

WIELOPŁATOWE, BEZPRZEGUBOWE ŚMIGŁO OGONOWE DO ŚMIGŁOWCA KLASY LEKKIEJ

Mirosław Bernard Piłat
Alicja Kaznowska
Instytut Lotnictwa

Streszczenie

Artykuł przedstawia koncepcję 4-łopatowego śmigła ogonowego dla śmigłowca klasy lekkiej z torsjonowym przenoszeniem sił odśrodkowych oraz otunelowaniem typu DTR (Ducted Tail Rotor).

1. WSTĘP

Analizując koncepcję nowego śmigła ogonowego należy wykorzystać te istniejące rozwiązania, które spełniają wszystkie wymogi obecnie stosowanej technologii wytwarzania. Podczas analizy nowego śmigła ważne jest aby spełniały warunki rozwojowości wersji i łatwej ich modyfikacji konstrukcyjnej, szczególnie w odniesieniu do zwiększania wielołopatowości.

2. ZAŁOŻONA KONSTRUKCJA ŚMIGŁA OGONOWEGO

Założenia projektowo - konstrukcyjne:

- śmigło typu DTR, (śmigło pracuje w obudowie, która jest częścią statecznika pionowego),
- 4 łopaty,
- zastosowanie nowoczesnego profilu na łopaty śmigła ogonowego opracowanego przez Instytut lotnictwa,
- wyeliminowanie łożysk promieniowych (kulkowych, wałeczkowych, igiełkowych) i przegubów a tym samym zredukowanie liczby części zespołu śmigła ogonowego,
- zastosowanie kompozytowego torsjonu, który zastąpi rolę przegubów w osi wahań i przekręceń łopaty,
- kompozytowa budowa łopat,
- niesymetryczny rozstaw łopat śmigła ogonowego.

Wstępny schemat przedstawia rys. 1. Opis w tekście. Elementem spajającym układ śmigła jest cylinder na którego promieniu umieszczone są łopaty. Całość cylindra składa się z okrągłej płyty (1) przykręconej do głowicy (2). Głowica (2) osadzona jest na wale wirnika (3) i połączona jest z węzłem spinającym torsjony (5) (węzeł łączy moduły dwułopatowe). Moduł łopaty (4) składa się z dwóch łopat i jednego wspólnego torsjonu. U nasad łopat zamocowany jest przegub osiowy (6) osadzony w gnieździe (7) (gniazdo jest dzielone na dwie części), ułożyskowanym (8) dwoma łożyskami ślizgowymi. Tuleja/przegub osiowy posiada gniazdo łączenia dźwigni przekręceń (9) oraz ciężarek ustawiający łopatę na optymalny kąt natarcia podczas utraty sterowania przez pilota. Płyta (1), gniazdo przegubu (7) skręcone są śrubami (10) razem z płytą zewnętrzną (11) o kształcie płaskiego pierścienia. Całość zakrywa pokrywa (12). Przedstawione rozwiązanie może być konfiguracją zarówno 4-ro jak i 6-cio łopatową, do przedstawionej koncepcji można dołożyć dodatkowy moduł łopat (13).

Kąty rozstawienia łopat

Jako podstawowe kąty pomiędzy łopatomy założono $55^\circ/125^\circ$ dla śmigła 4-ro łopatego. Taki sam jaki występuje na śmigłowcach AH-64 Apache oraz Mi-28, co wg literatury istotnie wpłynęło na obniżenie emisji hałasu tych śmigłowców.

Promień śmigła

Przy proponowanym rozwiązaniu śmigła ogonowego przyjęto promień $r = 0.432\text{m}$ (taki promień wyznaczono we wcześniejszych rozważaniach dotyczących śmigła ogonowego dla IS-2) z tego obszar czynny aerodynamicznie wynosi $\sim 60\%$ promienia całego śmigła. Część nieczynną aerodynamicznie stanowi cylinder. Cylinder zajmuje $\sim 40\%$ promienia wirnika. W rozwiązaniu typu Fenestron istnieją podobne proporcje.

Profil aerodynamiczny łopaty

Podstawowym wymaganiem projektowym profilu łopaty śmigła ogonowego jest uzyskanie możliwie dużych wartości współczynnika maksymalnej siły nośnej w zakresie liczb Macha $Ma=0.5\div 0.6$, co jest bardzo trudne ze względu występowania w tych warunkach silnych niekorzystnych efektów ściśliwości na dużych kątach natarcia. Przyjmowane ograniczenia momentowe profili łopaty śmigła ogonowego mogą być, jak to wynika z literatury, znacznie łagodniejsze niż dla profilu wirnika nośnego. Jednakże w literaturze brak jakichkolwiek danych liczbowych. Proponowany profil aerodynamiczny to ILT212 [8].

