

KONCEPCJA I ANALIZA DZIAŁANIA PROJEKTU WIRNIKA NOŚNEGO WSPÓŁOSIOWEGO WSPÓŁBIEŻNEGO NA PRZYKŁADZIE ROZWIĄZANIA DLA ŚMIGŁOWCA IS-2

mgr inż. **Piotr FILIPIAK**
PZL Świdnik S. A.

W artykule przedstawiono wstępną koncepcję wirnika nośnego o liczbie łopat większej od pięciu. Rozwiązanie takie pozwoli na obniżenie poziomu emitowanego hałasu przez wirnik nośny. Dodatkowo zwiększona liczba łopat wirnika spowoduje mniejszy poziom drgań powstających na wirniku i przenoszonych na kadłub śmigłowca.

1. WSTĘP

Współczesne kierunki projektowania wirników nośnych śmigłowców skupiają się na wyciszeniu tych wirników, jest to pochodną wyostrażania norm dopuszczalnego hałasu emitowanego przez śmigłowiec. Z jednej strony wynika to z chęci zmniejszenia szkodliwości oddziaływania śmigłowca na środowisko naturalne, z drugiej zaś z coraz częstszego wykorzystywania śmigłowca w obszarach mocno zurbanizowanych.

Powyższe wymagania uzyskuje się poprzez:

- odpowiedni kształt końcówek łopat,
- odpowiedni dobór prędkości obrotowej wirnika nośnego,
- zwiększenie liczby łopat wirnika.

Projektowanie łopat z odpowiednimi końcówkami w połączeniu z odpowiednim doбором prędkości obrotowej wirnika nośnego przynosi wymierne rezultaty w obniżeniu emisji hałasu wirnika nośnego.

Zwiększanie liczby łopat wirnika nośnego napotyka na poważne ograniczenia wynikające z konstrukcji piasty wirnika. Zachowane optymalnych wymiarów i masy piasty powoduje, że we współczesnych konstrukcjach wirników nośnych stosuje się maksymalnie 5 łopat.

Wirnik nośny współosiowy współbieżny to prototypowa konstrukcja, której głównym celem jest uzyskanie cichego wirnika, co za tym idzie cichego wiroplata. Jako podstawowe źródła hałasu wytwarzanego przez wirnik nośny śmigłowca możemy uznać:

- hałas powstały w wyniku ruchu obrotowego wirnika,
- hałas szerokopasmowy,
- interakcja łopat i wirów (BVI),
- wysoka prędkość na końcu łopaty nacierającej.

Koncepcja cichego wirnika współosiowego współbieżnego opierać się będzie na zmniejszeniu prędkości obrotowej wirnika, z równoczesnym zwiększeniem liczby łopat. Niższa prędkość obrotowa wirnika będzie powodować mniejszy hałas, szczególnie dokuczliwy podczas prac w zawisie śmigłowca i podczas operowania śmigłowca nad terenami zamieszkanymi. Obniżona prędkość obrotowa spowoduje również spadek prędkości liniowej końcówki łopaty nacierającej dla lotu z dużą prędkością a tym samym zmniejszenie efektów ściśliwości.

Dodatkową zaletą takiego wirnika przy odpowiednim doborze następujących parametrów takich, jak:

- kąt rozchylenia wirników,
- rozstaw poosiowy pomiędzy wirnikiem górnym a dolnym,
- różne kąty nastawienia łopat dla wirnika górnego i dolnego,
- różne promienie łopat wirnika górnego i dolnego,

będzie zjawisko schodzenia wirów z łopat wirników górnego i dolnego w taki sposób, że interferencja tych wirów będzie umożliwiała zmianę kierunku schodzenia tych wirów, co w ostateczności będzie powodować że łopaty następnej pary łopat nie będą poruszały się w wirach pary poprzedniej. Zmniejszy to znacząco drgania powstające na wirniku nośnym i w konsekwencji zmniejszeniu ulegnie poziom drgań kadłuba śmigłowca.

Idea projektu nawiązuje do konstrukcji wirników sterujących śmigłowców Mi-28 i AH-64 Apache, gdzie w ich skład wchodzi dwa dwułopatowe wirniki obracające się w tych samych kierunkach.

Koncepcja tego projektu opiera się na zaprojektowaniu wirnika sześciolopatowego, poprzez złożenie ze sobą dwóch wirników trzyłopatowych, gdzie jeden umieszczony byłby nad drugim. Oba wirniki obracałyby się w tym samym kierunku co pozwalałoby na zastosowanie wspólnego układu sterowania. Ewentualnym zmianom trzeba będzie poddać element wirujący tarczy sterującej, a zespół popychaczy dostosować do nowej konstrukcji. Drugą zaletą takiego rozwiązania byłaby „klasyczna” przekładnia główna, której to wielkość wpływa na kształt i wielkość przestrzeni ładunkowej śmigłowca.

Podstawowym założeniem jest wykorzystanie jak największej liczby części wirnika IS-2.

Podstawowa cecha wpływająca na „kształt” i gabaryty wirnika jest rozstaw poosiowy wirnika górnego od dolnego i kąt rozchylenia tych wirników. Zbyt duży rozstaw poosiowy powodowałby wzrost wysokości całego śmigłowca, co mogłoby wpływać negatywnie na całą konstrukcję stwarzając problemy z hangarowaniem i czynnościami obsługowymi wirnika. Rozstaw pomiędzy wirnikami wpływa również na konstrukcję wału głównego i jego zabudowę w przekładni głównej a więc i na samą przekładnię główną śmigłowca. Wielkością wymiarującą rozstaw wirników i kąt ich rozchylenia będzie taki dobór tych wielkości aby wiry schodzące z łopaty wyprzedzającej w danej parze łopat nie trafiały na łopatę „następującą” danej pary łopat.

Zmiany prędkości obrotowej wirnika nośnego będą polegały na jej zmniejszaniu w celu obniżenia emitowanego przez wirnik hałasu przy jednoczesnym zachowaniu odpowiednich osiągow. Prędkość obwodowa końcówki łopaty wirnika nośnego śmigłowca IS-2 wynosi 195 [m/s], wstępne założenia projektu wirnika współosiowego współbieżnego przewidują obniżenie tej prędkości do wartości 150-160 [m/s].

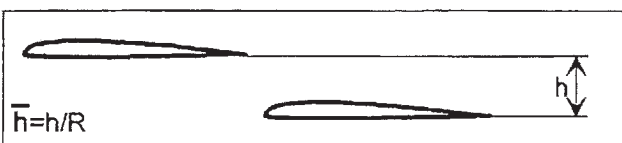
2. INFORMACJE Z LITERATURY

Pierwszy tego typu wirnik pojawił się w śmigłowcu AH-64 Apache w końcu lat siedemdziesiątych. Kilka lat później fabryka śmigłowców Mil zastosowała tego typu wirnik na swoim śmigłowcu Mi-28.

Możemy wyróżnić dwie konfiguracje wirników współosiowych współbieżnych. Pierwszą z nich jest konfiguracja typu „L”, charakteryzuje się ona tym, że dolna łopata danej pary łopat jest łopatą prowadzącą w stosunku do drugiej górnej łopaty (rys. 1).



