

VI. Odezva konstrukcí na zatížení větrem

- 1. Charakteristiky větru**
- 2. Ztráta aerodynamické stability**
- 3. Výpočet dynamické odezvy podle norem**
- 4. Prostředky k omezení dynamické odezvy konstr.**



1. Charakteristiky větru

Vítr – vzniká vyrovnáváním tlaků v atmosféře, která je nerovnoměrně ohřátá Sluncem nebo Zemí, popisuje pohyb částic hmoty vzduchu

Mezní vrstva – přízemní vrstva, kde pro rychlost větru platí:

- a) směr rychlosti větru není rovnoběžný s izobarami, střední rychlost větru klesá (tření o zemský povrch)
- b) tření je též příčinou turbulence, která se projevuje kolísáním - fluktuací - okamžité rychlosti větru kolem průměru

$$v(x, t) = v_m(x) + v_f(x, t)$$

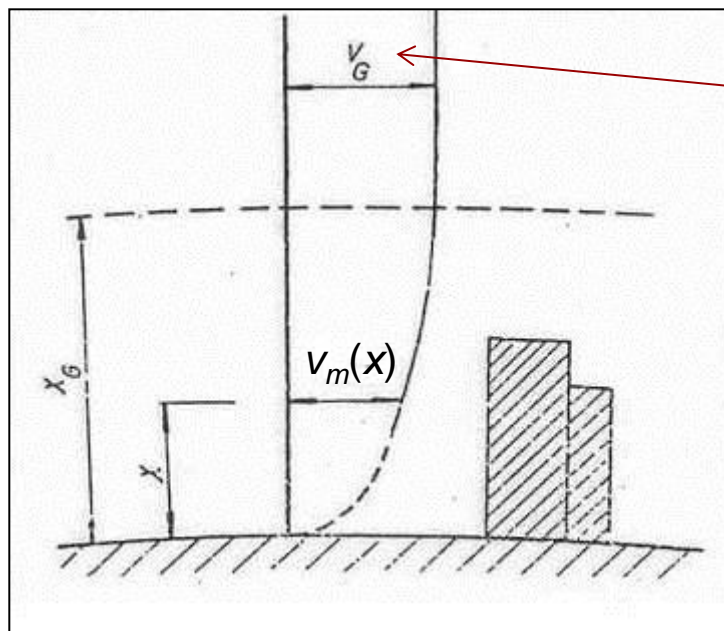
okamžitá rychlost = střední (stálá) rychlost + proměnná (fluktuační) složka

x_G - výška mezní vrstvy
300 m (otevřený terén) - 600 m (města)



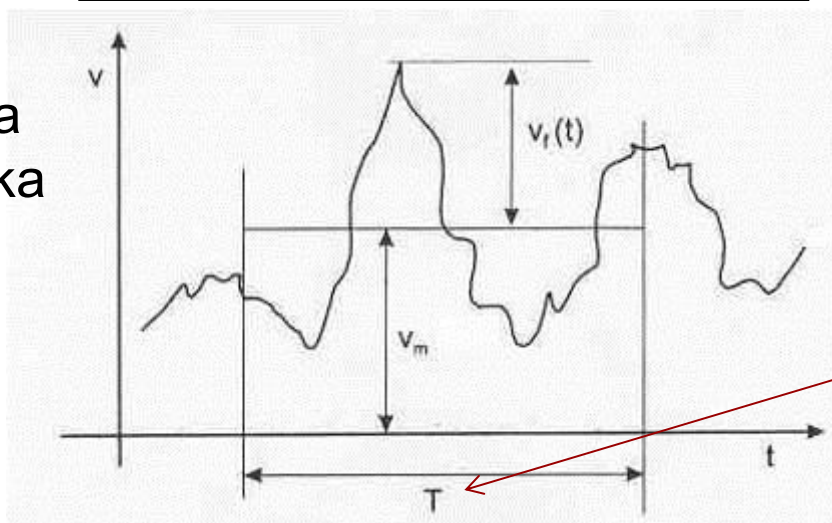
1. Charakteristiky větru

Střední rychlost
v mezní vrstvě



v_G – rychlost
gradientního větru
(pohybuje se konstantní
rychlostí nad mezní
vrstvou, sleduje izobary)

Střední složka a
proměnná složka
rychlosti větru



T – integrační doba
(pro určení střední
rychlosti větru)

