

Cyfrowy bliźniak mechanizmu regulacji łopatek wirnika śmigłowca

Mirosław Wendeker
Politechnika Lubelska

Michał Piłat
Leonardo Helicopters, Świdnik



Źródło: domena publiczna

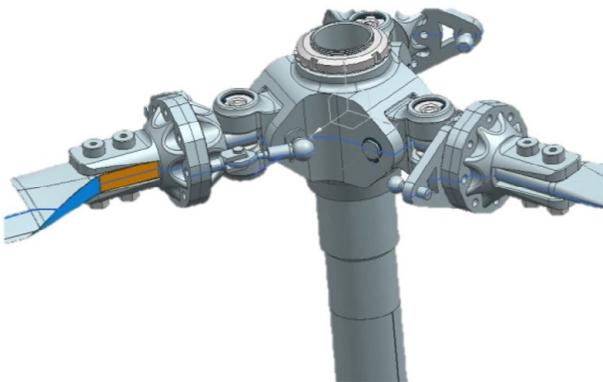
Streszczenie

Artykuł przedstawia nowe podejście do monitorowania i konserwacji dynamicznych systemów śmigłowcowych poprzez opracowanie cyfrowego bliźniaka mechanizmu regulacji łopatek wirnika. Zaawansowany model cyfrowy nie tylko umożliwia dokładne śledzenie i analizę warunków operacyjnych śmigłowca, ale również znacząco przyczynia się do zwiększenia jego bezpieczeństwa i wydajności. Omówiono szczegóły przedmiotowego rozwiązania, jego znaczenie oraz techniczne wyzwania, które musiały zostać przezwyciężone w drodze do jego realizacji.

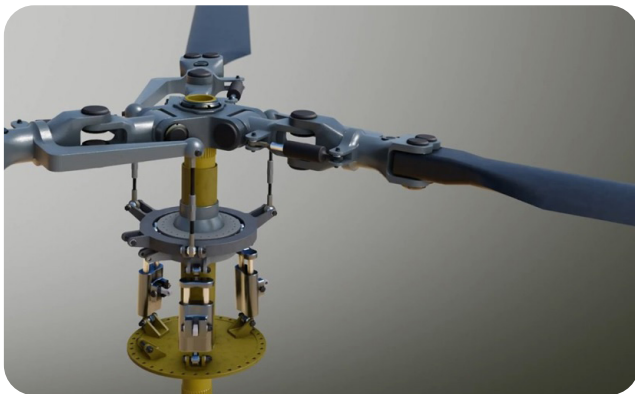
Słowa kluczowe: śmigłowiec, wirnik nośny, tarcza sterująca, cyfrowy bliźniak

Wprowadzenie

Przegubowy system wirnika śmigłowca charakteryzuje się wyjątkową elastycznością i możliwością szerokiego zakresu skręcania łopatek, co jest niezbędne do wykonywania skomplikowanych manewrów lotniczych. Centralnym elementem tego systemu jest tarcza sterująca, która przekłada polecenia pilota na precyzyjne ruchy łopatek wirnika. Mechanizm ten kontroluje zmiany pochylenia zbiorczego i cyklicznego, zarządzając jednocześnie ruchami obrotowymi łopatek. Precyzyjne sterowanie łopatkami wirnika jest niezwykle istotne dla osiągnięcia i bezpieczeństwa śmigłowca. Dokładne działanie tego mechanizmu umożliwia stabilny lot, zwrotność oraz zdolność do wykonywania złożonych operacji lotniczych [2, 3]. Rycina 1 przedstawia zespół wirnika śmigłowca, będący przedmiotem badań.



