

Využití metody SBRA při posuzování dynamické odezvy vysokých budov zatížených větrem z hlediska použitelnosti

Obvyklou vlastností štíhlých výškových staveb je stále rostoucí míra uplatnění nových vysokopevnostních materiálů, které mají relativně nízkou hmotnost a malý vnitřní útlum. Moderní výškové budovy jsou proto poměrně lehké a poddajné, což se projevuje zvýšenou citlivostí na dynamické zatížení, např. od větru.

Kromě obvyklého posouzení konstrukce z hlediska bezpečnosti (únosnost, stabilita) hraje důležitou roli zhodnocení konstrukce z hledisek použitelnosti [9]. Vedle posouzení schopnosti konstrukce vzdorovat velkým deformacím, které mohou vést k estetické disfunkci a např. také k poškozování nenosných prvků konstrukce, je významným kritériem také potřeba, aby konstrukce vyhověla z hygienického hlediska. Nadměrné pohyby budovy mohou vést také k nepříjemným pocitům citlivějších osob, a proto je nutno při návrhu přihlídnout k pohodlí a pocitu bezpečnosti uživatelů. K posouzení konstrukce ze zmíněného hlediska komfortu uživatelů je využito plně pravděpodobnostní přístup s využitím metody Simulation-Based Reliability Assessment (SBRA) [4, 5].

METODICKÝ PŘÍSTUP

Kritérium použitelnosti

Při posouzení spolehlivosti konstrukce je nutno stanovit tzv. referenční veličinu, která bude na konstrukci sledována a jejíž hodnoty budou porovnány s přípustným intervalem referenčních hodnot. Vnímání vibrací lidským organismem může být hypoteticky závislé na rychlosti pohybu, zrychlení, případně na derivaci zrychlení podle času. Studie (např. [3]) prokázaly, že rozhodujícím kritériem je zrychlení, jemuž je organismus vystaven. To zřejmě souvisí s velikostí setrvačných sil, které působí na tělo, zejména na vestibulární systém ve vnitřním uchu, jakožto orgán pro vnímání pohybu a rovnováhy.

Protože zatížení budovy větrem i odezva na toto zatížení představovaná vodorovnou výchylkou budovy je náhodný proces, je i hodnota vodorovného zrychlení v čase proměnná. Toto zrychlení je při konstantní střední rychlosti větru centrováný náhodný proces (střední hodnota je nula) a k jeho statistickému popisu lze použít kvadratickou odchylku hodnot zrychlení (druhý stochastický moment náhodného procesu) σ_a . Pro její výpočet je použit vztah odvozený v práci [7]:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\pi f S_{FF}}{4 m_0^2 \zeta}} \quad (1)$$

f – frekvence kmitání budovy,

S_{FF} – pořadnice spektrální hustoty zatížení pro frekvenci kmitání f ,

m_0 – zobecněná hmotnost budovy,

ζ – poměrný útlum.

Význam a odvození jednotlivých veličin je uvedeno dále v této kapitole. V dalším textu je veličina σ_a zkráceně označována jen jako zrychlení.

Zatížení větrem

Proudění vzduchu v atmosféře je složité popsatelné, což platí zejména při obtékání překážek. Rychlost větru je obecně náhodnou veličinou, proměnlivou v prostoru i v čase. Při statickém návrhu konstrukce se však používá jen střední rychlost větru, která je nezávislá na čase t a závislá pouze na výšce nad terénem z a na drsnosti terénu z_0 . Tuto závislost vyjadřuje profil střední rychlosti větru v mezní vrstvě atmosféry. K jeho popisu se v současnosti nejčastěji používá logaritmický vztah, uplatňovaný také např. v normách Eurocode [12]. Lze psát:

$$\bar{v}(z) = \frac{v_t}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2)$$

z_0 – drsnost povrchu,

v_t – smyková rychlost,

κ – von Kármánova konstanta (v oboru aeroelasticity je $\kappa = 0,4$).

