

UWAGI DO WERYFIKACJI MODELU OBLICZENIOWEGO DRGAŃ UKŁADÓW STEROWANIA ŚMIGŁOWCÓW

dr inż. **Wiesław KRZYMIEN**
Instytut Lotnictwa

Projektowanie śmigłowca wymaga prowadzenia wszechstronnej analizy właściwości drganiowej konstrukcji. W artykule zawarto szereg informacji i uwag dotyczących właściwości drganiowych układów sterowania w oparciu o doświadczenia z badań przeprowadzonych w Instytucie Lotnictwa.

Wśród konstrukcji lotniczych śmigłowce wymagają szczególnie wnikliwej analizy właściwości drganiowych.

Analiza właściwości drganiowych śmigłowców obejmuje:

- obliczenia symulacyjne,
- badania rezonansowe konstrukcji,
- pomiary drgań podczas eksploatacji.

Obliczenia prowadzone są na każdym etapie projektowania śmigłowca, natomiast badania i pomiary dotyczą zespołów lub całej konstrukcji śmigłowca (w wersji prototypowej a także ostatecznej).

1. BADANIA REZONANSOWE

Badania rezonansowe mają na celu określenie właściwości drganiowych fragmentu lub całej, rzeczywistej konstrukcji. Metody pomiarowe zwykle opierają się na właściwościach modelu liniowego, co oznacza, że wyniki nie muszą odzwierciedlać występujących nieliniowości drgań konstrukcji, a ponadto wzbudzanie drgań nie musi odpowiadać wielkościom sił występujących w rzeczywistości (tj. podczas eksploatacji śmigłowca). O ile łatwo jest wskazać miejsca powstania sił wzbudzających drgania konstrukcji, to jednak odwzorowanie ich wielkości, kierunku, widma i fazy nie jest proste. Ponadto szczególnie w przypadku śmigłowców istnieje sprzężenie pomiędzy siłami wzbudzającymi drgania konstrukcji (siły od wirnika nośnego i śmigła ogonowego) a jej odpowiedzią drganiową (ugięcie kadłuba, belki ogonowej i łopat).

Typowe badania rezonansowe stanowią wystarczającą podstawę pierwszego przybliżenia – liniowych właściwości modelu obliczeniowego. Dlatego celowe jest rozszerzenie zakresu i metody pomiarów tak, by możliwe było określenie nieliniowości drgań konstrukcji oraz jej podatności dynamicznej, czyli wyznaczenia wielkości odkształceń (amplitudy drgań) w zależności od siły wzbudzania. W niektórych przypadkach celowy jest też pomiar tłumienia drgań, także w funkcji amplitudy drgań.

Badania rezonansowe śmigłowca dotyczą:

- całej konstrukcji,
- układów sterowania,
- układu śmigłowiec-ziemia.

Jako oddzielne można traktować badania rezonansowe łopat wirnika nośnego (WN) i śmigła ogonowego (SO), gdyż ich podatność dynamiczna różni się istotnie od pozostałej części śmigłowca.

2. POMIARY DRGAŃ EKSPLOATACYJNYCH

Pomiary amplitudy i częstotliwości (widma) drgań podczas eksploatacji obejmują zarówno typowe jak i ekstremalne stany lotu i mają na celu przede wszystkim określenie warunków obciążeń zmęczeniowych elementów konstrukcji. Wyniki takich pomiarów mówią o efekcie końcowym projektu i powinny raczej potwierdzać słuszność przyjętych rozwiązań oraz potwierdzać właściwości konstrukcji, zapewniając przede wszystkim bezpieczeństwo i komfort lotu.

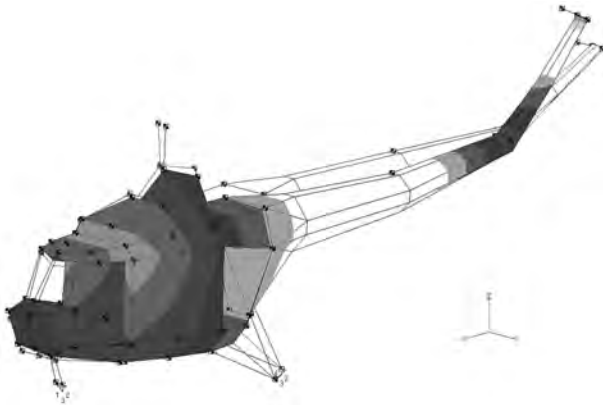
3. OBLICZENIA SYMULACYJNE

Obliczenia symulacyjne najczęściej wykonywane są metodą elementów skończonych wykorzystując model wytrzymałościowy całej konstrukcji lub jego fragmentu.