1. Charakteristiky větru

Beaufortova stupnice rychlosti větru

| stupeň | rychlost větru (m/s) | slovní označení | účinky |
|--------|----------------------|--------------------|---|
| 0 | 0–0,2 | bezvětrí | kouř stoupá svisle vzhůru |
| 1 | 0,3–1,5 | vánek | kouř už nestoupá úplně svisle, korouhev nereaguje |
| 2 | 1,6–3,3 | slabý vítr | vítr je cítit ve tváři, listí šelestí, korouhev se pohybuje |
| 3 | 3,4–5,4 | mírný vítr | listy a větvičky v pohybu, vítr napíná prapory |
| 4 | 5,5–7,9 | dosti čerstvý vítr | vítr zvedá prach a papíry, pohybuje větvičkami a slabšími větvemi |
| 5 | 8,0–10,7 | čerstvý vítr | hýbe listnatými keři, malé stromky se ohýbají |
| 6 | 10,8–13,8 | silný vítr | pohybuje silnějšími větvemi, je obtížné používat deštník |
| 7 | 13,9–17,1 | prudký vítr | pohybuje celými stromy, chůze proti větru obtížná |
| 8 | 17,2–20,7 | bouřlivý vítr | láme větve, vzpřímená chůze proti větru je již nemožná |
| 9 | 20,8–24,4 | vichřice | menší škody na stavbách |
| 10 | 24,5–28,4 | silná vichřice | na pevnině se vyskytuje zřídka, vyvrací stromy a ničí domy |
| 11 | 28,5–32,6 | mohutná vichřice | rozsáhlé zpustošení plochy |
| 12 | > 32,7 | orkán | ničivé účinky odnáší domy, pohybuje těžkými hmotami |



1. Charakteristiky větru

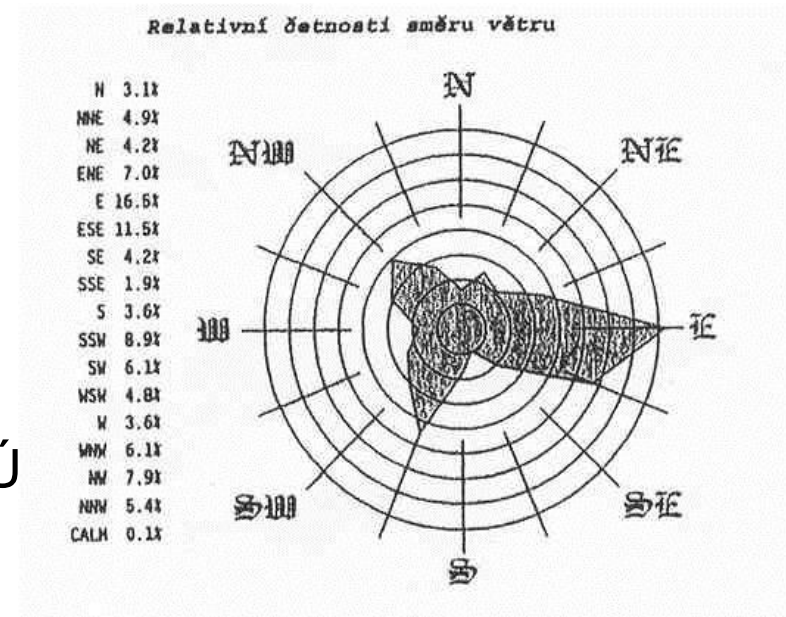
Veličiny vyjadřující charakteristiky větru

- směr větru
- střední (stálá) složka rychlosti větru
- gradient rychlosti větru
- maximální rychlost větru
- proměnná (fluktuační) složka rychlosti větru
- turbulence vzdušného proudu
- režim obtékání

Směr větru

- popisován tzv. růžicí výskytu pro danou lokalitu

měsíční přehled vydaný ČHMÚ
pro lokalitu Praha-Karlov



1. Charakteristiky větru

Střední složka rychlosti větru

– nutná k výpočtu statického tlaku větru

$$v_m = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$

T – integrační doba (zásadním způsobem ovlivňuje velikost střední složky rychlosti, smluvní hodnota)

ČSN 73 00 35 – při sestavování mapy větrových území použita integrační doba 10 s (odpovídá střední době návratu rychlosti větru 80 let)
EC 1 – použita integrační doba 10 minut ve výšce 10 m nad terénem v otevřené krajině (odpovídá střední době návratu rychlosti větru 50 let)

Gradient rychlosti větru

– popisuje vzrůst střední složky rychlosti větru v mezní vrstvě

$$v_m(x) = v_{10} \left(\frac{x}{10} \right)^\alpha$$

Davenportův empirický vztah

v_{10} – rychlost ve výšce 10 m nad terénem

α – koeficient vyjadřující drsnost terénu

EC 1 – součinitel drsnosti terénu $c_R(z)$



1. Charakteristiky větru

Maximální rychlost větru

– odpovídá integrační době $T = 2$ až 3 sek,
je cca 1,25 násobkem rychlosti větru s $T = 10$ minut,
nebo 1,7 násobkem rychlosti větru s $T = 1$ hodina

Proměnná (fluktuační) složka rychlosti větru

– dynamická složka rychlosti větru se při zjednodušujících předpokladech (náhodný, stacionární proces) popisuje obvykle pomocí *výkonových spektrálních hustot*
(ty ukazují frekvenční složení procesu a mohou se měřit)

Turbulence vzdušného proudu

$$I(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)}$$

– poměr směrodatné odchylky proměnné složky rychlosti a střední složky rychlosti ve výšce z s výškou nad terénem klesá
(např. při povrchu $I = 0,27$, ve výšce 100 m $I = 0,15$)