Frekvenční složení fluktuací složky náhodně proměnné rychlosti větru bývá vyjádřeno výkonovou spektrální hustotou větru S_{vv} [2]. Vyjádření spektra se podle prací různých autorů liší a z praktických důvodů (porovnání jednotlivých spekter, modelování ve větrném tunelu) bývá uváděno v normovaném (bezrozměrném) tvaru. V příkladu uvedeném dále v této práci je použito spektrum podle Kaimala [7], které zahrnuje závislost spektrální hustoty na charakteristikách terénu a které je normováno druhou mocninou smykové rychlosti v_t :

$$\frac{f S_{vv}(z, v, f)}{v_t^2} = \frac{105 f_r}{(1 + 33 f_r)^{5/3}} \quad (3)$$

f – frekvence,

f_r – tzv. bezrozměrná frekvence, daná vztahem:

$$f_r = \frac{f z}{\bar{v}(z)} \quad (4)$$

Aerodynamický součinitel čelního odporu C_D lze vyjádřit jako poměr mezi celkovou tlakovou silou od zatížení větrem působící na budovu a součinem dynamického tlaku vzduchu a návětrné plochy budovy:

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 A} \quad (5)$$

F – statická tlaková síla od větru působící na budovu,

ρ – objemová hmotnost vzduchu,

A – návětrná plocha konstrukce.

Objemová hmotnost vzduchu je obecně závislá na teplotě, tlaku a také vlhkosti. V [6] a v normě [12] je uváděno $\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Hodnota součinitele C_D závisí na tvaru a povrchu budovy a na orientaci budovy vůči směru větru. Obecně je také závislá na režimu obtékání charakterizovaném Reynoldsovým číslem, avšak při obvyklých rychlostech větru je již režim obtékání budovy nadkritický a hodnota aerodynamického součinitele je v něm téměř stálá (nezávislá na rychlosti proudu vzduchu) [2].

Aerodynamická admittance $\chi(f)$ představuje vazbu mezi fluktuacemi větru a výsledným zatížením. Její vyjádření může být komplikované, avšak pro budovy tvaru kvádry lze vztah výrazně zjednodušit [7]:

$$\chi(f) = \frac{1}{1 + (2 f A^{0,5} \bar{v}^{-1})^2} \quad (6)$$

Pomocí výše uvedených veličin je v práci [7] odvozen konečný vztah pro spektrální hustotu zobecněné síly S_{FF} ve tvaru:

$$S_{FF} = (C_D \rho \bar{v} A \chi)^2 S_{vv} \quad (7)$$

kde veličiny na pravé straně výrazu odpovídají veličinám z rovnic (2) až (6).

Dynamické vlastnosti konstrukce

K vypočtení odezvy vysoké budovy σ_a podle vztahu (1) je potřeba stanovit hodnoty dalších veličin, konkrétně frekvenci kmitání budovy f , zobecněnou hmotnost budovy m_0 a poměrný útlum ζ .

Vysoká budova buzená větrem kmitá nejčastěji v energeticky nejméně náročném tvaru, kterým je první vlastní tvar kmitání (ohybový tvar v rovině zatížení větrem). Tomu odpovídá i frekvence kmitání, která je rovna první (základní) vlastní frekvenci f_0 . Ačkoliv je kmitání budovy vynuceno tlakem větru, budovu lze považovat



za mechanický filtr, který z původně širokopásmového větrného spektra „propustí“ jen úzké pásmo frekvencí v okolí f_0 . Zanedbání vyšších tvarů kmitání tak nezpůsobuje při stanovení vodorovné výchyly chybu větší než 3 % [7]; kromě toho jsou vyšší tvary kmitání výrazně více tlumeny a skutečná chyba při výpočtu σ_a je ještě nižší.

Vlastní frekvence lze s různou mírou přesnosti určit, např. výpočtem metodou konečných prvků nebo měřením na již postavené budově. Jak bylo uvedeno, pro vysoké budovy s obdélníkovým půdorysem, které jsou hmotnostně i tuhostně symetrické, postačí znalost nejnižší frekvence pro každou zobecněnou souřadnici (dvě svíslé roviny a kroucení). Pro jejich určení lze s dostatečnou přesností využít jednoduché matematické modely nebo různé vztahy založené na čistě geometrických parametrech (výška a šířka budovy, počet podlaží). Z nich lze také obecně odvodit, že vlastní frekvence s rostoucí výškou budovy klesá.

Zobecněná hmotnost pro n -tý vlastní tvar kmitání m_n se určí z výrazu:

$$m_n = \int_0^h \varphi_n(z)^2 \mu(z) dz \quad (8),$$

φ_n – pořadnice normovaného n -tého vlastního tvaru,
 μ – měrná hmotnost budovy.

