

## PRÓBY REZONANSOWE – NOWE ZASTOSOWANIA

WITOLD WIŚNIEWSKI  
Instytut Lotnictwa

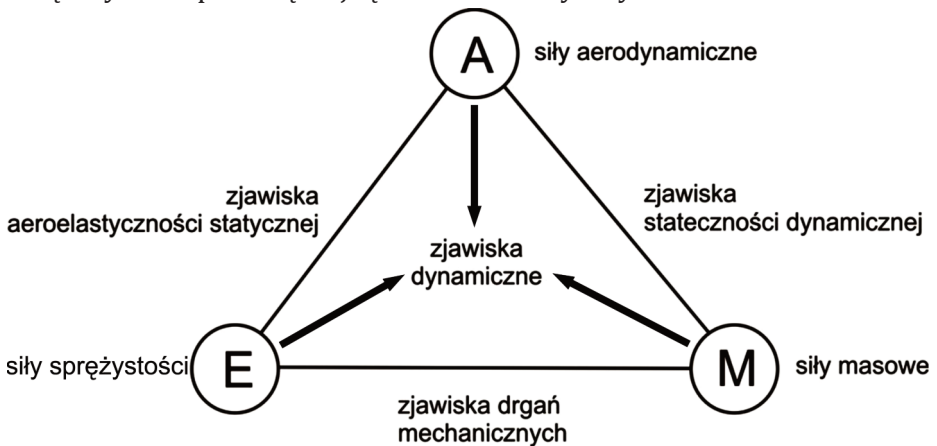
### Streszczenie

Próby rezonansowe są metodą badania dynamicznych właściwości konstrukcji. Podstawowym ich celem jest wyznaczanie współczynników mas, sztywności i tłumienia występujących w równaniach ruchu konstrukcji. W pracy przedstawiono kilka nowych możliwości wykorzystania prób rezonansowych do identyfikacji oraz interpretacji zjawisk występujących w konstrukcjach obciążanych w sposób dynamiczny.

### 1. Wprowadzenie

Próby rezonansowe są doświadczalną metodą badania dynamicznych właściwości konstrukcji. Polegają na harmonicznym wymuszaniu i pomiarze drgań konstrukcji w warunkach laboratoryjnych. Wynikiem prób są częstości drgań rezonansowych, odpowiadające im postacie drgań oraz współczynniki tłumienia. Próby rezonansowe stanowią nieodzowny element badań w cyklu budowy statków powietrznych, podobnie jak próby statyczne, sztywnościowe, zmęczeniowe oraz próby w locie. Ich wyniki wykorzystuje się w analizach zjawisk aeroelastycznych oraz analizach dynamicznych zachowań konstrukcji. Poza przemysłem lotniczym znajdują szerokie zastosowanie w technikach kosmicznych, przemyśle okrętowym, samochodowym, kolejnictwie, budownictwie i wielu innych dziedzinach.

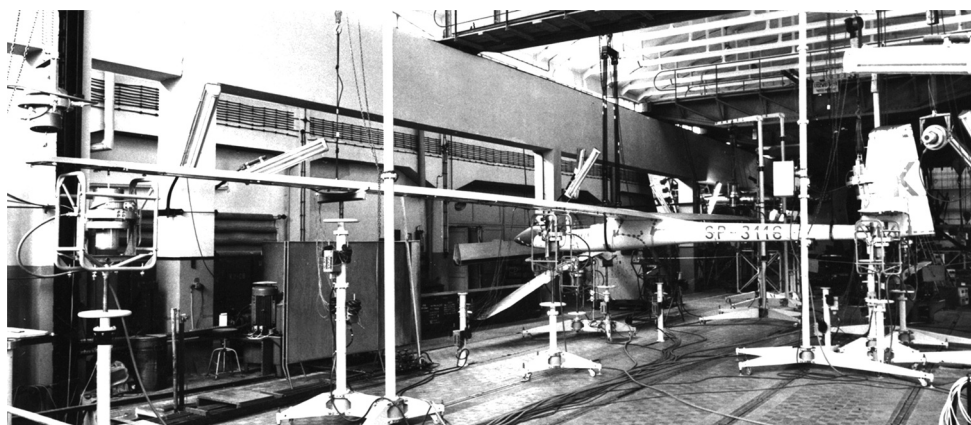
Zakres badań, podczas których wykorzystuje się wyniki prób rezonansowych przedstawia się zwykle za pomocą trójkąta sił aeroelastycznych.



Rys. 1. Trójkąt sił aeroelastycznych.



*Rys. 2. Samolot M-18 Dromader podczas prób rezonansowych.*



*Rys. 3. Szybowiec SZD Jantar 2B podczas prób rezonansowych.*

Próby rezonansowe są narzędziem, dzięki któremu było możliwe poznanie właściwości różnych obiektów latających, zbadanie nietypowych przypadków i zjawisk, opracowanie nowych metod badań oraz stworzenie baz danych.