1. Charakteristiky větru

Režim obtékání

závisí na tzv. Reynoldsově čísle, intenzitě turbulence a drsnosti povrchu obtékaného tělesa
charakterizován velikostí tlaků (čelní odpor, vztlak) a prouděním za tělesem (hladký proud, pravidelné oddělování vírů nebo nepravidelné proudění)

Tlak větru

$$p(t) = c_D \frac{1}{2} \rho \left(v_m + v_f(t) \right)^2 \doteq c_D \frac{1}{2} \rho \left(v_m^2 + 2v_m v_f \right)$$

c_D – aerodynamický součinitel

ρ – objemová hmotnost vzduchu



2. Ztráta aerodynamické stability

pokud se po náhodném malém vychýlení konstrukce v proudu vzduchu převrhne, zřítí nebo se amplitudy kmitů začnou dále zvětšovat, dojde k *aerodynamické/aeroelastické nestabilitě*

1. Příčné kmitání (odtrhávání vírů)

při obtékání některých těles (profilů) se vytvářejí víry, které se za vhodných podmínek oddělují střídavě na obou stranách vzniklá periodická síla má snahu těleso rozkmitat v rovině kolmé ke směru větru

nastává, jestliže frekvence odtrhávání vírů je shodná s některou vlastní frekvencí štíhlé konstrukce nebo konstr. prvku

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot f_i}{St}$$

b – průměr válce

f_i – vlastní frekvence

St – Strouhalovo číslo
0,18 pro válec

EC1 – není třeba vyšetřovat,
je-li kritická rychlost větru $v_{crit,i}$
větší než 1,25 x střední rychlost
nebezpečí – namáhání na únavu
příklad – stojky Žďákovského mostu



2. Ztráta aerodynamické stability

2. Oválování

kruhový příčný řez tenkostěnných těles tvaru válce (nejspíše kruhového, např. ocelové komíny, nádrže) se při kmitání vyvolaném odtrháváním Strouhalových vírů mění v ovál

3. Galloping

vzniká při obtékání ostrohranných těles (např. mostů) za jistých podmínek útlumu a aerodynamických podmínek (závisí na hodnotě tzv. součinitele vztlaku a čelního odporu - určí se experimentálně v aerodynamickém tunelu)

samobuzené kmitání (většinou v rovině kolmé ke směru větru nebo kroucením), kdy energie pohybu je čerpána z energie vzdušného proudu, je vyvoláno náhodným impulzem, turbulencí větru nebo vlivem Strouhalových vírů, v závislosti na útlumu končí havárií nebo ustáleným kmitáním (snižování únavové pevnosti, vznik opakovaných plastických deformací)



2. Ztráta aerodynamické stability

3.1 Galloping lan

Lana (kotvené stožáry, zavěsy mostů) jsou ohrožena jednak kmitáním vlivem Strouhalových vírů (rychlé kmitání okem nepozorovatelné, působící dlouhodobě), jednak gallopingem (pomalé kmitání v základním tvaru s velkými amplitudami)

- námraza (změna hmotnosti, tvaru)
- svazky vodičů (2-4-6 prvků fixovaných distančními elementy)
- vícepramenná vinutá lana (různý režim obtékání na horním a dolním povrchu způsobí rozdílné tlaky)
- déšť (porušení pravidelného kruhového tvaru příčného řezu stékající vodou, nutno zajistit dostatečný útlum)

3.2 Úplavový galloping

Vyskytuje se u štíhlých těles umístěných za sebou, kdy druhé těleso kmitá v proudu vzduchu rozvířeného prvním tělesem, a to i když první těleso samo nekmitá.



2. Ztráta aerodynamické stability

4. Kroutivě ohybový flutter

nastává u mostních konstrukcí a lávek pro pěší – harmonické kmitání ve složeném pohybu kroutivě ohybovém, nastává při kritické rychlosti větru, kdy se k sobě blíží frekvence ohybového a kroutivého kmitání (Tacoma Bridge)

5. Divergence a flutter

nastává u plošných konstrukcí (reklamní tabule, široké mostovky)

- divergence (statický jev, vybočení)

- flutter (dynamický jev, rozkmitání konstrukce ve směru kolmém ke směru větru)

6. Buffeting

nastává u konstrukcí (komíny ve skupině, mostní stojky, pruty příhradové konstr., paralelní závěsy) kmitajících v závětrří za jinou konstrukcí, je-li vlastní frekvence blízká frekvenci vzdušného proudu (chladicí věže ve Ferrybridge)



3. Výpočet dynamické odezvy podle norem

ČSN 73 0035

1. statická složka (uvažuje se vždy)

2. dynamická složka - účinky ve směru větru

- účinky kolmo na směr větru

(příčné kmitání způsobené odtrháváním vírů)

Dynamická složka se uvažuje pouze v určitých případech:

- např. budovy vyšší než 100 m nebo je-li $f_1 < 1$ Hz

- objekty, kde $f_1 \leq 4$ Hz (komíny, stožáry, věže)