Je-li konstrukce modelována jako konzola pevně vetknutá do základu, je poměr zobecněné hmotnosti ku hmotnosti celkové pro základní vlastní tvar $m_0/m = 0,250$ pro pouze ohybové přetvoření nebo $m_0/m = 0,500$ pro pouze smykové přetvoření [7]. V případě reálné konstrukce s ohybově-smykovým přetvářením se hodnota podílu pohybuje mezi oběma uvedenými čísly. V uvedené práci je také odvozeno, že zanedbání interakce konstrukce s podlažím u štíhlých budov s vlastní frekvencí v intervalu 0,5–1 Hz zatíží výpočet jen velmi malou chybou, v případě frekvencí nižších než 0,5 Hz je rozdíl dokonce zcela zanedbatelný.

Útlum vyjadřuje schopnost budovy pohlcovat budící energii. Disipace energie (konstrukční útlum) závisí na mechanismu a hodnotě vnitřního útlumu stavebních materiálů a na utváření spojů. Útlum je parametrem, k jehož stanovení se využívá zejména empirických znalostí získaných při experimentech. Kromě toho na budovu kmitající v okolním vzduchu působí dalších tlumících síly (aerodynamický útlum). Celkový útlum vysoké budovy je součtem útlumu konstrukčního a útlumu aerodynamického. Nejjednodušší model tzv. viskózního tlumení předpokládá, že tlumící síla zavedená do pohybové rovnice je přímo úměrná rychlosti pohybu, konstantou úměrnosti je součinitel viskózního útlumu c . Veličinou běžně používanou k vyjádření míry tlumení je pak poměrný útlum ζ , definovaný:

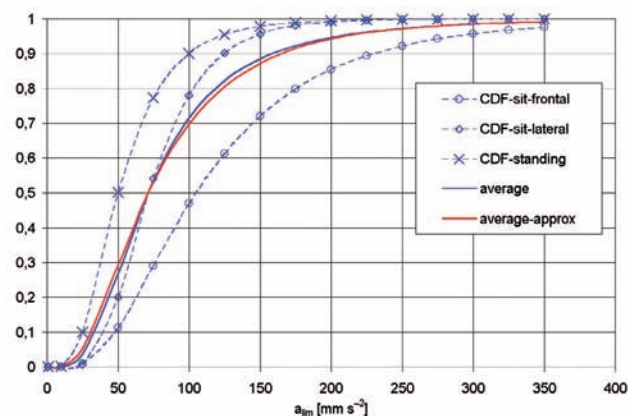
$$\zeta = \frac{c}{c_{kr}} = \frac{\delta}{2\pi} \quad (9),$$

c – součinitel viskózního útlumu,
 c_{kr} – součinitel kritického útlumu,
 δ – logaritmický dekrement útlumu.

Dynamické chování vysokých štíhlých konstrukcí může být ovlivněno také jevy, které souhrnně označujeme jako aerodynamickou nestabilitu. Patří sem např. tzv. oddělování vírů, kdy se vlivem lokální mezní vrstvy při povrchu konstrukce mohou začít odtrhávat víry a na konstrukci začnou působit proměnné tlaky. Při periodickém odtrhávání se může konstrukce rozkmitat [6]. Na dynamické chování vysoké budovy mohou mít vliv i okolní objekty, které nelze zohlednit pouhou změnou součinitele drsnosti terénu z_0 . V takovém případě bývá nutné provést zkoušku v aerodynamickém tunelu. V této práci se k možnosti vzniku zmíněných jevů nepřihlíží.

Práh citlivosti

Referenční hodnotou, která se uplatňuje v posudku vysokých budov z hlediska použitelnosti, je tzv. práh citlivosti (práh vnímání) vyjadřující hodnotu vodorovného zrychlení, při jejímž déletrvajícím přesazení začnou lidé zažívat nepříjemné pocity nebezpečí a ztráty



Obr. 1 – Distribuční funkce prahu citlivosti alim. Čárkované hodnoty podle práce [1] pro stojící osoby (křížek), sedící osoby vystavené vibracím kolmo ke směru pohledu (čtvereček) a sedící osoby vystavené vibracím ve směru pohledu (kolečko). Plnou modrou čarou vážený průměr pro stejnoměrné zastoupení jednotlivých aktivit, červeně aproximace log-normálním rozdělením, které je použito v dalším výpočtu.