Doskonałość aerodynamiczną profilu ILT212 wynosi 68 a profilu NACA23012 odpowiednio 43 dla liczby przy K dla $Ma=0.6$, $Cz=0.6$. Doskonałość profilu ILT212 jest wyższa o około 58% niż klasycznego profilu NACA23012. Można więc stwierdzić, że profil ILT212 łopaty śmigła ogonowego posiada bardzo wysokie wartości doskonałości aerodynamicznej. Kąt zerowej siły nośnej dla profilu ILT212 wynosi $\sim 2,5^\circ$. Pozwala to na uzyskanie względnych kątów nastawienia względem cięciwy aerodynamicznej przy mniejszym (o ten kąt zerowej siły nośnej) przekręceniu konstrukcyjnym łopaty. Jest to ważne dla rozwiązań posiadających torsjon, gdyż zmniejsza moment pochylający przy zmianie kąta skoku ogólnego łopaty.

Rodzaj śmigła

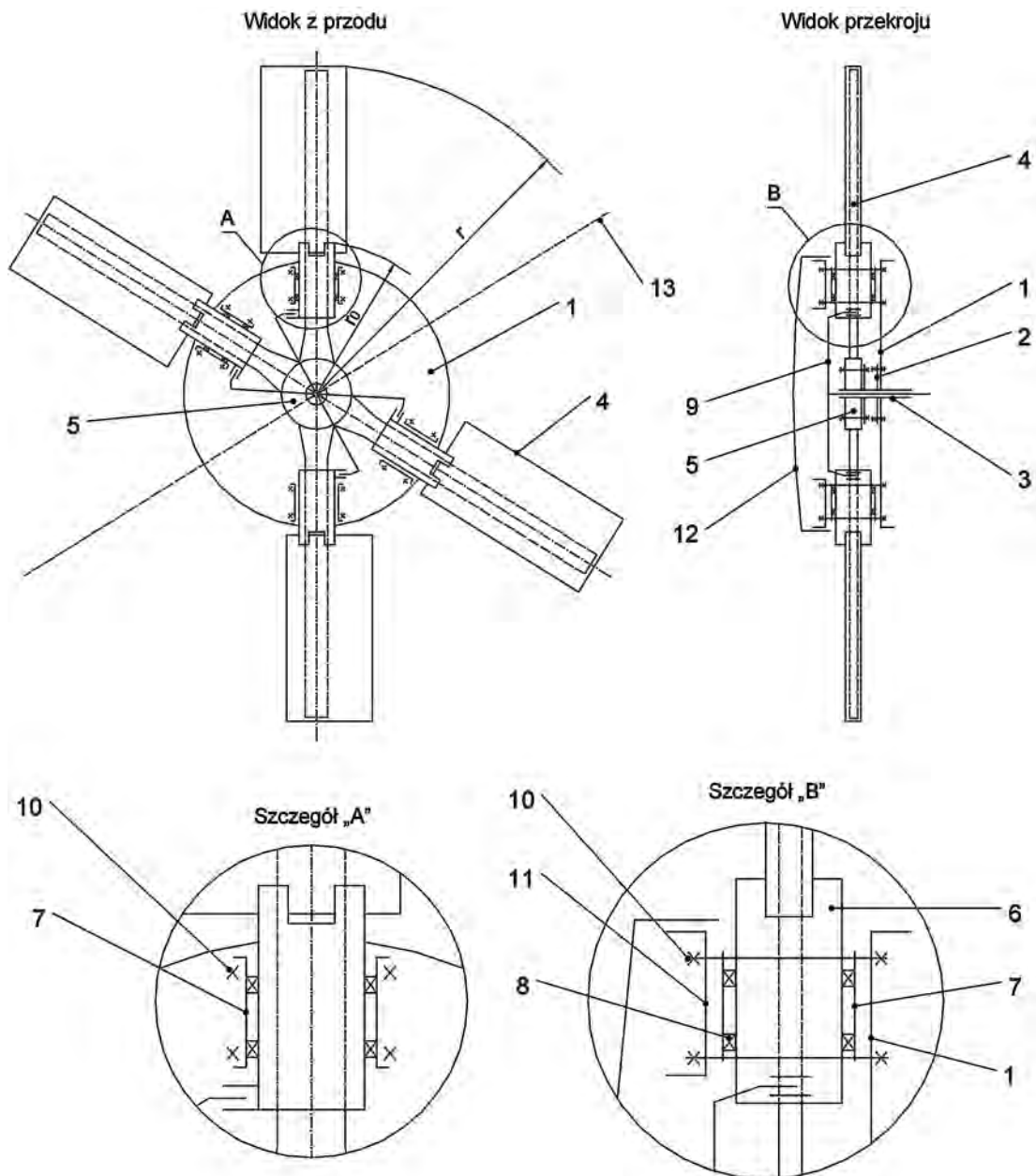
Śmigło obudowane typu DTR - bezpieczeństwa i możliwości zmniejszenia hałasu. Śmigło pracuje w obudowie, która jest zarówno osłoną śmigła jak i statecznikiem pionowym. W wyniku prowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono możliwość korzystnej współpracy aerodynamicznej śmigła - obudowa zwiększającej ciąg do kilkunastu procent.