Složky se nesčítají, rozhoduje méně příznivý stav

Dynamická složka - $S_{dyn} = S_m + S_{fl}$

a) střední složka - S_m (vyvolává odezvu statickou)

b) fluktuační složka - S_{fl} (vyvolává odezvu dynamickou)



3. Výpočet dynamické odezvy podle norem

Fluktuační složka

odezva se řeší rozkladem do vlastních tvarů kmitání účinek zatížení (vnitřní síly, přetvoření) $S_{fl(j)}$ při kmitání v j -tém vlastním tvaru

$$S_{fl(j)} = q_{(j)} S_{(j)}$$

parametr $q_{(j)}$ závisí na fluktuačním zatížení, veličina $S_{(j)}$ odpovídá kmitání v j -tém tvaru a závisí na vlastnostech konstrukce

výsledný účinek fluktuačního zatížení S_{fl}

$$S_{fl} = \sqrt{\sum_{j=1}^n S_{fl(j)}^2}$$

počet uvažovaných tvarů je n , zpravidla do vl. frekvence 4 Hz



3. Výpočet dynamické odezvy podle norem

Eurokód 1

Nerozlišuje působení stálé složky zatížení větrem od působení proměnné složky zatížení, působení větru různými součiniteli transformuje ve statickou složku, návrat k dynam. součiniteli

Platí pro:

- pozemní a inženýrské stavby s výškou do 200m
- mosty s rozpětím menším než 200m

Neplatí pro:

- kotvené stožáry a komíny
- kroutivé kmitání (vysoké budovy s jádrem)
- zavěšené mosty
- kmitání, kdy se musí uvažovat více tvarů kmitání

- výpočet odezvy ve směru větru (výchylka, směr. odchylka zrychlení)
- odtrhávání vírů (kmitání kolmo na směr větru, vírová rezonance)
- stanovení kritických rychlostí v případě ztráty aeroelastické nestability – galloping, interferenční jevy, divergence, flutter



3. Výpočet dynamické odezvy podle norem

Maximální dynamický tlak větru ve výšce z
(zahrnuje střední a krátkodobé fluktuace větru)

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z)$$

→ $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ měrná hmotnost vzduchu

→ $v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$ střední rychlost větru

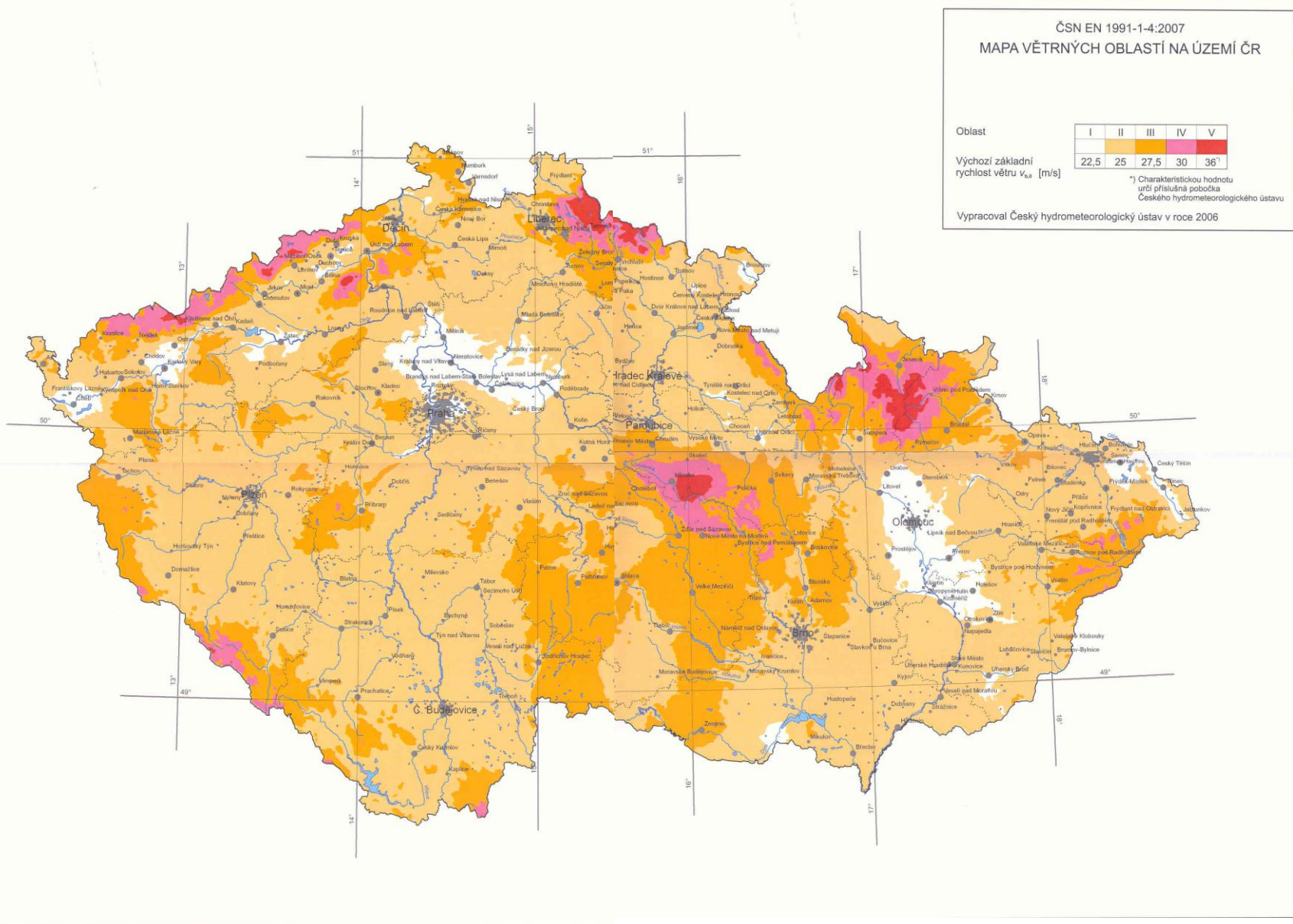
$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$ základní rychlost větru