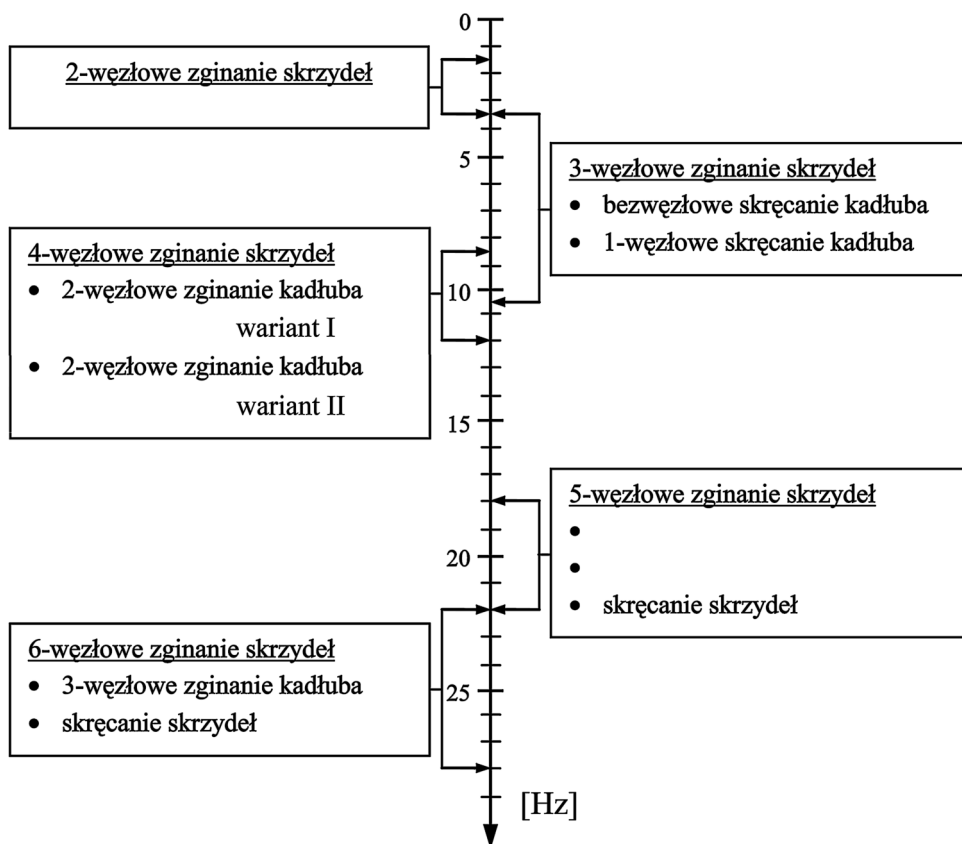
W pracy wykorzystano wyniki badań kilkudziesięciu samolotów, szybowców, śmigłowców i ich podzespołów wykonane - w kierowanej przez autora - Pracowni Prób Rezonansowych Instytutu Lotnictwa. W każdym przypadku badania obejmowały kilkadziesiąt rezonansów. Dla każdego z badanych obiektów zmierzona została częstość, postać drgań oraz współczynnik tłumienia, a dla znacznej części obiektów luz uogólniony oraz masa uogólniona. Uporządkowane wyniki umożliwiły sporządzenie ramowych map rezonansów poszczególnych typów statków powietrznych. Mapy te mogą stanowić przewodniki dla realizatorów badań laboratoryjnych oraz dla wykonawców obliczeń numerycznych, dzięki którym jest możliwe uniknięcie błędów oraz poprawna interpretacja wyników obliczeń.

Bardzo obiecujące okazały się możliwości wykorzystania prób rezonansowych w nowych obszarach i zakresach do których należy zaliczyć:

- skalowanie rezonansowe jako sposób pomiaru drgań eksploatacyjnych,
- rezonansowe metody odwzorowywania obciążeń akustycznych,
- odstrojenie częstości rezonansowych od częstości wzbudzeń roboczych,
- badanie drgań popychaczy układów sterowania,
- rezonansową metodę badania luzu.

## 2. Modelowa mapa rezonansów szybowców

Wyniki badań kilkunastu szybowców pozwoliły na sporządzenie modelowej mapy rezonansów szybowców – rys. 4. Na mapie zaznaczono i nazwano wszystkie rezonanse, które badacz powinien wyszukać i zbadać. Na mapie przedstawiono również przedziały częstości, w których powinny wystąpić.