Otunelowane śmigła

W śmigłowcu IS-2 śmigło ogonowe znajduje się nisko nad ziemią co jest niebezpieczne dla osób poruszających się wokół stojącego na ziemi śmigłowca. Jest to powód dlaczego śmigło ogonowe zaproponowano w stateczniku pionowym. Tunelowanie może zwiększyć sprawność aerodynamiczną śmigła ogonowego. Zgodnie z danymi z literatury zwiększenie sprawności spowodowane obecnością obudowy może posiadać liczącą się wartość ale zależy od wielu czynników, z których najważniejszymi są: szczelina pomiędzy końcem łopatki a obudową, grubość obudowy oraz przesunięcie płaszczyzny śmigła względem obudowy. Parametry te mają również istotny wpływ na hałas generowany przez śmigło ogonowe.

Każde śmigło ogonowe śmigłowca posiada dwie wady: odbiera moc od wirnika nośnego (w każdym manewrze zwiększeniu mocy na wirniku nośnym towarzyszy konieczność zrównoważenia powiększonego momentu obrotowego) oraz wytwarza hałas. Biorąc pod uwagę rozważania konfiguracji śmigła ogonowe w stateczniku pionowym będący jednocześnie jego obudową nie jest już istotne rozważanie konfiguracji jak w przypadku śmigła ogonowego swobodnego umieszczonego przed lub za statecznikiem lub belką.

W śmigle otunelowanym końce łopat nie poruszają się w swobodnym powietrzu, ale są otoczone kołowym pierścieniem, podobnie jak w wentylatorze. Dlatego przy prowadzeniu obliczeń takiego śmigła parametry przepływu przy końcach łopatek rozważa się tak, jak w wentylatorach i sprężarkach osiowych.



Rys. 1. Schemat koncepcyjny 4-ro łopatego śmigła ogonowego IS-2

3. WSTĘPNY DOBÓR PARAMETRÓW ŚMIGŁA OGONOWEGO

Założenia konstrukcyjne oparto o istniejące śmigło ogonowe w śmigłowcu IS-2. Jako, że powstawały już wcześniej rozwiązania konstrukcji śmigłowca IS-2 pewne parametry dotyczące śmigła ogonowego zostały przyjęte. Proponowane rozwiązanie jest nową koncepcją posiadającą pewne cechy konstrukcyjno projektowe już istniejące takie jak statecznik pionowy, prędkość obrotowa wału śmigła, przekładnia kątowa, promień śmigła ogonowego czy też konstrukcja łopat.

Liczba łopat śmigła

Dobór liczby łopat śmigła ogonowego opisano we wcześniejszym rozdziale i jak wiadomo średnio wynosi $2/3$ łopat wirnika głównego. W pracy rozważany warianty wielołopatowego śmigła ogonowego uwzględnia śmigło 4-ro łopatowe jako wariant podstawowy dla wersji istniejącej śmigłowca IS-2 oraz wariant 6-cio łopatowy dla śmigłowca w wersji rozwojowej cięższej/większej.

Ze względu na budowę łopat śmigła jaką przyjęto do projektu można było uwzględniać śmigło ogonowe o parzystej liczbie łopat (krotność modułów łopat, 2 lub 3 moduły).

Oznacza to, że istnieje oddziaływanie otunelowania na opływ łopatek wirnika.