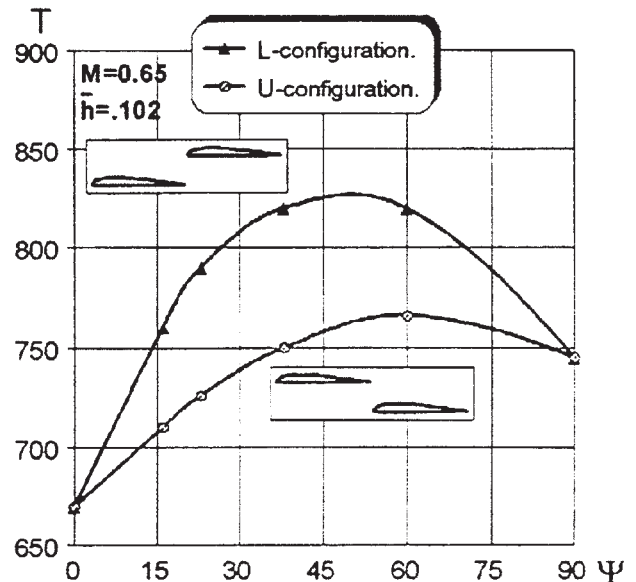
Rys. 1. Konfiguracja „L” wirnika współosiowego współbieżnego [2]



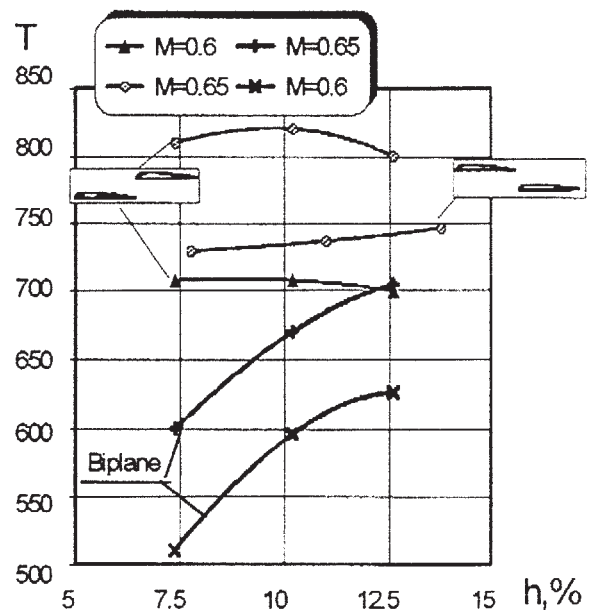
Rys. 2. Konfiguracja „U” wirnika współosiowego współbieżnego [2]

Drugą konfiguracją jest konfiguracją „U” gdzie dolna łopata danej pary łopat jest łopatą tylną (wyprzedzoną) przez drugą górną łopatę (rys. 2).

Fabryka Mil opublikowała wyniki badań wirnika współosiowego współbieżnego dokonanych podczas projektowania śmigła ogonowego do MI-28 [2]. Przeprowadzono je dla dwóch możliwych konfiguracji wirnika „L” i „U”. Badanie to nie obejmowało zmian rozstawu poosiowego wirników. Badania przeprowadzono na maksymalnym kącie nastawienia profilu.



Rys. 3. Ciąg wirnika T w funkcji kąta rozchylenia wirników Psi [2]



Rys. 4. Ciąg wirnika T w funkcji rozstawu poosiowego h [2]

Wynik badań pokazuje, że lepszym ustawieniem wirnika jest konfiguracja „L” z dolną łopatą jako łopatą prowadzącą. Optymalny kąt rozchylenia wirników Psi waha się w zakresie 35÷55°, w tym zakresie różnica siły ciągu wirnika pomiędzy konfiguracją „L” a „U” jest znacząca (w porównaniu z wartością ciągu dla kąta 90° wynosi około 10%) (rys. 3).

Kolejnym etapem badań było zbadanie wpływu rozstawu poosiowego przy założonym kącie rozchylenia wirników na ciąg wirnika (rys. 4). Analiza wyników wykazała wpływ rozstawu poosiowego na ciąg wirnika.

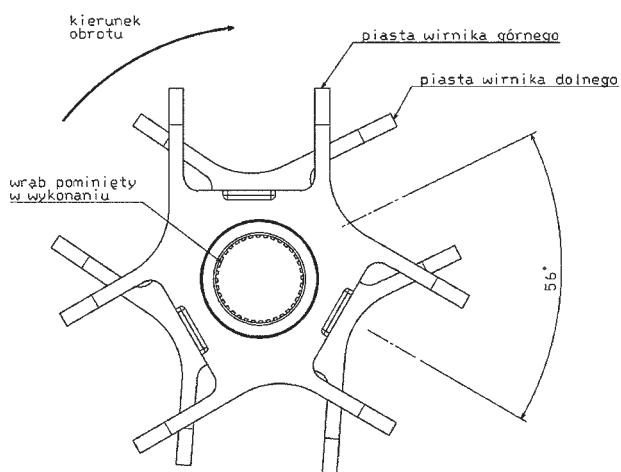
3. WIRNIK WSPÓŁOSIOWY WSPÓŁBIEŻNY NA PRZYKŁADZIE ROZWIĄZANIA DLA ŚMIGŁOWCA IS-2

Projekt śmigłowca IS-2 powstał w Instytucie Lotnictwa w Warszawie, jako projekt lekkiego śmigłowca dwuosobowego. Maksymalna masa startowa śmigłowca 910kg. Śmigłowiec napędzany jest przez silnik tłokowy Lycoming 0-630. Wirnik nośny trójłopatowy z łopatomi kompozytowymi, śmigło ogonowe czterołopatowe obudowane. Konstrukcję nośną kadłuba stanowi kratownica z rur stalowych. Podwozie śmigłowca stanowi konstrukcja płozowa najczęściej wykorzystywana w tego typu śmigłowcach.

Chęć zbudowania wirnika sześciłopatowego z łopatomi umieszczonymi w jednej płaszczyźnie, przy zastosowaniu technologii i materiałów ogólnie dostępnych, powodowała by konieczność zwiększenia rozstawu przegubów poziomego i pionowego w celu bezkolizyjnego rozmieszczenia ramion wirnika. Całość pociąga za sobą wzrost masy całego wirnika.

Piasta wirnika współosiowego współbieżnego

Piasta wirnika współosiowego współbieżnego składa się z dwóch piast, piasty wirnika górnego i piasty wirnika dolnego, pomiędzy którymi znajduje się tuleja dystansowa. Zgodnie z założeniami projektu, piasty wirnika są konstrukcjami zmodyfikowanymi uwzględniającymi sposób ich montażu na śmigłowcu.



Rys. 5. Piasta wirnika współosiowego współbieżnego. Kąt rozchylenia wirników 56°

Jednym z podstawowych obciążeń tarczy sterującej są obciążenia masowe. Siły odśrodkowe wywołane wirującymi masami powodują obciążenia rozciągające.

Analiza porównawcza sił odśrodkowych działających na przeguby poziomy i pionowy łopat wirnika nośnego śmigłowca IS-2 z klasycznym trzyłopatowym wirnikiem i dla śmigłowca IS-2 z wirnikiem współosiowym współbieżnym. Poniższe porównanie wyników zawiera wyniki dla trzech manewrów:

- zawisu,
- lotu z prędkością przelotową $v = 180$ [km/h],
- oraz manewru wyrwania.