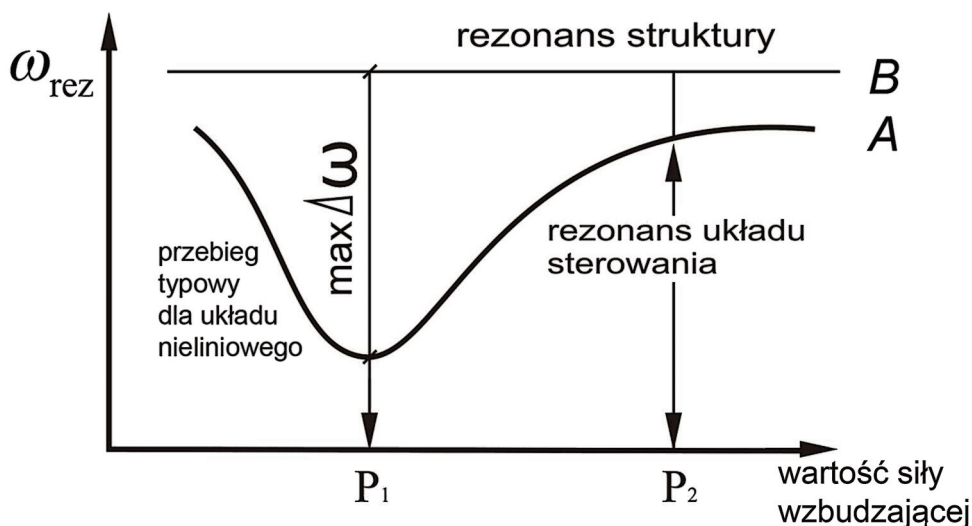
Rys. 4. Modelowa mapa rezonansów szybowca.

## 3. Luz uogólniony

Luz uogólniony jest sumą wszystkich luzów które uczestniczą w drganiach rezonansowych.

Luz uogólniony daje o sobie znać szczególnie przy małych amplitudach drgań, stąd błędne są zalecenia aby pomiary wykonywać przy „małych” amplitudach. Zamiast tego

celowe jest zalecenie aby mierzyć zależność częstości rezonansowej w funkcji amplitudy drgań aż do stanu w którym częstość rezonansowa przestanie być zależna od amplitudy. Patrz rys. 5. Ponieważ wielkość luzu w drganiach o określonej postaci jest wielkością stałą, wraz ze wzrostem amplitudy drgań udział luzu maleje. W przypadku drgań układu z luzem istnieje zagadnienie niejednoznacznego wyznaczania częstości rezonansu.

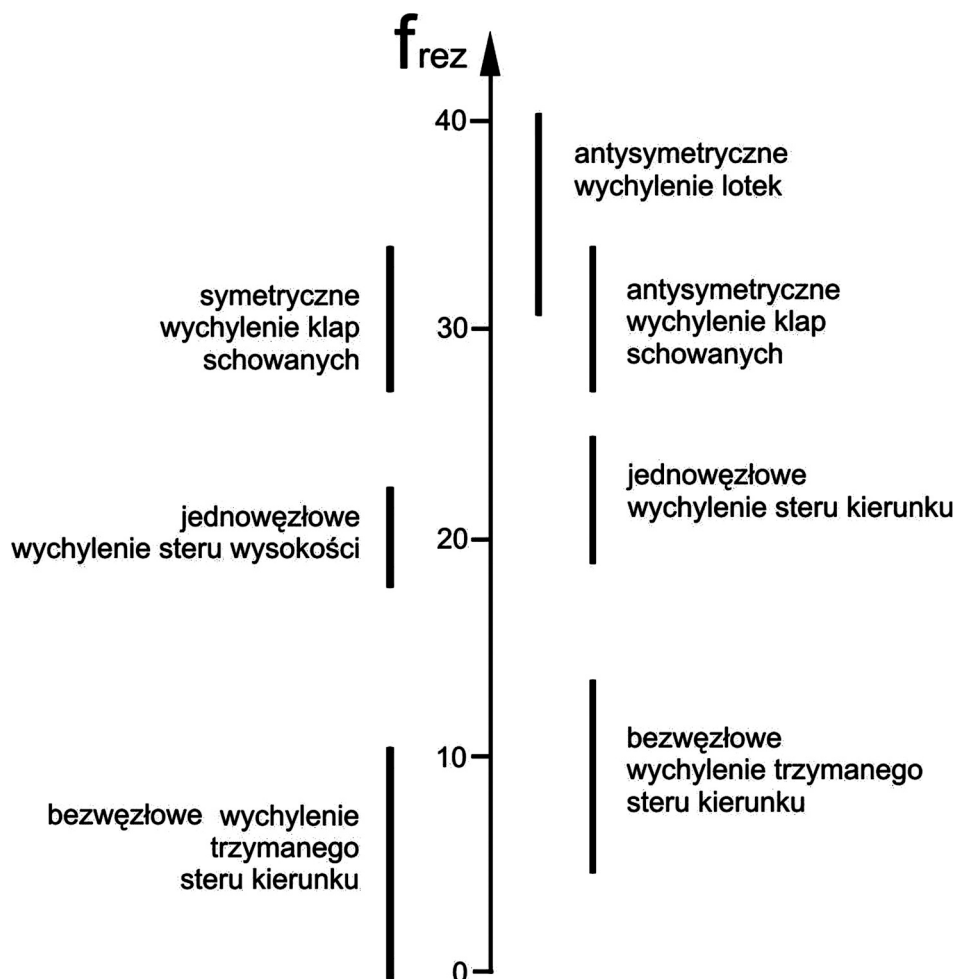


Rys. 5. Zależność częstości drgań rezonansowych od ich amplitudy  
a) ze względu na duży luz, b) ze względu na mały luz.

Struktury posiadają rezonanse z różnym udziałem luzu. Większe luzy występują zazwyczaj w układach sterowania, mniejsze w strukturze, dlatego w zakresie wpływu luzów może wystąpić zjawisko zmiany względnych wartości częstości rezonansowych pary rezonansów, co widać na rys. 5.