Obrys łopaty śmigła

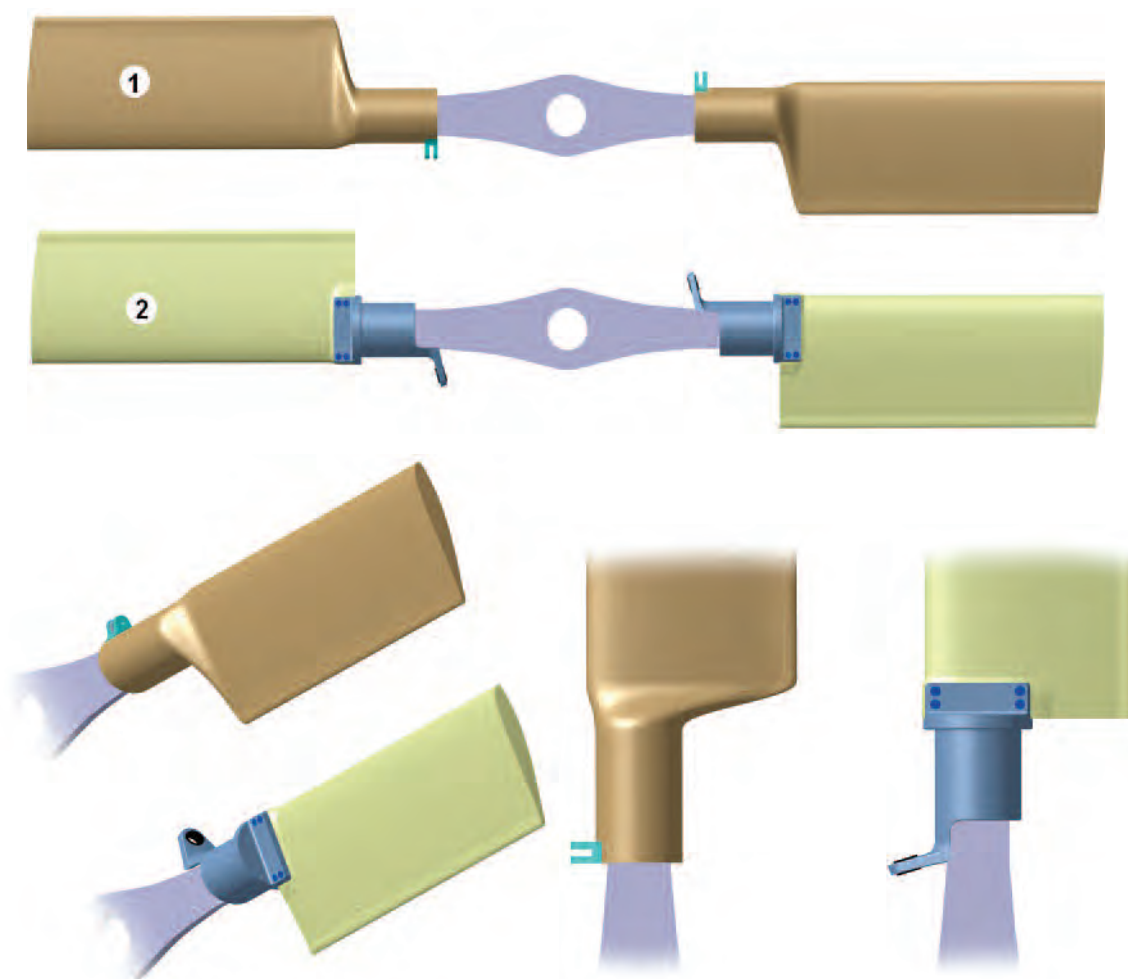
Optymalnym obrysem łopaty z punktu widzenia aerodynamiki jest obrys eliptyczny. W projekcie pracy przyjęto, że obrys łopaty będzie miał obrys bliski prostokątnemu ze względu na prostsze jego wykonanie. Ponieważ śmigło pracuje w obudowie a kanał ma regularny przekrój walca, końcówki zaokrąglone są względem krzywizny kanału. Odległość końcówki łopaty od pierścienia obudowy powinna być jak najmniejsza.

Skreślenie geometryczne łopaty

Stosowanie ujemnych kątów skreślenia geometrycznego łopaty poprawia rozkład prędkości indukowanej wzdłuż promienia śmigła umożliwiając uzyskanie większego ciągu w warunkach lotu silnikowego. Podczas lotu autorotacyjnego skreślenie takie działa niekorzystnie, pogarsza charakterystyki aerodynamiczne śmigła przy ujemnym ciągu śmigła. Przyjęto brak skreślenia geometrycznego śmigła ogonowego. Ważnym argumentem mogącym utrudnić wykonanie łopaty ze skreśleniem geometrycznym jest jego konstrukcja, w której torsjon kompozytowy w sposób ciągły przechodzi w dźwigar łopaty.

Przeguby śmigła

Założona konstrukcja śmigła nie posiada przegubów wahań i odchyłeń, natomiast posiada tylko przegub osiowy. Elementami umożliwiającymi osiowe przekreślenie łopaty (zmiana kątów nastawienia łopaty) jest przegub osiowy z łożyskami ślizgowymi ale i elastyczny kompozytowy torsjon umożliwiający obrót w zadanym zakresie kątów. Przemieszczenie przegubu wzdłuż promienia łopaty uniemożliwia torsjon będący częścią łopaty (dźwigarem), który zamocowany jest do węzła piasty wirnika. Tuleja/przegub zamocowana jest na stałe do łopaty. Konstrukcja modułu łopaty może być wykonana w dwóch wariantach (rys. 2).



Rys. 2. Wizualne przedstawienie budowy dwóch typów modułów

Na rys. 2 przedstawiono dwa rodzaje modułów, moduł nr 1 posiada budowę integralną. Obszar czynny aerodynamicznie (profil łopaty) przechodzi bezpośrednio w cylindryczny kształt o okrągłym przekroju. Unika się tym sposobem węzła łączącego tuleję z rękawem. Łopaty modułu łączone tuleją byłyby formowane jako połówki i sklejane razem oraz owijane (okopertowane). Aby wprowadzić poprawnie momenty gnące w płaszczyźnie mniejszej sztywności należy pogrubić ścianki tulei od górnej i dolnej strony profilu kształtując je w formę dźwigarów. Owińnięcie można wykonać z kompozytu z implantami bezsmarnymi, tak aby po przetoczeniu, zewnętrzna powierzchnia stanowiła bieżnię łożyska ślizgowego.