Tab. 1. Siła odśrodkowa działająca na przeguby poziomy i pionowy wirnika współosiowego współbieżnego w zawisie $\omega = 40$ [rad/s]

Przegub poziomy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	41,56
Max.	42,79
Min.	42,68
Przegub pionowy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	41,2
Max.	42,42
Min.	42,31

Tab. 2. Siła odśrodkowa działająca na przeguby poziomy i pionowy wirnika trzyłopatowego śmigłowca IS-2 w zawisie $\omega = 50,667$ [rad/s]

Przegub poziomy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	66,74
Max.	68,73
Min.	68,53
Przegub pionowy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	66,15
Max.	68,13
Min.	67,93

Tab. 3. Siła odśrodkowa działająca na przeguby poziomy i pionowy wirnika współosiowego współbieżnego podczas lotu z prędkością przelotową $\omega = 40$ [rad/s]

Przegub poziomy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	42,64
Max.	42,72
Min.	42,48
Przegub pionowy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	42,27
Max.	42,35
Min.	42,11

Tab. 4. Siła odśrodkowa działająca na przeguby poziomy i pionowy wirnika trzyłopatowego śmigłowca IS-2 podczas lotu z prędkością przelotową $\omega = 50,667$ [rad/s]

Przegub poziomy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	68,40
Max.	68,58
Min.	68,26
Przegub pionowy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	67,80
Max.	67,98
Min.	67,66

Tab. 5. Siła odśrodkowa działająca na przeguby poziomy i pionowy wirnika współosiowego współbieżnego podczas manewru wyrwania $\omega = 47,37$ [rad/s] przy kącie skoku ogólnego zmniejszonym do $16,8^\circ$

Przegub poziomy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	58,18
Max.	60,67
Min.	59,04
Przegub pionowy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	57,67
Max.	60,15
Min.	58,52

Tab. 6. Siła odśrodkowa działająca na przeguby poziomy i pionowy wirnika trzyłopatowego śmigłowca IS-2 podczas manewru wyrwania $\omega = 60,8$ [rad/s]

Przegub poziomy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	101,02
Max.	101,93
Min.	99,56
Przegub pionowy	
Siła odśrodkowa [kN]	
Średnia	100,16
Max.	101,06
Min.	98,70

Największe obciążenia piasty i zespołów wirnika wynikające z oddziaływania na nie siły odśrodkowej występują podczas manewru wyrwania. Wynika to ze zwiększonej prędkości obrotowej wirnika podczas tego manewru.

Analizując wyniki można stwierdzić, że zwolnienie prędkości obrotowej pozwoliło na zmniejszenia obciążeń piasty wirnika nośnego i łączników piasty z przegubem osiowym o około 40% w odpowiadających sobie manewrach. Zmiana cykli obciążeń tych elementów wynikająca ze spadku wielkości siły odśrodkowych, powoduje zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej elementów wirnika. Ma też znaczący wpływ na ich żywotność wirnika.

Zmniejszenie obciążeń wynikające z działania sił odśrodkowych w przypadku projektowania wirnika sześciłopatowego (jednopłaszczyznowego czy też dwupłaszczyznowego współosiowego współbieżnego) od podstaw daje nam możliwość zmniejszenia masy piasty oraz innych elementów wirnika odpowiedzialnych za przenoszenie obciążeń od sił odśrodkowych.

Lopaty wirnika

Jednym z podstawowych założeń koncepcji wirnika współosiowego współbieżnego na przykładzie rozwiązania dla śmigłowca IS-2 jest wykorzystanie jak największej liczby istniejących części i zespołów wirnika śmigłowca IS-2. Tyczy się to również łopat wirnika nośnego.

Zmniejszając prędkości końca łopaty zmieni się eksploatacyjny zakres prędkości obrotowych wirnika. O ile nie zmieniają się parametry łopaty wirnika takie jak sztywność łopaty, rozkład mas na jej długości, zmiana eksploatacyjnego zakresu prędkości obrotowych spowoduje konieczność sprawdzenia czy w nowym zakresie częstości drgań własnych nie są równe z częstościami wymuszeń.

W celu sprawdzenia czy łopaty wirnika współosiowego współbieżnego nie pracują w stanie rezonansu wyliczono dla nowych prędkości obrotowych wirnika częstości drgań własnych łopaty. Obliczenia wykonano dla prędkości obrotowej nominalnej co pozwoli na analizę czy wystąpienia zjawiska rezonansu w eksploatacyjnym zakresie prędkości obrotowych wirnika oraz dla prędkości obrotowych odpowiadający prędkościom biegu jałowego wirnika $0,5 N_{nom}$ do $0,6 N_{nom}$. Bliskość częstości drgań własnych z częstościami wymuszeń oznaczać będzie pracę łopaty w rezonansie i będzie wymuszać konieczność rozstrojenia wartości częstości drgań własnych.

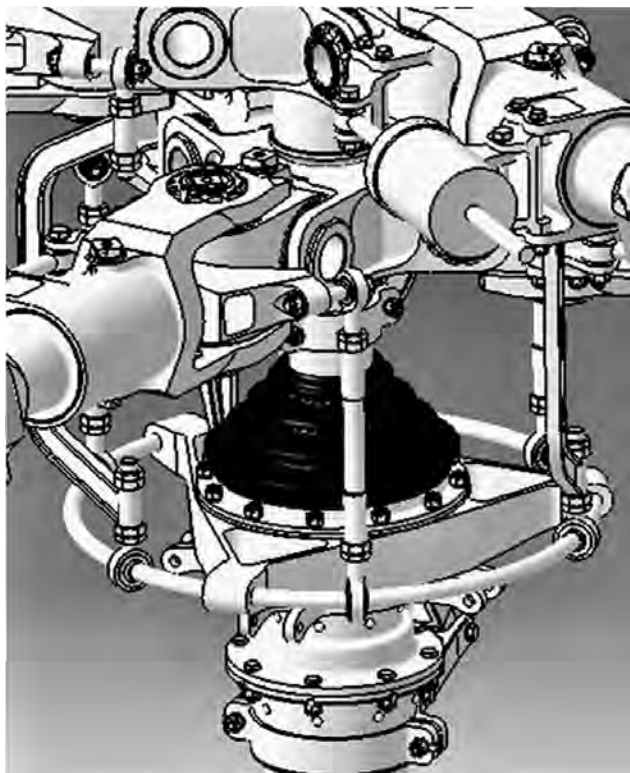
Tarcza sterująca wirnika współosiowego współbieżnego.

W śmigłowcu IS-2 zastosowano tarczę sterującą typu pierścieniowego, trzyramienną z kątem wyprzedzenia sterowania $\Delta\psi_S = 35^\circ$.

Podstawowym parametrem wpływającym na zakres modyfikacji tarczy jest zwiększenie liczby łopat do sześciu. Kąt wyprzedzenia sterowania dla wirnika współosiowego współbieżnego pozostaje bez zmian w stosunku do IS-2.

Konstrukcja tarczy sterującej wirnika współosiowego współbieżnego jest ściśle powiązana z wybraną koncepcją zespołu popychaczy. Zaproponowano zespół popychaczy z odrębnym ramieniem tarczy sterującej dla każdej łopaty.

Zastosowanie zespołu popychaczy z odrębnym ramieniem tarczy sterującej dla każdej łopaty powoduje konieczność wprowadzenia zmian konstrukcyjnych pierścienia wirującego tarczy sterującej.



Rys. 6. Tarcza sterująca z odrębnym ramieniem tarczy dla każdej łopaty. Zespół popychaczy wirnika

Zmiany konstrukcyjne pierścienia wirującego tarczy sterującej polegają na zaprojektowaniu trzech dodatkowych ramion. Można to wykonać poprzez skonstruowanie nowego pierścienia wirującego tarczy sześćo ramiennego lub (jak zaprezentowano na rysunku) przez przebudowę istniejącego. Przebudowa polegałaby na pominięciu w procesie wytwarzania pewnych elementów pierścienia wirującego i dostawieniu pierścienia na którym można by było zamontować dolne końcówki popychaczy. Element ten musiał by się odznaczać wysoką sztywnością i małą masą.

Zespół popychaczy wirnika

Konfiguracja „L” wirnika wymusza przebudowę zespołu popychaczy ze względu na możliwość kolizji popychacza wirnika górnego z tłumikiem odchylenia łopaty, przy granicznych dopuszczalnych kątach rozchylenia wirników. W śmigle ogonowym Mi-28 ten problem nie wystąpił z powodu zastosowania tarczy sterującej typu „pająk” oraz braku tłumika odchylenia łopaty. Zwiększanie zakresu kąтового rozchylenia wirników zmusza do zastosowania popychacza w kształcie litery „C”. W celu uniknięcia tego problemu można poddać modyfikacjom położenie oraz sposób połączenia z łącznikiem i korpusem przegubu osiowego tłumika odchylenia łopaty.