↓
výchozí základní rychlost v .
(desetiminutová střední rychlost
větru ve výšce 10 m, střední doba
návratu 50 let) – viz mapa

↓
součinitel ročního období (=1)

↓
součinitel směru větru (=1)





3. Výpočet dynamické odezvy podle norem

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$$



součinitel orografie (izol. kopce, hřebeny, srázy)

součinitel drsnosti terénu

→ $I_v(z)$ intenzita turbulence
(podíl směrodatné odchylky turbulence a střední rychlosti větru)

Tlak větru na povrchy (na vnější a vnitřní povrchy konstrukce)

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$



$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi}$$



součinitel tlaku
(aerodynamický součinitel)



3. Výpočet dynamické odezvy podle norem

Síly od větru (na celou konstrukci nebo nosný prvek)

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot A_{ref}$$



součinitel konstrukce

účinek zatížení při nesoučasném výskytu maximálních tlaků větru na povrchu konstrukce (součinitel velikosti c_s) a zvýšení zatížení způsobené turbulencí (dynamický součinitel c_d)

je roven 1 např.:

- pozemní stavby nižší než 15m
- pozemní stavby s rámovou konstr. a nosnými stěnami, nižší než 100m jejichž výška je menší než 4 délky ve směru větru
- komíny kruhového průřezu nižší než 60m



3. Výpočet dynamické odezvy podle norem

EC1

- Čl. 6.3 + přílohy B a C – podrobný postup pro stanovení součinitele $c_s c_d$
platí pouze pro typické tvary konstrukcí
 - vertikální konstrukce (např. budovy)
 - horizontální konstrukce (např. mostní nosníky)
 - bodově působící objekty (např. informační tabule)a současně je významné pouze kmitání ve směru větru v základním tvaru a tento tvar má konstantní znaménko
- Příloha D – hodnoty součinitele $c_s c_d$ pro:
 - vícepodlažní ocelové a betonové pozemní stavby
 - ocelové a betonové komíny bez vyzdívky
 - ocelové komíny s vyzdívkou



3. Výpočet dynamické odezvy podle norem

Mosty – dynamický výpočet obecně není nutný pro obvyklé konstrukce s rozpětím menším než 40 m

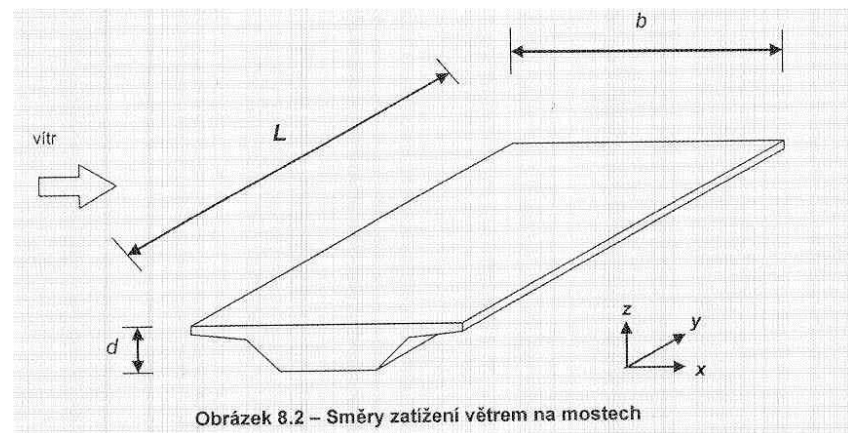
$$F_w = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref}$$

síly ve směru větru

↓ měrná hmotnost vzduchu
↓ základní rychlost větru
↓ součinitel zatížení větrem (aerodynamický součinitel)
↓ referenční plocha

zatížení

- vodorovné kolmé o ose mostu
- vodorovné ve směru osy mostu
- svislé



3. Výpočet dynamické odezvy podle norem

EC1 - příloha E

- Odtrhávání vírů – kmitání kolmo na směr větru
- Galloping – samobuzené příčné kmitání ostrohranných těles
- Účinky interference na příčné kmitání
 - vírová rezonance svislých válců v řadě nebo ve skupině
 - interferenční galloping volně stojících válců
 - klasický galloping spřažených válců
- Divergence – nestability u pružných deskových konstrukcí, statický jev (projeví se např. vybočením)
- Flutter – dynamický jev, projeví se harm. rozkmitáním (mosty velkých rozpětí, lehké mosty – lávky, potrubní mosty) – vzniku divergenci a flutteru se má zabránit