Tuleja kompozytowa jest bardziej elastyczna na zginanie niż metalowa i należy brać pod uwagę elastyczne łożyska ślizgowe niemetalowe. Klasyczne metalowe, sztywne wywołują nierównomierne naciski po wygięciu się tulei.

Przy końcu tulei formowane jest ucho dźwigni przekreśń łopaty i/lub wklejamy metalowy element podczas procesu formowania łopaty. Diagnozowanie i wyprodukowanie takiego typu łopaty może okazać się trudniejsze niż łopaty z tuleją metalową. Na chwilę obecną są trudności z uzyskaniem informacji i danych odnośnie elastycznych łożysk ślizgowych niemetalowych.

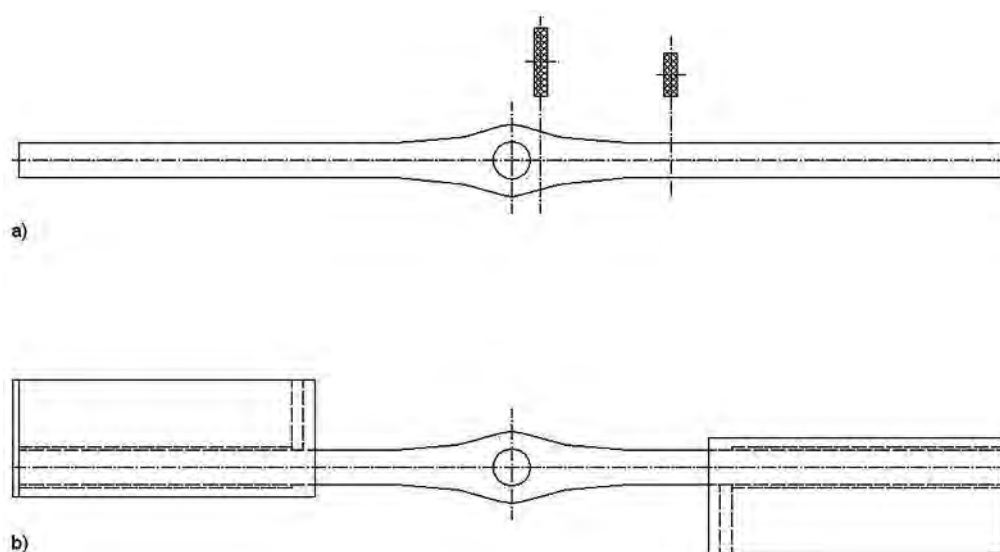
Budowa modułu nr 2 rys. 2 jest równie łatwa pod względem technologicznym jak modułu nr 1 rys 2. Tuleję metalową należy nałożyć przed sklejeniem torsjonu z łopatkami. Zgrubienie (miejsce chwytu łopaty) wykonać należy przed nasunięciem metalowej tulei przez doklejenie kolejnych warstw tworzywa u jej nasady. Po nasunięciu tulei na łopatkę należy wykonać otwory pod sworznie mocujące łopatkę w gnieździe tulei. Sworznie mają wprowadzić siłę skupioną pochodzącą od masy tulei w torsjon.

Konstrukcja łopaty

Łopata śmigła posiada konstrukcję kompozytową, wykonywaną techniką worka podciśnieniowego, gdzie dźwigar łopaty wiodącej i torsjon kompozytowy komponują element piasty, wraz z łopatką przeciwstawną stanowią integralną całość. Łopaty wykonano z włókna węglowego okopertowanego tkaniną szklaną a torsjon/dźwigar z rowingu szklanego.

W takiej technologii możemy wykonać moduł, który składa się z dwóch łopat i jednego torsjonu. Do uprzednio wykonanego torsjon doklejane są elementy struktury łopat a całość formowana jest w przyrządzie/formie i sklejana z wykorzystaniem worka podciśnieniowego i utwardzenia. Dokładny przebieg procesu formowania podciśnieniowego możemy znaleźć w pracy.

Torsjon konstrukcyjnie jest płaski a jego przekrój w na każdym odcinku jest prostokątny. Zwiększenie przekroju torsjonu bliżej środka obrotu przez doklejenie nakładek zwiększa jego sztywność oraz pozwala na dociśnięcie go w węzle mocowania piasty do wału.



Rys. 3. Schemat budowy modułu łopat; a) torsjon; b) moduł łopaty po sklejeniu

Torsjon został przebadany. Rys. 4 Przedstawia układ dwóch torsojnow zamocowanych w węźle przed badaniem na rozciągnięciu.