Dla dolnego wirnika można zaadaptować rury popychaczy śmigłowca IS-2. Geometria wirnika górnego wymaga zastosowania nowej rury (laski popychacza). Końcówki popychaczy również będą musiały ulec przekonstruowaniu. Wynika to z faktu, że w wyniku oddziaływania siły odśrodkowej na rurę popychacza, popychacz będzie chciał się obracać względem swojej osi. Obrót taki mógłby powodować kolizję rury popychacza z innymi elementami wirnika i aby uniemożliwić obrót końcówki trzeba wyposażyć w ustalacze.

Obniżenie prędkości obrotowej wirnika nośnego spowodowało zmiany obciążeń w układzie sterowania wirnikiem, wynikające ze zmiany wielkości sił aerodynamicznych i masowych powstających na wirniku. Zmiany te dotyczą wszystkich stanów lotu śmigłowca.

Jako porównanie wielkości odpowiadających sobie obciążeń układu sterującego śmigłowca IS-2 trzyłopatowego i śmigłowca IS-2 z wirnikiem współosiowym współbieżnym wybrano obciążenia powstałe podczas trzech manewrów:

- zawisu,
- lotu z prędkością przelotową $v = 180[\text{km/h}]$,
- oraz manewru wyrwania.

Wielkości obciążeń porównywane to:

- moment sterowania łopaty (moment skracający łopate),
- moment sterowania podłużnego,
- moment sterowania poprzecznego,
- siła sterowania skokiem ogólnym.

Siłą działającą bezpośrednio na popychacz jest siła odpowiadająca ilorazowi momentu sterowania łopaty i odległości osi popychacza i osi przegubu osiowego.

Tab. 7. Obciążenia w układzie sterowania śmigłowca IS-2 z wirnikiem współosiowym współbieżnym

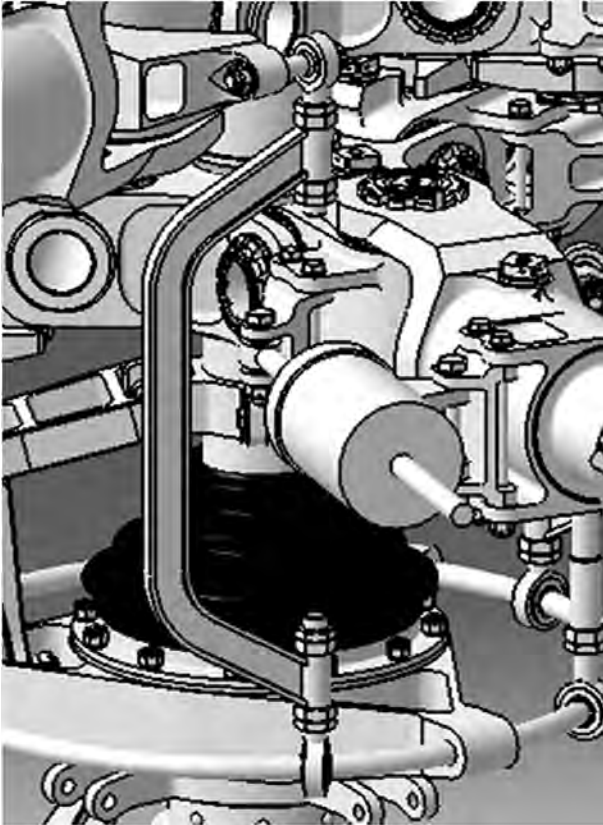
			Zawis	Przelot	Wyrwanie
Moment sterowania łopata M_x	[Nm]	Srednia MAX. MIN.	-15,53 -9,50 -21,66	-21,17 -16,96 -27,03	-39,01 -18,33 -64,11
Odległość osi popychacza od osi przegubu przekreśień l_{p-po}	[m]		0,105		
Siła w popychaczu F_p	[N]	max.	-206,29	-257,43	-610,57

Tab. 8. Obciążenia w układzie sterowania śmigłowca IS-2 z wirnikiem klasycznym (trzyłopatowym)

			Zawis	Przelot	Wyrwanie
Moment sterowania łopata M_x	[Nm]	Srednia MAX. MIN.	-21,54 -16,22 -27,14	-28,11 -6,72 -46,63	-59,25 -40,90 -84,41
Odległość osi popychacza od osi przegubu przekreśień l_{p-po}	[m]		0,105		
Siła w popychaczu F_p	[N]	max.	-258,48	-444,1	-803,9

Największe obciążenia w układzie sterowania występują podczas wykonywania manewru wyrwania. Dlatego też siły obciążające popychacz podczas tego manewru będą siłami wymiarującymi. Zmniejszenie prędkości obrotowej dla wirnika współosiowego współbieżnego spowodowało spadek obciążeń w układzie sterowania w porównaniu do 3-łopatowego wirnika śmigłowca IS-2 dla zawisu i wyrwania o ok. 30%.

Odpowiedni dobór parametrów materiału, z którego będzie wykonany popychacz wirnika górnego (w kształcie „C”) w połączeniu z odpowiednim doбором pozwoli usztywnić układ sterowania łopatom wirnika górnego. Na wymiary przekroju poprzecznego profilu z jakiego został wykonany popychacz wpływ ma rozstaw poosiowy wirnika. Ogranicza on maksymalną wysokość profilu, wynika to konieczności uniknięcia kolizji zespołu mocowania popychacza (końcówki górnej popychacza, nakrętek ustalających popychacz) jak i samego popychacza z elementami przegubu osiowego odpowiedniej łopaty wirnika dolnego.



Rys. 7. Popychacz wirnika górnego w kształcie litery „C” wykonany ze stali. Profil dwuteowy wykorzystany na pręt popychacza

Negatywną cechą popychacza wykonanego ze stali o przekroju dwuteowym laski popychacza jest jego zwiększona masa w porównaniu z popychaczem wykonanym z rury duralowej.

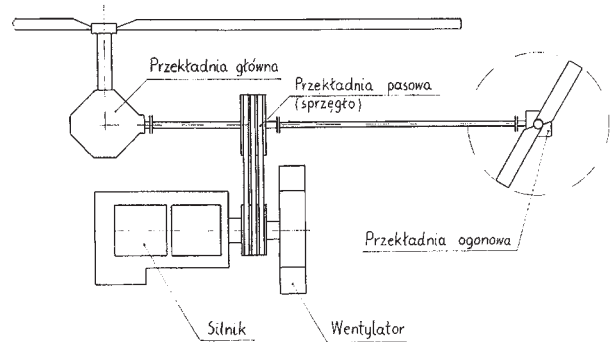
Zastosowanie popychacza wirnika górnego wymusza również przekonstruowanie sposobu mocowania popychacza do układu sterowania. Konieczność wyeliminowania możliwości obrotu popychacza wokół teoretycznej osi popychacza wymusza zmianę budowy końcówki górnej i dolnej popychacza. Jedną z dostępnych możliwości jest połączenie końcówek górnej i dolnej popychacza z popychaczem wirnika górnego za pomocą wpustów.

Zespół przekazania mocy

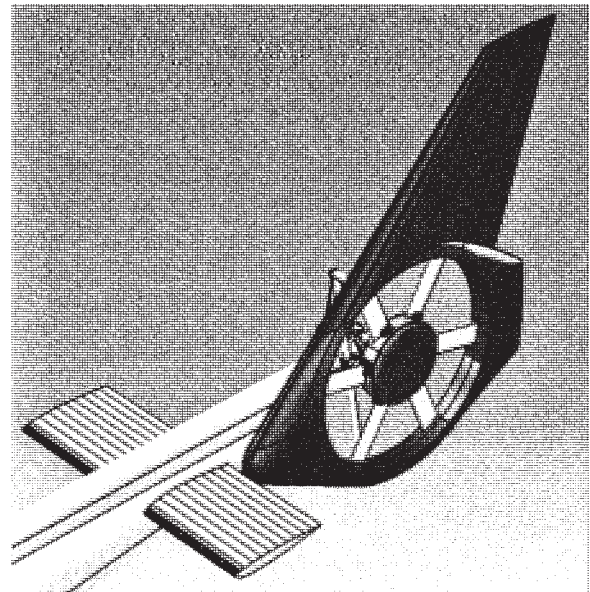
Wymóg zastosowania przekładni głównej śmigłowca IS-2 powoduje konieczność obniżenia tej prędkości na sprzęgle przekazującym napęd z silnika na wał napędzający przekładnię główną wirnika nośnego i przekładnię śmigła ogonowego. Sprzęgło to podczas rozruchu silnika ma rozłączyć odbiorniki od źródła do momentu uzyskania przez silnik odpowiednich parametrów, podobnie podczas wyłączenia silnika.