EC1 uvádí podmínky vzniku nestabilit, kritické rychlosti apod.



3. Výpočet dynamické odezvy podle norem

EC1 - příloha F

Základní dynamické charakteristiky konstrukcí

- základní frekvence
- základní tvar kmitání
- ekvivalentní hmotnost
- logaritmický dekrement útlumu

zjednodušené analytické, poloempirické nebo empirické vztahy pro typické konstrukce:

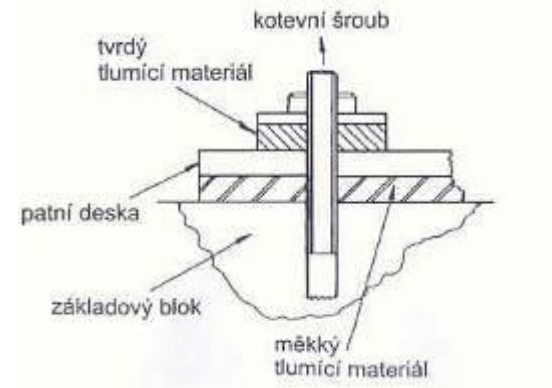
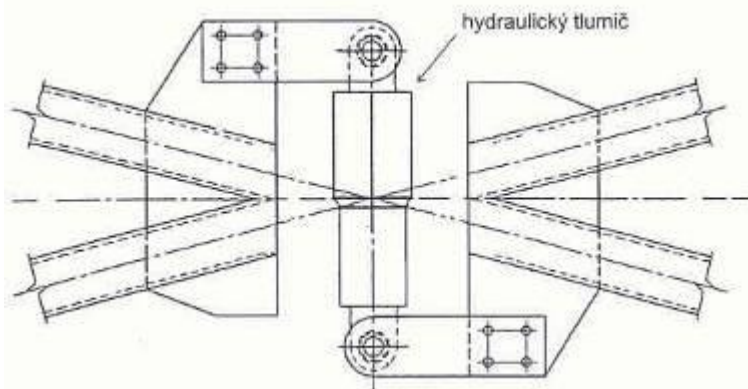
- konzola (obrácené kyvadlo)
- vícepodlažní budova
- komín
- svislé kmitání deskových a komorových mostů
- kroutivé kmitání trámových a komorových mostů



4. Prostředky k omezení dynamické odezvy konstrukcí

1. Mechanické pohlcovače

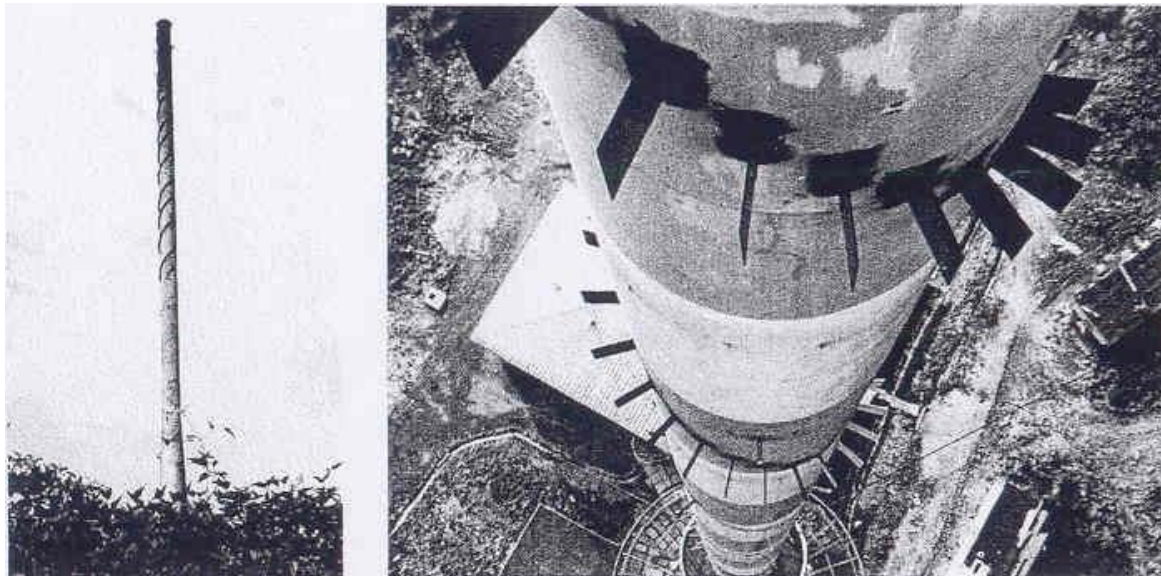
- změna tuhosti nebo hmotnosti konstrukce (rozladění vlastní a budicí frekvence, v případě větru velmi obtížené např. nasypáním písku do stojek mostu Žďákovského mostu se změnila vl. frekvence z 1,6 Hz na 0.73 Hz)
- zvýšení útlumu (hydraulické tlumiče v místech velkých pohybů, např. připojení diagonál, propojení objektů, tlumicí vrstvy mezi patní deskou a základovým blokem, dodatečné přikotvení kotevních lan tlumicími lany)