Z pracy [7] wynika że siła rozciągająca powstała od siły odśrodkowej działająca na torsjon przy zastosowaniu tulei metalowej (Rys. 2, moduł 2) wynosi $\sim 6850\text{N}$ (obciążenie $\sim 3425\text{N}$ na jedną stronę torsjonu) a zerwanie badanego próbki-torsjonu nastąpiło przy sile $\sim 29377\text{N}$ co przedstawiono w opracowaniu badań Instytutu Lotnictwa [6].



Rys. 4. Układ dwóch torsojnow przygotowany do badania



Rys. 5.a. Torsojny po badaniu, zerwane



Rys. 5.b. Torsojny po badaniu, zerwane

Siła niszcząca jest ~ 8.5 razy większa od siły działającej we wstępnych obliczeniach co pozwala twierdzić, że torsojon z powodzeniem wytrzyma zadane obciążenie przedstawione w pracy [7]. Budowa struktury torsojonu z wycięta z taśmy okazała się niemal tak samo wytrzymała jak układowana z rowingu, rys. 5.a. W węźle mocowania torsojonu zastosowano wstawkę metalową - ustalacz, który ułatwiał mocowanie w węźle. Podczas próby w okolicy ustalacza nastąpiło zerwanie struktury ze względu na różnice odkształceń kompozytu i metalu. Włókna opływające oś wału wcale nie uległy ściśnięciu i pofalowaniu co zakładano.

Głowica śmigła ogonowego

Głowica śmigła ogonowego założonego rozwiązania w swojej konstrukcji i budowie nie przypomina klasycznych głowic śmigieł ogonowych stosowanych na śmigłowcach. Podobne rozwiązanie można zobaczyć w konstrukcjach typu Fenestron czy FANTAIL™. Głowica ukształtowana jest na kształt bębna, na którego obwodzie rozmieszczone są łopaty.

Tego typu rozwiązanie zapewnia prawidłowe funkcjonowanie mechanizmu zmiany kąta nastawienia łopat i przekazywania momentu obrotowego oraz kontroli kąta nastawienia łopat w przypadku uszkodzenia mechanizmu zmiany skoku śmigła. Posiada również w swojej konstrukcji gniazda przegubów osiowych wyposażonych w łożyska ślizgowe metalowe (w przypadku stosowania modułu nr 1 przedstawionego na rys. 2 łożyska ślizgowe kompozytowe).

Prędkość obwodowa końców łopat

Zwiększając prędkość obrotową śmigła uzyskuje się większy ciąg przy tym samym promieniu śmigła. Niekorzystne zjawisko jakie wywołuje zwiększenie prędkości obrotowej to zwiększenie pobieranej mocy przez śmigło ogonowe, efekt ściśliwości na końcówce łopaty, spadek sprawności śmigła, erozja oraz poziom hałasu. Dla śmigłowca IS-2 założona prędkość obwodową łopat śmigła ogonowego jest bliska prędkości obwodowej wirnika nośnego i wynosi 180m/s. Dobór odpowiedniej wielkości wypełnienia śmigła pozwalający na utrzymanie tak niskiej prędkości obwodowej umożliwia spełnienie wymagań niskiego poziomu hałasu wytwarzanego przez śmigło.

Rodzaj pracy śmigła

Ze względu na umiejscowienie śmigła ogonowego w otworze statecznika nie przewiduje się niekorzystnego przesłonięcia tarczy śmigła przez statecznik a zatem i niekorzystnego wpływu statecznika na pracę śmigła.

Kierunek obrotów śmigła

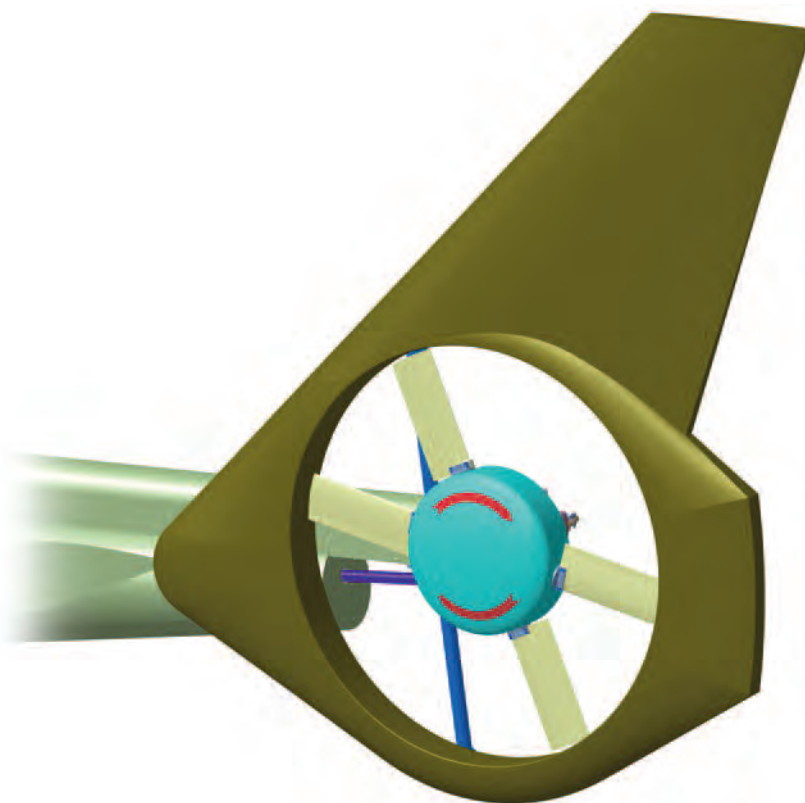
Kierunek obrotów śmigła ogonowego, którego dolna łopata obraca się w kierunku „do przodu” (patrząc od prawej lub lewej strony belki ogonowej/śmigłowca) wykazuje lepszą jakość aerodynamiczną i jest mniej czułe na wpływ śladu zawirnikowego wirnika nośnego.

