

Dynamic behaviour of the airplane piston engine

Abstract: The possibility of reducing the vibrations of airplane piston engine was studied. Experimental tests and numerical simulation methods were applied for the passive and active vibroisolation. Engine corps was suspended on elasto-damping mounts, whose nonlinear characteristics were identified with own, patented method. The investigation resulted in procedures for choosing and checking appropriate rubber mounts and their configuration. The aeroengine behavior simulation in Matlab+Simulink environment was extended to investigate the opportunity of semi-active vibroisolation and sustaining stochastic excitations. Computational comparison of many possible suspension versions were verified by vibration measurement checks of piston “boxer” engine assembled with few chosen mounting sets to the airplane engine frame.

Key words: aeroengines, dynamic behaviour, vibrations, suspension

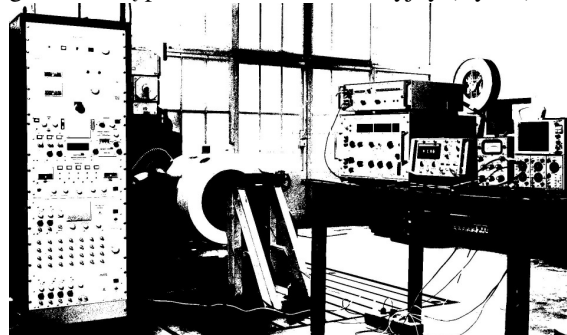
Dynamika tłokowego silnika lotniczego

Streszczenie: Zbadano możliwości zmniejszenia drgań tłokowego silnika lotniczego. Zastosowano metody doświadczalne i symulacyjne do badań wibroizolacji pasywnej i aktywnej. Korpus silnika był zawieszony na lordach podatno-tłumiących, których nieliniowe charakterystyki zostały wyznaczone własną, opatentowaną metodą. Wynikiem badań są procedury doboru i testowania odpowiednich amortyzatorów gumowych oraz ich konfiguracji. Badania dynamicznych zachowań silnika lotniczego w środowisku Matlab+Simulink rozszerzono na badania wibroizolacji semi-aktywnej i obciążeń losowych. Obliczeniowe badania porównawcze wielu możliwych wersji zawieszenia weryfikowały pomiarowe próby drganiowe kilku wybranych uprzednio zespołów zawieszenia silnika tłokowego typu „bokser” do kratownicy wręgi ogniowej konstrukcji płatowca.

Słowa kluczowe: silniki lotnicze, dynamika, drgania, zawieszenie

1. Identyfikacja nieliniowej sztywności dynamicznej wibroizolatorów

Tłokowy silnik lotniczy jest zawieszony na kratownicy wręgi ogniowej płatowca za pośrednictwem kilku gumowych amortyzatorów zwanych też wibroizolatorami. Dobór optymalnego zawieszenia wymaga określenia ich parametrów dynamicznych. Dokonano identyfikacji szeregu wibroizolatorów lotniczych podczas wymuszania siłą harmoniczną generowaną przez wzбудnik indukcyjny (Rys. 1).



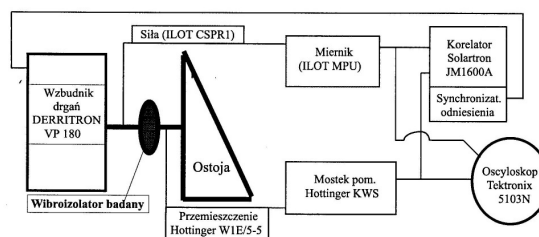
Rys.1. Zestaw urządzeń do identyfikacji dynamicznej wibroizolatorów.

Dla projektowania zawieszonych elastycznych opartych o elementy gumo-podobne model histerytyczny (subwiskotyczny) uznano za najbardziej wiarygodny.

$$R(\zeta, \dot{\zeta}) = -c_{hy} |\zeta| \text{sign}(\dot{\zeta}) \quad (1)$$

Badania wykazały, że amplituda siły tłumiącej jest wprost proporcjonalna do wartości bezwzględnej amplitudy przemieszczenia ζ i przeciwna fazowo do prędkości ruchu. Wpływ częstości wymuszenia w zakresie 5 – 50 Hz okazał się nieznaczny. Przeprowadzono badania porównawcze tego modelu z klasycznym modelem wiskotycznym, który okazał się niemiernodajny do opisu tłumienia w gumie – jego wyznaczone pomiarowo współczynniki różniły się nawet o rząd wielkości.