Faktyczny wpływ luzów na częstości rezonansów w zakresie amplitud drgań porównywalnych z amplitudami luzów może być znaczny. Na rys. 6. przedstawiono wynik rzeczywistych pomiarów wpływu luzów na częstości drgań rezonansowych układu sterowania samolotu.

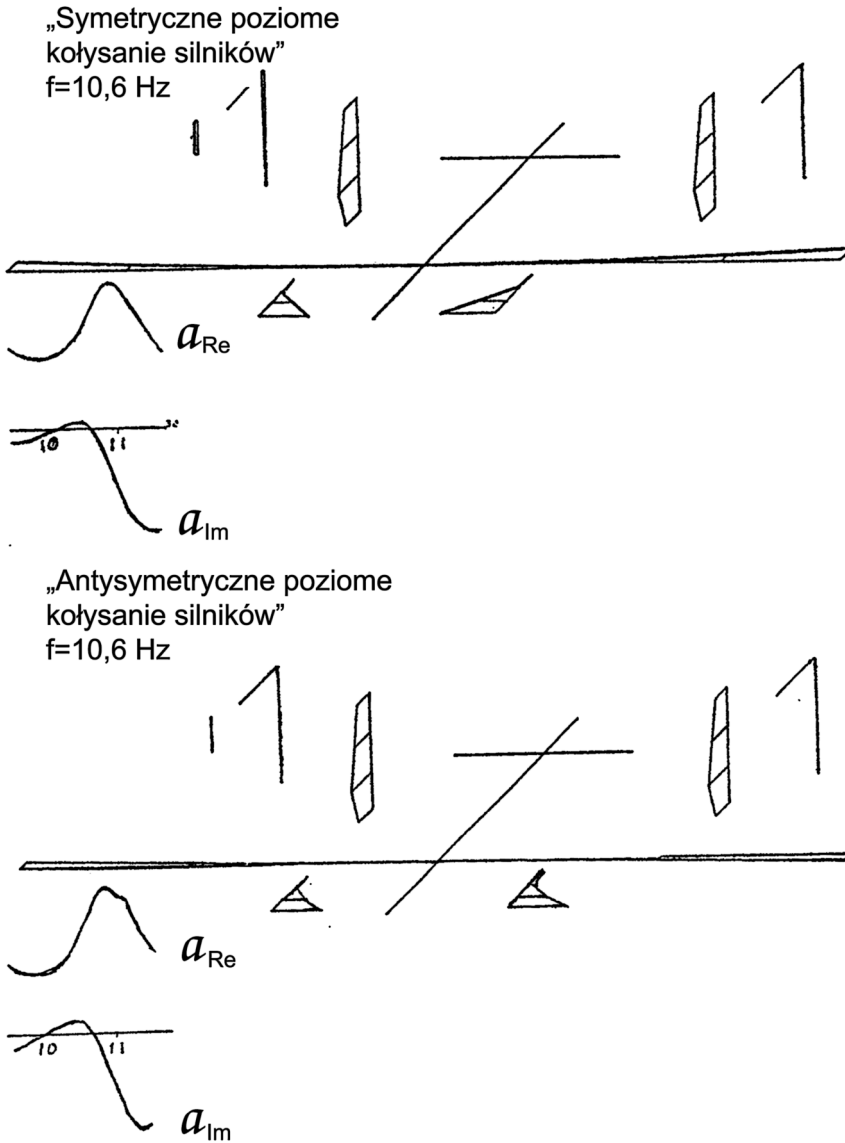
Istnienie lokalnej nieliniowości drgań układów sterowania wykorzystano dla opracowania metody uniknięcia wpływu układu sterowania na badane rezonanse struktury. Metoda ta polega na mierzeniu parametrów rezonansu struktury przy wzбудzeniu siłą o takiej wartości przy której częstość rezonansu struktury i częstość rezonansu układu sterowania maksymalnie różnią się od siebie.



Rys. 6. Wpływ luzów na częstości drgań rezonansowych układu sterowania samolotu.