4. WIZUALNE PRZEDSTAWIENIE ANALIZOWANEGO ŚMIGŁA OGONOWEGO

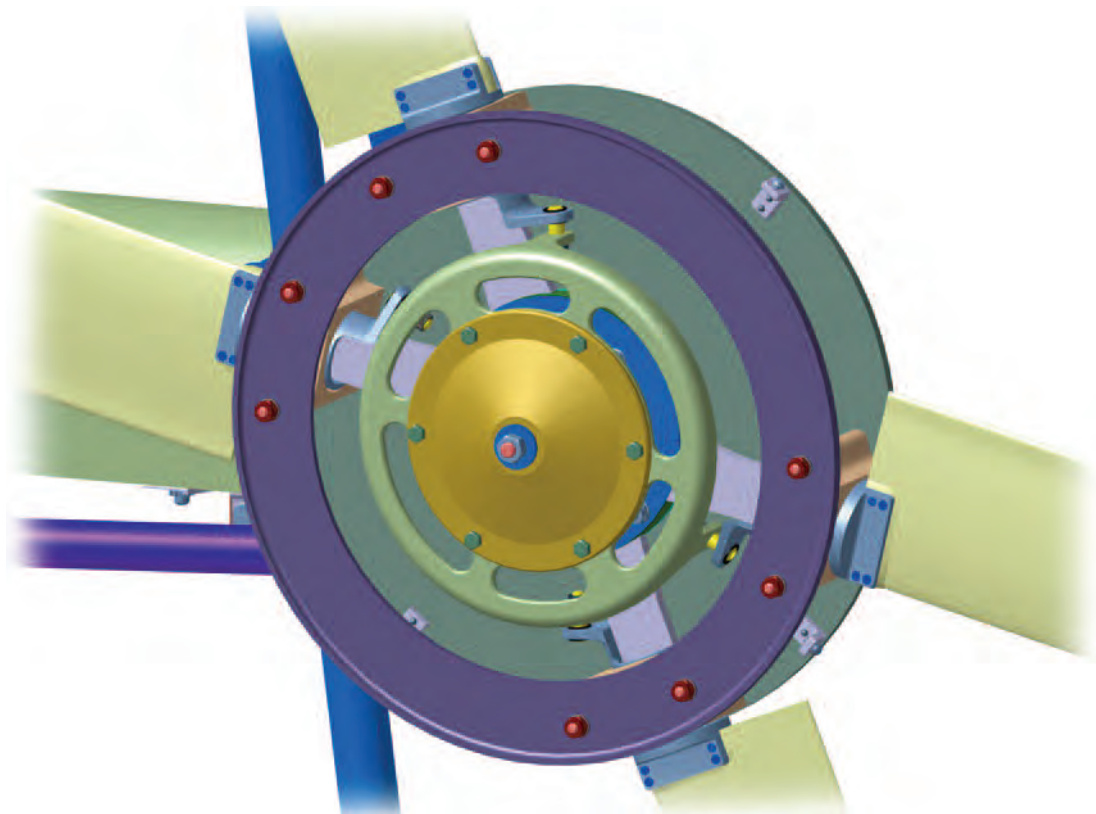
Dla lepszej wizualizacji nowego śmigła ogonowego stworzono trójwymiarowy model przestrzenny. Tego typu forma projektowania zapewnia uzyskanie analizy dokładnej masowej oraz pozwala na optymalizację konstrukcji. Rysunki 6-8 przedstawiają najważniejsze detale śmigła natomiast rysunek 8 przedstawia wstępny wariant układu zmiany skoku łopat (układ dźwigni).



Rys. 6. Śmigłowiec IS-2 z nowym śmigłem ogonowym



Rys. 7. Śmigło ogonowe oraz usterzenie pionowe



Rys. 8. Widok na wirnik śmigła ogonowego (bez pokrywy)

5. PODSUMOWANIE

Proponowane rozwiązanie konstrukcyjne łączy w sobie cechy nowoczesnego śmigła ogonowego zgodnie z obowiązującymi tendencjami w rozwoju śmigłowców. W tym celu poddano przeanalizowaniu rozwiązania dotyczące konstrukcji śmigieł ogonowych oraz posłużono się nabytymi doświadczeniami ze wcześniejszych rozwiązań dotyczących śmigła ogonowego IS-2.