W czasie od projektu wstępnego do wdrożenia i certyfikacji konstrukcji model obliczeniowy podlega ciągłej weryfikacji: podlega zmianom wraz z wprowadzanymi zmianami konstrukcyjnymi jak i „dostrojeniu” (czyli wprowadzaniu odpowiednich poprawek) modelu w celu doprowadzenia do zgodności wyników obliczeń z wynikami pomiarów.

Na poprawność tworzonego modelu mają wpływ:

- dokładność i rodzaj przeprowadzonych badań,
- doświadczenie inżynierów zarówno prowadzących pomiary jak i tworzących model obliczeniowy,
- indywidualne właściwości danej konstrukcji.



Rys. 1. Uproszczony model masowo-szywnościowy śmigłowca Mi-2M

Właściwości drganiowe układów sterowania śmigłowców

Układ sterowania w śmigłowcu może mieć różnorodną konstrukcję: układ popychaczy, napęd linkowy, ze wzmacniaczem albo siłownikiem w ciągu sterowania a nawet jako drążek mocowany bezpośrednio do tarczy sterującej (w przypadku małych śmigłowców lub wiatrakowców).

Układ popychaczowy charakteryzuje się wieloma stopniami swobody: poza drganiami wzdłużnymi całego ciągu, każdy z drążków może drgać w obydwu kierunkach poprzecznych do osi. Ponadto własne oscylacje mogą wykonywać łączniki i podpory. Nie bez wpływu na te drgania jest podatność samej konstrukcji śmigłowca, w szczególności kadłuba. Model masowo-szywnościowy typowego śmigłowca to (w uproszczeniu) przestrzenny układ dwóch mas połączonych sztywnością kadłuba. Masami tymi są od dołu: podwozie, zbiornik paliwa i wyposażenie (np. akumulatory, awionika, fotele) a od góry: silniki, przekładnia i agregaty. Wzajemne przemieszczanie się tych mas może oddziaływać na układ sterowania prowadząc nawet do sprzężenia drgań.

W przeciwieństwie do układów sterowania małej i średniej wielkości samolotów układy popychaczowe śmigłowców tworzą linię łamaną. Na ich sztywność istotny wpływ mają połączenia kątowe: sztywność dźwigni i ich podparcia.

Na wielkość masy drgającej układu sterowania ma wpływ: drążek (relatywnie duża bezwładność względem osi obrotu) oraz łopaty wraz z przegubami osiowymi głowicy WN i tarczą sterującą.

Badania rezonansowe układów sterowania śmigłowca mają na celu weryfikację podatności dynamicznej układów: sterowania podłużnego, sterowania poprzecznego, skoku ogólnego oraz sterowania skokiem SO.

Specjalne cechy posiadają wzmacniacze hydrauliczne wprowadzone do ciągów sterowania. Wzmacniacze mają

własną częstotliwość drgań wzbudzenia, która jest stonkowo wysoka (zwykle powyżej 25 Hz) i zależy głównie od właściwości suwaka sterującego zaworami. Drgania te trudno jest wzbudzić od strony tarczy sterującej, natomiast łatwiej poprzez drążek sterowania wywołując drgania o dużej amplitudzie i nieliniowej charakterystyce.

Badania rezonansowe układów sterowania przeprowadza się wraz z badaniami rezonansowymi śmigłowca, stojącego na podwoziu. Ze względów na sposób wykorzystania wyników wskazane jest wykonanie pomiarów w kombinacji:

- osobno dla każdego ciągu sterowania,
- dla wirnika z łopatami oraz dla wirnika z masami zastępczymi (modelującymi moment bezwładności oraz masę łopat),
- bez oraz z masą zastępującą masę ręki pilota na drążku (albo nóg w przypadku układu sterowania SO),
- przy włączonych i wyłączonych wzmacniaczach hydraulicznych (jeśli są).

Wzbudzenie drgań realizuje się przy pomocy wzbudników (o odpowiednio dużej sile) zwykle poprzez dźwignie przy przegubach sterowania kątem natarcia łopat albo za krawędź spływu łopaty. Podczas badań łopaty WN powinny być elastycznie podwieszane do pozycji poziomej.

Interesującą informacją do obliczeń mogą być dane z wyników badań rezonansowych całego wirnika nośnego z łopatami wraz z układami sterowania i sztywnością wału. W takim przypadku do obliczeń można zastosować uproszczony model struktury śmigłowca.

