

UPROSZCZONA PIASTA DLA ŚMIGŁOWCA O MASIE STARTOWEJ 7000 KG

mgr inż. **Radosław RACZYŃSKI**
PZL Świdnik S.A.

W artykule przedstawiono koncepcję rozwiązania bezłożyskowego śmigła ogonowego śmigłowca wielozadaniowego klasy PZL Sokół. Podano analizy obliczeniowe toru sjonu kompozytowego metodą MES.

1. WSTĘP

Projekt śmigłowca klasy Sokół o masie startowej 7000 kg wymaga zaprojektowania nowego wirnika, sterującego dla większej masy śmigłowca, ze względu na konieczność spełnienia podstawowych wymagań charakteryzujących zdolność do lotu.

Zwiększenie masy śmigłowca, przy projektowych założeniach osiągowych, wymaga zwiększenia mocy silników, co automatycznie powoduje wzrost momentu reakcyjnego, który musi zostać zrównoważony przez śmigło ogonowe.

Śmigło ogonowe, oprócz tego, że powinno równoważyć moment reakcyjny i zapewniać sterowanie kierunkowe śmigłowca we wszystkich założonych warunkach lotu, powinno również charakteryzować się takimi cechami jak:

- niską masą konstrukcji,
- wysoką niezawodnością,
- niskim kosztem wytwarzania i eksploatacji.

Zaproponowane rozwiązanie powinno spełniać wyżej wymienione założenia.

W celu obniżenia kosztów wykonania prototypu oraz prób związanych z jego weryfikacją projekt zakłada:

- wykorzystanie łopatek śmigła ogonowego ze śmigłowca PZL Kania,
- możliwość zamocowania śmigła ogonowego na śmigłowcu PZL Sokół. Wymaga to zachowania geometrii mocowania do przekładni końcowej oraz zastosowania, jak w Sokole podatnego systemu przekazania ruchów sterowych z zachowaniem skoku trzonu sterującego. Ponadto wykorzystanie prototypowego rozwiązania na już istniejącym śmigłowcu zdecydowanie obniży koszty badań,
- wykorzystanie jak największej ilości elementów wchodzących w skład obecnego rozwiązania wirnika sterującego śmigłowca PZL Sokół, w celu obniżenia kosztów związanych z projektowaniem.

W konstrukcji nowej piasty zakładane jest wykorzystanie nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych, eliminujących takie elementy, jak: łożyska i przeguby oraz elementy współpracujące z nimi, które są bardzo kłopotliwe pod względem technologicznym i eksploatacyjnym, a wykonanie ich wymaga zastosowania wiele różnych procesów technologicznych oraz wykwalifikowanego personelu, co znacząco wpływa na koszty i cenę produktu finalnego.

2. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE ŚMIGŁA OGONOWEGO

W tabeli 2.1. przedstawione są założenia projektowe i osiągowie związane z takim śmigłowcem klasy PZL Sokół.

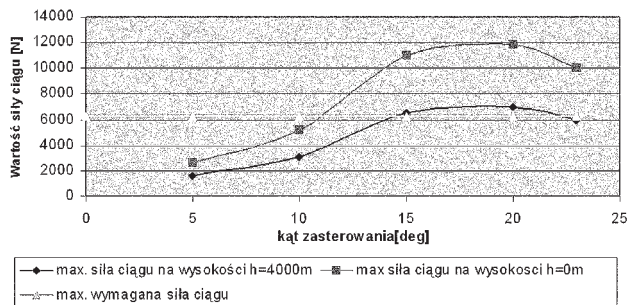
Założenia osiągowie i konstrukcyjne śmigłowca z wykorzystaniem łopatek ze śmigłowca Kania determinuje osiągi projektowanego śmigła ogonowego. Na rysunku 2.1 przedstawione są możliwości nowego śmigła ogonowego w funkcji wysokości lotu oraz kąta nastawienia.

Analiza energetyczna zaproponowanego układu 4-łopatowego śmigła ogonowego, wykazała dobre osiągi w projektowanym zakresie eksploatacyjnym oraz duży zapas siły ciągu DT. Zapas siły ciągu DT = 5000 [N] na wysokości H = 0 m zapewnia dużą manewrowość śmigłowca, co jest bardzo istotne w przypadku wykorzystania nowego wirnika sterującego w wojskowych śmigłowcach, szczególnie podczas wykonywania manewrów NOE na małej wysokości.

Tab. 2.1. Wstępne założenia projektowe śmigłowca klasy PZL Sokół do którego projektowane jest śmigło ogonowe

Masa startowa	W_{TO}	7000	kg
Srednica WN	D_{WR}	15,7	m
Srednica SO	D_{TR}	3,03	m
Cięciwa łopaty SO	C	0,25	m
Liczba łopat WN	N_{WR}	4	-
Liczba łopat SO	N_{TR}	4	-
Obciążenie tarczy WN	DL_{WR}	≈36	kg/m
Prędkość obrotowa WN (100%)	n_{WN}	270	obr./min
Prędkość kątowna WN (100%)	Ω_{WN}	28,6	rad/s
Prędkość obrotowa SO (100%)	n_{SO}	1372	obr./min
Prędkość kątowna SO (100%)	Ω_{SO}	143,6	rad/s
Prędkość projektowa	V_p	290	km/h
Zakres kątów nastawienia łopaty SO	φ	-10÷20	°
Odległość osi wirników	L_c	9,425	m
Zakres temperatur	t	-45÷50	°C

Podstawowe dane techniczne zawarte są w tabeli 2.1 pod względem rozwiązania konstrukcyjnego, w proponowanej modyfikacji, piasta zamocowana jest na sztywno do wału przekładni śmigła ogonowego. Łopata jest zamocowana do piasty sprężysto (na zginanie oraz skręcanie) oraz na sztywno w płaszczyźnie obrotu.



Rys. 2.1. Wykres osiowych energetycznych śmigła ogonowego

3. MODELE MES WĘZŁA MOCUJĄCEGO ŁOPATY ŚMIGŁA

W celu określenia zapasu nośności statycznej podstawowych elementów konstrukcyjnych takich, jak ramię elastyczne piasty, konieczne jest przeprowadzenie obliczeń wytrzymałościowych na obciążenia statyczne, które mogą wystąpić w warunkach eksploatacyjnych wirnika sterującego.

Podstawowe przypadki obliczeniowe to:

- rozciąganie dwukrotną siłą odśrodkową CF,
- zginanie ramienia piasty w płaszczyźnie ciągu, z uwzględnieniem wpływu siły odśrodkowej CF,
- zginanie ramienia piasty wywołane podmuchem wiatru podczas postoju śmigłowca,
- zginanie ramienia piasty w płaszczyźnie obrotu wywołane momentem reakcyjnym na śmigle ogonowym,
- obciążenia wywołane zmianą kąta nastawienia łopaty,
- analiza sprawdzająca ścinania międzywarstwowe.

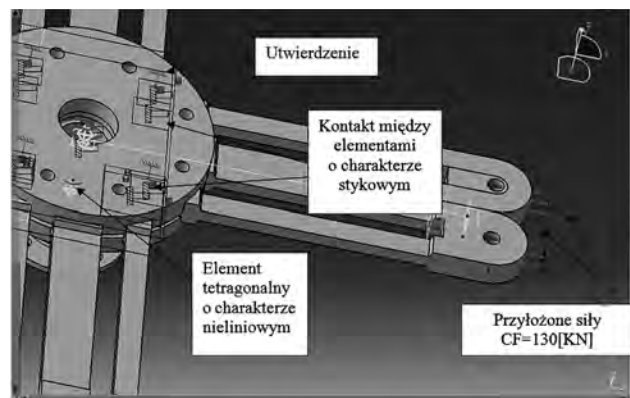
Jako materiał na ramiona sprężyste wybrano włókno szklane ze względu na dużą technologiczność tego materiału, jak i dobre własności wytrzymałościowe. Do obliczeń użyty został modelu kompozytu, który został zdefiniowany jako tzw. materiał ortotropowy 3D o własnościach mechanicznych różnych na swoich kierunkach.

W rzeczywistości jest to wiązka zbudowana z włókien szklanych przesyconych żywicą epoksydową o nazwie handlowej ER3005. W tabeli 3.1 przedstawione są podstawowe parametry wytrzymałościowe rovingu.

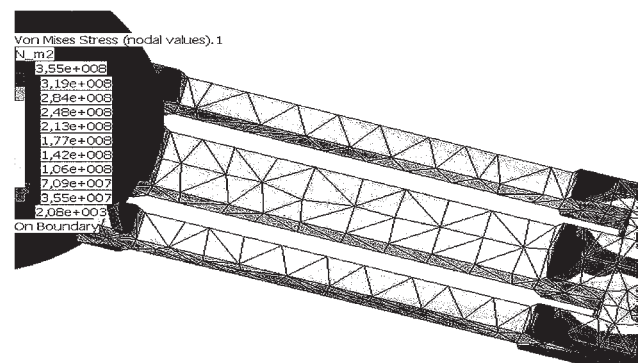
Tab. 3.1. Dane charakteryzujące pasy wiązek szklanych ER3005 oraz syciwa epoksydowego

Wytrzymałość doraźna na rozciąganie	R_m	980	[MPa]
Wytrzymałość doraźna na ścinanie międzywarstwowe	σ_{mnv}	41	[MPa]
Wytrzymałość doraźna na zginanie	σ_g	720	[MPa]
Współczynnik bezpieczeństwa	f	1,5	[-]
Napężenia dopuszczalne	σ_d	654	[MPa]

Poniżej przedstawiony został przykład budowy modelu przeznaczonego do analizy MES.



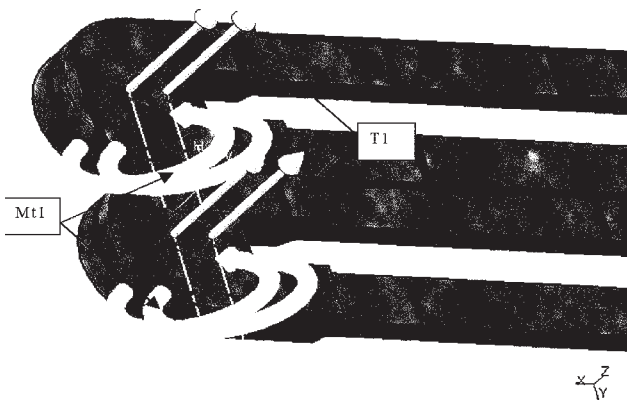
Rys. 3.1. Budowa modelu MES do obliczeń naprężeń w ramionach piasty



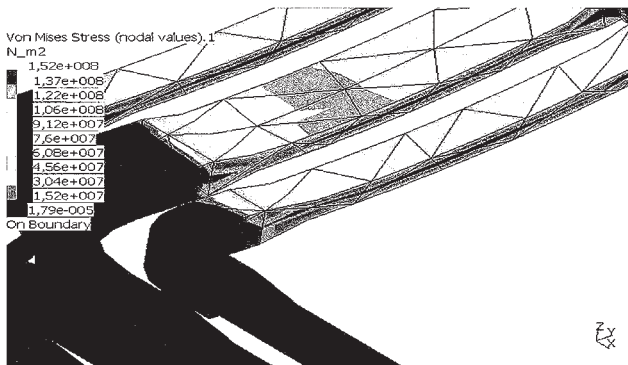
Rys. 3.2. Wyniki obliczeń naprężeń w ramionach elastycznych piasty przeprowadzone metodą MES

Jednym z przykładów obciążeń jakie mogą wystąpić podczas eksploatacji jest zginanie wywołane podmuchem wiatru o prędkości 40m/s.

Całkowita siła ciągu śmigła ogonowego wywołana podmuchem wiatru	$T=784$ [N]	73,4[kG]
Siła przypadająca na 1 łopatkę przyłożona na 0,7R	$T1=196$ [N]	18,5 [kG]
Zastępczy moment zredukowany do układu mocowania łopaty	$M_{T1}=141$ [Nm]	13,2[kGm]



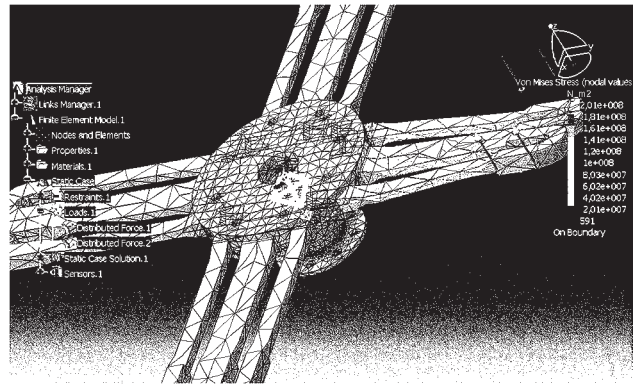
Rys. 3.3. Model obciążeń działających na ramię piasty w analizie MES



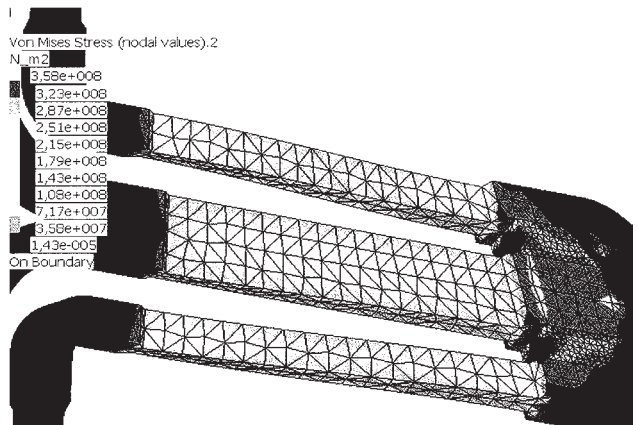
Rys. 3.4. Wynik obliczeń poziomu naprężeń wg metody MES zginania w płaszczyźnie ciągu wywołane podmuchem wiatru

Projekt wirnika sterującego wymaga zapewnienie zmiany kąta nastawienia łopaty w zakresie od -10° do $+20^\circ$. Ze względu na cykliczność pracy, wartość naprężeń jakie mogą wystąpić na skutek zmiany kąta jest tutaj bardzo istotna, ze względu na wytrzymałość zmęczeniową ramienia piasty. Zmiana kąta nastawienia łopaty realizowana jest poprzez odkształcenia sprężyste ramion piasty. W analizie naprężeń powstałych podczas przekręcania, wzięte zostały pod uwagę dwie modyfikacje konstrukcyjne, 1 – odsztywniona końcówka ramienia piasty, 2 – dosztywniona końcówka ramienia piasty.

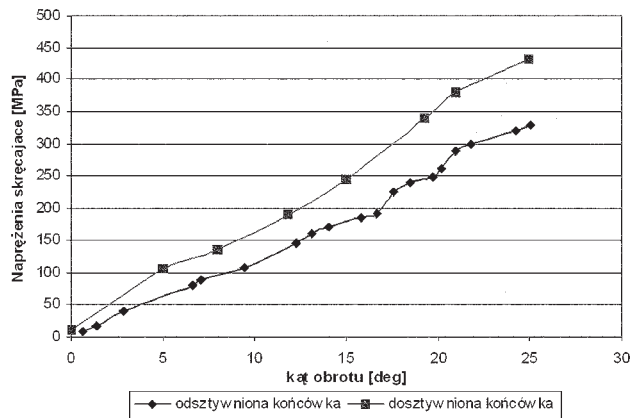
Aby wyznaczyć wartości naprężeń, jakie występują podczas zasterowania łopaty na określony kąt nastawienia, konieczne jest zbudowanie modelu obliczeniowego. Niestety nie można określić bezpośrednio wartości naprężeń skręcających, jakie występują przy odpowiednim kącie nastawienia. Metoda wymaga wprowadzenia pary sił, które spowodują skrócenie ramion o odpowiedni kąt mierzony w stosunku do położenia zerowego. Zmiana wartości pary sił spowoduje zmianę kąta zasterowania, dzięki temu można wyznaczyć wartość naprężeń skręcających w całym zakresie sterowania. W obliczeniach nie została uwzględniona siła odśrodkowa.



Rys. 3.5. Wyniki obliczeń wg metody MES skręcania ramienia piasty dla układu z odsztywnioną końcówką

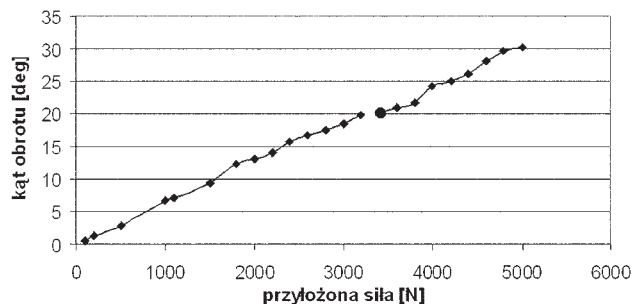


Rys. 3.6. Wynik obliczeń wg metody MES naprężeń w ramieniu piasty, od zmiany kąta nastawienia dla układu z dosztywnioną końcówką



Rys. 3.7. Naprężenia skręcające związane ze zmianą kąta zasterowania

zależność przyłożonej siły od kąta obrotu



Rys. 3.8. Wartość pary sił przyłożonych do układu w celu zmiany kąta zasterowania bez uwzględnienia siły odśrodkowej

Wprowadzenia dosztywnienia końcówki było zabiegiem konstrukcyjnym mającym na celu ułatwienia wykonania ramienia elastycznych oraz konieczność polepszenia warunków współpracy z innymi zespołami wchodzącymi w skład wirnika sterującego. Nowy projekt wirnika sterującego zakłada wykorzystanie wzmacniaczy hydraulicznych wspomagających realizację zmiany kąta zasterowania ze względu na duże opory związane ze sztywnością wiązek rovingowych (rys. 3.8). Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest wyeliminowanie układu niwelującego moment przegubowy na śmigle ogonowym.

4. ANALIZY OBLICZENIOWE (DRGANIA WŁASNE I OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE)

Do wyznaczenia częstości drgań własnych układu użyty został program AMPL.

Metodyka programu oparta jest na metodzie podziału łopaty na odcinki. Na długości każdego odcinka wartość sztywności w płaszczyźnie ciągu, obrotu, wartość kąta nastawienia łopaty jest stała. Skupiona masa umieszczona jest

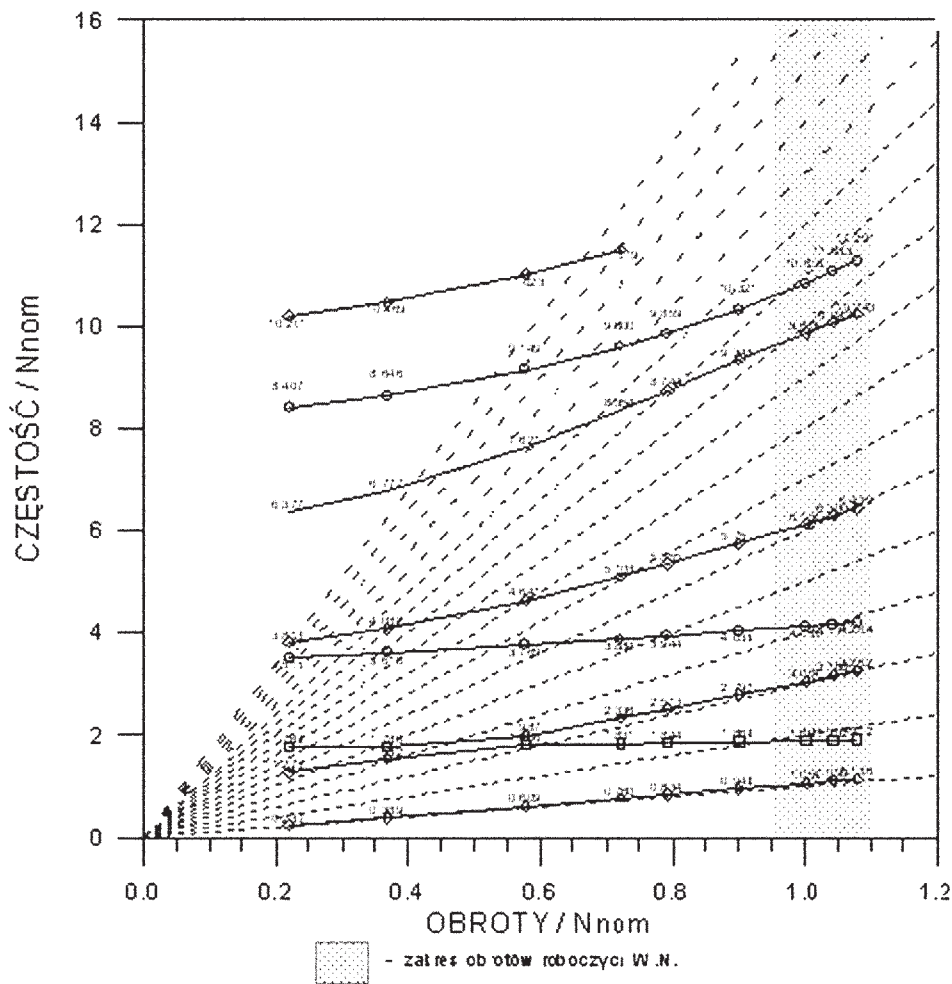
na krańcach odcinków, wartość masy skupionej równa się sumie połowie mas odcinków przylegającej do krawędzi odcinka.

Wartościami wejściowymi do obliczeń są dane zawarte w dokumencie obliczeniowym K/B0-154 „Obliczenia charakterystyk rezonansowych łopaty S.O nr rys. 90.38.000.00.01 śmigłowca PZL Kania oraz dane uzyskane z numerycznej analizy masy projektowanego zespołu piasty nr rys. 34.39.800.000.01.

W przypadku określenia wartości sztywności ramion rovingowych, w celu zweryfikowania otrzymanych analitycznie wyników użyta została metoda MES.

Wszystkie powyższe metody oszacowania wartości mas, momentów bezwładności i sztywności przeprowadzone zostały w programie CATIA V5 R16.

Na poniższych rysunkach zostały przedstawione wyniki obliczeń w postaci wykresów rezonansowych.



Śmigłowiec klasy sokół, wykres rezonansowy dla łopaty śmigła ogonowego, obroty nominalne 1372 obr/mir.

$\theta = 0^\circ$

Położenie przegubów:

pozomy $r_z = 0.095\text{ m}$

piorowy $r_n = 0.120\text{ m}$

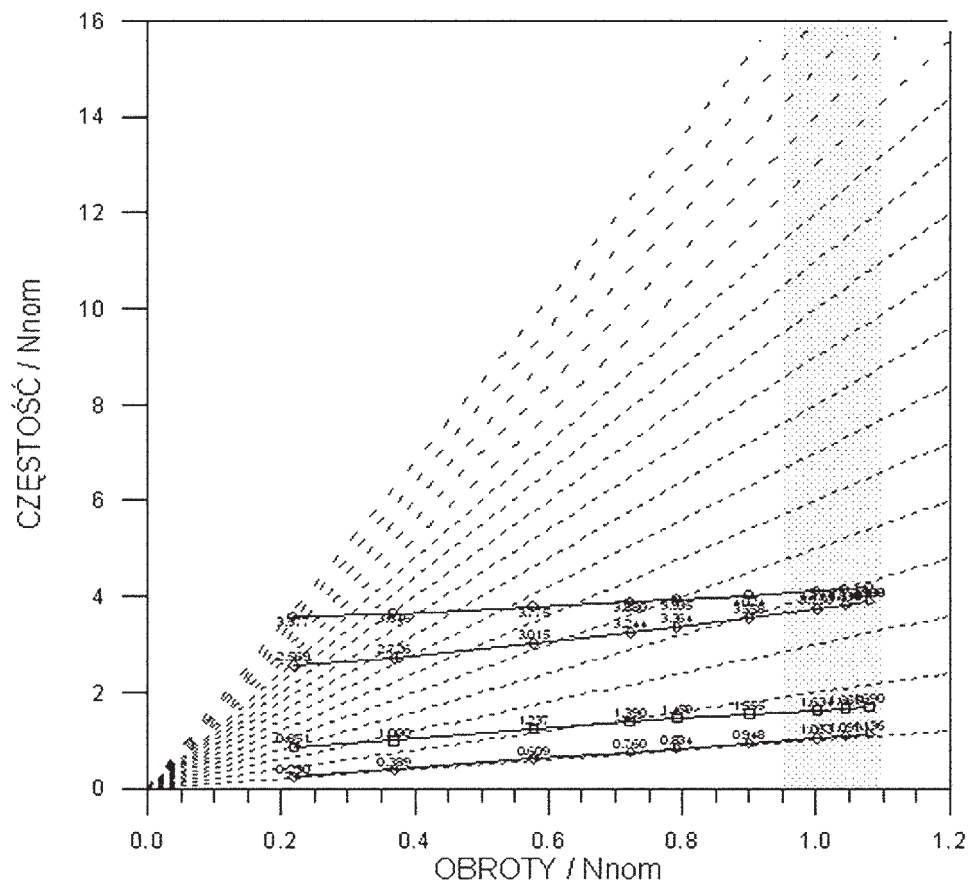
osicwy $r_o = 0.250\text{ m}$

◇ postać gęsta w płaszczyźnie ciągu

□ postać gęsta w płaszczyźnie obrotów

○ postać skąta

Rys. 4.1. Wykres rezonansowy śmigła ogonowego dla kąta nastawienia łopaty 0°



Śmigłowiec klasy sokół wykres rezonansowy dla łopaty wirnika ogonowego
 obroty nominalne 1372 obr/min
 $\theta = 20^\circ$

Położenie przegubów:
 poziomy rz = 0.095 m
 pionowy rn = 0.120 m
 osiowy ro = 0.250 m

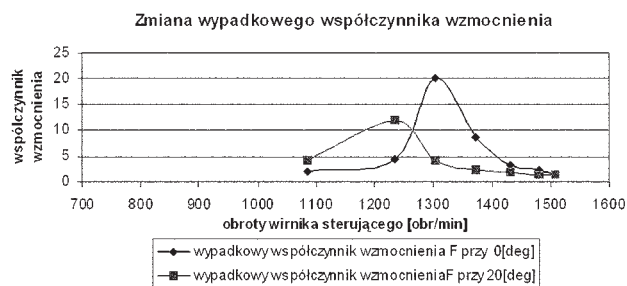
- ◇ postać giętna w płaszczyźnie ciągu
- postać giętna w płaszczyźnie obrotów
- postać skrętna

Rys. 4.2. Wykres rezonansowy śmigła ogonowego dla kąta nastawienia łopaty 20°

Jednym z problemów napotkanych podczas projektowania był rezonans łopaty śmigła ogonowego z 2 harmoniczną w płaszczyźnie obrotu. W celu odsunięcia się od częstości granicznej zastosowany został manewr polegający na dodaniu masy na końcu łopaty w celu zwiększenia siły dośrodkowej usztywniającej układ. Zabieg zwiększenia masy w przypadku projektowanego śmigła o 0,35 kg skutecznie odsunął częstość drgań własnych łopaty od częstości rezonansowej.

W celu oszacowania obciążeń dynamicznych wpływających z łopaty na piastę konieczne jest określenia wartości współczynnika wzmocnienia dynamicznego, odpowiedzialnego za wartość zmiennego momentu gnącego w płaszczyźnie obrotu.

W poniższej tabeli przedstawione zostały wyniki obliczeń wartości zmiennego momentu gnącego w płaszczyźnie ciągu. Obliczenia zostały przeprowadzone dla dwóch układów: 1- układ bez dodatkowej masy, 2- układ z dodatkową masą.

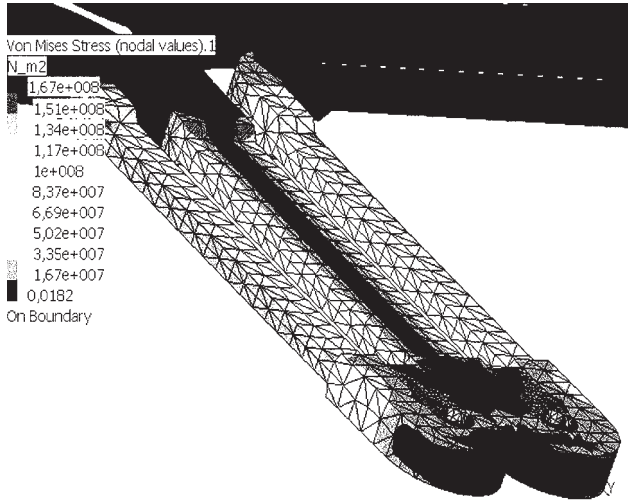


Rys. 4.3. Zmiana wypadkowego współczynnika wzmocnienia z prędkością obrotową s.o w układzie z dodatkową masą

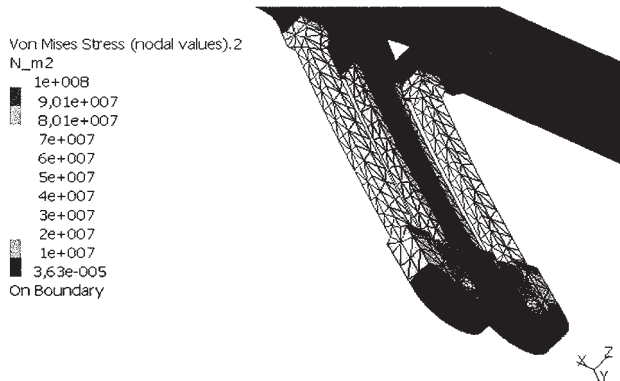
Tab. 4.1. Wyniki porównawcze dwóch układów

n_{so} [obr/min]	Kąt nastawienia [°]	M_{ph} bez dodatkowej masy [kGm]	M_{ph} z dodatkową masą [kGm]
1235	0	185	235
1235	20	431	640
1372	0	910	564
1372	20	241	152
1480	0	392	180
1480	20	150	113

Znając wartość zmiennego momentu gnącego w płaszczyźnie obrotu, wyznaczone zostały wartości naprężeń. Poniższe rysunki obrazują rozkład naprężeń w ramieniu piasty.



Rys. 4.4. Wyniki obliczeń poziomu naprężeń wg metody MES ramienia piasty przy kącie nastawienia 20 [deg]



Rys. 4.5. Wyniki obliczeń poziomu naprężeń wg metody MES w ramieniu piasty dla układu z dodatkową masą przy kącie nastawienia 20[deg]

Wyniki porównawcze z obliczeń MES zostały przedstawione w tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Zestawienie porównawcze wyników analizy

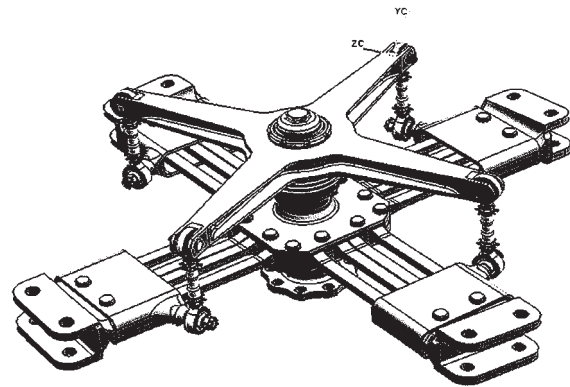
Obroty nominalne [obr/min]	Kąt nastawienia [°]	Naprężenia średnie w układzie bez dodatkowej masy [MPa]	Naprężenia średnie w układzie z dodatkową masą [MPa]
1372	0	520	280
1372	20	157	90

Na poniższym wykresie przedstawiono warunki pracy zmęczeniowej ramienia elastycznego, odniesionego do liczby cykli.

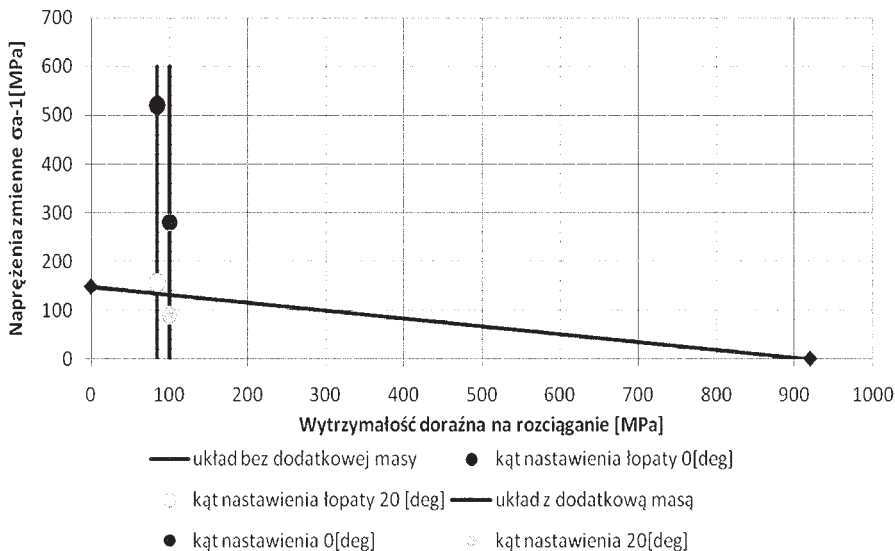
Dodatkowa masa $m_d = 0,350$ kg spowodowała obniżenie naprężeń średnich w przypadku obrotów nominalnych z 520 MPa do 280 MPa, przy kącie nastawienia łopaty 0° , a przy kącie 20° naprężenia spadły z 157 do 90 MPa, co w przypadku 0° kąta nastawienia występuje bardzo istotny spadek obciążeń. Modyfikacja układu znacznie zmniejszyła poziom obciążeń zmiennych w całym zakresie prędkości roboczych oraz biegu jałowego oraz w całym zakresie kątów zasterowania. Wstępna analiza wytrzymałości zmęczeniowej wykazała trzykrotny wzrost rezerwy wynikający ze znacznego obniżenia naprężeń związanych z obciążeniami zmiennymi.

5. RYSUNKI KONSTRUKCYJNE

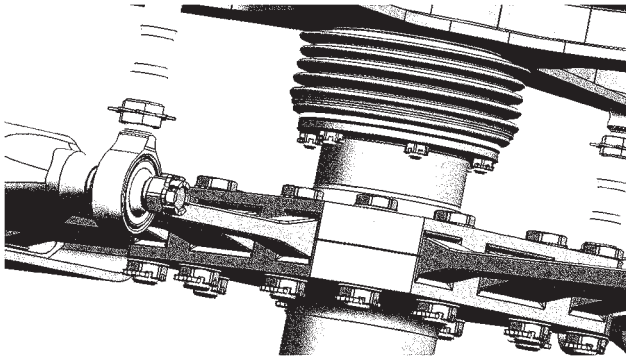
Na poniższych rysunkach przedstawiona została bezłożyskowa piasta śmigła ogonowego.



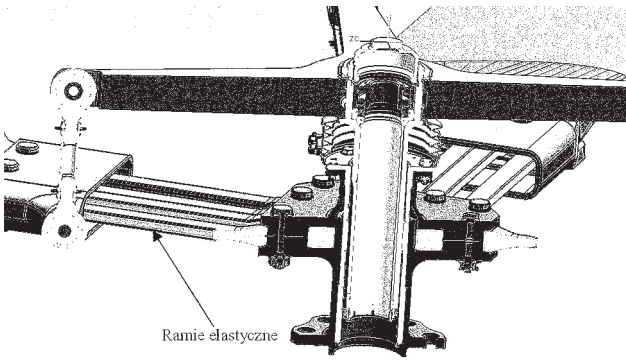
Rys. 5.1. Piasta bezłożyskowa śmigła ogonowego



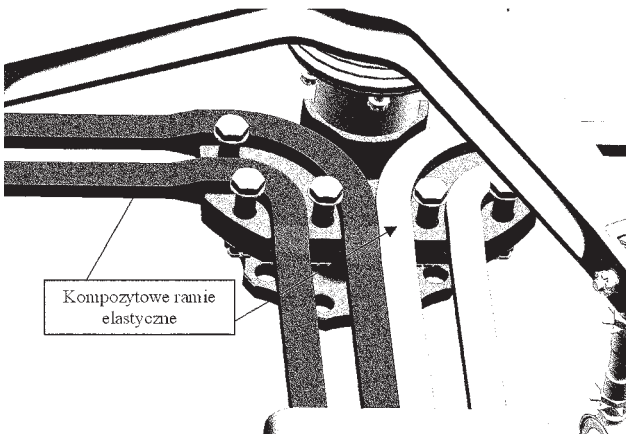
Rys. 4.6. Wykres zmęczeniowy dla próbki wiązek z włókien szklanych, dla 10^6 cykli



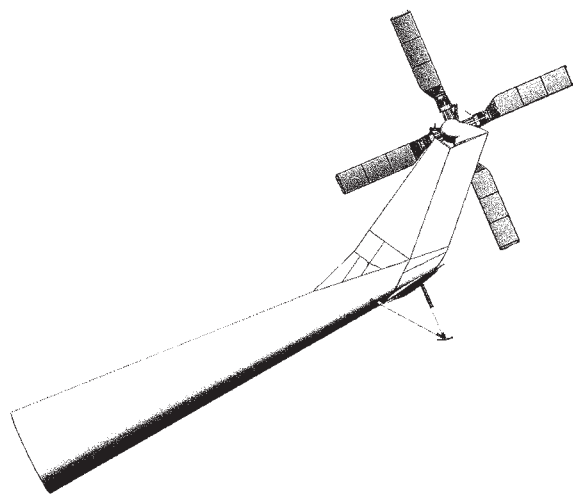
Rys. 5.2. Piasta bezłożyskowa śmigła ogonowego



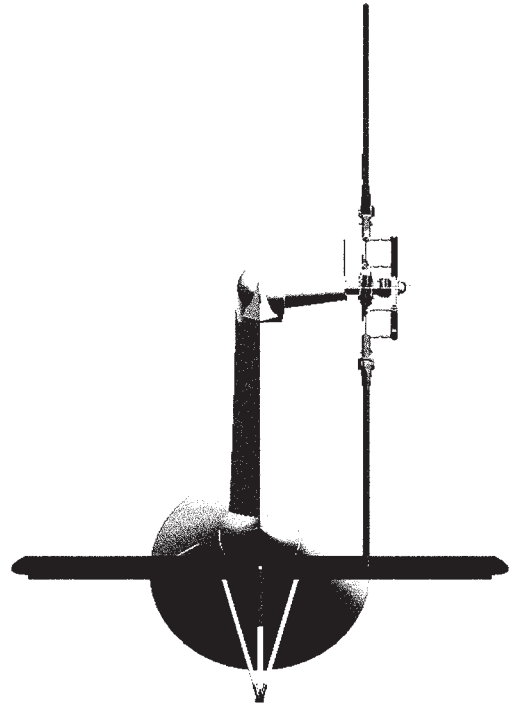
Rys. 5.3. Układ sterujący piasty



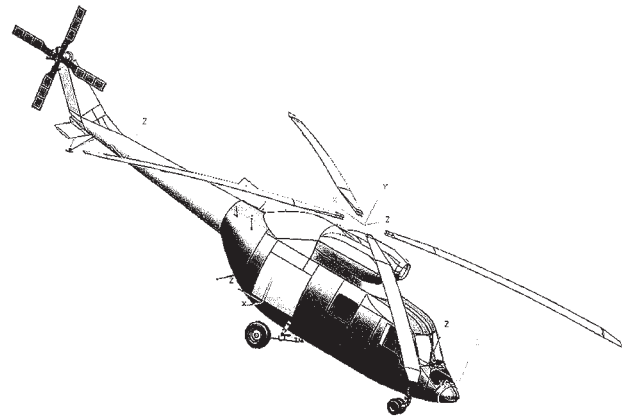
Rys. 5.4. Schemat układu ramienia elastycznego piasty śmigła ogonowego



Rys. 5.5. Widok ogólny belki ogonowej śmigłowca PZL Sokół ze zmodernizowanym wirnikiem sterującym



Rys. 5.6. Widok ogólny belki ogonowej śmigłowca PZL Sokół ze zmodernizowanym wirnikiem sterującym



Rys. 5.7. Widok ogólny śmigłowca PZL Sokół ze zmodernizowanym wirnikiem sterującym

Zastosowanie piasty bezprzegubowej powoduje znaczące obniżenie masy na samej piaście wirnika sterującego o 21 kg (wstępne wyniki, które w miarę rozwoju konstrukcji mogą ulec zmianie), co dodatkowo powoduje obniżenie balastu znajdującego się w nosie śmigłowca o 15 kg. Zysk na masie jest znaczący, według wstępnych obliczeń masa konstrukcji wyniesie 36 kg. Należy zaznaczyć, iż elementy piasty wirnika były liczone na śmigłowiec o masie startowej 7000 kg.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Klimkowski J.:** *Wykłady z budowy śmigłowców.* Lublin 2007/2008.
- [2] **Brzoska Z.:** *Wytrzymałość materiałów.* PWN, Warszawa 1972.
- [3] *Prace Instytutu Lotnictwa nr 151.* Wydawnictwo Naukowe Instytutu Lotnictwa.
- [4] *Composites* 1997, vol. 28A, No. 2.
- [5] *Dokument obliczeniowy K/B0-154 Obliczenia charakterystyk rezonansowych łopaty S.O nr rys. 90.38.000.00.01 śmigłowca PZL Kania.*
- [6] *Sprawozdanie z fabrycznej laboratoryjnej próby zmęczeniowej materiałów kompozytowych SP.1D-60.02/19/1.* Świdnik 2005r.
- [7] *Warunki techniczne zespołu śmigła ogonowego śmigłowca PZL-W3A 37.39/01.*
- [8] *Ilustrowany katalog części rozłącznych śmigłowca W3A.* Świdnik 2003 r.
- [9] *Sprawozdanie nr 1194/77 z obliczeń rezonansowych zespołu śmigła ogonowego śmigłowca PZL-W3.* Świdnik 1978 r.

R. Raczyński

SIMPLIFIED TAIL ROTOR HUB FOR HELICOPTER WITH 7000KG TAKE-OFF MASS

Summary

This article presents the design concept of bearingless tail rotor propeller hub for multitask class helicopter PZL Sokół. An computational analysis for composite torsion bar performed with FEM method is given.

Р. Рачиньски

УПРОЩЕННАЯ СТУПНИЦА ДЛЯ ВЕРТОЛЕТА СО СТАРТОВОЙ МАССОЙ 7000 КГ

Резюме

В статье представлена концепция бесподшипникового хвостового винта многоцелевого вертолета класса PZL Sokół. Предъявлен расчетный анализ композиционного торсиона методом МКЭ.