FAKULTA STROJNÍ TUL

ZKM
P03 Vliv prostředí

Ing. Jan Kracík, Ph.D. (převzato od Ing. Jan Novosád, Ph.D.)
Katedra energetických zařízení

jan.kracik@tul.cz

Obsah

- Základní dimenzování - zatížení
- Zatížení mechanické, tepelné, ostatní
- Vlivy prostředí (vlhkost, tlak, vibrace)
- Testovací standardy

Základní druhy zatížení

- **Mechanické**
  - Statické
  - Dynamické
- **Tepelné** (teplotní)
- **Logistické a provozní**
  - Přeprava, manipulace, skladování
  - Operační zatížení

Zatížení

Maximální vs návrhové zatížení

- **Maximální zatížení** („Limit Loads“) – např. nepřekročitelné zatížení s pravděpodobnosti 99 %

- **Návrhové zatížení** („Design Limit Loads“) – LL × návrhový součinitel (Design Factor (DF) = 1.5 – 10 a více)

Zatížení

Maximální zatížení

<

Návrhové zatížení

Vliv prostředí

- **Teplota** (teplotní analýza, termo-mechanická analýza, cyklické namáhání teplotou, radiační analýza)
- **Tlak** (statické namáhání, cyklické namáhání, akustické testy)
- **Vibrace** (modální analýza, frekvenční analýza, harmonické vibrace, náhodné vibrace)
- **Ráz** („Shock“)

Vliv prostředí

- **Vlhkost** (uvolňování plynů)
- **Radiace** (vliv RTG…)
- **Koroze** (koroze mezi materiály)
- **Plísně a houby**

Teplota

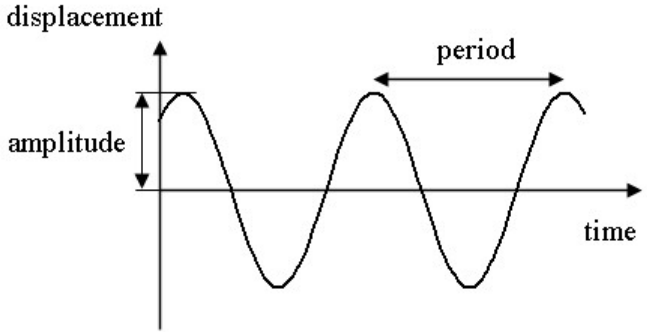
- **Běžná zařízení:** -20°C až 40°C
- **Vojenský materiál:** -62°C až 71°C (-54°C až 52°C)
- **Automotive:** -40°C až 70°C

Tlak

- **Standardní tlak** = 101.325 kPa
- **Pumpování** při změnách tlaku
- **Nutné prostupy** („leakage“) – většinou s filtrem
- **Deformace** vlivem tlaku
- **Absorpce vlhkosti**
- **Kondenzace**

Vibrace

- **Harmonické**
- **Náhodné** („random“)
- **Vlastní frekvence**, rezonanční frekvence



$$f_N = \left(\frac{0.05}{\pi}\right)\left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

k… tuhost v N/m

m … hmotnost v kg

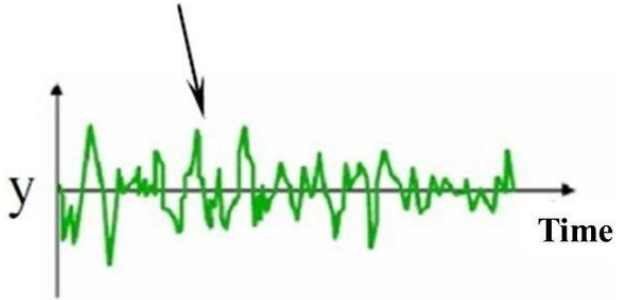
Harmonické vibrace

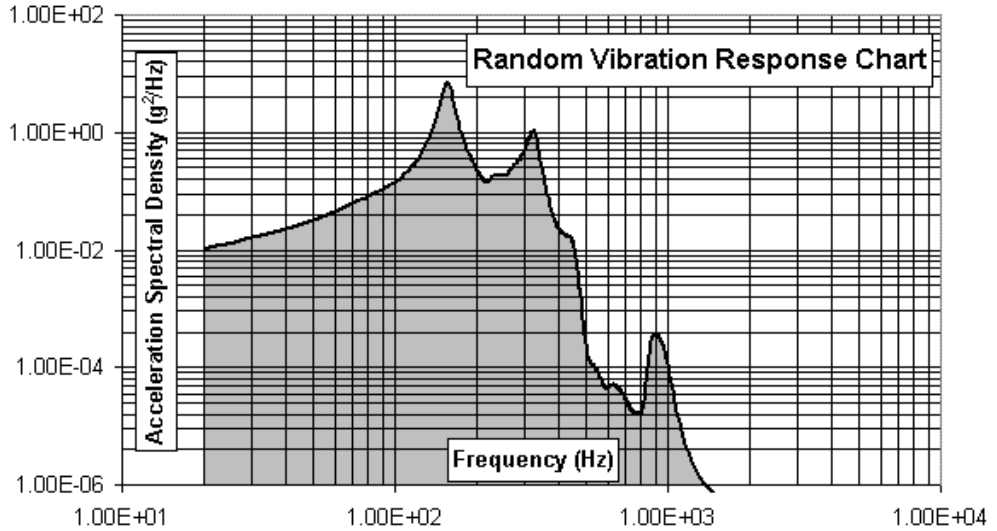
- **Nejnižší vlastní frekvence (VF) musí být vyšší než budící frekvence**, ideálně alespoň 2x
- Vhodné je navrhovat systém tak, aby VF subsystému byly min 2x VF celého systému
- **FEM analýza** – Modální analýza (MA), vlastní tvary kmitů, lineární vs. nelineární MA
- **Vliv teploty a tlaku**, předpětí v systému
- **Harmonická analýza**

Náhodné vibrace

- Řeší se s ohledem na interakci s vlastní frekvencí
- Zjednodušeně (pro návrh) se využívá **Spektrální hustota výkonu (PSD)**

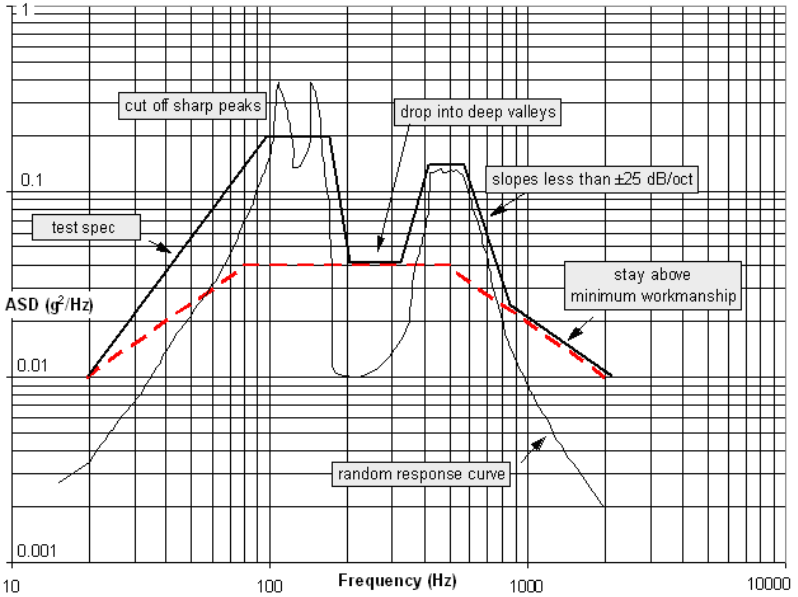
$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y_n \sin n\omega_0 t$$





Náhodné vibrace

- Řeší se s ohledem na interakci s vlastní frekvencí
- Pro návrh se zjednodušeně využívá **Spektrální hustota výkonu (PSD), tzv. „Power Spectral Density“**



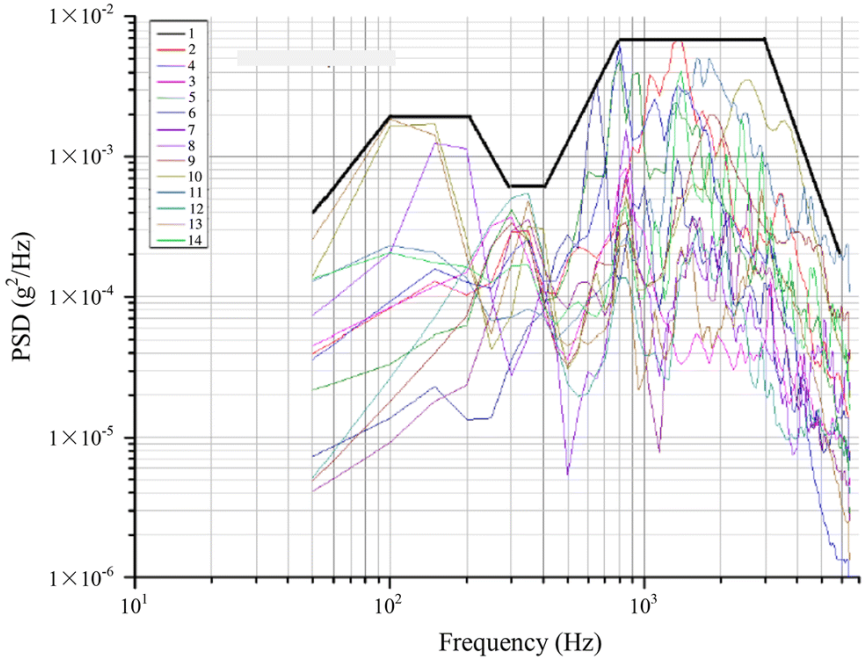
Náhodné vibrace

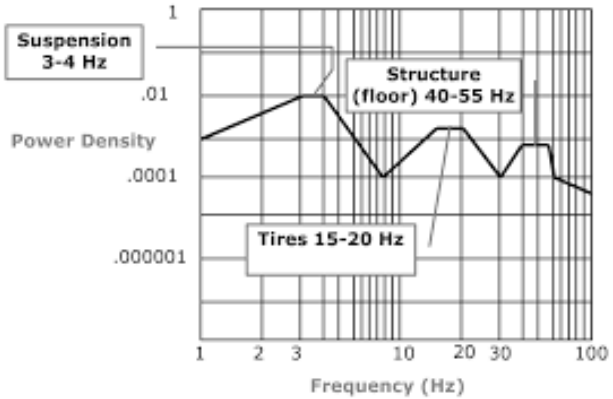
- **Směrodatná odchylka odezvy ξ**
- Vyjadřuje **efektivní statistickou hodnotu** namáhání, napětí nebo průhybu součástky způsobenou náhodným třesením

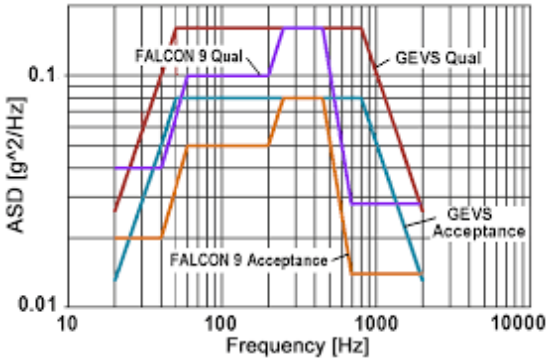
$$\xi = \left(\frac{\pi f_N PSD}{4\eta}\right)^{\frac{1}{2}}$$

η vyjadřuje efektivní strukturní tlumení

Náhodné vibrace







Frekvenční spektrum - doprava

$$g_{rms} = \left(\frac{\pi}{2} \cdot f_N \cdot Q \cdot PSD\right)^{\frac{1}{2}}$$

- Q je činitel jakosti =1/(2η)
- g_{rms} => 1σ
- Reálně se uvažuje 3σ

Frequency (Hz)	PSD – Pick up/Delivery vehicle (g^2/Hz)
1	0.001
3	0.035
5	0.35
7	0.0003
13	0.0003
15	0.001
24	0.001
29	0.0001
50	0.0001
70	0.002
100	0.002
200	0.00005
Overall, g rms	0.46

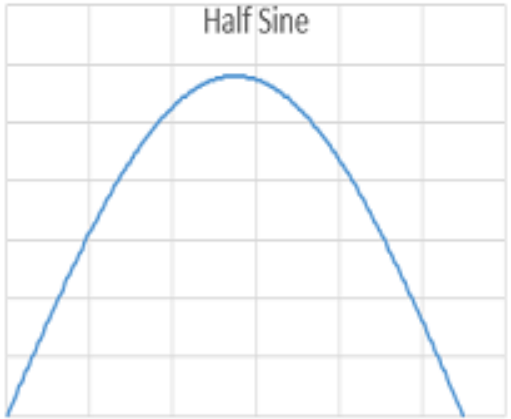
Frequency (Hz)	PSD – Over the Road Trailer (Semi-Truck) (g^2/Hz)
1	0.0007
3	0.02
5	0.02
7	0.001
12	0.001
15	0.004
24	0.004
28	0.001
36	0.001
42	0.003
75	0.003
200	0.000004
Overall, g rms	0.53



