

AEROELASTYCZNOŚĆ

4.1. WPROWADZENIE

Literatura

„Biblia” Aeroelastyczności

Bisplinghof, R.L., Ashley, H., Halfman, R.L.; *Aeroelasticity*, Addison-Wesley, Cambridge, Mass. 1955.

Materiały edukacyjne i popularnonaukowe

Pietrucha, J.P.; *Flutter - wstęp do teorii aerosprężystości*, NIT, cz. I 1(8), 2005, cz. II 4-5(11) 2005

Hodges, D.H., Pierce, G.A.; *Introduction to structural dynamics and aeroelasticity*, Cambridge, NY, 2002

Wright, J.R., Cooper, J.E.; *Introduction to aircraft aeroelasticity and loads*, Wiley, 2007

„State of the Art”

Dowell, E.H., Curtiss, H.C., Scanlan, R.H., Sisto, F.; *A modern course in aeroelasticity*, Sijthof & Noordhoff, Alphen aan den Rijn, 2004.

Balakrishnan A.V.; *Aeroelasticity. The Continuum Theory*, Springer, 2012.

Scanlan, R.H., Rosenbaum R.; *Drgania i flutter samolotów*, PWN, Warszawa, 1964.

AEROELASTYCZNOŚĆ

4.1. WPROWADZENIE

AEROELASTYCZNOŚĆ

4.1. WPROWADZENIE

4.1.1. ZJAWISKA AEROELASTYCZNE - RYS HISTORYCZNY

Przedmiot i zakres aeroelastyczności

Zjawiska aeroelastyczne lub hydroelastyczne

Zjawiska w których obiekty odkształcalne zostają wprowadzone w ruch bądź odkształcone na skutek oddziaływania na nie poruszającego się ośrodka (powietrza lub wody).

Aerohydroelastyczność

Dział mechaniki zajmujący się badaniem zjawisk w których występuje wzajemne oddziaływanie ośrodka płynnego i obiektów odkształcalnych.

Aeroelastyczność lotnicza zajmuje się badaniem zjawisk występujących podczas lotu samolotów lub raket w powietrzu.

Przykłady:

- kołysanie się drzew, falowanie łąnów zbóż, łopotanie flag,
- drgania wież, kominów i mostów na wietrze,
- kołysanie się przewodów elektrycznych.

Przebieg zjawiska aeroelastycznego może być gwałtowny – mogą one powodować zniszczenie obiektów, n.p.:

- łamanie się drzew, zawalanie się kominów czy mostów,
- zrywanie przewodów sieci energetycznych,
- zniszczenia skrzydeł, usterzeń samolotów, łopatek turbin lub łopat śmigłowców.

4.1.1 Zjawiska aeroelastyczne - rys historyczny

W lotnictwie zjawiska aeroelastyczne polegają na odkształcaniu się lub ruchu elementów samolotu pod wpływem działających na nie sił aerodynamicznych.

Przykłady:

- uginanie się i drgania skrzydeł i usterzeń,
- drgania powierzchni sterowych,
- drgania łopat wirników śmigłowców,
- drgania łopatek turbin silników odrzutowych.

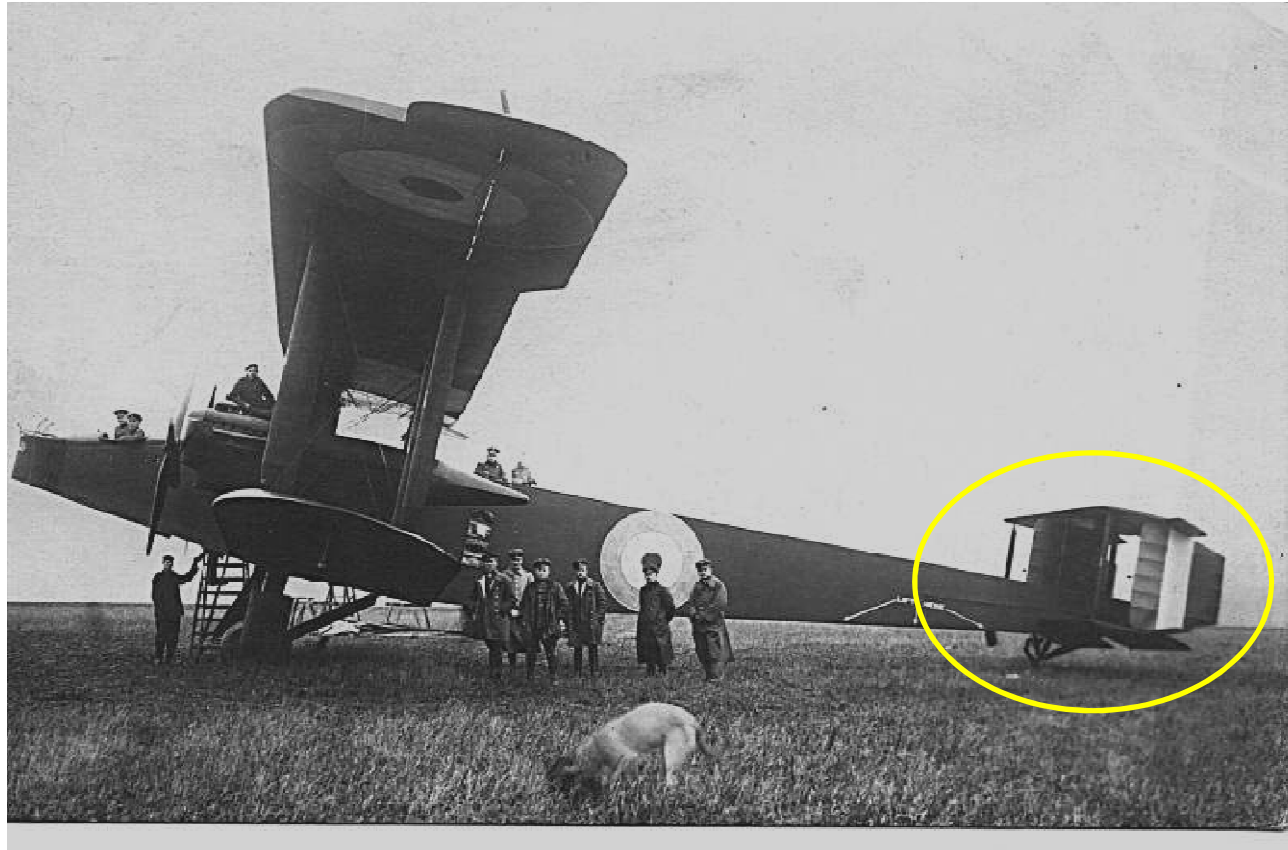
Najważniejszym zjawiskiem aeroelastycznym w lotnictwie jest **flutter**.

Flutter to szybkie drgania konstrukcji (np. skrzydła) powstające w trakcie lotu z dużą prędkością.

Jest to zazwyczaj zjawisko gwałtowne.

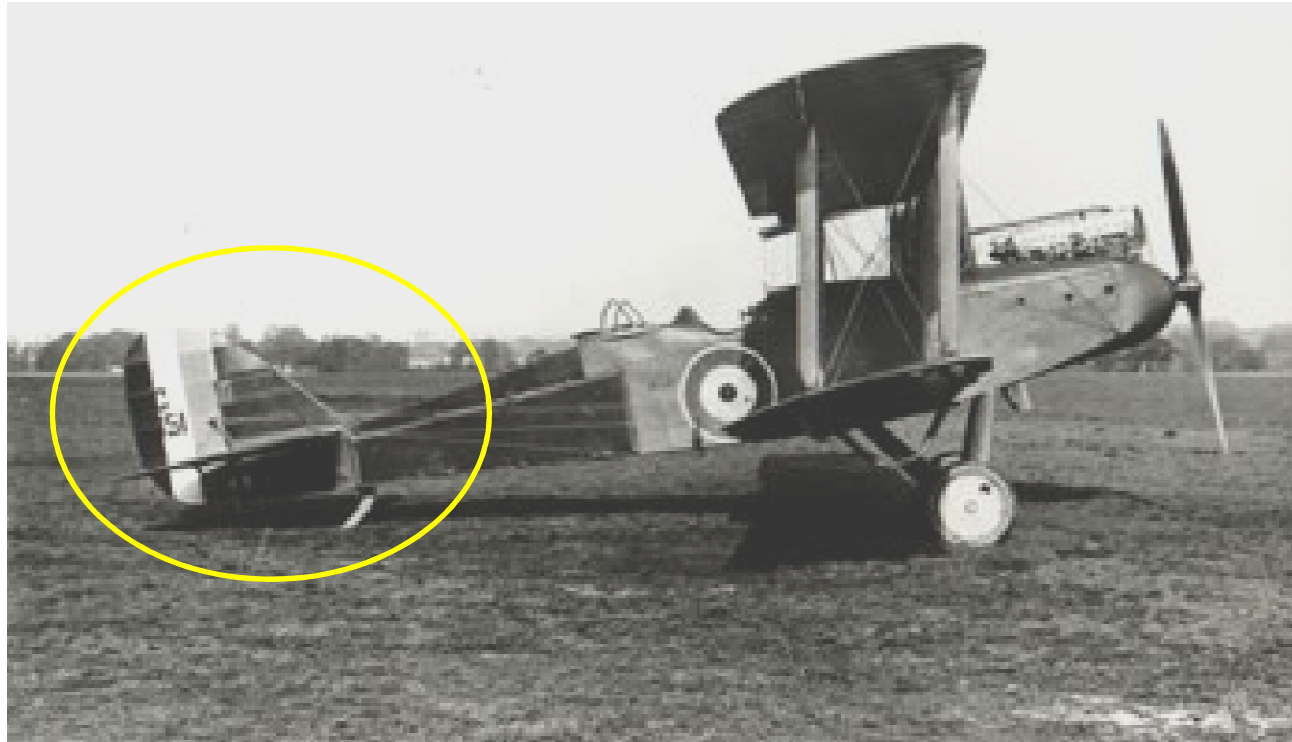
Flutter często niszczy konstrukcję.

Zacząło się prawie sto lat temu...



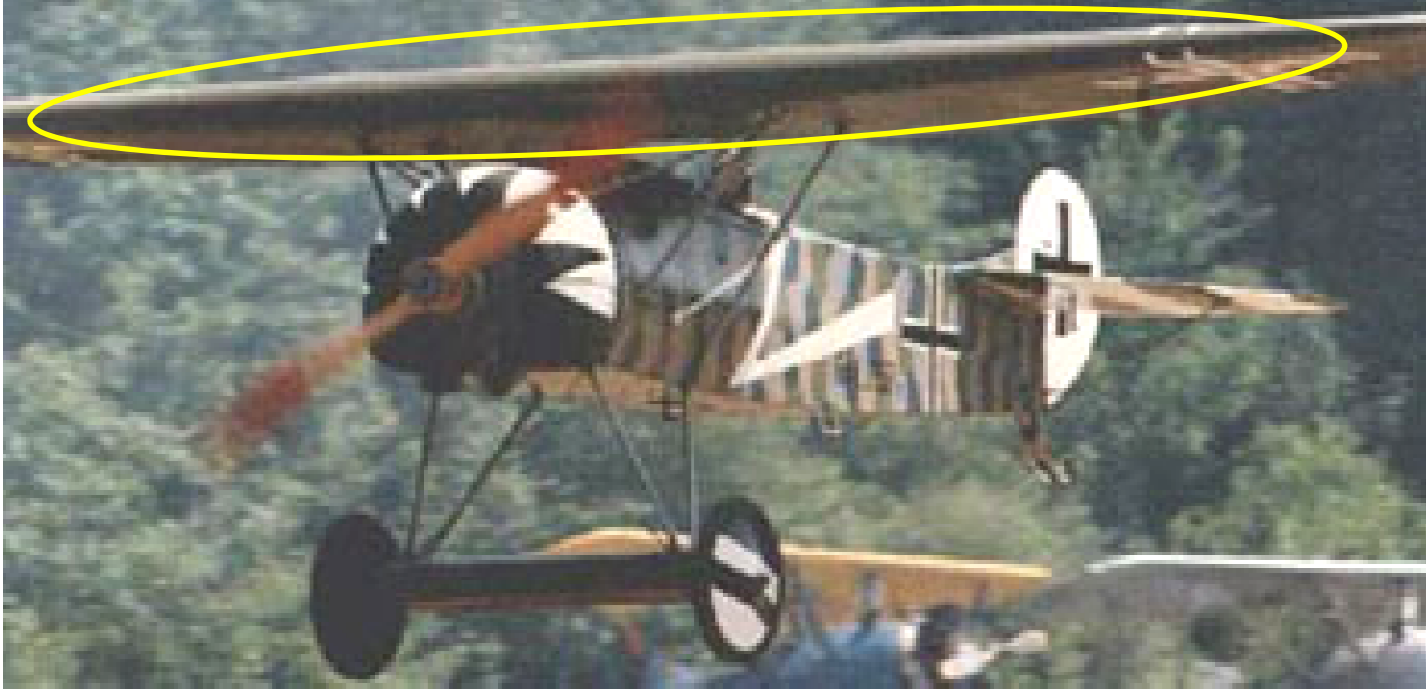
Bombowiec Handley Page O/100 - pierwszy samolot na którym wystąpił **flutter usterzenia** (1914)

Zacząło się prawie sto lat temu...



Bombowiec De Havilland DH-9 - kolejna ofiara flatteru usterzenia (1914)

Zacząło się prawie sto lat temu...



Fokker D-VIII - myśliwiec, na którym w trakcie nurkowania występowała statyczna **dywergencja skrzydła** (1916)

4.1.1 Zjawiska aeroelastyczne - rys historyczny

Cechą charakterystyczną katastrof bombowców były drgania tylnej części kadłuba i usterzeń.

Było to zjawisko aeroelastyczne dynamiczne – **flutter**.

W przypadkach katastrof bombowców intuicja podpowiedziała inżynierom, że należy **usztynić tył kadłuba i usterzenie**.

Katastrofy Fokkerów były zupełnie inne – drgania skrzydeł nie występowały.

Było to zjawisko aeroelastyczne statyczne – **dywergencja**.

Po dłuższej analizie Anthonny Fokker zrozumiał, że ich przyczyną było **aerodynamiczne ukręcenie skrzydła**.

W tym przypadku pomogło również **usztynienie konstrukcji**.

Przyczyny katastrof:

- **zbyt niska sztywność konstrukcji,**
- **brak elementarnej wiedzy na temat zjawisk aeroelastycznych.**

4.1.1 Zjawiska aeroelastyczne - rys historyczny

Lot 599 Kansas City – Los Angeles, USA, 31 Marca 1931, Cottonwood Falls.

Katastrofa samolotu komunikacyjnego Fokker F10 Trimotor

W wypadku zginęło dziewięć osób, w tym sławny trener futbolowy.

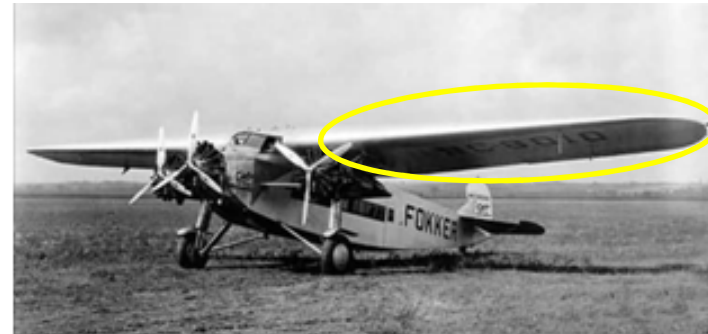
Przyczyną był **flutter**, który spowodował urwanie się skrzydła.

Flutter powstał w wyniku osłabienia konstrukcji skrzydła spowodowanego rozmiękczeniem skleń wskutek przesiąknięcia skrzydeł paliwem.

Wypadek miał ważne konsekwencje:

- linie lotnicze musiały wycofać Fokkery F10 ze służby,
- doprowadził do powstania FAA

Przyczyny katastrofy – niewłaściwa eksploatacja.



4.1.1 Zjawiska aeroelastyczne - rys historyczny

Prędkości lotu szybko rosły, co sprzyjało pojawianiu się flatteru na nowych samolotach...



Gee Bee R2 - samolot wyścigowy, na którym występował
flutter skrzydeł oraz flutter lotek (1930)

4.1.1 Zjawiska aeroelastyczne - rys historyczny

Eksperymentując stwierdzono, że drganiom lotek można zapobiec poprzez ich **przednie wyważenie**, czyli przesunięcie środka masy do przodu.

Pojawiały się też inne niepożądane zjawiska aeroelastyczne, np. odwrotne działania sterów (zwłaszcza lotek).

Przyczyny katastrof – niewyważenie masowe sterów.

Powoli uczono się zapobiegać wypadkom aeroelastycznym, ale „na ślepo” - metodą prób i błędów.

Do połowy lat trzydziestych XX. wieku brak było bowiem teorii pozwalających przewidywać i zapobiegać takim wypadkom w sposób metodyczny.

4.1.1 Zjawiska aeroelastyczne - rys historyczny

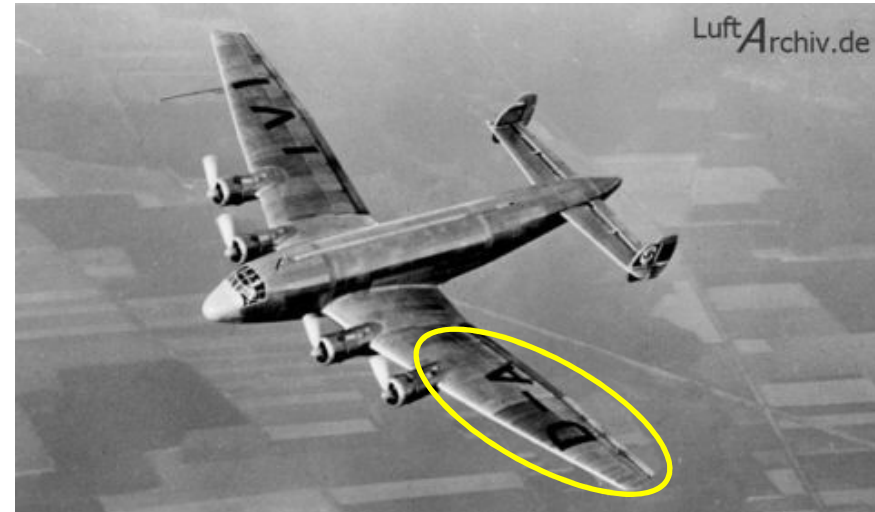
Katastrofa w trakcie prób flutterowych, Ju-90 VI - prototyp

6 Lutego 1938, Niemcy

Samolot uległ katastrofie w trakcie prób flutterowych.

Próby były starannie zaplanowane.

Zginęła cała załoga, w tym inżynierowie – specjaliści od prób flutterowych.



Wypadek ten uświadomił niebezpieczeństwo związane z takimi próbami.

Zrozumiano, że **flutterowe próby w locie muszą być poprzedzone wyjątkowo staranną analizą teoretyczną.**

Analiza teoretyczna powinna przewidzieć warunki wystąpienia wszystkich zjawisk aeroelastycznych dla samolotu z wystarczającą dokładnością – taką, która zapewni bezpieczeństwo prób w locie.

Przyczyna katastrofy:

- **nieprecyzyjne określenie prędkości krytycznej,**
- **brak dokładnych metod analizy aeroelastycznej.**

4.1.1 Zjawiska aeroelastyczne - rys historyczny

Pojawiła się pilna potrzeba opracowania możliwie dokładnych modeli zjawisk aeroelastycznych.

Od modeli tych wymagano, aby pozwalały wyznaczyć prędkość lotu przy której mogły wystąpić zjawiska aeroelastyczne, tzw. **prędkość krytyczną**.

Pierwsze modele pojawiły się w latach 30. i 40. XX wieku:

- Theodorsen, Garrick (USA),
- Küssner, Schwarz (Niemcy),
- R.T. Jones (Anglia),
- Niekrasov, Kiełdysz (ZSRR).

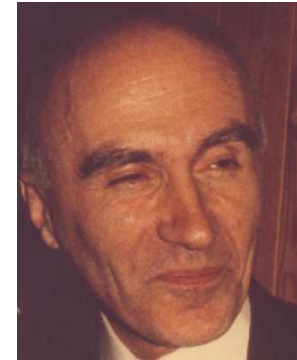
Katastrofa samolotu Ju-90 w trakcie starannie przygotowanych prób flutterowych pokazała, jak ważne jest precyzyjne analityczne określenie prędkości krytycznej flutteru.

Do końca lat sześćdziesiątych XX. wieku opracowano zadowalające modele większości zjawisk aeroelastycznych.

Umożliwiło to włączenie analizy aeroelastycznej do procesu projektowania samolotów... **ale nie wyeliminowało to całkowicie groźby wystąpienia flutteru!**

Słynne samoloty mające problemy z flutterem...

- PZL P-23 „Karaś”
- Messerschmitt Bf-109 B
- RWD-6 (1936)
- Focke Wulf Fw 191
- Supermarine „Spitfire” Mk.III
- Avro „Lancaster”
- De Havilland DH-98 „Mosquito”
- Lockheed P-38 „Lightning”
- Mitsubishi A6M „Zero”
- Hawker „Typhoon”
- Chance Vought „Corsair”
- Boeing B-29 „Superfortress”
- Su-15
- North American F-86 „Sabre”
- Mucha 100 (1953)
- Lockheed L-188 „Super Electra”
- SZD-21 „Kobuz” (1960)



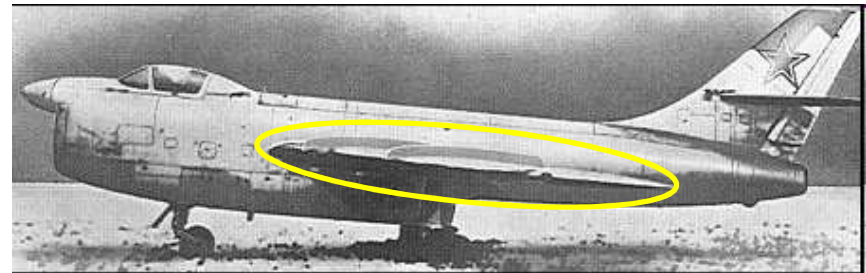
Prof. Władysław Fiszdon
(1912-2004)

W latach 50. - 60. XX wieku
Kierownik Katedry Mechaniki
(obecnie Zakładu Mechaniki)
Wydziału Mechanicznego
Energetyki i Lotnictwa

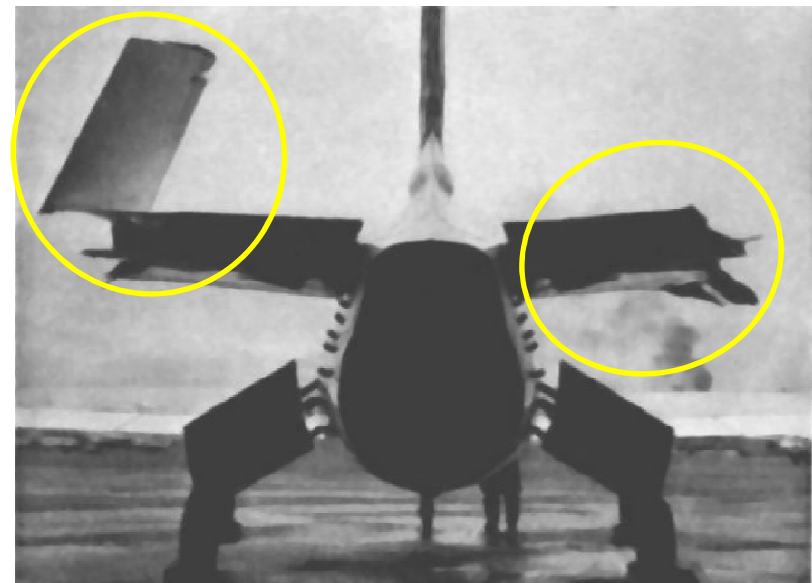
4.1.1 Zjawiska aeroelastyczne - rys historyczny

Szybki rozwój lotnictwa w okresie II Światowej i po niej stwarzał coraz większe problemy aeroelastyczne – samoloty zaczęły przekraczać prędkość dźwięku.

W trakcie 39. lotu próbnego, 3 lipca 1949, na prototypie samolotu Su-15 (P) wystąpił **flutter skrzydeł**. Pilot katapultował się.



Samolot F-86 „Sabre” po pomyślnym lądowaniu mimo zniszczenia usterzenia poziomego wywołanego **flutterem** (Korea, 1950)



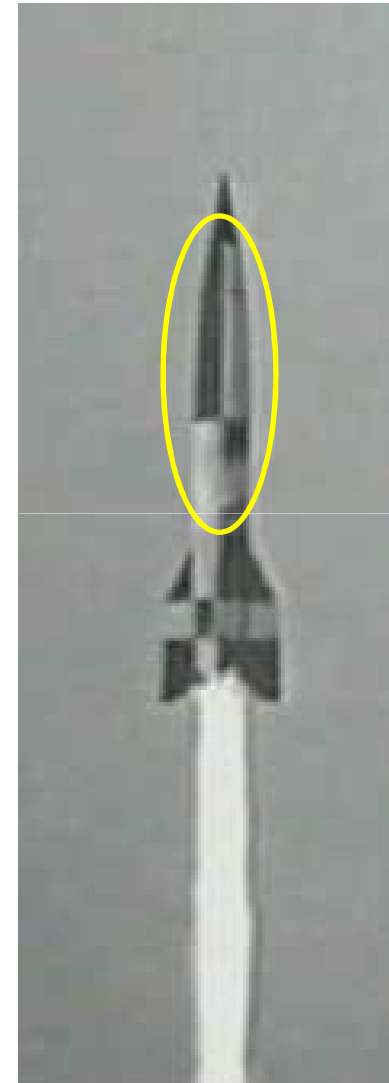
Pojawiły się też całkiem nowe zjawiska aeroelastyczne

Niemieckie rakiety V-2, osiągające wielkie prędkości naddźwiękowe ($Ma \gg 2$) ulegały w latach 1943-1944 tajemniczym katastrofom w trakcie lotu z wielkimi prędkościami.

Rakiety rozpadały się na dużych wysokościach.

Zniszczeniu uległo ok. 70 rakiet.

Przyczyny katastrof – flutter panelowy.



Pojawiły się też całkiem nowe zjawiska aeroelastyczne



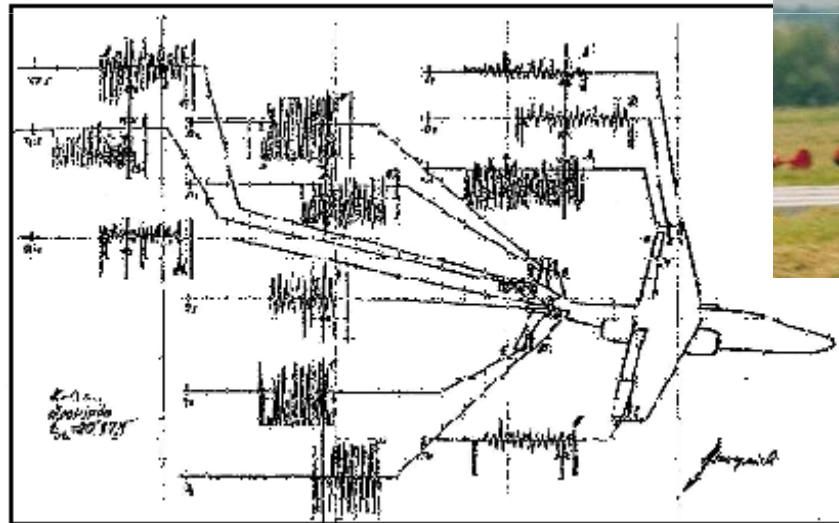
Samolot
Lockheed L-188 „Electra”
...po wypadku
spowodowanym **flutterem**
wirowym (1960)



Przyczyny katastrof – flutter wirowy.

Nawet współczesne samoloty ulegają wypadkom wskutek wystąpienia flutteru

Polski samolot I-22 „Iryda” uległ katastrofie 30 stycznia 1987 roku w trakcie prób flutterowych wskutek wystąpienia **flutteru usterzenia**.



**Przyczyna katastrofy – nieprzestrzeganie przepisów
- niewłaściwa eksploatacja.**

4.1.1 Zjawiska aeroelastyczne - rys historyczny

Nawet współczesne samoloty ulegają wypadkom wskutek wystąpienia flutteru



F-117 - samolot niezwykle (w 1997) zaawansowany technicznie, a jednak...

Flutter samolotu F-117

Baltimore, USA, 14 września 1997, pokazy lotnicze.

Był to pierwszy lot samolotu po naprawie układu sterowania lotek.

Samolot leciał z prędkością ok. 750 km/h, która jest dużo niższa niż prędkość krytyczna flatteru F-117.

Przy wznoszeniu wystąpiły drgania zewnętrznej części lewego skrzydła wywołane drganiami sterolotki (wykonała cztery szybkie oscylacje).



Przyczyną drgań były luzy w układzie sterowania lotką.

Po katastrofie zbadano 33 egzemplarze F-117 i w żadnym z nich nie stwierdzono drgań nawet przy większych prędkościach.

Mimo tego w samolotach wyprodukowanych po wypadku usztywniono układ siłownika sterolotki.

Przyczyna katastrofy – niewłaściwa eksploatacja.

4.1.1 Zjawiska aeroelastyczne - rys historyczny

Flutter może wystąpić także na szybowcach oraz na samolotach sportowych

Katastrofa szybowca SZD-12A „Mucha 100 A”
(Listopad 1953)

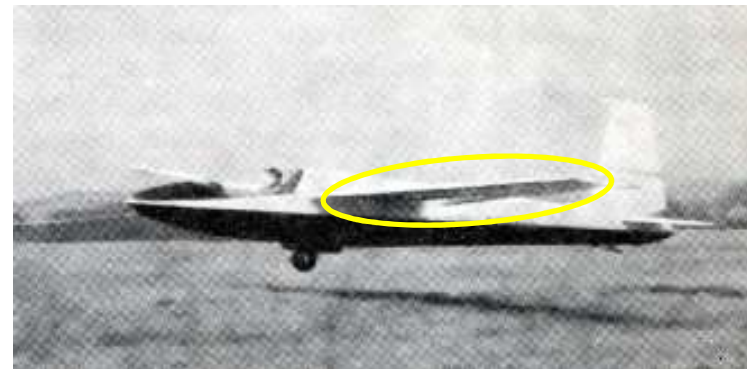
W trakcie próby prędkości dopuszczalnej wystąpił **flutter lotek**. Szybowiec uległ częściowemu zniszczeniu i pilot ratował się skokiem ze spadochronem.



Katastrofa szybowca SZD-21 „Kobuz” 2A
(20 kwietnia 1963)

W trakcie próby flutterowej wystąpił **flutter giętno-skrętny skrzydła**.

- Słaba znajomość zjawiska flutteru.
- Lot nie był należycie przygotowany.
- Prędkość flutteru nie była oszacowana!



Przyczyny katastrof – niewłaściwie przeprowadzone próby w locie.

Flutter samolotu JK-05L

Krosno, 26 kwietnia 2004.

Pierwszy lot samolotu po modyfikacji do wersji JK-05L.

Celem lotu było sprawdzenie właściwości pilotażowych samolotu, oraz rozpędzanie samolotu do prędkości większej niż 200 km/h.

Przy prędkości przyrządowej przekraczającej 200 km/h, na wysokości 450 m, wystąpił flatter giętno-skrętny skrzydła.



W wyniku flatteru nastąpiło urwanie lewego skrzydła i klapolotki prawego skrzydła w 2/3 rozpiętości.

Flutter samolotu JK-05L

Komisja Badania Wypadków Lotniczych ustaliła że:

- **nie wykonano obliczeń flutterowych** wyważenia masowego klapolotek dla oczekiwanej prędkości maksymalnej większej niż 200 km/h.
- Skalowanie prędkościomierza nie spełniało wymagań zawartych w programie prób i było niewystarczające z punktu widzenia bezpieczeństwa wykonywanych lotów.
- Pilot w czasie lotu nie miał możliwości precyzyjnego określenia prędkości lotu.
- Z informacji nadesłanej z Francji wynikało, że wskazania prędkości w górnym zakresie mogły się różnić od rzeczywistych **nawet o 20% w stronę niebezpieczną, tj. o około 40 km/h.**
- Warunki atmosferyczne (zwłaszcza występowanie turbulencji) nie odpowiadały wymaganiom dla tego rodzaju lotów próbnych i mogły mieć wpływ na przebieg wypadku.

Podobny wypadek – samolot Sky Cruiser (2006), Poznań

**Przyczyny katastrof – nieprzestrzeganie przepisów
- niewłaściwa eksploatacja.**

Flutter jest więc nadal groźny!

Mimo znacznych postępów w zrozumieniu natury zjawiska flatteru jest on nadal groźny z kilku powodów:

- Ignorancja: konstruktorzy-amatorzy czasami w ogóle nie wiedzą o istnieniu flatteru lub nie rozumieją istoty zjawiska!
- Błędy produkcyjne lub montażowe mogą doprowadzić do spadku sztywności konstrukcji.
- Konstrukcje amatorskie często nie przechodzą pełnego cyklu badań rezonansowych i flatterowych.
- Błędy wskazań przyrządów (zwłaszcza prędkościomierza) w połączeniu z wcale nierzadką brawurą pilotów mogą doprowadzić do przekroczenia prędkości krytycznej.
- Nawet samoloty wojskowe są narażone na wystąpienie flatteru z powodu niewłaściwej eksploatacji.

Główne przyczyny katastrof aeroelastycznych

- **Ignorancja**: brak wiedzy na temat zjawisk aeroelastycznych i możliwości ich wystąpienia.
- **Błędy projektowania i wykonania**: za mała sztywność konstrukcji, niewyważenie lotek, ...
- **Niewłaściwa eksploatacja**: rozsztywnienie konstrukcji, luzy w układach sterowania, niewłaściwie przeprowadzone przeglądy techniczne, zła kalibracja przyrządów,...
- **Błędy ludzkie**: brawura, nieprzestrzeganie przepisów i procedur postępowania, pośpiech przy badaniach.

AEROELASTYCZNOŚĆ

4.1. WPROWADZENIE

4.1.2. CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA ZJAWISK AEROELASTYCZNYCH

Rodzaje zjawisk aeroelastycznych

Zjawiska aeroelastyczne **statyczne**

Zjawiska, w których bezwładność konstrukcji nie ma znaczenia

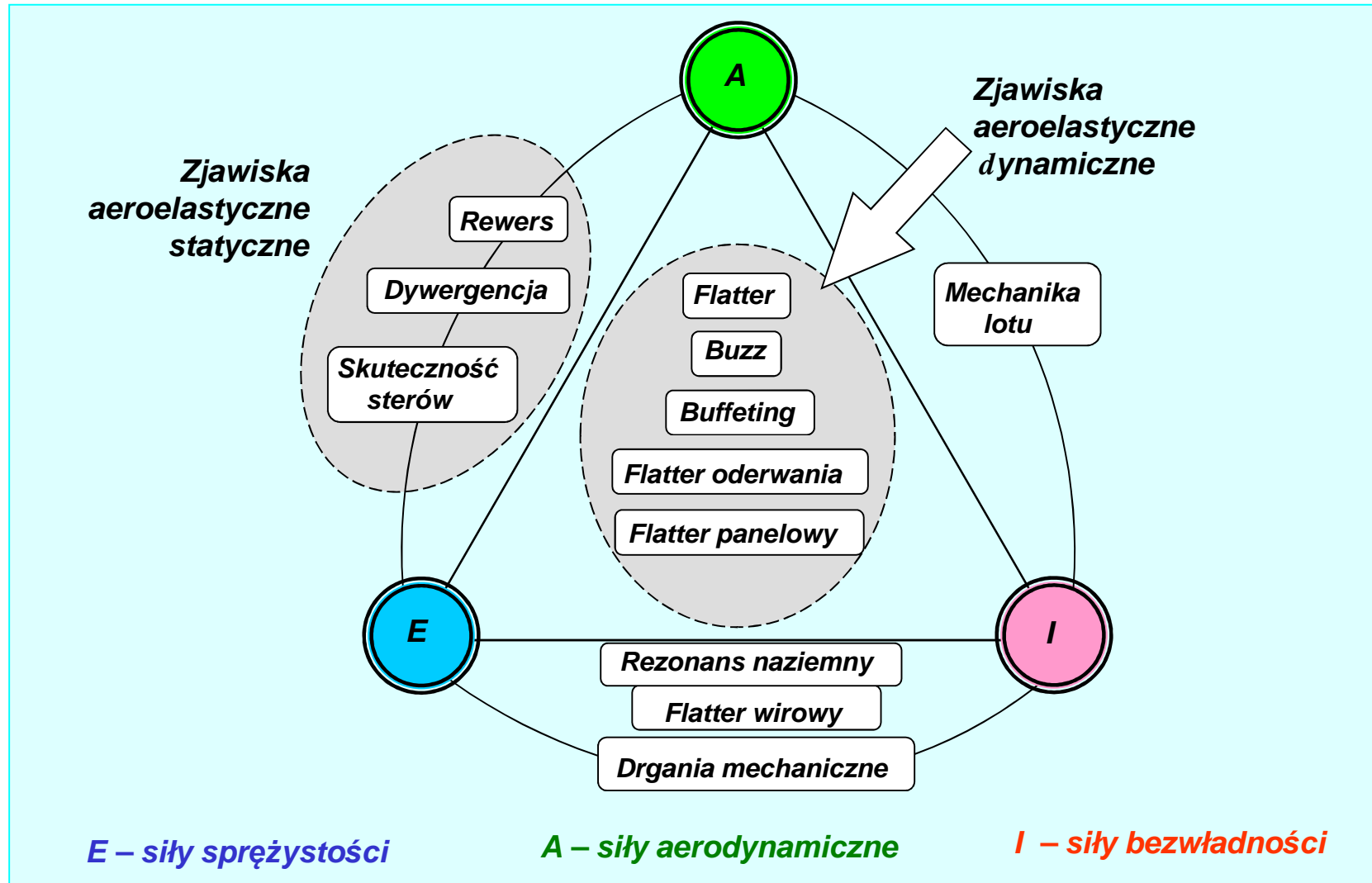
- dywergencja skrzydeł,
- rewers lotek

Zjawiska aeroelastyczne **dynamiczne**

Zjawiska, w których bezwładność konstrukcji jest istotna

- flutter skrzydeł,
- flutter usterzeń,
- flutter powierzchni sterowych,
- flutter oderwania,
- flutter wirowy,
- flutter panelowy,
- flutter transoniczny („buzz”),
- buffeting („trzepotanie”)

Rodzaje zjawisk aeroelastycznych



Klasyczny Trójkąt Collara

Inne zagadnienia aeroelastyczne

Termoaeroelastyczność

Zjawiska aeroelastyczne w których istotny jest wpływ temperatury:

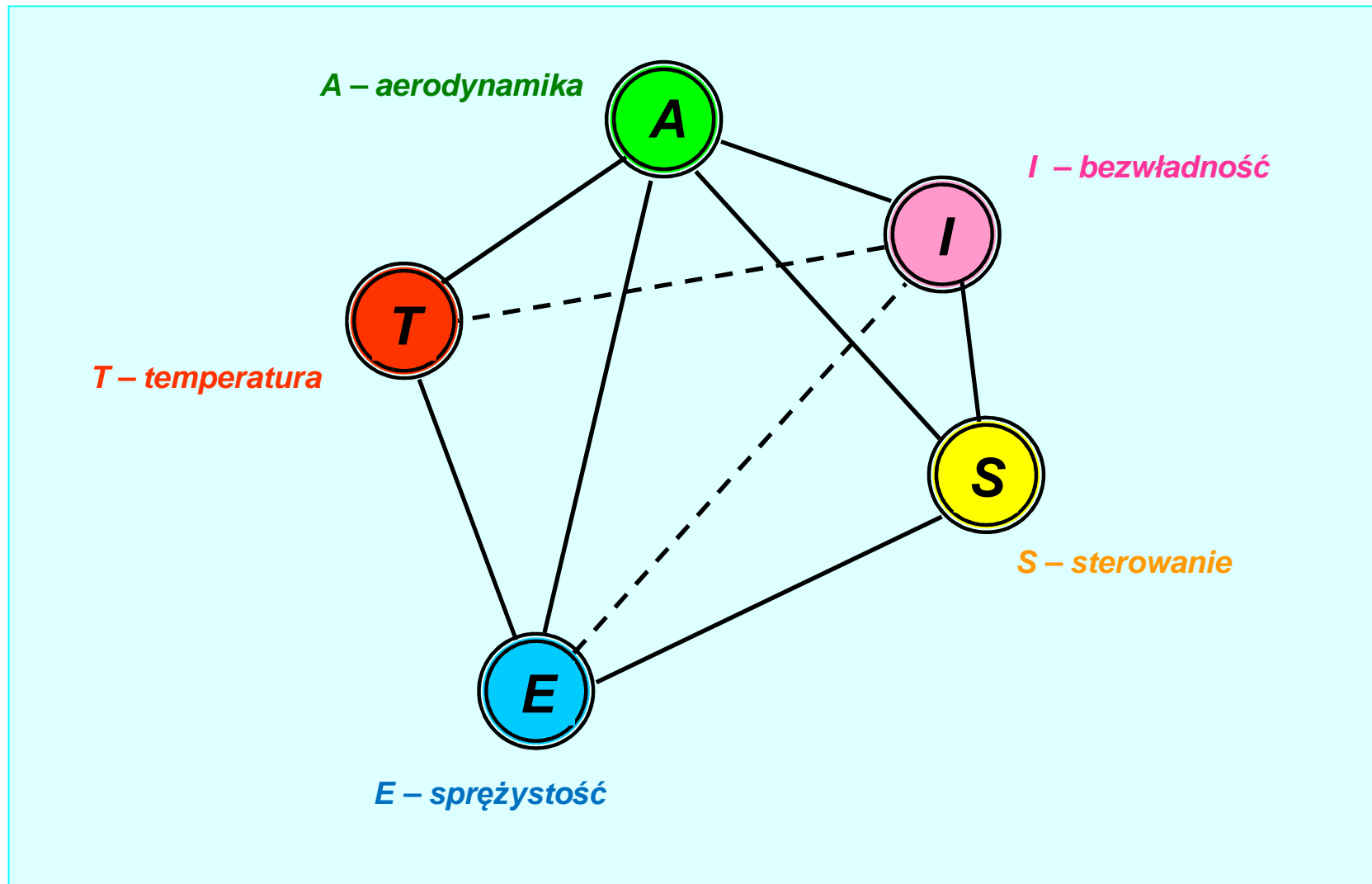
- loty hipersoniczne i kosmiczne,
- aeroelastyczność łopatek turbin silników odrzutowych.

Serwoaeroelastyczność

Czynne sterowanie zjawiskami aeroelastycznymi:

- czynne tłumienie flatteru,
- sterowanie zmianami geometrii skrzydeł.

Rodzaje zjawisk aeroelastycznych



Diament Aeroelastyczny

Prędkość krytyczna

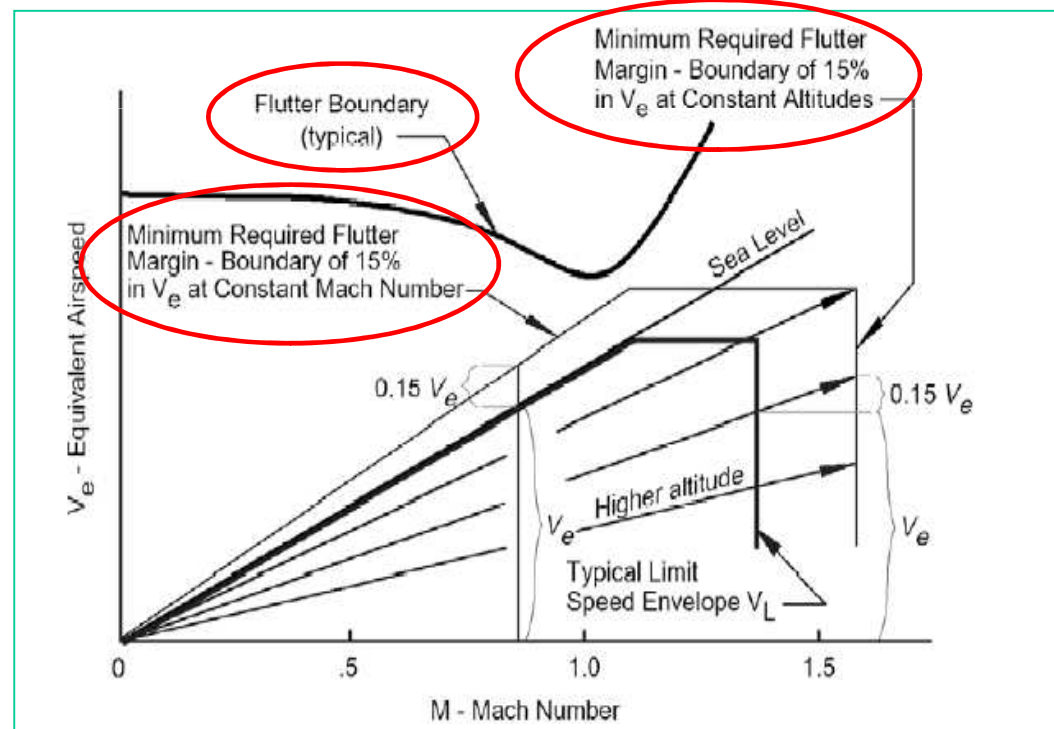
Jest to taka **najmniejsza** prędkość opływu obiektu (lub prędkość jego poruszania się w ośrodku nieruchomym) przy której zjawisko aeroelastyczne może wystąpić.

Znaczenie prędkości krytycznej w lotnictwie

Prędkość krytyczna ogranicza dopuszczalną prędkość eksploatacyjną samolotu.

Konieczność wyznaczenia prędkości krytycznej regulują odpowiednie przepisy: MIL, FAR, JAR, CS.

Wyznaczenie prędkości krytycznej ma zasadnicze znaczenie dla prawidłowego zaprojektowania samolotu i jego bezpiecznej eksploatacji



AEROELASTYCZNOŚĆ

4.1. WPROWADZENIE

4.1.3. METODY ANALIZY AEROELASTYCZNEJ

Analiza zjawisk aeroelastycznych

Niebezpieczeństwo wystąpienia flatteru (oraz innych zjawisk aeroelastycznych) wymusza konieczność przeprowadzenia badań teoretycznych i doświadczalnych przed dopuszczeniem prototypu samolotu do lotów z większymi prędkościami.

Flutterowe próby w locie są bardzo niebezpieczne – w przeszłości (Junkers Ju-90, Kobuz), ale i obecnie (Iryda), miały miejsce katastrofy w trakcie prowadzenia takich prób.

Dlatego istnieje potrzeba przeprowadzenia badań analitycznych zjawisk aeroelastycznych, które **możliwie precyzyjnie określą prędkości krytyczne** w różnych warunkach lotu.


Wynika stąd, że potrzebne są wiarygodne metody analizy aeroelastycznej.

Od ich jakości zależy bezpieczeństwo pilotów przeprowadzających takie próby.

Metody analityczne

Klasyczna analiza aeroelastyczna

$$\mathbf{M}(U)\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}(U)\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}(U)\mathbf{x} = \mathbf{0}$$


$$\mathbf{x}(t) = \bar{\mathbf{x}} e^{\lambda t}$$


$$(\lambda^2 \mathbf{M} + \lambda \mathbf{C} + \mathbf{K})\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$$

Pierwiastki $\lambda = \alpha + i\omega$ zależą od prędkości U , $\lambda = \lambda(U)$

$\omega(U)$ - częstość drgań,

$\alpha(U)$ - współczynnik tłumienia drgań.

Stateczność ruchu $\mathbf{x}(t)$

$\alpha < 0$ - drgania zanikają,

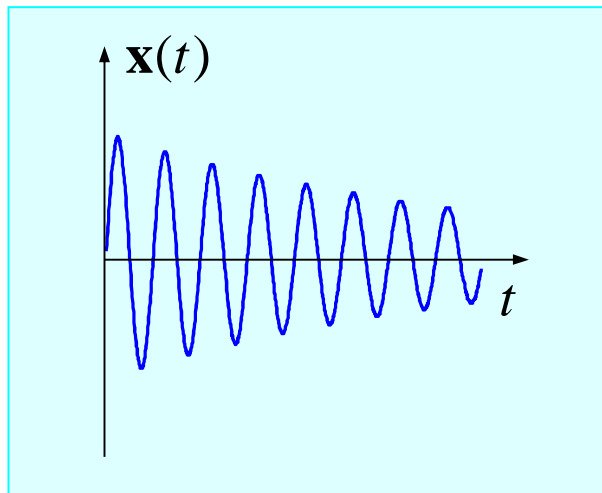
$\alpha = 0$ - drgania ustalone,  Prędkość krytyczna U_{kr}

$\alpha > 0$ - drgania narastają.

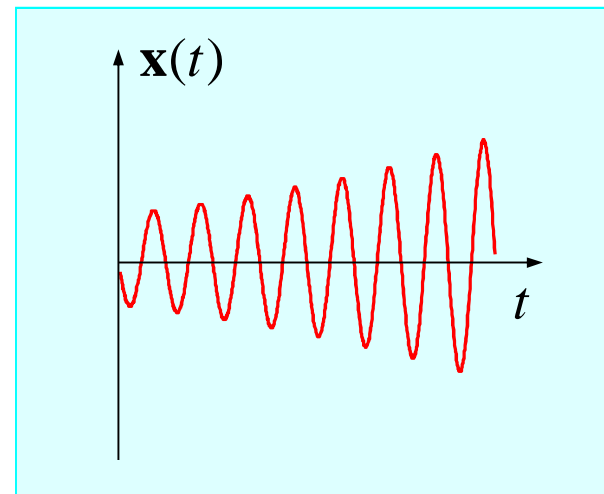
Metody analityczne

Symulacyjna analiza aeroelastyczna

$$U \rightarrow \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{0} \rightarrow \text{całkowanie numeryczne} \rightarrow \mathbf{x}(t; U)$$



U_1 - ruch zanika

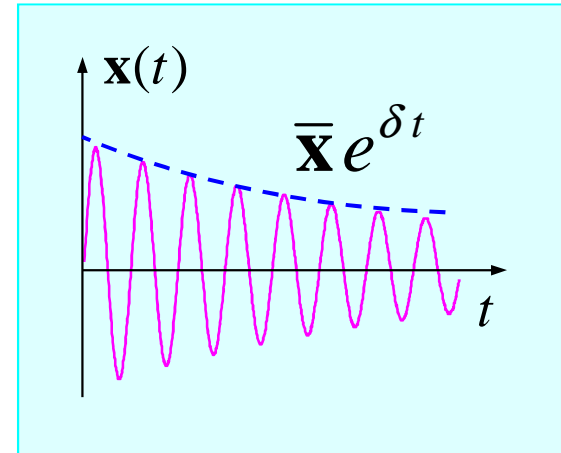
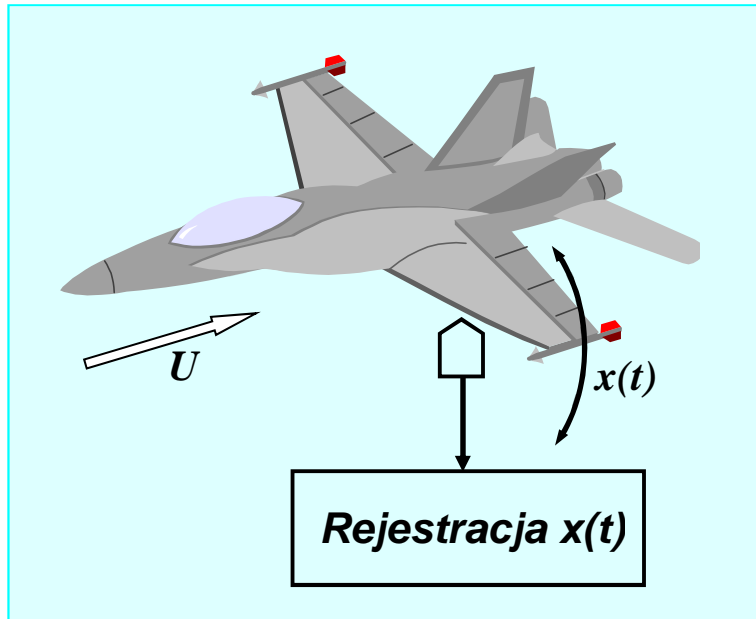


U_2 - ruch narasta

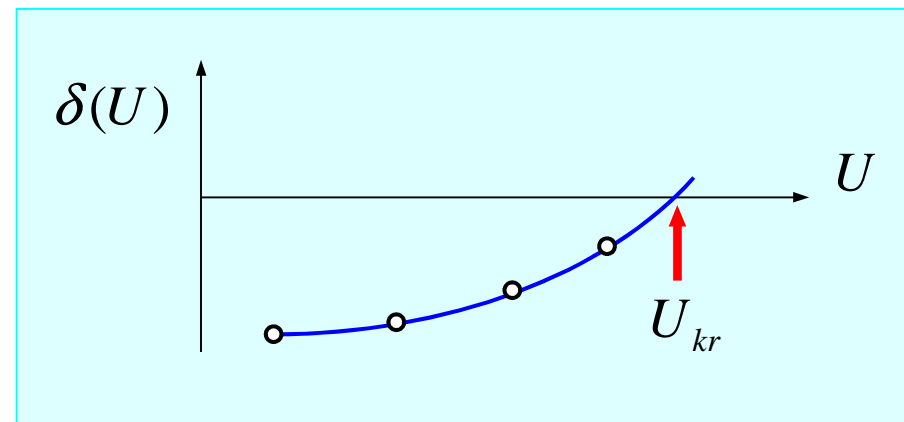
$$U_1 < U_{kr} < U_2$$

Jest to numeryczny odpowiednik badań doświadczalnych.

Metody doświadczalne



δ - logarytmiczny dekrement drgań



Podobnie przebiegają laboratoryjne metody doświadczalne.

Wnioski

1. Zjawiska aeroelastyczne - zjawiska w których obiekty odkształcalne zostają wprowadzone w ruch bądź odkształcone na skutek oddziaływania na nie poruszającego się powietrza.
2. Prędkość krytyczna – najmniejsza prędkość opływu obiektu przy której zjawisko aeroelastyczne może wystąpić
3. Najważniejszym zjawiskiem aeroelastycznym w lotnictwie jest flutter.
4. Flutter jest bardzo groźny, gdyż często prowadzi do gwałtownego zniszczenia konstrukcji.