4. Prostředky k omezení dynamické odezvy konstrukcí

2. Aerodynamické pohlčovače

- zabránění vzniku Kármánových vírů, změna tvaru průřezu, aby nebyl aerodynamicky nestabilní (spirálové rozrážeče, plošné stabilizátory apod.)

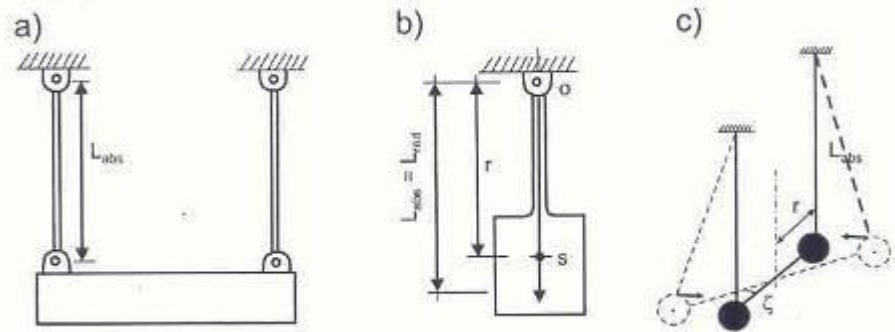
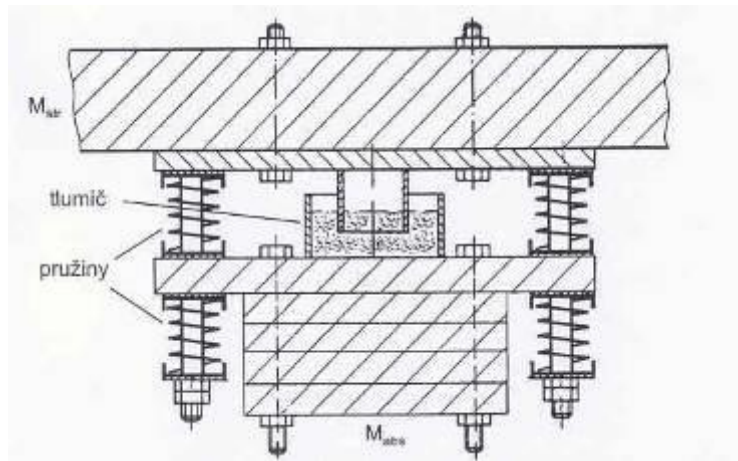


4. Prostředky k omezení dynamické odezvy konstrukcí

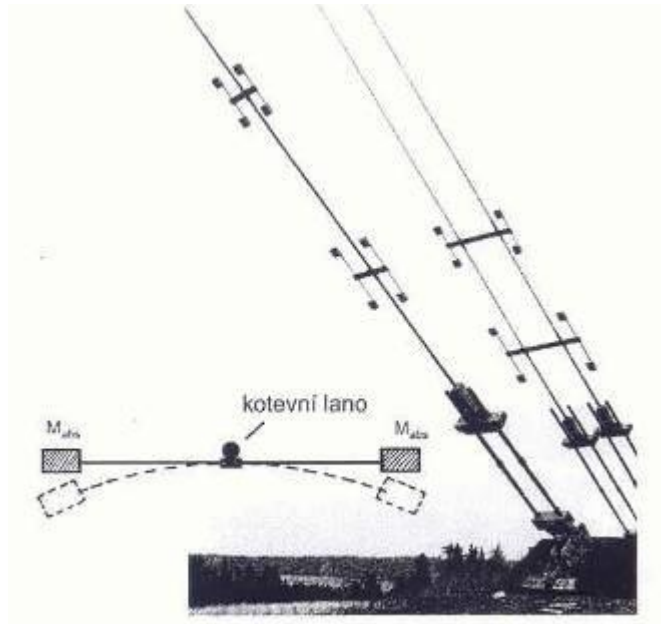
3. Dynamické pohlcovače pasivní

soustava hmota – pružina – tlumič připojené k původní kmitající soustavě, vhodné pro ustálené kmitání

- kyvadlový pohlcovač – a)translační pohyb desky na 2 závěsech, b)kývavý pohyb hmoty, c)torzní kyvadlo
- zavěšený řetěz na kotevním laně
- kulový pohlcovač (koule uložená do mísy kulového tvaru)
- kapalinové pohlcovače (disipace energie pohybující se kapalinou)



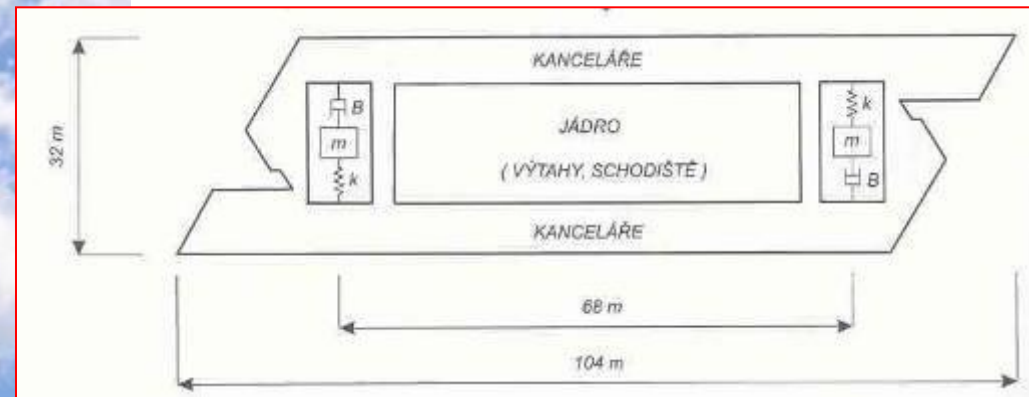
4. Prostředky k omezení dynamické odezvy konstrukcí



4. Dynamické pohlcovače aktivní – inteligentní doplnění systému pasivního tlumení o snímače pohybu, vyhodnocovací systém a silové prvky (např. mrakodrap John Hancock v Bostonu – 2x 270 t s možností rozkmitu $\pm 1,90$ m ovládané elektronicky řízenými hydraulickými lisy)



John Hancock Tower, Boston
(USA), 1976
60 podlaží, 241 m

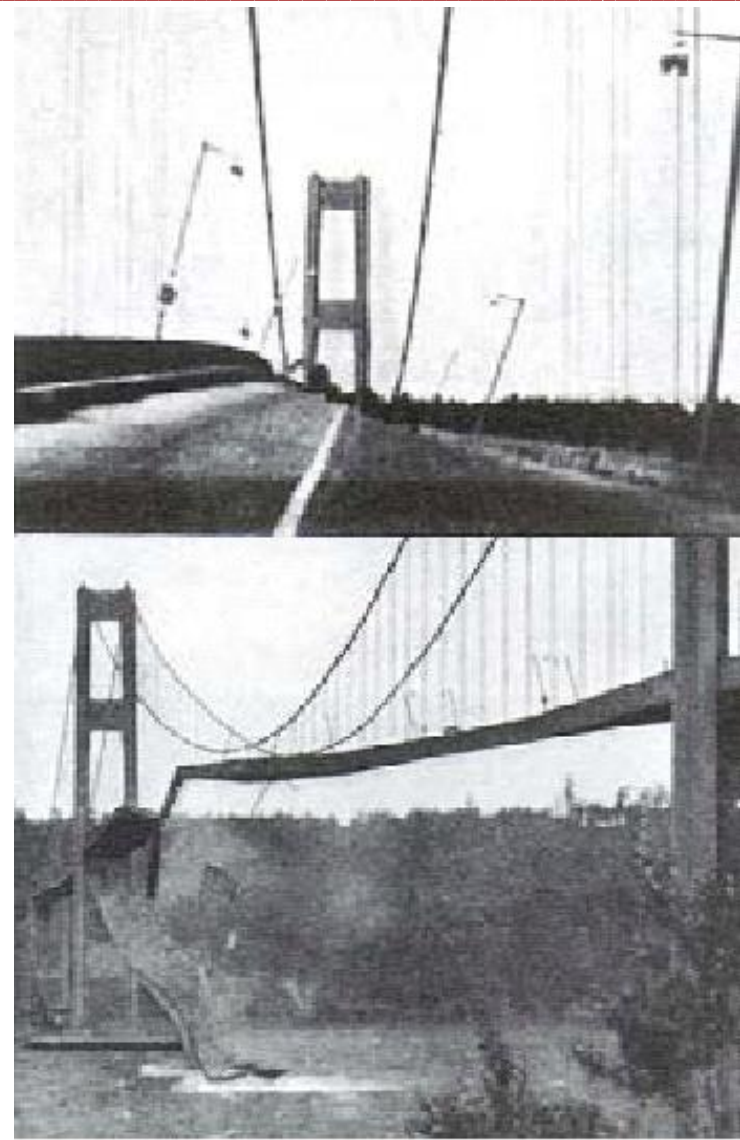


2 x 270 tun
57 podlaží

5,2 m² x 0,9 m



Ferrybridge, Yorkshire (UK), 1965



Tacoma Bridge, WA (USA), 1940