Sprzęgło to połączone jest z przekładnią pasową przekazującą napęd z silnika na wał napędzający przekładnię główną wirnika nośnego i przekładnię śmigła ogonowego. Sterowanie transmisją mocy odbywa się poprzez sterowanie napięciem pasków klinowych.

Wymusza to zmianę geometrii (przełożenia) przekładni pasowej.



Rys. 8. Schemat układu napędowego śmigłowca z silnikiem o osi poziomej i z przekładnią pasową połączoną ze sprzęgłem [5]



Rys. 9. Śmigło ogonowe śmigłowca IS-2 z dodatkową parą łopat

Śmigło ogonowe

Obniżenie prędkości obrotowej wirnika nośnego spowodowałoby konieczność zabudowy śmigła ogonowego o większym ciągu i równocześnie spowodowało obniżenie hałasu śmigła ogonowego.

Jedną koncepcją zmian konstrukcyjnych byłaby przebudowa śmigła ogonowego IS-2 z czterołopatowego na sześciółopatowe. Mogłoby to polegać na dołożeniu jednej pary łopat. Proces ten z uwagi na budowę całej konstrukcji śmigła nie wymagałby znacznych modyfikacji konstrukcji. Przekonstruowaniu należałoby poddać między innymi piastę śmigła.

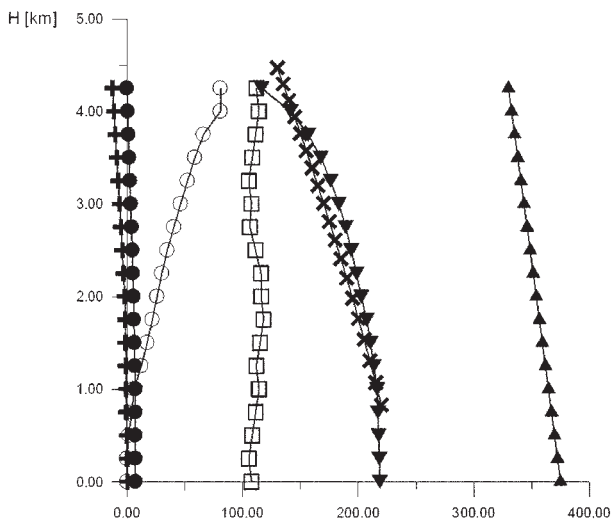
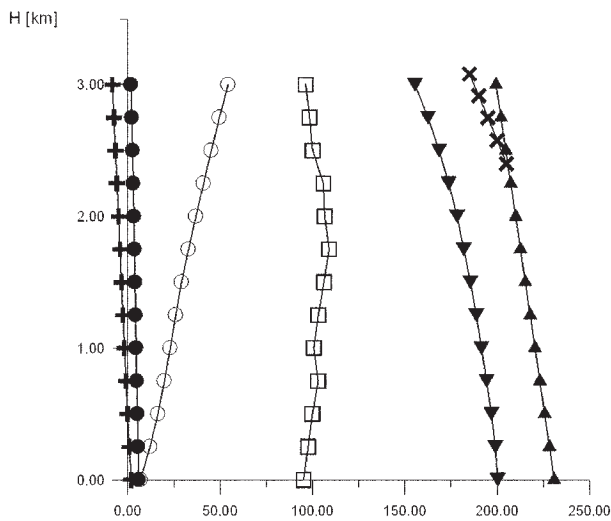
Dołożenie jednej pary łopat najlepiej przy nierównomiernym ich rozkładzie azymutalnym spowodowałoby rozstrojenie zmian ciśnienia akustycznego w funkcji czasu, w kierunku „szumu”. Kolejne łopaty obracającego się śmigła nie trafiałyby z tą samą częstotliwością na wiry spływające z łopat wyprzedzających.

4. ANALIZA WŁASNOŚCI ŚMIGŁOWCA IS-2 Z WIRNIKIEM WSPÓŁSIOWYM WSPÓLBIEŻNYM

Analiza obejmuje porównanie osiągow, emisji hałasu wirników, analiza interferencji śladów wirowych schodzących z łopat wirnika współosiowego współbieżnego oraz porównanie poziomego drgań wytwarzanych na wirniku nośnym. Dodatkowo porównane zostaną właściwości manewrowe śmigłowca IS-2 z wirnikiem trzyłopatowym i wirnikiem współosiowym współbieżnym.

Analiza porównawcza osiągow

Porównanie charakterystyk osiągow obejmuje porównanie charakterystyk osiągowych śmigłowca IS-2 z dwoma różnymi wirnikami.



Rys. 10. Charakterystyki osiągow
 + W_o [m/s], • W_{max} [m/s], o V_{min} [km/h], □ V_{wmax} [km/h],
 ▼ V_{max} [km/h], ▲ V_{Makr} [km/h], × $H_{usl}(V)$

Obniżenie prędkości obrotowej spowodowało dla wirnika współosiowego współbieżnego znaczące odsunięcie prędkości początku pojawiania się zjawisk ściśliwości na łopacie nacierającej. Odsunięcie to pozwala przewidywać uniknięcie pojawiania się zjawisk ściśliwości na łopacie nacierającej.

Krzywa obrazująca górną granicę oderwania również zmieniła swoje położenie w stosunku do odpowiadającej jej krzywej dla wirnika IS-2 trzyłopatowego. Nie udało się uniknąć pojawiania się lub zminimalizowania zjawiska oderwania dla wirnika współosiowego współbieżnego, ale udało się odsunąć górną granicę oderwania od zakresu lotów z dużą prędkością postępową na dużej wysokości.

Analiza porównawcza emisji hałasu przez wirniki

Obniżając prędkość obrotową wirnika nośnego współosiowego współbieżnego wraz z podwojeniem liczby łopat wirnika oraz doбором odpowiedniego kąta rozchylenia wirników i rozstawu poosiowego pozwoli na zmniejszenie powstałego w wyniku wpływu cyklicznych siłowych oddziaływań łopat na powietrze, a zatem i hałasu powstałego w wyniku ruchu obrotowego wirnika.

Zwiększenie liczby łopat dla wirnika współosiowego współbieżnego pozwoli również na zmniejszenia hałasu powstającego w wyniku tworzenia się wiru końcowego poprzez zmniejszenia cyrkulacji wiru końcowego. Za jego powstawanie odpowiedzialne jest zjawisko zakrzywania się strug powietrza, które przepływają wokół końcówki łopaty z dolnej na górną powierzchnię [1].

Nierównomierne rozmieszczenie łopat wirnika wpływa również znacząco na częstotliwość emitowanego hałasu. Różny rozstaw kątowy łopat powoduje rozstrojenie tej częstotliwości.