pohodlí, případně nevolnosti. U vysokých budov jsou proto přípustné pouze velmi nízké hodnoty zrychlení (viz dále). Podle [3] ovlivňují práh citlivosti následující kritéria:

- **frekvence kmitání:** v oblasti nízkých frekvencí (méně než cca 1 Hz) práh citlivosti s klesající frekvencí roste;
- **věk:** mladší lidé jsou citlivější než lidé starší;
- **poloha těla:** ležící osoba je méně citlivá než osoba sedící, jež je méně citlivá než osoba stojící;
- **očekávání pohybu:** člověk, který očekává pohyb, je odolnější než člověk nepřipravený na možnost, že se objekt může pohybovat;
- **pohyb osob:** osoba, která je v pohybu, začne vnímat vibrace až při vyšších hodnotách zrychlení než osoba, která je v klidu;
- **vizuální vjemy:** reakci organismu mohou zhoršovat podněty jako kývavý pohyb zavěšených předmětů nebo pohyb horizontu při pohledu z oken;
- **akustické podněty:** vnímání vibrací je posilováno jevy, jako je pískání větru při bouři nebo zvuky způsobené pohyby ve výtahových šachtách;
- **druh vibrací:** velký vliv na vnímání organismu má skutečnost, zda jde o vibrace v jednom, nebo ve více směrech současně. Torzní kmitání bývá vnímáno citlivěji.

V práci [8] byly sledovány reakce obyvatel dvou výškových budov. Poté, co byly tyto budovy vystaveny vichřici se změněnými hodnotami rychlosti větru, byli lidé dotazováni, kolikrát ročně by podobnou vichřici dokázali akceptovat, aniž by to narušilo jejich práci a pohodlí. Z tohoto a dalších výzkumů vyplynulo, že pro zajištění ekonomické rentability výškové budovy je pro projektanty a investory přijatelná hranice 2 % lidí, kteří mohou mít námitky proti nežádoucím vibracím budovy od zatížení větrem.

Přímá měření [1] na 112 osobách v simulátorech pohybu při dlouhých periodách kmitání (5, 10 a 15 s) poskytla hodnoty prahu vnímání, viz obr. 1. Z výsledků plyne, že tato veličina sleduje logaritmicko-normální rozdělení. Kromě toho měření potvrdila výše uvedené závěry týkající se periody kmitání, polohy těla a očekávání pohybu.

Předpisy, které se v Česku zabývají hygienickými kritérii z hlediska působení zrychlení, jsou jednak nařízení vlády [13], které se však vztahuje na vibrace o frekvenci vyšší než 1 Hz, a tedy je v případě vysokých budov obtížně uplatnitelné; a dále norma [11], která udává přípustné hodnoty vodorovného zrychlení v závislosti na frekvenci pohybu v rozsahu 0,063 až 1 Hz.

VÝSLEDKY ŘEŠENÍ

Pravděpodobnostní posudek spolehlivosti

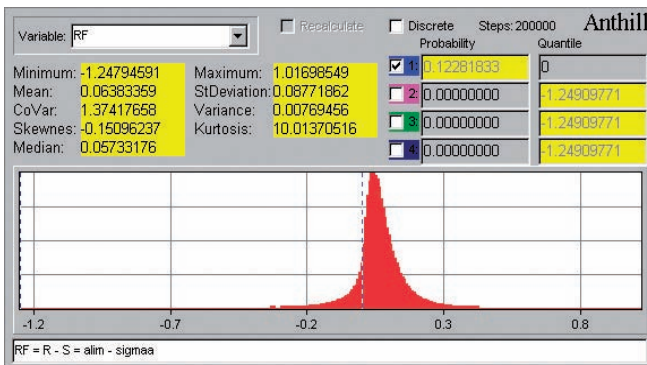
V následujícím příkladu je demonstrován posudek vysoké budovy aplikující metodiku uvedenou v předchozí kapitole. Výpočet s využi-

Tab. 1 – Přehled náhodně proměnných vstupních veličin

Veličina	Označení	Rozměr	Rozdělení
Smyková rychlost	v_t	$m \cdot s^{-1}$	Weibullovo ($\alpha = 1,88; \beta = 2,0$)
Práh citlivosti	$a_{lim,var}$	$m \cdot s^{-2}$	Lognormální (střední hodnota 0,0881; směrodatná odchylka 0,0643)

Veličina	Označení	Rozměr	Nom. hodnota	Variabilita	Rozdělení	Rozsah
Vlastní frekvence	f_0	s^{-1}	0,30	$f_{0,var}$	N(1,0; 0,05)	<0,85; 1,15>
Měrná hmotnost	μ	$kg \cdot m^{-3}$	250	μ_{var}^*	N(1,0; 0,05)	<0,85; 1,15>
Poměrný útlum	ζ	-	0,025	ζ_{var}	N(1,0; 0,05)	<0,85; 1,15>

* Variabilita μ_{var} zahrnuje jak možný rozptyl měrné hmotnosti, tak i neurčitost při stanovení tvaru kmitání a tím i poměru m_0/m .