Ryc. 1. Zespół wirnika śmigłowca stanowiący przedmiot cyfrowego bliźniaka



Ryc. 2. System sterowania wirnikiem z tarczą sterującą

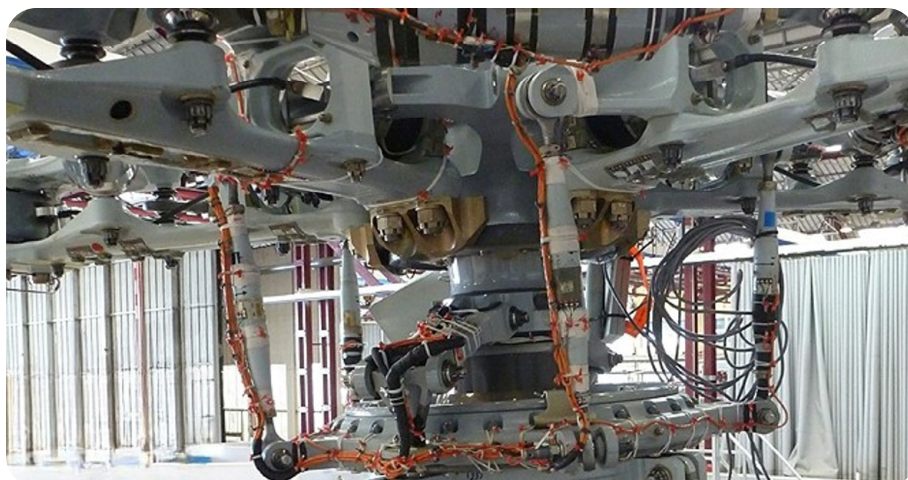
System sterowania wirnikiem za pomocą tarczy sterującej jest najważniejszym elementem umożliwiającym śmigłowcowi precyzyjne i stabilne wykonywanie zadań w różnych warunkach lotu (ryc. 2). Dzięki zaawansowanej konstrukcji system ten pozwala na koordynację wspólnych i indywidualnych zmian pochylenia łopat, a także zarządzanie ruchami obrotowymi i wyprzedzającymi. W praktyce oznacza to, że pilot jest w stanie dokładnie kontrolować każdy aspekt lotu śmigłowca – od startu, przez manewry w powietrzu, aż po

bezpieczne lądowanie. Prawidłowe działanie mechanizmu sterowania wirnikiem jest konieczne dla stabilności lotu, zwrotności i zdolności do wykonywania skomplikowanych operacji lotniczych. Regularne kontrole i testy, takie jak badania ultradźwiękowe i kontrola penetracyjna elementów, pozwalają na wykrycie wewnętrznych wad i pęknięć w komponentach, co zapobiega krytycznym awariom i zapewnia ciągłą bezpieczną eksploatację śmigłowca [4, 5].

Cyfrowy bliźniak układu sterowania wirnikiem nośnym śmigłowca

Opracowanie cyfrowego bliźniaka mechanizmu regulacji łopat śmigłowca otwiera nowe możliwości w zakresie monitorowania i konserwacji dynamicznych systemów lotniczych. Politechnika Lubelska, korzystając z zaawansowanego stanowiska testowego, opracowała cyfrowy model mechaniki wirnika nośnego, który umożliwia ciągłe monitorowanie stanu konstrukcji. Projekt ten koncentruje się na stworzeniu cyfrowego bliźniaka elementów nośnych łączników skokowych wirnika głównego, co pozwala na dokładne symulowanie rzeczywistych warunków operacyjnych. Precyzyjne pomiary dostarczają niezbędnych danych, które są integrowane z modelami cyfrowych bliźniaków, umożliwiając im dokładne symulowanie rzeczywistych warunków. Na rysunku tytułowym przedstawiono przyjęty schemat obciążeń w układzie głowica – tarcza sterująca – wirnik.