#### 4. Rezonanse o jednakowych lub bliskich częstościach

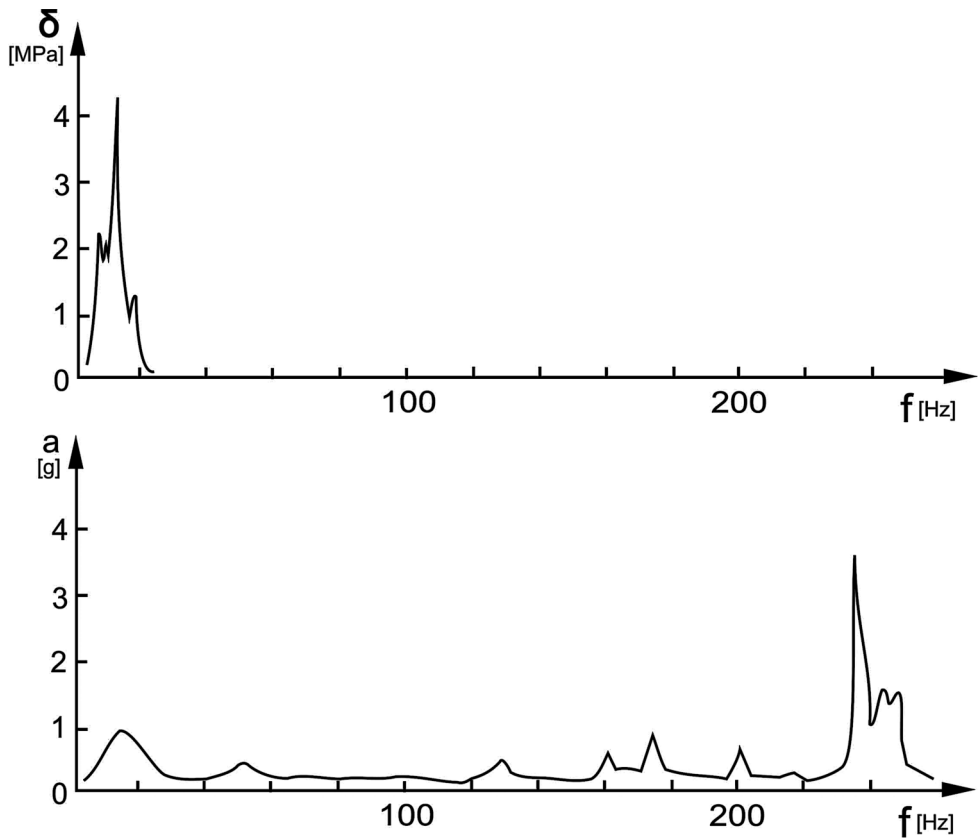
Szczególnym przypadkiem jest istnienie rezonansów o różnych postaciach i jednakowych częstościach. Przypadek taki zbadano między innymi na samolocie dwusilnikowym. W rezonansach tego typu dowolna kombinacja postaci rezonansów jest również postacią rezonansową. W badaniach należy poświęcić specjalną uwagę takim przypadkom. Na rys. 7. przedstawiono wyniki pomiaru dwóch wydawałoby się różnych postaci drgań układu silnik - skrzydło, posiadających tę samą częstość rezonansową. Przy tej samej częstości wzbudzenia było możliwe uzyskanie innych postaci będących kombinacją liniową symetrycznego i antysymetrycznego „kołysania silników”.



Rys. 7. Przykład rezonansów o jednakowej częstotliwości.

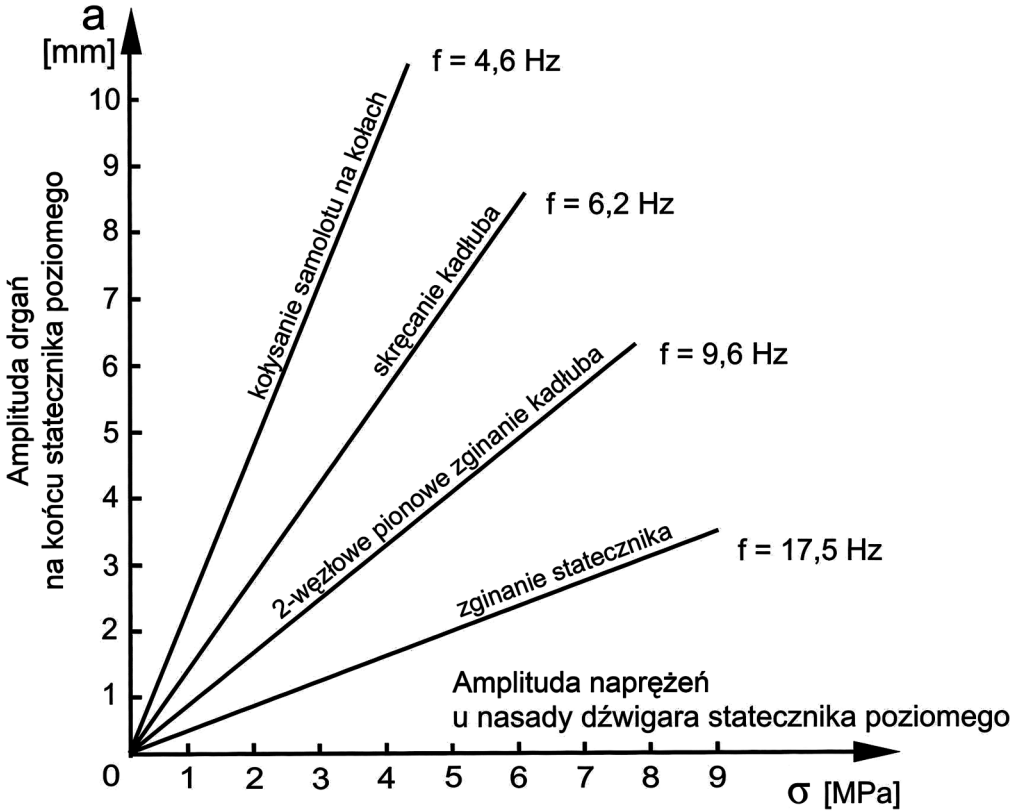
## 5. Skalowanie rezonansowe i sposób pomiaru drgań eksploatacyjnych

Pomiary drgań samolotów w locie wykonuje się najczęściej za pomocą przyśpieszeniometerzy lub tensometrów. Przyśpieszeniometerzy dobrze rejestrują drgania o wysokich częstotliwościach, a tensometry o niskich. Przykład tego samego pomiaru wykonanego za pomocą przyśpieszeniometerza i tensometru przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Analiza harmoniczna odkształceń na dźwigarze oraz przyspieszeń na końcu poziomego usterzenia samolotu wyposażonego w silnik tłokowy.

W celu wykorzystania wiedzy o właściwościach obiektu latającego uzyskanej w próbach rezonansowych oraz maksymalnego wykorzystania właściwości pomiarowych tensometrów, opracowano metodę rezonansowego skalowania tensometrów. Przykład wyników skalowania przedstawiono na rys.9.



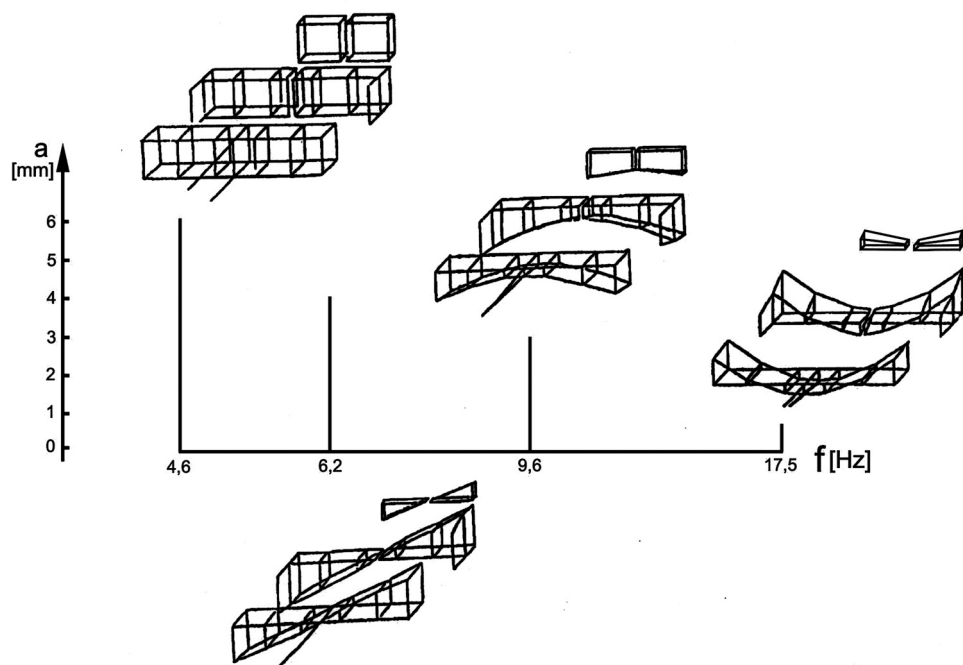
Rys. 9. Wyniki rezonansowego skalowania tensometru na dźwigarze poziomego statecznika samolotu tłokowego

Skalowanie rezonansowe tensometrów wykorzystano do pomiaru drgań samolotów z pracującymi silnikami. Przykład wyników pomiaru drgań samolotu z silnikiem tłokowym przedstawiono na rys. 10.

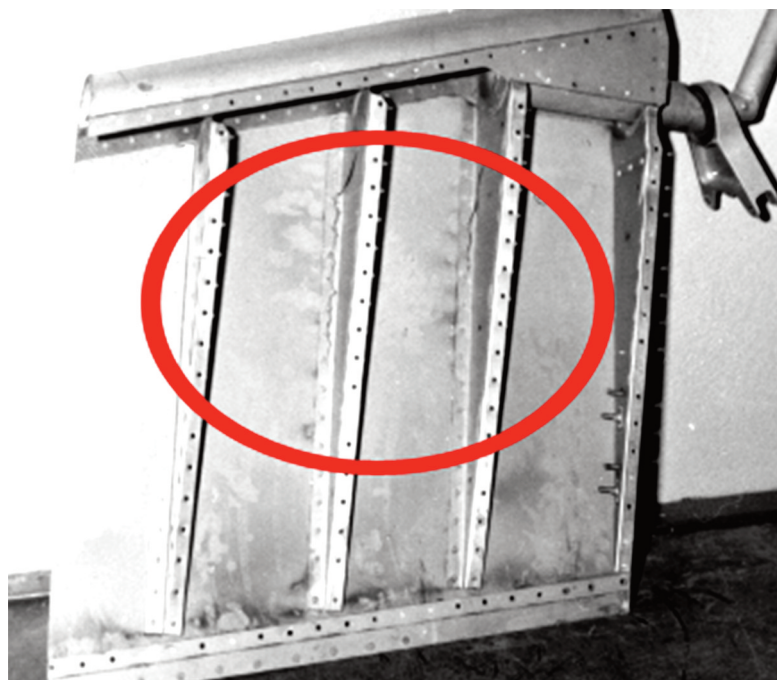
## 6. Rezonansowa metoda odtwarzania obciążeń akustycznych

Rezonansową metodę odtwarzania obciążeń akustycznych opracowano dla poznania mechanizmu niszczenia steru wysokości samolotu I-22 Iryda. W sterze uległa zniszczeniu zmęczeniowemu półka żeberka. Pęknięcie pokazano na rys. 11.





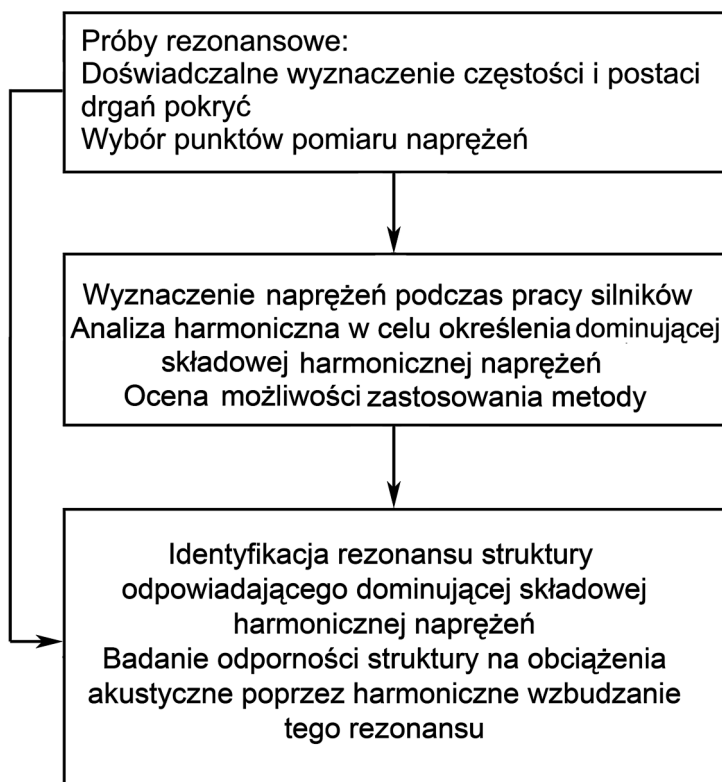
Rys. 10. Wyniki pomiarów drgań samolotu z silnikiem tłokowym



Rys. 11. Zmęczeniowe pęknięcie półki żeberka steru wysokości samolotu wywołane obciążeniem akustycznym

Ster pracował w polu akustycznym wytwarzanym przez silnik odrzutowy samolotu. Wytwarzany hałas miał - w przybliżeniu - charakter białego szumu. Pomiar naprężeń na żeberku w miejscu pęknięcia pokazał, że obciążenie ma charakter monoharmoniczny, a próby rezonansowe, że są to drgania rezonansowe o postaci 2-węzłowe zginanie steru. Na podstawie analiz uzyskanych wyników opracowano metodę rezonansowego odtworzenia obciążeń akustycznych przydatną do realizacji badań zmęczeniowych, której algorytm przedstawiono na rys. 12.

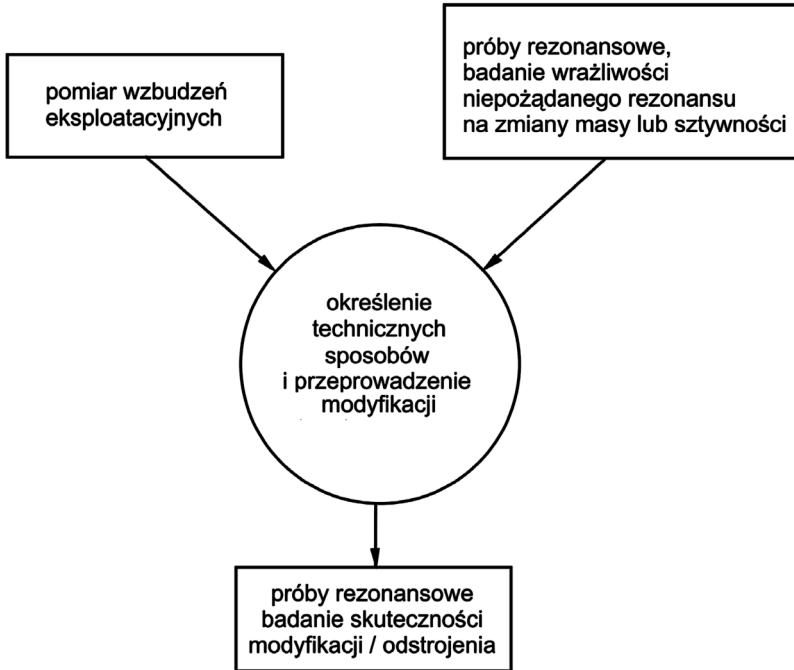
Przeprowadzone badania zmęczeniowe steru według tej metody potwierdziły jej skuteczność i prawidłowość. Zmęczenie miało taki sam charakter i nastąpiło po takim czasie jak na obiekcie.



Rys. 12. Algorytm rezonansowego odtwarzania obciążeń akustycznych.

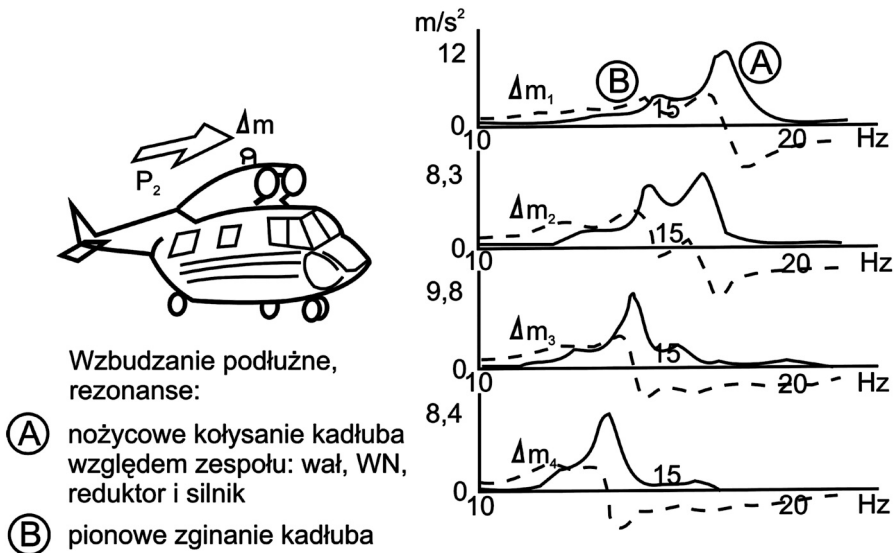
## 7. Odstrajanie częstości rezonansowych od częstości wzbudzeń eksploatacyjnych

Obiekt latający posiada kilka związanych z jego działaniem źródeł wzbudzania drgań. Są to np. wirniki nośne i śmigła ogonowe śmigłowców, śmigła samolotów czy wiry spływające ze skrzydeł i kadłuba. Próby rezonansowe oraz obliczenia lub pomiary częstości wzbudzeń są dla konstruktorów materiałem do analiz i ewentualnych modyfikacji konstrukcji. Zadanie to jest skomplikowane, ponieważ często nie jest możliwa zmiana częstości wzbudzania, wówczas poszukuje się możliwości przesunięcia częstości rezonansowych przez odsztywnienie lub dosztywnienie konstrukcji. Procedurę odstrajania częstości rezonansowych od częstości wzbudzeń eksploatacyjnych przedstawia rys. 13.



Rys. 13. Procedura odstrajania rezonansów struktury od częstości wzbudzeń eksploatacyjnych

Przykład odstrojenia rezonansu śmigłowca poprzez dodanie masy na wale wirnika nośnego przedstawiono na rys. 14



Rys. 14. Wpływ dodanej masy na końcu wirnika nośnego śmigłowca na częstość rezonansu „nożycowe kołysanie kadłuba względem wału i wirnika nośnego”

## 8. Podsumowanie

Praca powstała w wyniku poszukiwania rozwiązań różnych zagadnień związanych z identyfikacją, redukcją i minimalizacją drgań obiektów latających. Do badań i analiz wykorzystano możliwość wyizolowania pojedynczych rezonansów. Dzięki ich wyizolowaniu uzyskano możliwość ich wytłumaczenia, zrozumienia występujących zjawisk i projektowania modyfikacji. Opracowano kilka nowych metod i algorytmów umożliwiających wykorzystanie metody prób rezonansowych w szerszym zakresie badania drgań konstrukcji i interpretacji uzyskanych wyników.

## 9. Literatura

1. Witold Wiśniewski, „*Badania rezonansowe obiektów latających – metody i analiza wyników*”, Prace Instytutu Lotnictwa nr 209, Warszawa, 2010.
2. Wiesław Krzymień, „*Nieliniowości drgań badanych konstrukcji lotniczych*”, XIII Konferencja *Mechanika w Lotnictwie*, Kazimierz n. Wisłą, 2008.
3. Wiesław Krzymień, „*Próby rezonansowe samolotu PZL 130 TC Orlik-Turbo*”, sprawozdanie Instytutu Lotnictwa 24/BW-W2/89.
4. Zbigniew Lorenc, „*Próby rezonansowe samolotu PZL 130 TC Orlik-Turbo*”, sprawozdanie Instytutu Lotnictwa 2/BW-W1/91.
5. Wojciech Chajec, „*Wykorzystanie pomiarów rezonansowych do analizy flatteru samolotu po zmianie rozkładu masy*”, rozprawa doktorska, 2011.

WITOLD WIŚNIEWSKI  
*Institute of Aviation*

## RESONANCE TESTS - A NEW APPLICATIONS

### **Summary**

*The resonance tests are the investigation method of dynamic properties of structures. Their basic aim is to determine the coefficients of mass, stiffness and damping occurring in the structure equations of motion. The paper presents some new possibilities of using resonant tests to identify and interpret the phenomena occurring in dynamically loaded structures.*