Skonfigurowany układ wymuszenia harmonicznego i pomiarów przemieszczenia i siły reakcji (dekomponowanej następnie na składową sprężystą i tłumiącą) przedstawiono na rys.2. Zastosowano również wspomagające oprogramowanie do uśredniania i aproksymacji (wielomianem piątego stopnia) wyników pomiarów.

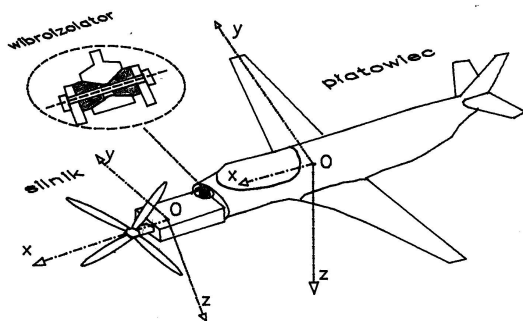


Rys.2. Schemat układu identyfikacji dynamicznej wibroizolatorów.

2. Symulacje obliczeniowe drgań silnika

Obliczenia dynamiczne silnika były poprzedzone zastosowaniem standardowych metod statyki. Pozwoliły one porównać położenie bryły silnika pod wpływem sił quasi statycznych jak grawitacja, średni moment reakcyjny oraz przeciążenia występujące podczas kilku wymiarujących akrobacji.

Ponadto, tłokowy silnik lotniczy, w czasie swej pracy, generuje wymuszenia dynamiczne oraz jednocześnie podlega wymuszeniom kinematycznym od płatowca.



Rys.3. Silnik tłokowy zawieszony na samolocie

Te pierwsze zostały wyznaczone jako zdeterminowane, te drugie natomiast mają charakter losowy. Wymuszający moment reakcyjny, przyłożony do korpusu silnika, jest poliharmoniczny:

$$L(t) = \sum_{i=1}^{i=6} Li \cos(i2\omega + v_i) \quad (2)$$

Przeprowadzono w pierw badania modelu, przedstawionego na rys.4, który zawiera 3 stopnie swobody w płaszczyźnie Oyz: przemieszczenia liniowe y i z oraz kąt obrotu ϕ - w tej płaszczyźnie działa moment $L(t)$. Zawieszenie stanowią trzy wibroizolatory: dwa z nich przenoszą siły w kierunku osi z, a trzeci - w kierunku osi y.

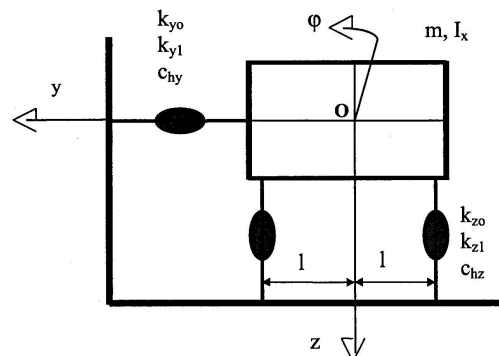
Drgania modelu w płaszczyźnie głównego wymuszenia stanowią pewne uproszczenie drgań całego silnika. Dlatego sprawdzono jego przydatność porównując wyniki jego symulacji przy obrotach silnika 2500 obr/min z wynikami pomiarów na samolocie. Porównywaną wielkością fizyczną były wartości skuteczne przyspieszenia na górnej, prawej łapie silnika. Wartość ta, scałkowana w środowisku Matlab'a różniła się od zmierzonej tylko około 15%, głównie wskutek błędów identyfikacji modelowanego układu. Poniżej zacytowane równania stanowią model matematyczny drgań silnika w płaszczyźnie wymuszenia.

Podstawienie w nich danych geometrycznych i dynamicznych zawieszono silnika prowadzi do modelu numerycznego, zrealizowanego w środowisku MATLAB+ SIMULINK.

$$\begin{aligned} \ddot{\zeta} + 2\zeta k_{z0}/m &= -k_{z1}l^2[(\zeta + \phi)^3 + (\zeta - \phi)^3]/m - \\ c_{hy}|\dot{\zeta}| \operatorname{sign}(\dot{\zeta})/m & \\ \ddot{\phi} + 2\phi k_{z0}l^2/I_x &= -k_{z1}l^4[(\zeta + \phi)^3 - (\zeta - \phi)^3]/I_x - \end{aligned} \quad (3)$$

$$c_{hy}|\dot{\phi}|^2 \operatorname{sign}(\dot{\phi})l^2/I_x + \sum_{i=1}^{i=6} Li \cos(i2\omega + v_i)/I_x \quad (4)$$