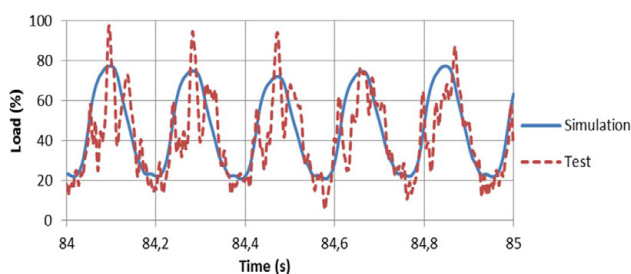
Jednym z głównych wyzwań technicznych w opracowaniu cyfrowego bliźniaka mechanizmu regulacji łopat śmigłowca jest oprzyrządowanie wszystkich części mechanicznych w locie [1]. Instalowanie czujników na obracających się częściach, takich jak pręty podziałowe, jest trudne i niepraktyczne ze względu na dynamiczny ruch wirnika (ryc. 3). Jednakże, dzięki strategicznie rozmieszczonym czujnikom na określonych częściach systemu, cyfrowy bliźniak może skutecznie obliczać obciążenia przyłożone do innych komponentów, minimalizując potrzebę rozbudowanego oprzyrządowania fizycznego. Do skonstruowania cyfrowego bliźniaka najlepsze jest wykorzystanie symulacji wieloobiektowej,



Ryc. 3. Oprzyrządowanie głowicy wirnika głównego

ponieważ metoda ta doskonale sprawdza się w obliczaniu obciążeń i przemieszczeń na połączeniach mechanizmów. Do tego celu szczególnie dobrze nadaje się formalizm wielokorpusowy, ponieważ może obsługiwać duże przemieszczenia i efekty dynamiczne, które mają podstawowe znaczenie w badaniu wirników helikopterów.

Testy przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym oraz na stanowisku testowym pozwoliły na weryfikację dokładności cyfrowego bliźniaka. Wyniki wykazały wysoką zgodność z danymi symulacyjnymi, co potwierdza skuteczność opracowanego modelu. Analizy obejmowały badania aerodynamiki, dynamiki konstrukcji i mechaniki lotu, wspierane przez złożone symulacje komputerowe. Testy te były wymagane, aby zapewnić, że cyfrowy bliźniak dokładnie odzwierciedla rzeczywiste warunki operacyjne. Weryfikacja obejmowała pomiary obciążeń siłowników hydraulicznych, które są częściami nieobrotowymi i łatwymi do oprzyrządowania w normalnych warunkach lotu, oraz symulację obciążeń części obrotowych. Symulowane obciążenia były następnie porównywane z wynikami eksperymentalnymi ze stanowiska testowego, aby zapewnić dokładność cyfrowego bliźniaka (ryc. 4).



Ryc. 4. Symulowane obciążenie przegubu głowicy wirnika

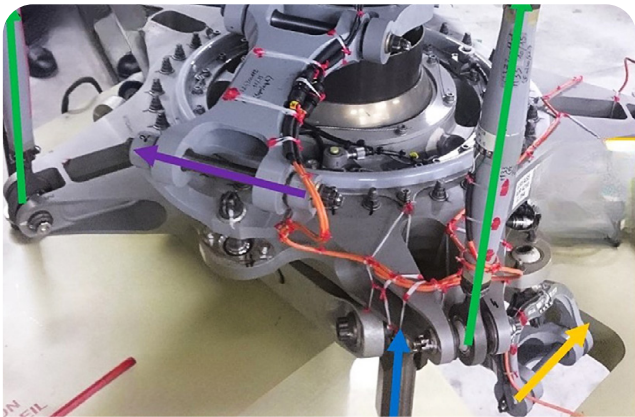
Cyfrowe bliźniaki są bardzo przydatne w dziedzinie systemów dynamicznych śmigłowców, szczególnie dlatego, że bezpośrednie oprzyrządowanie każdej części mechanicznej podczas lotu stanowi poważne wyzwanie. Na przykład oprzyrządowanie wirnika nośnego podczas prób w locie obejmuje liczne i nieporęczne czujniki, co ilustrują pomarańczowe elementy na rycinie 3. Instalowanie czujników na obracających się częściach, takich jak popychacze, jest niezwykle trudne ze względu na dynamiczny ruch wirnika helikoptera [1]. W związku z tym niepraktyczne jest stosowanie takich czujników na śmigłowcach służbowych w locie bez nakładania znacznych obciążeń związanych z utrzymaniem. W tym miejscu w grę wchodzi użyteczność cyfrowych bliźniaków. Wykorzystując dane pozyskane ze strategicznie rozmieszczonych czujników na określonych częściach systemu, cyfrowy bliźniak może skutecznie obliczyć obciążenia przyłożone do wszystkich innych komponentów. Takie podejście minimalizuje potrzebę rozbudowanego oprzyrządowania fizycznego. Do skonstruowania cyfrowego bliźniaka wykorzystuje się symulacje wielomasowe, ponieważ metoda ta sprawdza się w obliczaniu obciążeń i przemieszczeń na połączeniach mechanizmów. Matematyczny formalizm wielomasowy sprawdza się przy tym szczególnie dobrze, ponieważ może szacować duże wartości przemieszczeń i odkształceń, które mają strategiczne znaczenie w badaniu wirników helikopterów.