Przeprowadzono analizy osiągnięć, drgań łopatek, oraz sterowności śmigłowca. Wykonano wstępne obliczenia wytrzymałościowe elementów głowicy śmigła ogonowego z wykorzystaniem nowoczesnych technik obliczeniowych. Zebrane obliczenia mają stanowić podstawę do optymalizacji konstrukcji. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że zaproponowana konstrukcja może być realizowana w projekcie śmigłowca.

Konstrukcja ta, składająca się z modułów dwułopatowych może być wykorzystana do rozwojowej wersji śmigłowca IS-2 jako sześciułopatowa.

Zastosowanie nożycowego rozstawu łopatek w wersji podstawowej 4-ro łopatowej śmigła powinno wpłynąć na zmniejszenie emisji hałasu. Wady proponowanej konstrukcji łopatek wiążą się koniecznością stosowania parzystej liczby łopatek. Głowica śmigła ogonowego odbiega wyglądem i konstrukcją od klasycznych rozwiązań. Przy opracowywaniu wstępnej konstrukcji wzorowano się na nowoczesnym rozwiązaniu typu Fenestron i Fantail. Moduły w swojej budowie posiadają przegub osiowy i element sprężysty (torsjon kompozytowy), są łatwe i tanie w produkcji. Moduł ten można łatwo wymienić w przypadku uszkodzenia. Brak informacji na temat łożysk kompozytowych wymusza stosowanie klasycznych łożysk ślizgowych oraz metalowej tulei przegubu osiowego łopaty. Proponowane również w pracy rozwiązanie „integralnej” łopaty z elementem bezsmarnym oraz łożysk kompozytowych zmniejszy masę oraz uprości technologię wykonania, zmniejszy liczbę elementów i jest to rozwiązanie nowoczesne, trudnością może okazać się diagnostyka takiego układu-modułu. Nowoczesny profil aerodynamiczny zastosowany na łopatach śmigła jest konkurencyjny w stosunku do powszechnie stosowanych i wykazuje bardzo dobre właściwości aerodynamiczne.

Charakterystyki użytkowe śmigła w wersji podstawowej oraz rozwojowej dają zadowalające wyniki. Założone kryteria zostały spełnione nawet z dużym zapasem. Obudowa śmigła będąca jednocześnie otunelowaniem oraz częścią statecznika pionowego poprawia charakterystyki pracy śmigła i bezpieczeństwo użytkowania. Statecznik pionowy w swojej konstrukcji ze względu na zastosowany profil aerodynamiczny i kąt zaklinowania, generuje siła nośna odciążającą śmigło ogonowe w locie poziomym. Niektóre parametry takie jak przesunięcie płaszczyzny śmigła ogonowego wewnątrz tunelowania oraz profil tunelu należy uściślić na drodze badań prototypowych, Na podstawie badań ustalono, że przesunięcie wpływa istotnie na cechy użytkowe śmigła (zmniejszenie pobieranej mocy, wzrost ciągu).

BIBLIOGRAFIA

- [1] **S. Boganow, K. Szabelski:** „Wstęp do konstrukcji śmigłowców”, WKŁ, Warszawa 1995.
- [2] **K. Szumański:** „Eksploatacja śmigłowców”, wykłady Politechnika Lubelska, Lublin 2002.
- [3] **Lynn R. R., Robinson F. D., Batra N. N., Duhon J. M., Tail Rotor:** „Design Part I: Aerodynamics”, Journal of the American Helicopter Society, vol. 15, No. 4, 1970.
- [4] **Łucjanek:** „Osłonięte wirniki ogonowe śmigłowców”, Prace Instytutu Lotnictwa nr 153-154, Warszawa 1998.
- [5] **K. Szumański:** „Model symulacyjny dynamiki wirnika śmigłowca w granicznych nieustalonych stanach lotu”, Prace Instytutu Lotnictwa nr 89, Warszawa 1982.
- [6] **A. Kaznowska, D. Szelaż:** Protokół nr 7/04 z badań materiału kompozytowego, Laboratorium badań materiałów kompozytowych. Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2004.
- [7] **M. B. Piłat** Praca dyplomowa, „Analiza możliwości zastosowania wielołopatowego śmigła ogonowego do śmigłowca klasy IS-2” Politechnika Lubelska, Lublin 2006.

Mirosław Bernard Piłat
Alicja Kaznowska

Summary

The article presents the concept of four blade helicopter tail rotor propeller to the helicopter of the light class with transfer of centrifugal forces by the torsion element and the tunnel duct of DTR (Ducted Tail Rotor) type.