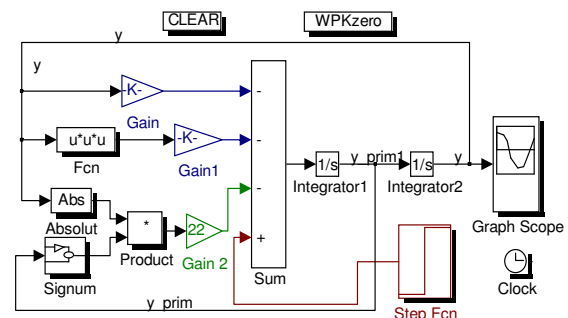
$$\ddot{v} + k_{y0}v/m = -k_{y1}l^2v^3/m - c_{hy}|v| \operatorname{sign}(\dot{v})/m \quad (5)$$



Rys.4. Model silnika w płaszczyźnie wymuszenia

Powyższe równania posłużyły do tworzenia trzech modeli numerycznych w wielu wariantach, także z wymuszeniami losowymi oraz przy zastąpieniu amortyzatorów gumowych przez układy semi-aktywne lub adaptacyjne.

Model Matlab dla współrzędnej przemieszczenia bocznego korpusu silnika v w płaszczyźnie wymuszenia zdeterminowanego pokazano na rys. 5.



Rys.5. Schemat blokowy przemieszczenia v z wymuszeniem skokowym.

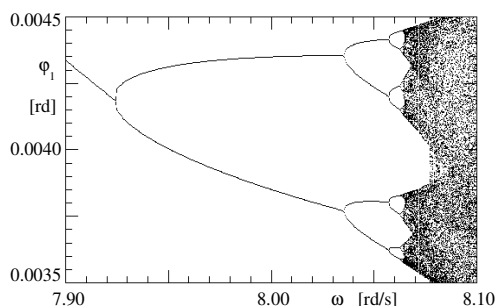
Celem badań numerycznych było określenie wrażliwości odpowiedzi modelu na zmiany parametrów wymuszenia oraz sprężystości i tłumienia wibroizolatorów. Poszukiwano ewentualnych granic stateczności modelu i jego zachowań chaotycznych. Obok badań klasycznego schematu wibroizacji pasywnej rozpoznano aktywne koncepcje wibroizacji w zastosowaniu do zawieszania tłokowego silnika lotniczego.

Wykorzystano ogromne możliwości środowiska komputerowego Matlab i Simulink. Analizowano odpowiedzi czasowe, trajektorie fazowe, funkcje korelacyjne i widma gęstości mocy odpowiedzi modeli poddanych różnym obciążeniom. Badania rozpoczęto od sprawdzenia zachowania się modelu wyjściowego (odpowiadającego aktualnej konstrukcji samolotu Koliber z silnikiem Franklin 4) pod wpływem tzw. wymuszeń standardowych.

Badany model realizuje dwa ruchy sprzężone i jeden niezależny. Dla ich zbadania zastosowano trzy typy wymuszeń standardowych: skok Heavyside'a, tzw. biały szum oraz wymuszenia harmoniczne. Porównanie odpowiedzi modelu na te oddziaływania pozwoliło stwierdzić jego poprawność oraz wykryć granice stateczności przy nadmiernie dużych odkształceniach.

Dla zbadania symptomów chaosu podczas symulacji zawieszenia wymuszanego poliharmonicznie nie ograniczono wartości parametrów wymuszenia ani też zakresu parametrów sprężystych i tłumiących do wartości potencjalnie realizowanych w konstrukcji badanego samolotu.