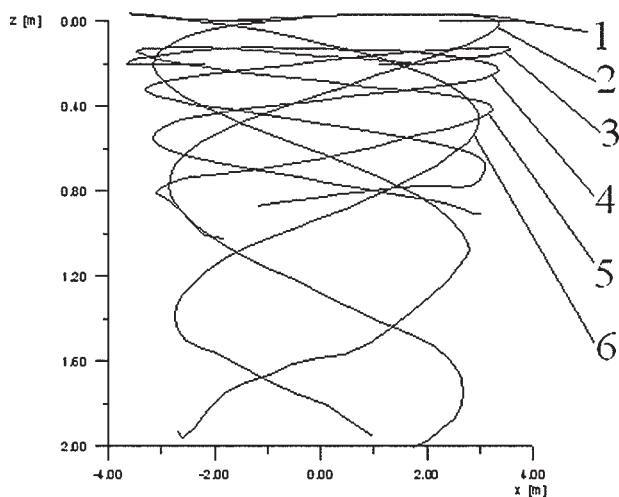
Obniżenie prędkości liniowej końcówki łopaty spowodowało spadek hałasu emitowanego przez wirnik nośny. Poziom ciśnienia akustycznego SPL (Sound Pressure Level) obliczony na podstawie wzoru Dawidsona i Hargesta wyniósł dla śmigłowca IS-2 77,65dB, natomiast dla śmigłowca IS-2 z wirnikiem współosiowym współbieżnym 69,35 dB.

Analiza interferencji śladów wirowych schodzących z łopat

Odpowiedni dobór parametrów dla wirnika współosiowego współbieżnego takich jak kąt rozchylenia wirników i rozstaw poosiowy wirników pozwoli wpłynąć na trajektorię schodzenia wirów z łopat.

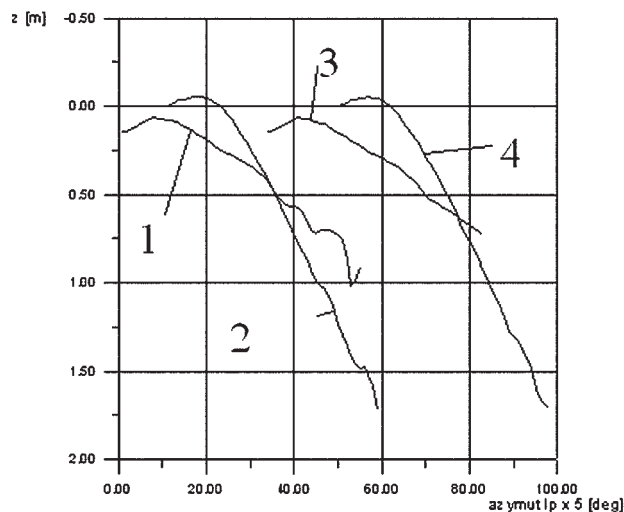
W koncepcyjnym rozwiązaniu przyjęto kąt rozchylenia wirników 56° , rozstaw poosiowy pomiędzy wirnikami 140 mm oraz różne długości łopat. Łopaty wirnika dolnego są krótsze o 0,1 m w stosunku do łopat wirnika górnego.

Liczba łopat wirnika wpływa znacząco na poziom drgań przenoszonych na kadłub. Wynika to z faktu oddziaływania zmiennych obciążeń na większą liczbę łopat, które są rozstawione o mniejszy kąt względem siebie. Dodatkowo dla wirnika z większą liczbą łopat zakładany ciąg wirnika będzie osiągniany dla mniejszych kątach nastawienia łopat. Podczas lotów z dużą prędkością zmniejszono możliwość wystąpienia efektów falowych na łopacie nacierającej lub niebezpieczeństwo pojawiania się oderwania na łopacie powracającej oddala się.



Rys. 11. 1-1 łopata; 2-2 łopata; 3-3 łopata; 4-4 łopata; 5-5 łopata; 6-6 łopata

Parametry geometryczne, odkształconego przez własne pole prędkości indukowanej, śladu wirowego wirnika współosiowego współbieżnego w płaszczyźnie równoległej do osi podłużnej śmigłowca w idealnym zawisie pokazano na rysunku 13. Widoczne zwięźnienie śladu pod wirnikiem.



Rys. 12. 1 – łopata pierwsza; 2 – łopata druga; 3 – łopata trzecia; 4 – łopata czwarta

Położenie względem płaszczyzny obrotów śladu wirowego czterech kolejnych łopat wirnika sześciolopatego dwupłaszczyznowego współosiowego współbieżnego w konfiguracji „L” przedstawiono na rysunku 14.

Analiza poziomu drgań generowanych na wirniku

Na poziom drgań generowanych na wirniku i przenoszonych na kadłub śmigłowca znaczący wpływ ma liczba łopat wirnika. Drgania na wirniku nośnym powstają w wyniku zmiennych sił aerodynamicznych działających na wirnik, opływu łopat wirnika przez niejednorodny strumień powietrza, interferencji śladów wirowych schodzących z łopat. Wirnik dwupłaszczyznowy współosiowy współbieżny z uwagi na swoją budowę generuje mniejsze drgania wynikające z interferencji śladów wirowych schodzących z łopat.

Wyznaczono następujące obciążenia wału w funkcji azymutu łopaty:

- T_z – siła wzdłuż osi wału (+) do góry,
- H – siła podłużna prostopadła do osi wału (+) do przodu,
- S – siła boczna prostopadła do osi wału (+) w kierunku azymutu 90 – łopata nacierająca,
- M_x – moment przechylający wał (+) w kierunku azymutu 270 – łopata powracająca,
- M_y – moment pochylający wał (+) nurkowanie,
- M_z – moment skręcający wał wirnika nośnego.

Wyniki obliczeń przedstawiono na poniższych wykresach. Dla porównania umieszczono wyniki obliczeń obciążeń wału głównego śmigłowca IS-2 (trzyłopatowego), śmigłowca IS-2 z wirnikiem sześciolopatowym (jednopłaszczyznowym o równomiernym rozkładzie kątowym łopat), oraz śmigłowca IS-2 z wirnikiem dwupłaszczyznowym współosiowym współbieżnym.

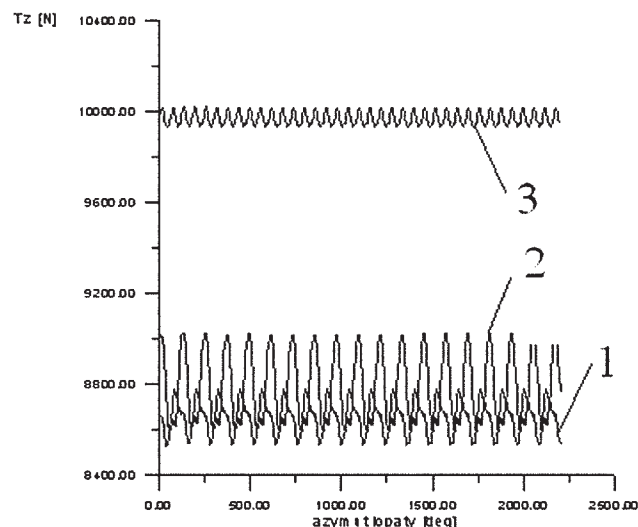
Na różnice wartości obciążeń średnich oraz amplitudy obciążeń wału miały wpływ następujące parametry:

- odległość płaszczyzny konstrukcyjnej wirnika od środka ciężkości śmigłowca,
- prędkość obrotowa wirnika,
- liczba łopat.