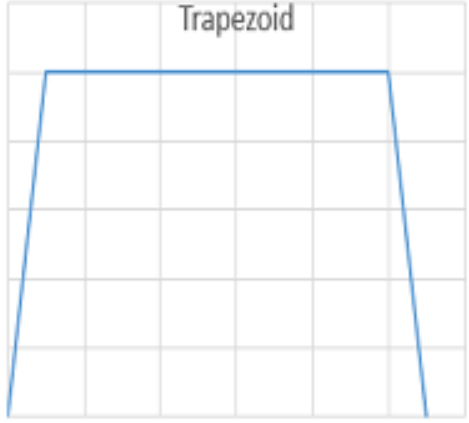


Ráz („Shock“)

- Buzení maximálně polovina periody
- Zesílení vstupu, rezonance vybuzeného systému
- Vliv délky a tvaru rázu, VF, tlumení

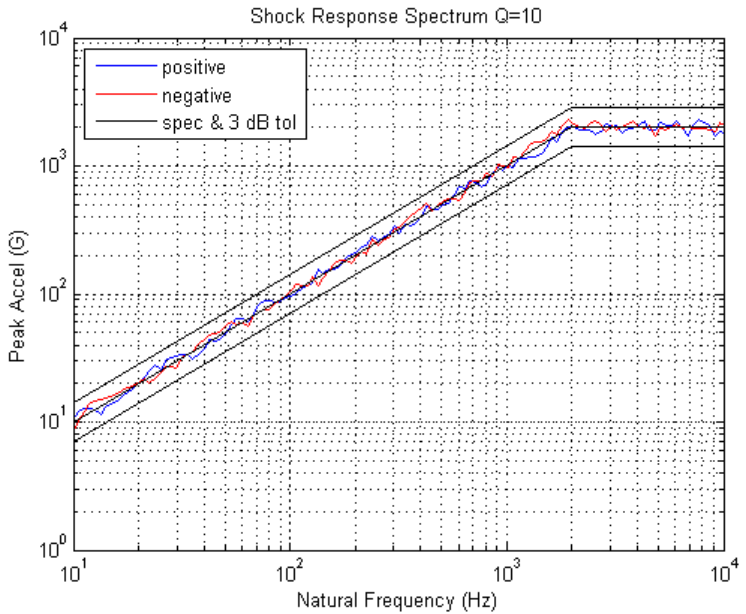






Ráz („Shock“)

- Maximální zesílení 2x – návrh pro max. 2x největší zatížení
- Vratné i nevratné změny
- Běžná manipulace 3G
- Pád z auta 25G (15G pokud zabaleno)



Vlhkost

- Montáž v suchém prostředí, izolace
- Plnění inertním plynem (N, He)
- Pohlcování vlhkosti (silikagel)

Koroze

- Oxidační nebo redukční reakce
- Vliv vlhkosti
    - Styk různých materiálů (galvanic attack)
    - Vliv vibrací (fretting)
    - Difuse H_2 do materiálu (Hydrogen embrittlement)
    - Koroze při napětí

Koroze

- Ochrana
  - Al (elox), Ti, Mg, nerez ocel 316, 410
  - Nátěry, nápary

Další

- Poškození zářením (gama, X, neutrony, protony)
- Poškození laserem
- Abrase a eroze (nápary)
  - Písek
  - Sníh
- Houba

Náročné podmínky – dle požadavku na výrobky

Parametr	Normální	Náročný	Extrém
T_{min}	20 °C	-51 °C	-271 °C
T_{max}	27 °C	71 °C	150 °C
p_{low}	88 kPa	57 kPa	0 kPa
p_{high}	108 kPa	1 MPa	138 MPa
Vlhkost	25-75 %	100 %	Voda
Ráz (a_G)	3	100	11,000
Vibrace	0.2 mm/s rms	0.04 g^2/Hz	0.13 g^2/Hz

Testování – MIL-STD-1540

Druh testu	Kvalifikace	Akceptance	Volba
Teplotní-vakuum	x	x	
Harmonické vibrace			x
Náhodné vibrace	x	x	
Shock			x
Zrychlení	x		
Vlhkost			x
Životnost			x

https://vibrationresearch.com/wp-content/uploads/2021/05/MIL-STD-1540D.pdf

FAKULTA STROJNÍ TUL

Děkuji za pozornost

Ing. Jan Kracík, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

jan.kracik@tul.cz