Zastosowanie topologicznej metody badania drgań nieliniowych pozwala poszukiwać obszaru zmiennych stanu układu, w którym mogą pojawić się odpowiedzi chaotyczne na wymuszenia deterministyczne. Stan układu dynamicznego w danej chwili jest określony przez punkt w przestrzeni fazowej. Współrzędne tego punktu reprezentują wartości zmiennych dynamicznych układu. Podczas ewolucji układu w czasie punkt ten wędruje w przestrzeni stanów i kreśli trajektorię fazową. Trajektorie zamknięte przedstawiają rozwiązania okresowe. Jeśli układ oscyluje z kilkoma częstotliwościami to jego trajektoria charakteryzuje się kilkoma pętlami. Natomiast niedomknięta, niepowtarzalna trajektoria świadczy o ruchu quasi-periodycznym lub chaotycznym. Ruch quasi-periodyczny ma miejsce, gdy jego składowe częstotliwości są niewspółmierne. Dodatkowe znamię chaosu to ciągłe widmo reakcji modelu na dyskretne wymuszenie. Badania chaosu deterministycznego w pewnych zakresach parametrów modeli nieliniowych są prowadzone od kilkadziesiąt lat przez wielu badaczy [2]. Ciekawość badawcza tego zjawiska fizycznego wynika z jego **podobieństwa do postulatów wolnej woli** w świecie ludzkim. Wyniki uzyskane metodą symulacji komputerowej zostały potwierdzone w badaniach, przeprowadzonych w ramach projektu badawczego Komitetu Badań Naukowych Nr 2 P03A 041 12 pt. "Analiza i symulacja chaosu deterministycznego w dynamicznym modelu zawieszenia silnika". Stosując metody analizy numerycznej do badanego modelu obliczono mapy Poincaré i wykresy bifurkacyjne wpraw w zakresie operacyjnych stanów pracy, a następnie poza nim.



Rys.6. Diagram bifurkacyjny współrzędnej φ dla lotu poziomego: $\omega=7,9$ [rad/s], $k_{z0} = 20$ [kN/m], $k_{z1} = 20 \cdot 10^6$ [kN/m³].

Następnie zbadano reakcje dynamicznych wariantów tego modelu w trakcie typowych stanów operacyjnych samolotu oraz podczas przyspieszeń.

Symulację wibroizolacji pasywnej przeprowadzono badając modele procesu przejściowego dla trzech wariantów wymuszenia:

- przemiatanie częstotliwością (ang.: chirp) - stała, jednostkowa amplituda i zwiększana liniowo częstotliwość wymuszenia harmonicznego;
- wymuszenie monoharmoniczne o częstotliwości rosnącej liniowo i amplitudzie zwiększanej parabolicznie;
- wymuszenie poliharmoniczne o częstotliwościach rosnących liniowo i amplitudach poszczególnych harmonicznych zwiększanych parabolicznie.

Następnie poświęcono uwagę dla rozpoznania efektywności dwóch nowych koncepcji zawieszenia, a mianowicie adaptacyjnego modelu wibroizolacji semi-aktywnej oraz modelu wibroizolacji aktywnej z wymuszeniem losowym.

3. Badania doświadczalne drgań silnika

Celem badań doświadczalnych jest porównanie drgań generowanych przez różne silniki tłokowe na identycznym zawieszeniu, prowadzone na hamowni i na samolocie, oraz/lub stopnia przeniesienia drgań danego silnika na podłoże (płatowiec) przez różne warianty zawieszenia.

Obiektem badań były cztery warianty zamocowania silnika na samolocie lekkim. Mierzono przyspieszenie w trzech ortogonalnych kierunkach podczas postoju samolotu z pracującym silnikiem. Sygnał przyspieszenia jest preferowanym nośnikiem informacji w diagnostyce drganiowej. Wynika to stąd, że zawiera on mniej zakłóceń niż sygnał akustyczny, a jest łatwiejszy do zmierzenia niż przemieszczenie lub siła. Sygnał ten można łatwo scałkować, co umożliwi porównanie sygnałów prędkości lub przemieszczeń, których miary stanowią kryteria jakości wibroizolacji w określonych zakresach częstotliwości.

Punkty pomiarowe drgań silnika i płatowca na badanym samolocie zlokalizowano tam, gdzie energia drgań przenosi się na zewnątrz, a mianowicie:

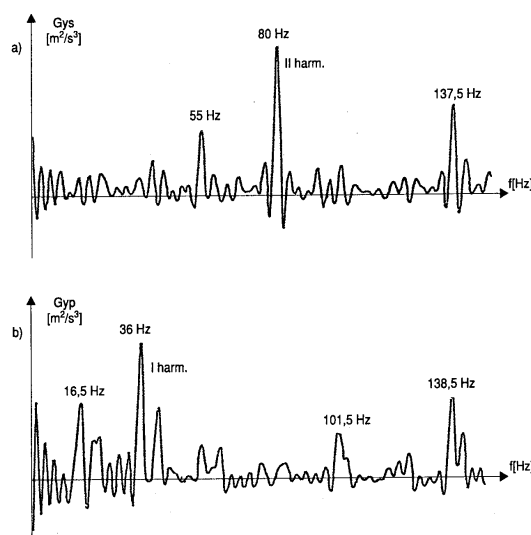
- na kadłubie silnika nad łożyskiem przednim w jego płaszczyźnie symetrii;
- na uchu silnika i łożu płatowca, w lewym górnym węźle mocowania.