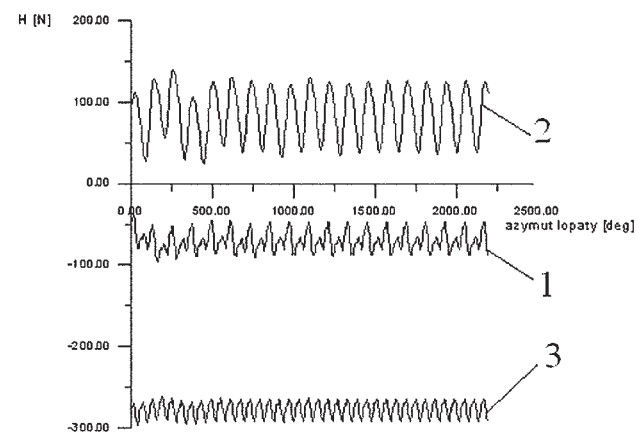
1 – Wirnik współosiowy współbieżny z przesunięciem fazowym

2 – Wirnik śmigłowca IS-2

3 – Wirnik sześciolopatowy jednopłaszczyznowy

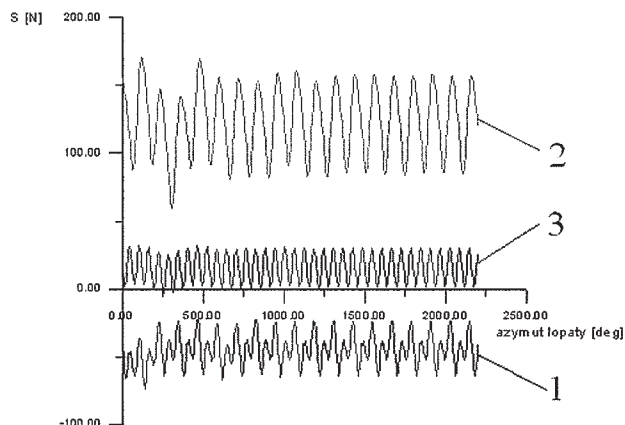


Rys. 13. Siła wzdłuż osi wału T_z (+) do góry w funkcji azymutu łopaty

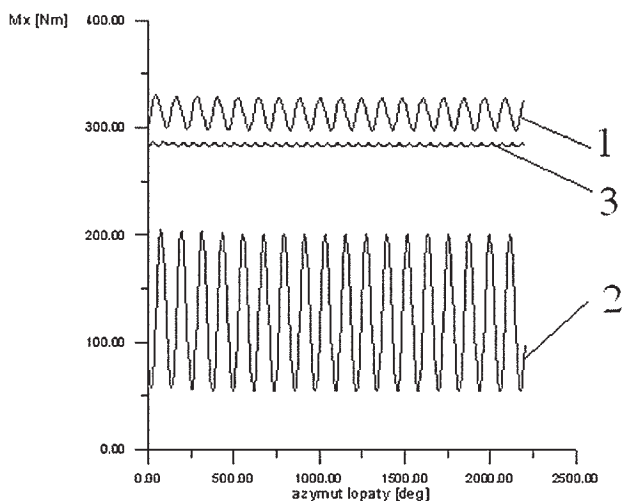


Rys. 14. Siła podłużna prostopadła do osi wału H (+) do przodu, w funkcji azymutu łopaty

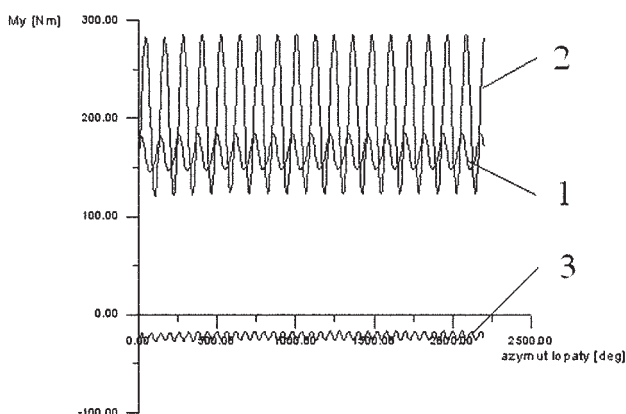
- 1 – Wirnik współosiowy współbieżny z przesunięciem fazowym
 2 – Wirnik śmigłowca IS-2
 3 – Wirnik sześciolopatowy jednopłaszczyznowy



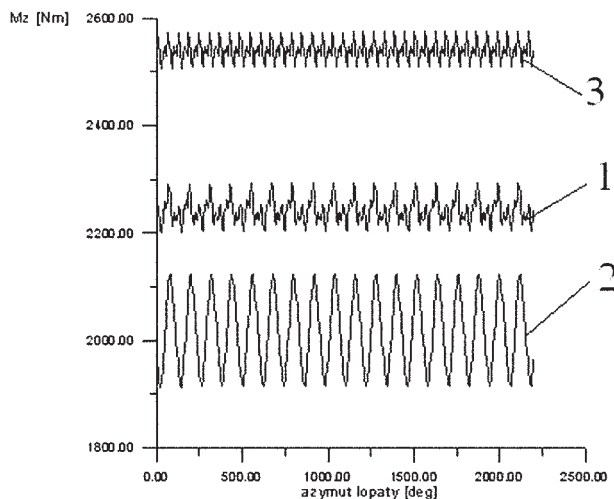
Rys. 15. Siła boczna prostopadła do osi wału S (+) w kierunku azymutu 90° – łopata nacierająca, w funkcji azymutu łopaty



Rys. 16. Moment przechylający wał M_x (+) w kierunku azymutu 270° – łopata powracająca, w funkcji azymutu łopaty



Rys. 17. Moment pochylający wał M_y (+) nurkowanie, w funkcji azymutu łopaty



Rys. 18. Moment skręcający wał wirnika nośnego w funkcji azymutu łopaty

Analizując powyższe wykresy można stwierdzić, znaczny spadek amplitudy obciążeń dla wirników sześciolopatowych (jednopłaszczyznowego i dwupłaszczyznowego współosiowego współbieżnego). Wynika to z faktu mniejszego rozmieszczenia kąтового łopat w wirnikach sześciolopatowych przedstawianych w analizie. Przesunięcie fazowe w wirniku współosiowym współbieżnym pomiędzy wirnikiem górnym a dolnym w zakresie 35° – 55° prócz przesunięcia fazowego obciążeń wału nie wpływa znacząco na wartość średnią i amplitudę obciążeń wału.

Na zmianę wartości średnich obciążeń wału dla wirnika współosiowego współbieżnego w porównaniu do wirnika trzyłopatowego śmigłowca IS-2 wpływ miały zmniejszenie prędkości obrotowej wirnika, rozstaw poosiowy pomiędzy wirnikiem górnym a dolnym wirnika współosiowego współbieżnego.

Analiza właściwości manewrowych śmigłowca IS-2 z wirnikiem współosiowym współbieżnym

Zmniejszenie prędkości obrotowej wirnika współosiowego współbieżnego w odniesieniu do wirnika IS-2 w połączeniu ze zwiększeniem liczby łopat jak i maksymalnych kątów nastawienia w pewnych manewrach oraz zwiększona masa wirnika, a zatem i całego śmigłowca pozwala sądzić, że zmianie ulegną własności manewrowe śmigłowca.

Wirnika dwupłaszczyznowy współosiowy współbieżny wykonany na bazie zespołów istniejącego klasycznego wirnika cechuje się zwiększonym zapasem do maksymalnej prędkości obrotowej wirnika ograniczonej wytrzymałością łopat. Pozwala to na wykonywanie manewrów energiczniej.

Analiza masowa wirnika współosiowego współbieżnego

Jedną z wad wirnika dwupłaszczyznowego współosiowego współbieżnego jest zwiększona masa takiego wirnika w porównaniu do tradycyjnych wirników. Na wzrost masy główny wpływ ma kompletny górny wirnik, tuleja dystansowa oraz zespół sterowania wirnika górnego.

Przybliżona masa wirnika śmigłowca IS-2 trzyłopatowego wynosi 85,527kg natomiast masa wirnika współosiowego współbieżnego, którego konstrukcja opiera się na istniejącej konstrukcji wirnika IS-2 wynosi 157,995kg.

O ile wzrost masy wirnika jest jego wadą, która pociąga za sobą spadek wielkości masy, którą można by dodatkowo przetransportować w postaci ładunku, bagażu to wzrost

masowego momentu bezwładności wirnika pozwala na zminimalizowanie strefy HV poprzez zwiększenie energii kinetycznej inercyjnego układu wirnika nośnego.