Przyjęcie do obliczeń uproszczonego modelu struktury śmigłowca jako szkieletu do obliczeń właściwości układów sterowania powinno ułatwić proces analizy wyników i porównania wariantów rozwiązań i modyfikacji.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy uproszczony model masowo-szywnościowy śmigłowca Mi-2M. Jakość takiego uproszczonego modelu obliczeniowego jest wystarczająca, o czym świadczy zgodność właściwości drganiowych modelu z wynikami badań rezonansowych i pomiarów drgań w locie (poniżej 5 % dla podstawowych postaci drgań) przeprowadzonymi dla śmigłowców dla Mi-2M i W-3 Sokół.

Na właściwości drganiowe układu sterowania ma także wpływ luz oraz tłumienie w licznych przegubach.

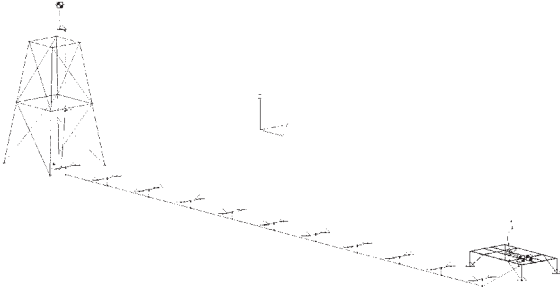
Tłumienie występujące w układach sterowania jest nieco większe niż samej konstrukcji i wynosi (przeciętna wielkość względnego współczynnika tłumienia):

- popychaczowy układ sterowania 4÷7%,
- układ ze wzmacniaczem hydraulicznym 3÷4% (przy nieliniowości typu „układ sztywniejący ze wzrostem amplitudy”),
- sterowanie statecznikiem 3÷4%.

Mniejsze tłumienie wykazują drgania popychaczy poprzeczne do ich osi (w obydwu kierunkach). Względny współczynnik tłumienia wynosi zwykle około 1%, co oznacza łatwość wzbudzenia tych drgań podczas eksploatacji śmigłowca.

Właściwości drganiowe układu sterowania stoiska do badań WN

Wszystkie wymienione powyżej cechy układów sterowania uwypukliły się podczas przygotowań do badań wirnika nośnego na stoisku pomiarowym w Instytucie Lotnictwa. Stoisko posiada jeden ciąg sterowania (popychaczowy), którego łączna długość wynosi ponad 19.5 m.



Rys. 2. Model obliczeniowy ciągu sterowania stoiska do badań

Wyniki przeprowadzonych badań rezonansowych różniły się znacznie od spodziewanych. Analizując prosty model obliczeniowy mocowania drążka, kolumny stoiska oraz ciągu sterowania określono najbardziej „miękkie” miejsca, które wymagały dodatkowego usztywnienia. Ponadto część przegubów wymagało zmniejszenia luzów i wymiany smaru. W efekcie powtórzono badania rezonansowe uzyskując pożądaną efekt w postaci braku drgań o charakterze rezonansowym w czasie badań tj. w całym badanym zakresie obrotów wału WN.



Rys. 3. Wzbudzenie drgań podczas badań rezonansowych „szywnego” ciągu sterowania

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sprawozdania wewnętrzne Instytutu Lotnictwa – badania rezonansowe śmigłowców Mi-2M, W-3 Sokół i IS-2, Warszawa, 1984-2000.
- [2] Sprawozdania wewnętrzne Instytutu Lotnictwa – badania rezonansowe układów sterowania Mi-2M i An-28 oraz stoiska do badań śmigłowców, Warszawa, 1984-2007.

W. Krzymień

SOME REMARKS ON THE VERIFICATION OF A MODEL CALCULATING THE VIBRATION OF THE HELICOPTERS CONTROL SYSTEMS

Summary

Helicopter design requires a comprehensive analysis of vibration properties of the construction. This paper includes information and remarks concerning the vibration properties of control systems, based on the research performed in the Institute of Aviation. Design of helicopters needs leading versatile analysis of vibration's property of construction. This paper included many information and remarks concern vibration's property of control systems, based on researches performed in Institute of Aviation. Helicopter design requires a comprehensive analysis of vibration properties of the construction. This paper includes information and remarks concerning the vibration properties of control systems, based on the research performed in the Institute of Aviation.

В. Кжымень

ПРИМЕЧАНИЯ К ВЕРИФИКАЦИИ РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТОЛЁТОМ

Резюме

Проектирование вертолётa требует проведения всестороннего анализа колебательных свойств конструкции. Статья содержит перечень информации и замечаний, касающихся колебательных свойств систем управления, основанных на опыте, полученном во время исследований проведённых в Институте Авиации.