Zmierzone wartości skuteczne (przy założeniu, że wartość średnia danego sygnału ergodycznego jest równa zero), są zdefiniowane identycznie jak odchylenie standardowe σ stacjonarnego procesu stochastycznego. Natomiast kwadrat dyspersji - σ^2 stanowi, jak wiadomo, inną probabilistyczną miarę procesu zwaną wariancją lub odchyleniem średnim kwadratowym.

Przetworzenie zmierzonych sygnałów polegało na ich całkowaniu oraz analizach: statystycznej, widmowej i korelacyjnej. Całkowanie sygnałów przyspieszeń pozwoliło porównać wartości skuteczne prędkości (pochodnej przemieszczenia) sygnału drganiowego.

Własności wibroizolacyjne zawieszania można ocenić porównując widmowe gęstości mocy przyspieszeń przed i za wibroizolatorami (Rys.7). Piki tych sygnałów przy tych samych częstościach wskazują, w jakim zakresie widma należy doskonalić własności filtracyjne danego wariantu zawieszania.

Warto również badać funkcję korelacji wzajemnej i związaną z nią wzajemną gęstość widmową. Jeśli moduł wzajemnej gęstości widmowej wykazuje dużo maksimów, to znaczy, że podłoże i zawieszony obiekt mają bliskie sobie, dominujące częstości drgań - taki wariant zawieszania nie spełnia swej funkcji wibroizolacyjnej.



Rys.7. Porównanie widmowych gęstości mocy przyspieszeń: a) przed i b) za wibroizolatorami typu 43 ° Sh silnika Franklin-4.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

MATLAB Matrix Laboratory/
Laboratorium macierzowe

SIMULINK Simulation Linkage/Połączenie
symulacyjne

Bibliography/Literatura

- [1]. Bogusz W.: Drgania mechaniczne, Skrypty uczelniane AGH, Kraków 1974
- [2]. Czołczyński K., Jeż M., Stefański A.: Analysis and simulation of deterministic chaos in the dynamical model of aeroplane engine mounting Mechanics and Mechanical Engineering, Vol.2, Nr 2, Łódź 1998
- [3]. Dzierżanowski P. et al.: Napędy lotnicze - Silniki tłokowe, WKiŁ, Warszawa 1981
- [4]. Jeż M.: Sposób określania własności dynamicznych amortyzatorów gumowych, Patent nr 108799, nadany dn. 22.06.1981
- [5]. Jeż M.: Airport Environmental Impact, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2006
- [6]. Jeż M.: Transport lotniczy a zrównoważony rozwój, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2009
- [7]. Jędrzejewski J.: Mechanika układów korbowych silników samochodowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1986
- [8]. Kołowski M.E.: Nieliniowa teoria wibrozaszczitnych systemów, Nauka, Moskwa 1998
- [9]. Kowal J.: Aktywne i semiaktywne metody wibroizolacji układów mechanicznych, AGH Kraków 1980
- [10]. Kowalewicz A. et al.: Laboratorium silników spalinowych, Wyd. Politechniki Radomskiej Nr 11, 1996
- [11]. Osiński Z. et al.: Damping of Vibrations, A.A. Balkema, Rotterdam 1998
- [12]. Schuster H.G.: Chaos deterministyczny, Wprowadzenie, PWN Warszawa 1995
- [13]. Snowdon J.C.: Vibration and shock In damped mechanical systems, John Wiley and Sons, N. York 1968
- [14]. Uhl T.: Komputerowe wspomaganie identyfikacji modeli układów mechanicznych, Konfer. „Metody i systemy komputerowe w badaniach naukowych i projektowaniu inżynierskim”, Kraków, AGH, 1997

Mr Marian Jeż, DEng. – Professor in the University of Ecology and Management in Warsaw.

Dr hab. inż. Marian Jeż – profesor Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie.