Aspekty technologiczne syntezy cyfrowego bliźniaka

Realizacja projektu cyfrowego bliźniaka mechanizmu sterowania wirnikiem głównym obejmowała dedykowane stanowisko testowe. Stanowisko to, pokazane na rycinie 5, składa się wyłącznie z elementów mechanizmu sterującego wirnika nośnego, co pozwala na kompleksowe testowanie zarówno pod obciążeniami statycznymi, jak i dynamicznymi. Wykorzystanie pełnowymiarowego stanowiska testowego jest korzystne, ponieważ nie tylko zawiera oprzyrządowanie, które zostanie zainstalowane na śmigłowcu – dostarczając dane bezpośrednio do cyfrowego bliźniaka – ale także zapewnia dodatkowe możliwości pomiarowe. Te dodatkowe pomiary, dostępne tylko za pośrednictwem stanowiska laboratoryjnego, mają bardzo duże znaczenie dla weryfikacji dokładności cyfrowego bliźniaka. Na przykład mierzone są obciążenia siłowników hydraulicznych, które są częściami nieobrotowymi. Części te można łatwo oprzyrządować nawet w normalnych warunkach lotu, a ich pomiary są wykorzystywane jako dane wejściowe dla cyfrowego



Ryc. 5. Stanowisko testowe głowicy wirnika śmigłowca



Ryc. 6. Oprzyrządowana głowica wirnika głównego z zaznaczonymi kierunkami obciążeń w poszczególnych elementach mechanizmu sterującego

bliźniaka. Rycina 6 przedstawia szczegóły głowicy wirnika z zaznaczonymi kierunkami obciążeń działających w elementach mechanizmu sterowania. I odwrotnie, obciążenia części obrotowych, takich jak popychacze, nie są zwykle mierzone w locie, ale mogą być symulowane przez cyfrowego bliźniaka. Symulowane obciążenia są następnie porównywane z wynikami eksperymentalnymi ze stanowiska testowego, aby zapewnić dokładność cyfrowego bliźniaka.