 Obr. 2 – Histogram funkce spolehlivosti $RF = R - S$

tím pravděpodobnostní metody SBRA je proveden v programu Anthill for Windows verze 2.3. Cílem výpočtu je určit pravděpodobnost poruchy P_f , definovanou jako pravděpodobnost, že směrodatná odchylka náhodného procesu zrychlení v nejvyšším podlaží budovy σ_a přesáhne přípustnou hodnotu danou prahem citlivosti a_{lim} .

Modelová budova skeletové železobetonové konstrukce má tvar kvádry následujících rozměrů: výška $h = 150$ m, šířka návětrné strany $b = 60$ m, rozměr ve směru větru $d = 20$ m. Budova se deformuje ohybově i smykově, poměr zobecněné hmotnosti ku hmotnosti celkové čelního odporu budovy $C_D = 1,2$. Objemová hmotnost vzduchu $\rho = 1,25$ $kg \cdot m^{-3}$ a součinitel drsnosti terénu $z_0 = 0,7$.

V tab. 1 jsou uvedeny další veličiny, které vstupují do výpočtu jako náhodné proměnné.

Rozdělení pro práh citlivosti $a_{lim,var}$ bylo získáno jako vážený průměr rozdělení pro jednotlivé polohy člověka (čárkované čáry na obr. 1) tak, že v programu Anthill for Windows byly generovány hodnoty v každém kroku vždy podle jedné náhodně zvolené křivky. V tomto případě byla každá z křivek použita se stejnou pravděpodobností ($P = 1/3$), avšak váhy lze snadno upravit podle očekávané aktivity osob v posuzované budově. Získané rozdělení (plná modrá čára na obr. 1) pak bylo aproximováno lognormálním rozdělením s parametry uvedenými v tab. 1 (plná červená čára na obr. 1).

Vliv skutečnosti, že hodnota prahu citlivosti je závislá na frekvenci pohybu, je zohledněn následující úpravou, kdy uvedený logaritmicko-exponenciální vztah je vyjádřením kritéria podle [11]:

$$a_{lim} = a_{lim,var} \cdot \exp(-0,4125 \cdot \ln f_0 - 3,65) / a_{lim,avg} \quad (10)$$

f_0 – frekvence kmitání,

$a_{lim,avg}$ – průměrný práh vjemu horizontálního pohybu člověkem pro frekvenci 0,1 Hz podle [11].

Pro rychlost větru je použito Weibullovo rozdělení. V programu Anthill je nelze přímo generovat, proto je použit vztah (11):

$$W(\alpha, \beta) = \alpha \cdot (-\ln(U))^{1/\beta} \quad (11)$$

U – rovnoměrné rozdělení na intervalu (0; 1),

$W(\alpha, \beta)$ – Weibullovo rozdělení s parametry α a β .

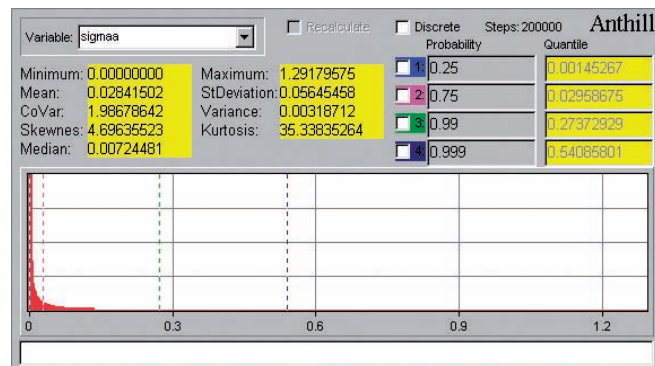
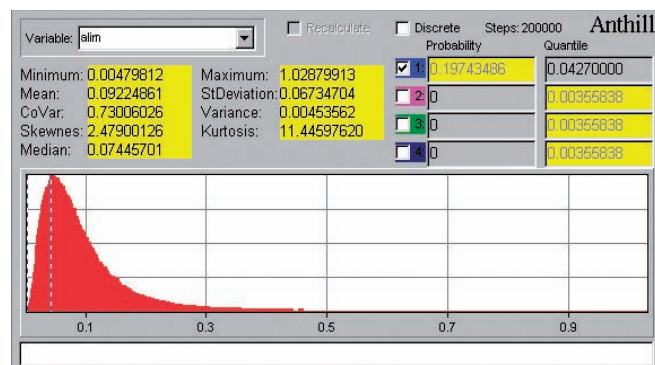
Dále jsou ve výpočtu použity vztahy uvedené v předchozí kapitole, které vedou ke stanovení směrodatné odchylky vodorovného zrychlení σ_a . Výsledkem řešení je funkce spolehlivosti RF , definovaná:

$$RF = R - S = a_{lim} - \sigma_a \quad (12)$$

Histogram této funkce, spolu s histogramy funkce odezvy konstrukce na zatížení $S = \sigma_a$ a referenční funkce $R = a_{lim}$, je uveden na obr. 2 a 3.

Interakci odezvy konstrukce na zatížení a referenční funkce lze ilustrovat také způsobem uvedeným na obr. 4. Z histogramu funkce S je patrné, že pro velkou část intervalu rychlosti větru, včetně nejčastěji generovaných hodnot, je výsledné zrychlení velmi malé. Vyšších hodnot dosahuje jen při extrémních rychlostech větru, které nastávají při bouři. V tomto intervalu narůstá zrychlení σ_a úměrně přibližně s $v^{7/3} = v^{2,333}$.

Výsledkem výpočtu je pravděpodobnost poruchy P_f , tedy pravděpodobnost, že účinek zatížení S (zrychlení σ_a) bude vyšší než referenční funkce R (práh citlivosti a_{lim}). Tato pravděpodobnost je $P_f = 0,12281$, což podle [10] odpovídá snížené úrovni spolehlivosti, pro kterou je hodnota návrhové pravděpodobnosti $P_d = 0,16$. Protože platí $P_f < P_d$, posuzovaná konstrukce z hlediska použitelnosti vyhovuje.


 Obr. 3a – Histogram odezvy konstrukce na zatížení $S = \sigma_a$

 Obr. 3b – Histogram referenční funkce $R = a_{lim}$

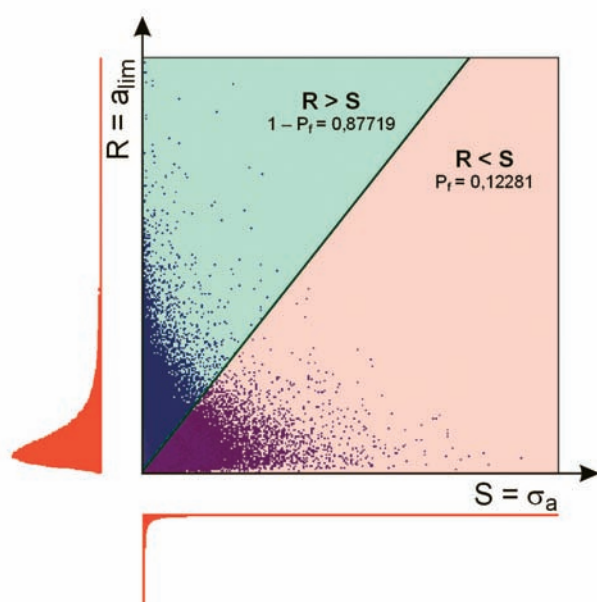


Tab. 2 – Výsledek citlivostní analýzy pro jednotlivé vstupní veličiny

Veličina	v_t	$a_{lim,var}$	f_0	m	ζ
Spearmanův součinitel pořadové korelace	-0,456	+0,775	-0,032	-0,008	-0,049

Citlivostní analýza

K určení míry závislosti výsledné funkce spolehlivosti na jednotlivých náhodných vstupních veličinách lze využít citlivostní analýzu. V tab. 2 a na obr. 5 jsou uvedeny výsledky této analýzy v podobě korelačních součinitelů mezi jednotlivými vstupními veličinami a funkcí spolehlivosti RF získaných pro 1 000 simulačních kroků. