

## DYNAMICZNE OBCIĄŻENIA KADŁUBÓW SILNIKÓW TURBINOWYCH I ICH ZAMOCOWAŃ NA PŁATOWCACH

ARTUR ROWIŃSKI

*Instytut Lotnictwa*

### Streszczenie

*Kadłub silnika turbinowego poddawany jest w trakcie pracy obciążeniom o charakterze statycznym (takich jak zginanie, skręcanie, ściskanie i rozciąganie w kierunkach prostopadłym i równoległym do osi wirnika) oraz dynamicznym spowodowanych oddziaływaniem wirnika na łożyska. W fazie projektowania istotną rzeczą jest wstępne obliczenie własności dynamicznych silnika. Analiza drgań konstrukcji silnika jest dokonywana poprzez analizę odpowiednio uproszczonego modelu obliczeniowego. Opis matematyczny modelu dynamicznego z uwzględnieniem podatności poszczególnych jego elementów rozkładu mas i sposobów ich zamocowania pozwala na obliczenie prędkości krytycznych silnika i związanych z nimi postaci drgań.*

Słowa kluczowe: sztywność i podatność podpór, zespół nośny, częstotliwość i amplitudy drgań podpór, czujniki drgań

### SILY ODDZIAŁYWUJĄCE NA KADŁUB SILNIKA

Siły gazowe oddziałują na elementy wirnika sprężarki i turbiny silnika poprzez reakcję na energię kinetyczną czynnika gazowego tj. sprężanego powietrza i spalin oraz ciśnienia statycznego. Oddziałują na łopatki sprężarki i turbiny obciążając wirnik momentem obrotowym i siłą wzdłużną. Zakres oddziaływania siły na wirnik jest bardzo szeroki i wynika zarówno ze zmiany ciśnień wewnątrz kanałów przepływowych silnika związanej ze zmianami prędkości obrotowej, mocy lub ciągu oraz oddziaływania otoczenia tj wysokości i prędkości lotu. Siły gazowe działają na zespół wirnikowy w sposób quasi-statyczny – w trakcie jednego cyklu pracy silnika następuje co najmniej jeden cykl zmiany obciążenia od sił gazowych.

Jedynie przepływ powietrza i spalin poprzez uszczelnienia labiryntowe może być przyczyną drgań, ale z powodu małych powierzchni pierścieni labiryntów powietrznych i niewielkich wydatków masowych przepływającego przez nie gazu, nie powoduje dużych obciążeń wirnika.

Siły masowe oddziałujące na wirnik są związane z:

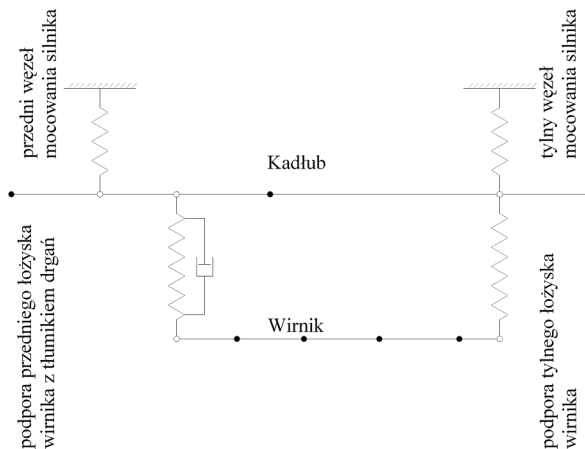
- ruchem obrotowym wirnika i zmianami wielkości tego ruchu. Ustalony ruch obrotowy wirnika powoduje obciążenia jego elementów siłami odśrodkowymi o przyspieszeniach do 6000 g na obwodzie. Czas zmiany prędkości obrotowej w czasie przyspieszeń lub opóźnień jest ograniczony poprzez układ paliwowy kontrolujący narastanie obciążenia cieplnego turbiny i dlatego nie może być zbyt krótki. Przyrost prędkości obrotowej od 60% do 100% trwa do

- 4 s (dla silnika jednoprzepływowego), więc moment obrotowy obciążający wirnika jest mały.
- ewolucjami samolotu, które nadają mu prędkości kątowe wokół trzech osi w przestrzeni. Manewry samolotu mają największy wpływ na reakcje łożysk wirnika w skutek działania momentów giroskopowych. Wynika to z wysokich prędkości obrotowych wirnika i prędkości kątowej samolotu podczas ewolucji. Przeciążenia w czasie ewolucji samolotu wywołują siły poprzeczne a zatem odpowiednie reakcje łożysk. Jednak ze względu na niewielką masę wirnika obciążenia te nie są znaczące dla ich trwałości.
  - niewyważenie dynamiczne wirnika powoduje powstanie siły i momentu wirującego z jego prędkością. Pomimo małych wielkości statycznych niewyważenia rzędu kilku gcm wskutek wysokich prędkości obrotowych, a także nieliniowych odkształceń wirnika, siły wirujące mogą osiągnąć wartości rzędu kilkudziesięciu daN. Oprócz dodatkowego obciążenia łożysk wirujące siły i momenty pochodzące od niewyważenia są jednym ze źródeł drgań wirnika a zatem i całego silnika.

Zewnętrzny siłami wymuszającymi drgania kadłubów są:

- pulsacje sił gazowych powstałe w skutek oddziaływania strumienia gazów w kanale głównym silnika na elementy kadłubów takich jak stójki i wieńce aparatów kierujących, komór spalania.
- oddziaływanie mechaniczne kół zębatych i innych elementów przeniesienia napędu z głównego wirnika na agregaty pomocnicze. Bardzo istotnym elementem powodującym dodatkowe obciążenia łożyska jest poślizg łożyska, który wynika ze zbyt małej siły tarcia na elementach tocnych w stosunku do siły wymuszającej prędkość obrotową. Zjawisko to może powodować powstanie dodatkowych drgań separatora kulek lub rolek łożyska.

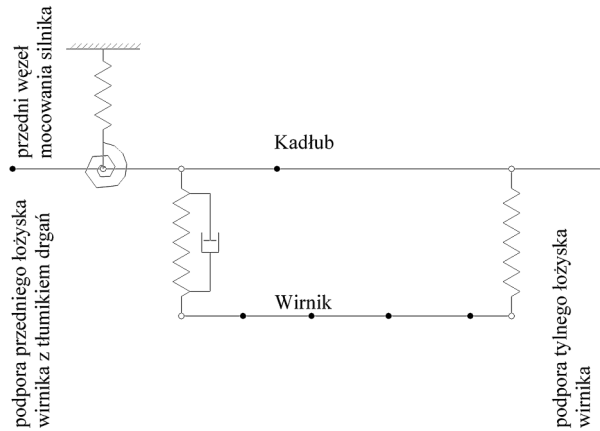
Na rys. 1 i 2 przedstawiono modele dynamiczne silnika z zaznaczeniem podatności podpór wirnika i mocowania silnika na płatowcu.



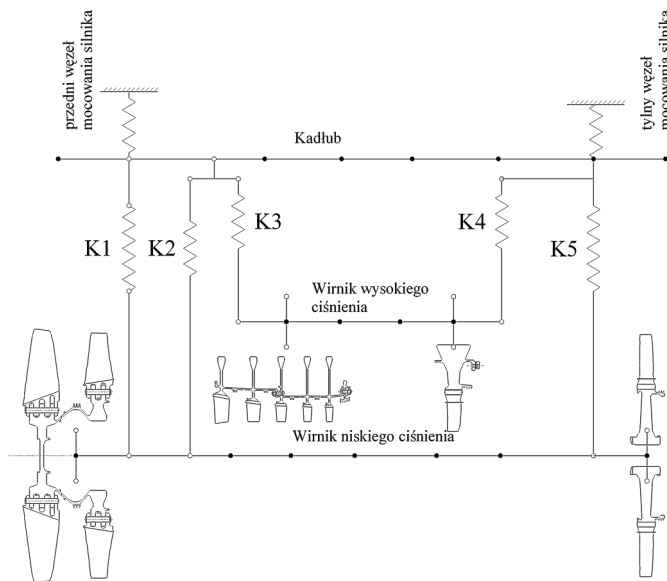
Rys. 1. Model dynamiczny układu jednowirnikowego – dla drgań poprzecznych

Poziom drgań wirnika jest zależny od jego prędkości obrotowej. Oddziaływanie sił statycznych i dynamicznych na kadłuby w wyniku reakcji wirnika na obciążenia w kierunku promieniowym i osiowym jest redukowane poprzez umieszczenie pomiędzy łożyskiem a sztywną podporą elementów tłumiących drgania (np. tłumika olejowego) oraz dobrania zakresów pracy silnika tak, aby wszystkie prędkości obrotowe odpowiadające kolejnym częstotliwościom harmonicznym były poza zakresami roboczymi prędkości obrotowych silnika. Praca przy prędkościach odpowiadających krytycznym powoduje nie tylko wzrost drgań silnika w elementach

wirnika i obciążen łożysk, ale może w skrajnym przypadku doprowadzić do zacierania łopatek wirnika, kierownic i labiryntów.



Rys. 2. Model dynamiczny układu jednowirnikowego- dla drgań podłużnych



Rys. 3. Model dynamiczny układu dwuwirnikowego na przykładzie silnika D-18

Pierwsza krytyczna prędkość obrotowa powinna znajdować się poniżej prędkości obrotowej biegu jałowego, druga powyżej prędkości maksymalnej. W tym przypadku podczas rozruchu wirnik przechodzi przez prędkości krytyczne, ale ze względu na małą prędkość obrotową amplitudy nie są duże. Prędkość krytyczna musi być dostatecznie oddalona od prędkości wiatrakowania zespołu wirnika, która jest przeważnie niższa od prędkości biegu jałowego. Niezbędne jest także tłumienie w węzłach łożyskowych dla zmniejszenia amplitud drgań dla krytycznych prędkości obrotowych. Na rys. 3 przedstawiono model dynamiczny silnika dwuwirnikowego zbudowanego dla zaprojektowanego w ILot dwuprzepływowego silnika D-18 przeznaczonego do napędu wersji rozwojowych samolotu „Iryda”.

Oprócz krytycznych prędkości obrotowych odpowiadających giętnym drganiom układu wirnik - kadłub, wirnik podlega drganiom skrętnym. Czynnikiem wymuszającym drgania skrętne jest oddziaływanie śmigła w silnikach śmigłowych. Podobnie jak w przypadku częstotliwości krytycznych niezbędne jest wyeliminowanie rezonansów dla ustalonych zakresów pracy silnika.

## OCENA OBCIĄŻEŃ KADŁUBÓW SILNIKÓW TURBINOWYCH

Względy konstrukcyjne nakazują ocenę nie tyle wartości naprężeń i osiąganych współczynników bezpieczeństwa względem granic sprężystości użytych materiałów analizowanej części kadłuba w ekstremalnych warunkach cieplnych, lecz wielkości jej odkształceń cieplnych i sprężystych. Kadłuby silników turbinowych mają co najmniej dwie grupy węzłów konstrukcyjnych wymagających precyzyjnej oceny przemieszczeń i odkształceń promieniowych w których muszą występować ściśle określone dokładności wzajemnego położenia części współpracujących. Dotyczy to bieżni łożysk na czopach wałów wirników w podporach kadłuba, luzów wierzchołkowych pomiędzy łopatkami roboczymi wieńców wirnikowych sprężarek i turbin oraz powierzchni współpracujących wszystkich uszczelnień labiryntowych. Odnosi się to do pracy w warunkach ustalonych i niestabilnych, w całym zakresie prędkości obrotowych silnika i warunków lotu statku powietrznego. Obciążenia kadłubów siłami i momentami częściowo równoważą się w samym silniku, a przenoszone na płatowiec węzłami mocowania to reakcyjne momenty sprężarek i turbin oraz ciśnienia w kanałach przepływowych z wyjątkiem ciągu w silnikach odrzutowych, a ciągu śmigła i jego momentu obrotowego w silnikach śmigłowych i śmigłowcowych.

Węzły mocowania według przepisów lotniczych są klasyfikowane jako elementy krytyczne silnika. Na węzły mocowania w każdym typie silników przenoszone są obciążenia od siły ciężkości w warunkach lotu ustalonego i zwiększone obciążenia podczas lotu po torach krzywoliniowych statku powietrznego.