Czas spadku prędkości obrotowej od wartości nominalnej do wartości krytycznej oderwania wynosi:

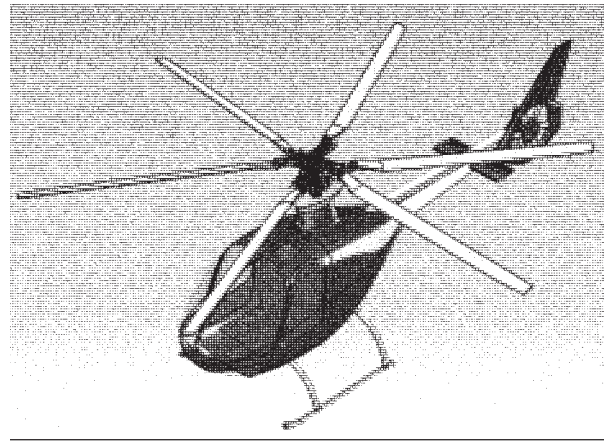
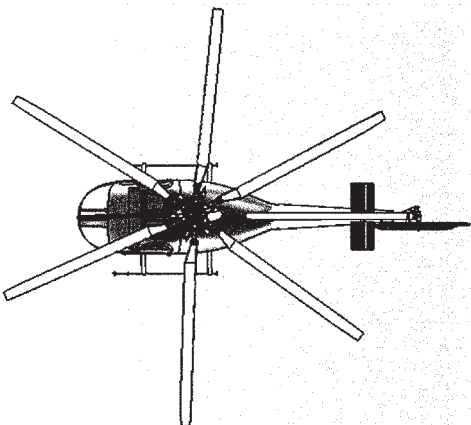
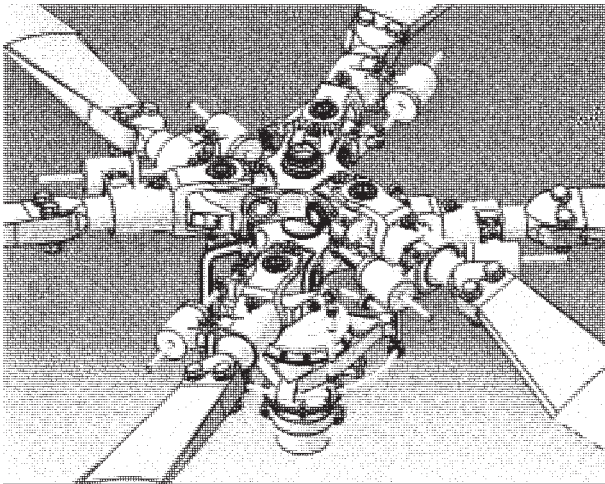
$$\text{IS-2 trzyłopatowy} \\ t = \frac{0,5 \cdot I_0 \cdot (\omega_0^2 - \omega_k^2)}{\Delta P} = 0,66s$$

IS-2 z wirnikiem współosiowym
współbieżnym

$$t = \frac{0,5 \cdot I_0 \cdot (\omega_0^2 - \omega_k^2)}{\Delta P} = 1,01$$

Zwiększony masowy moment bezwładności wirnika współosiowego współbieżnego wydłużył czas spadku prędkości obrotowej od wartości nominalnej do wartości krytycznej oderwania o prawie połowę. Daje to dłuższą chwilę na podjęcie decyzji przez pilota po awarii napędu i wykonanie odpowiednich procedur przejścia do lotu autorotacyjnego.

Masowy momenty bezwładności względem osi obrotu wirnika dla wirnika śmigłowca wyniósł IS-2 $J = 159,385 \text{ kgm}^2$, natomiast dla IS-2 z wirnikiem współosiowym współbieżnym $J = 318,06 \text{ kgm}^2$. Wzrost masowego momentu bezwładności dla śmigłowca IS-2 z wirnikiem współosiowym współbieżnym o ponad 158 kgm^2 dał możliwość znacznego zwiększenia energii kinetycznej inercyjnego układu wirnika nośnego, co w znacznym stopniu wpływa na zmniejszenie obszaru strefy HV dla śmigłowca IS-2.



Rys. 19. Widok ogólny śmigłowca IS-2 z wirnikiem współosiowym współbieżnym

5. WNIOSKI

Konstrukcja wirnika dwupłaszczyznowego współosiowego współbieżnego pozwala na budowę wirników sześciółopatowych (złożonych z dwóch wirników trzyłopatowych), oraz ośmiołopatowych (złożonych z dwóch wirników czterołopatowych).

Odpowiednie obniżenie prędkości końcówki łopaty powoduje niższy poziom ciśnienia akustycznego (SPL) dla takiego wirnika (zmniejszenie o około 7 dB).

Odpowiedni dobór parametrów wirnika takich, jak: kąt rozchylenia wirników (przesunięcie fazowe), rozstaw posiośowy pomiędzy wirnikiem górnym a dolnym, kąty nastawienia łopat wirnika górnego i dolnego, różne promienie łopat wirnika górnego i dolnego, pozwalają zmniejszyć interakcje łopat i wirów (BVI) co znacząco wpływa na hałas wytwarzany na wirniku oraz poziom drgań powstających na wirniku i przenoszonych na kadłub.

Wadą wirnika współosiowego współbieżnego jest jego zwiększona masa ze względu na zdublowanie kompletnych głowic i łopat wirnika, zastosowanie tulei dystansowej pomiędzy wirnikami oraz wydłużenie wału wirnika.

*Pracę wykonano w ramach projektu badawczego
MNiSW Nr 4T12C07130.*

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Golon G.:** *Analiza możliwości zmniejszenia hałasu śmigłowca na przykładzie PZLW3 Sokół*. Praca dyplomowa. Politechnika Lubelska. Lublin 2007.
- [2] Essential results obtained from research involved in scissors rotor Mikhail G. Rozhdestvensky Head of aerodynamics department Mill Helicopter Plant Moscow, Russia.
- [3] **Piłat M. B.:** *Nowoczesne wielołopatowe śmigło ogonowe do śmigłowca IS-2*. Praca dyplomowa. Politechnika Lubelska Lublin 2006.
- [4] *Wstęp do konstrukcji śmigłowców*. Praca zbiorowa pod redakcją K. Szabelskiego, B. Jancelewicza, W. Łucjanika. WKiŁ. Warszawa 1995.
- [5] **Niedziałek B., Perkowski W.:** *Układy napędowe ultralekkich śmigłowców*. Prace Instytutu Lotnictwa 1997, nr 2 (149-150).
- [6] **Filipiak P.:** *Koncepcja i analiza działania projektu wirnika nośnego współosiowego współbieżnego na przykładzie rozwiązania dla śmigłowca IS-2*. Praca dyplomowa. Politechnika Lubelska 2008.

P. Filipiak

IDEA AND PERFORMANCE ANALYSIS OF THE COAXIAL SYNCHRONOUS LIFTING ROTOR PROJECT ON THE SOLUTION EXAMPLE FOR THE IS-2 HELICOPTER

Summary

In the article is submitted the initial idea of lifting rotor with the blades number greater than five. Such solution will permit on the lowering noise level caused by the lifting rotor. Additionally, the increased number of the rotor blades will cause lowering of the rotor vibrations level, later transferred on the helicopter fuselage.

П. Филипяк

КОНЦЕПЦИЯ И АНАЛИЗ РАБОТЫ СООСНОГО И СИНХРОННОГО НЕСУЩЕГО ВИНТА НА ПРИМЕРЕ ВЕРТОЛЁТА IS-2

Резюме

В статье представлена предварительная концепция несущего винта с числом лопастей более пяти. Такое решение позволяет снизить уровень шума издаваемого несущим винтом. Дополнительно, повышение числа лопастей винта позволит обниси уровень вибрации появляющихся на несущем винте и передаваемых на фюзеляж вертолётa.