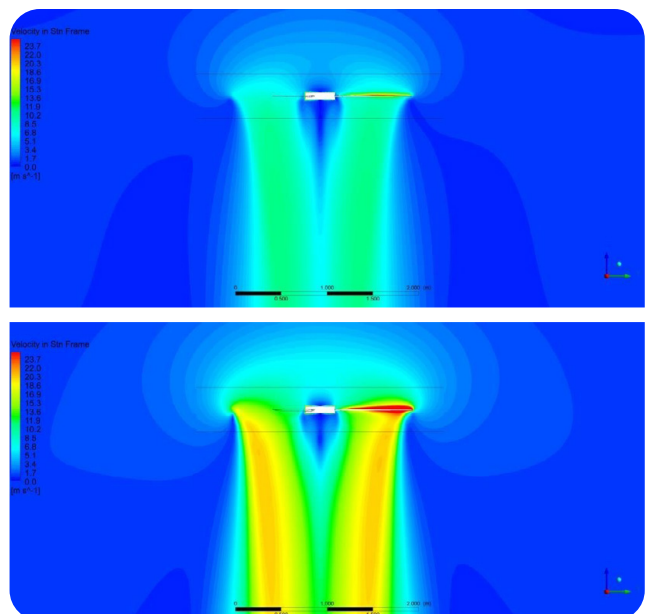
Przyjęto ścieżkę badawczą, która obejmuje metody zdolne dostarczyć odpowiednich dowodów dla procesu certyfikacji zgodnie z kryteriami opisanymi w przepisach lotniczych (FAR, JAR). Przeprowadzone analizy objęły aspekty aerodynamiki, dynamiki konstrukcji i mechaniki lotu. Podejście analityczne opierało się na strategii kosymulacji, wykorzystując jednocześnie różne środowiska obliczeniowe, takie jak FEM, CFD, MBD, oraz algorytmy opisujące mechanikę lotu i mechanikę generowania siły nośnej. Integracja tych różnorodnych środowisk została osiągnięta dzięki interfejsowi Matlab/Simulink. Procedura badawcza została podzielona na dwa główne bloki: analityczny i laboratoryjno-weryfikacyjny. Do podstawowych elementów bloku analitycznego należał dobór

parametrów kinematycznych wirnika oraz odpowiedni opis budowy głowicy i łopat wirnika w konfiguracji referencyjnej. Badane obiekty definiowane są jako klasyczny trójęłatowy wirnik przegubowy wyposażony w aktywny układ sterowania geometrycznym kątem skreślenia łopaty. Sterowanie wirnikiem, a także regulacja pochylecia, skoku i zbiorczego kąta pochylecia odbywa się za pomocą zespołu tarczy sterującej. Przyjęto klasyczną koncepcję głowicy wirnika, która obejmuje: zawias poziomy odpowiedzialny za obracanie łopat w płaszczyźnie ciągu, zawias pionowy odpowiedzialny za opóźnienie łopaty w płaszczyźnie obrotowej oraz zawias osiowy odpowiedzialny za zmianę kąta nachylenia ostrza. Ta tradycyjna konstrukcja zapewnia skuteczną kontrolę i stabilność układu wirnika.

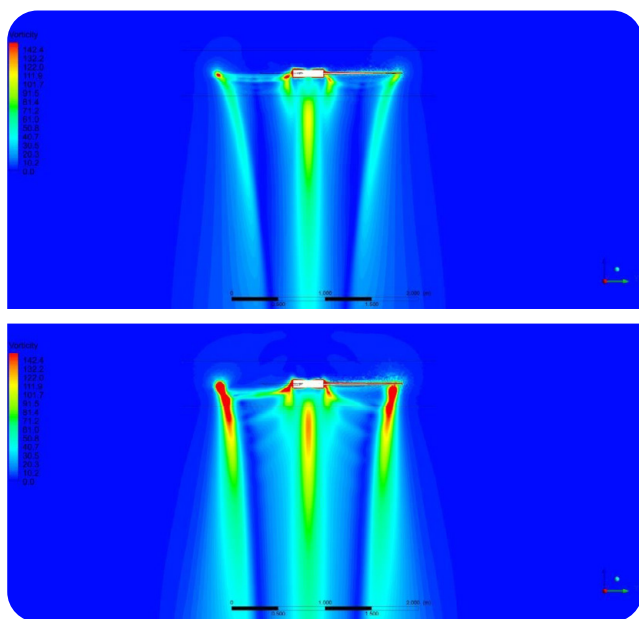
Metodologia budowy cyfrowego bliźniaka

Budowa cyfrowego bliźniaka wymaga metodycznego podejścia opartego na strategii kosymulacji, która obejmuje równoległe operacje w wielu dyscyplinach inżynierskich, wspierane i weryfikowane metodami eksperymentalnymi. W tym celu problem badawczy, będący przedmiotem cyfrowego bliźniaka, został podzielony na następujące podstawowe grupy zadań:

- konstrukcja łopaty wirnika nośnego przeznaczona do montażu na klasycznej głowicy wirnika (w oparciu o schemat wirnika przegubowego z konwencjonalnym układem dźwigni obrotu łopat),
- analiza rozkładu masy, sztywności na zginanie w płaszczyźnie mniejszej i większej sztywności lemiesza oraz sztywności skrętnej,
- weryfikacja charakterystyk aerodynamicznych z literatury w oparciu o metody CFD,
- rozszerzenie analiz CFD w celu weryfikacji i korekty charakterystycznych wymiarów profilu, takich jak położenie środka aerodynamicznego. Przykładowe wyniki symulacji metodą CFD przedstawiono na rycinach 7 i 8.



Ryc. 7. Symulacja prędkości przepływu dla dwóch wartości kąta natarcia



Ryc. 8. Symulacja wirowości przepływu dla dwóch wartości kąta natarcia

Weryfikacja cyfrowego bliźniaka mechanizmu sterowania wirnikiem głównym śmigłowca

Moduł zamontowany w centralnej części stanowiska badawczego odpowiada za rejestrację danych z dwóch tensometrów z częstotliwością 25 Hz oraz z akcelerometru z częstotliwością 175 Hz. Główny moduł sterujący wykorzystuje technologię Wi-Fi. Dostępny w przeglądarce internetowej specjalny interfejs pozwala na monitorowanie pracy stanowiska badawczego, odczytywanie sygnałów pomiarowych, wyzwalanie rejestracji oraz sterowanie systemem z dowolnego miejsca w zasięgu sieci.

Podsumowanie

Opracowanie cyfrowego bliźniaka mechanizmu regulacji łopat śmigłowca stanowi znaczący krok naprzód w dziedzinie inżynierii lotniczej. Dzięki precyzyjnym modelom cyfrowym możliwe jest lepsze zrozumienie obciążeń działających na krytyczne komponenty śmigłowca, co przekłada się na poprawę bezpieczeństwa i wydajności operacyjnej. Zorientowane na rozwój lotnictwo widzi w cyfrowych bliźniakach nie tylko narzędzie do predykcyjnej konserwacji, ale także do optymalizacji projektowania i eksploatacji śmigłowców. Politechnika Lubelska poprzez prowadzone badania wdraża innowacyjne rozwiązanie, które posiada potencjał zrewolucjonizowania sposobu, w jaki dynamiczne systemy lotnicze są monitorowane i konserwowane.

Wprowadzenie cyfrowego bliźniaka mechanizmu regulacji łopat śmigłowca to innowacja, która może poprawić sposób monitorowania i konserwacji dynamicznych systemów lotniczych. Dzięki zaawansowanym algorytmom i precyzyjnym pomiarom ten cyfrowy model pozwala na dokładne symulacje rzeczywistych warunków operacyjnych, co zwiększa bezpieczeństwo i efektywność lotów śmigłowców. Cyfrowe bliźniaki, dzięki precyzyjnym modelom i zaawansowanym technikom symulacji, zapewniają lepszy poziom zrozumienia i kontroli nad złożonymi systemami lotniczymi, otwierając nowe możliwości w zakresie bezpieczeństwa, wydajności i długowieczności śmigłowców.

Bibliografia:

- [1] Cooke, A.K., Fitzpatrick, E. (2002). *Helicopter Test and Evaluation*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [2] Padfield, G. (1998). *Dynamika lotu śmigłowców*. Sulejówek: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [3] Seddon, J., Newman, S. (2011). *Basic Helicopter Aerodynamics* (3rd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- [4] Szabelski, K., Jancelewicz, B., Łucjanek, W. (1995). *Wstęp do konstrukcji śmigłowców*. Sulejówek: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [5] Witkowski, R. (2023). *Wprowadzenie do wiedzy o śmigłowcach*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Lotnictwa.