Zminimalizowanie wpływu reakcyjnych momentów obrotowych w silnikach śmigłowych można osiągnąć przez zastosowanie śmigieł przeciwbieżnych, co jest charakterystyczne w pojawiających się samolotach z napędem śmigło-wentylatorowym. Cienkościenne konstrukcje zewnętrznych ścian kadłubów, które są jednocześnie ścianami kształtującymi kanały przepływowe silników, zawieszane punktowo w węzłach mocowania silników w płatowcu odkształcają się podczas przeciążeń poprzecznych. Wartości tych odkształceń stanowią mogą o wyborze montażowych luzów wierzchołkowych łopatek sprężarek i turbin. Natomiast stosowanie coraz wyższych wartości sprężu w nowopowstających konstrukcjach, zwłaszcza w wentylatorowych silnikach odrzutowych, sprzyja powstaniu osiowo-symetrycznych odkształceń zewnętrznych ścian kadłubów, co może w znacznym stopniu niwelować odkształcenia podczas przeciążeń siłami poprzecznymi.

## PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH ZESPOŁU KADŁUBÓW

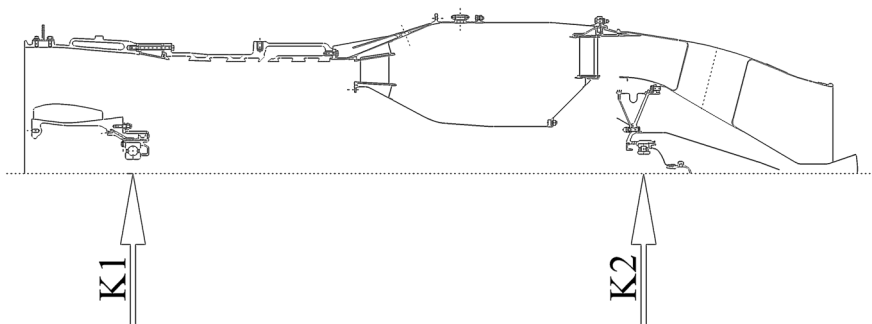
Na kolejnych rysunkach (4; 5 oraz 6) przytoczono charakterystyczne przykłady kadłubów jednowirnikowego silnika odrzutowego śmigłowcowego oraz dwuwirnikowego dwuprzepływowego silnika odrzutowego.

### Jednoprzepływowy silnik odrzutowy K-15

Na czopie pierwszej tarczy wirnika sprężarki osadzone jest czteropunktowe łożysko kulkowe, którego zewnętrzna bieżnia jest osadzona w sprężystej tulei. Podatność tulei w kierunku

promieniowym osiągnięto poprzez wykonanie szeregu wycięć w jej cylindrycznej części. Zewnętrzna powierzchnia tulei gniazda łożyska współpracuje z tłumikiem olejowym stanowiącym część kadłuba wlotowego zespołu łożyska. Luz pomiędzy tuleją sprężystą a tuleją stalową wciśniętą w gniazdo znajdujące się w kadłubie wlotowym określa dopuszczalne promieniowe przemieszczenie łożyska. Przestrzeń pomiędzy tulejami ograniczona ich powierzchniami oraz dwoma pierścieniami sprężystymi typu O'ring, wypełniona jest olejem pod ciśnieniem 3 barów. Drgania wirnika przenoszone są na kadłub wlotowy, poprzez elementy łożyska i układu tłumienia. Na zewnętrznej pokrywie kadłuba nad stójką łączącą jego cylinder wewnętrzny z zewnętrznym, zamocowany jest czujnik piezoelektryczny rejestrujący drgania wirnika w kierunku promieniowym do jego osi. Sygnał z czujnika jest przekazywany do bloku elektronicznego i dalej do bloku ostrzegania i służy do sygnalizacji przekroczenia dopuszczalnego poziomu.

Tylna podpora wirnika zamocowana jest w zespole dyszy wylotowej. Na czopie zamocowana do tarczy turbiny osadzone jest łożysko wałeczkowe. Zewnętrzna bieżnia łożyska osadzona jest w gnieździe w tarczy podpory bez luzu promieniowego. W badaniach stwierdzono, że maksymalny poziom drgań występuje przy 78.6% prędkości maksymalnej.



Rys. 4. Zespół kadłubów silnika K-15. K1 i K2 sztywności podpór łożyskowych

### Silnik śmigłowy GTD-350

Silnik GTD-350 jest zbudowany w układzie dwuwirnikowym. Wirniki sprężarki, turbiny sprężarki oraz oddzielnej turbiny napędowej są oddzielnie łożyskowane na pięciu podporach. Wirnik sprężarki jest zamocowany na dwóch łożyskach.

Przednie łożysko rolkowe wirnika sprężarki jest zamontowane w środkowej części osłony wewnętrznej. Przenosi reakcje od sił poprzecznych i umożliwia wzdłużne przemieszczanie się przedniego czopa wału wynikające z rozszerzania się wirnika w wyniku obciążenia cieplnego. Między powierzchniami pierścienia łożyska i środkową częścią osłony wewnętrznej umieszczone są dwie tulejki - gładka i sprężysta. Tulejka sprężysta jest tłumikiem drgań łożyska. Aby pierścień łożyska nie stykał się bezpośrednio z tulejką sprężystą i nie mógł się po niej ślizgać, między pierścieniem łożyska a tulejką sprężystą osadzona jest tulejka gładka. Tulejka ta jest zabezpieczona przed obracaniem się.

Dopuszczalną wartość niewyważenia wirnika osiąga się poprzez zdjęcie materiału na elemencie wyważającym z przedniej strony wirnika i wkładki wyważającej zamocowanej przed II łożyskiem wirnika (tylnym).

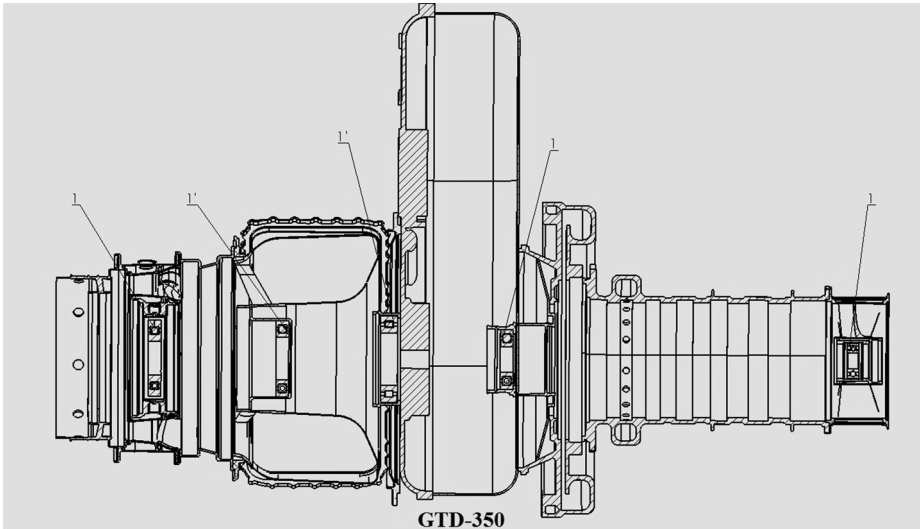
Wirnik turbiny sprężarki osadzony jest na dwóch łożyskach tocznych. Tylnie łożysko kulkowe (II silnika) przenosi obciążenia poprzeczne i wzdłużne, przednie łożysko rolkowe (IV silnika) przenosi obciążenia wyłącznie poprzeczne. Zewnętrzny pierścień łożyska III osadzony jest

w gnieździe łożyska, przy czym pomiędzy gniazdem a zewnętrznym pierścieniem łożyska umieszczone są dwie cienkościenne tulejki. Zewnętrzna tulejka - sprężysta służy do tłumienia drgań promieniowych łożyska. Wewnętrzna tulejka oddziela tulejkę sprężystą od pierścienia zewnętrznego łożyska i zabezpiecza go przed obracaniem.

Niewyważenia wału turbiny sprężarki usuwane są przez przestawianie pierścieni wyważających, dodawanie wkładki wyważającej pod półką labiryntu powietrznego po wewnętrznej stronie turbiny oraz poprzez zbieranie materiału na od-stopniowanej powierzchni wału.

Wirnik turbiny wyważony jest dynamicznie. Do usunięcia niewyważenia z tylnej strony na tarczy turbiny, a z przedniej przed łożyskiem II na wewnętrznej powierzchni koła zębatego napędu przekładni, stosuje się wkładki wyważające.

Wirnik turbiny osadzony jest na dwóch łożyskach: rolkowym (V łożysko silnika) i kulkowym (IV łożysko silnika) – umieszczonych w kadłubie kolektora gazu. Gniazdo łożyska kulkowego osadzone jest ciasno w kadłubie kolektora gazu na wąskim pasku przy kołnierzu, a pozostała część gniazda umieszczona jest w kadłubie kolektora spalin z luzem na powierzchni zewnętrznej. Konstrukcja taka zabezpiecza przed przenoszeniem drgań wirnika turbiny na kadłub.

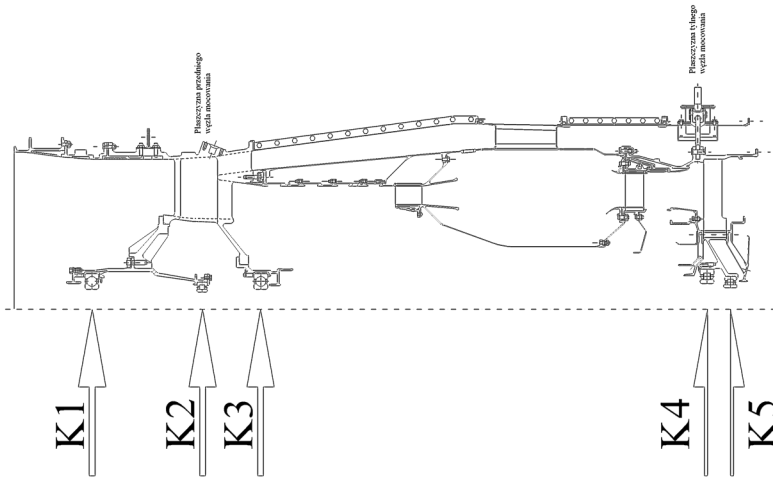


Rys. 5. Przekrój silnika GTD 350 – zespół kadłubów.

1-1-1 - łożyska wirnika sprężarki, 1'-1'- łożyska wirnika turbiny napędowej

### Silnik dwuwirnikowy D-18

Zespół wirnikowy silnika jest zbudowany z dwóch, oddzielnie łożyskowanych wirników – wysokiego i niskiego ciśnienia. Podpory obydwu wirników znajdują się w kadłubie pośrednim, połączonym z kadłubem wlotowym oraz w kadłubie turbiny. Wirnik niskiego ciśnienia składający się z dwustopniowego wentylatora i jednostopniowej turbiny, ze względu na niską wartość krytycznej prędkości obrotowej, podparty jest na trzech łożyskach. Wirnik wysokiego ciśnienia, w skład którego wchodzi sześciostopniowa sprężarka i jednostopniowa turbina, podparty jest na dwóch łożyskach. Wewnątrz kadłuba pośredniego znajduje się przednie kulkowe łożysko wirnika wysokiego ciśnienia. Do przedniej ściany kadłuba przymocowana jest tuleja, w której zostały osadzone łożyska K1 wentylatora (przednie kulkowe) i K2 (tylne wałeczkowe), zaznaczone na rys. 6.



Rys. 6. Zespół kadłubów silnika D-18

Na zewnętrznej pokrywie kadłuba pośredniego znajdują się dwa piezoelektryczne czujniki drgań mierzące przyspieszenia w kierunku promieniowym i obwodowym.

Łożyska wałeczkowe K4 i K5 zamocowane są w gniazdach znajdujących się w kadłubie turbiny. Podparcie turbiny jest wspólne dla turbiny wysokiego i niskiego ciśnienia. Wszystkie łożyska są sztywno osadzone w kadłubach silnika. Dopuszczalne niewyważenia dla wirników wynoszą 4 i 5 gcm i są korygowane poprzez odpowiednie rozłożenie łopatek wirnikowych na poszczególnych stopniach sprężarki, wzajemne ustawienie wałów par wałów wentylatora i turbiny niskiego ciśnienia oraz sprężarki i turbiny wysokiego ciśnienia i redukcję mas korekcyjnych na wybranych powierzchniach tarcz turbin, wentylatora i pierwszego stopnia sprężarki.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Instytut Lotnictwa – Zakład Silników Lotniczych „Projekt Wstępny silnika D-18 Obliczenia sił poprzecznych obciążających łożyska pędni”- Warszawa 1987r.
- [2] Instytut Lotnictwa – Zakład Silników Lotniczych „Opis silnika K-15”- Warszawa 1993r.
- [3] Instytut Lotnictwa – Zakład Silników Lotniczych- „Instrukcja eksploatacji silnika K-15”- Warszawa 1993 r.
- [4] Instytut Lotnictwa – Zakład Silników Lotniczych- „Sprawozdania i protokoły z badań silników K-15, K-16, SO-3, D-18, GTD-350”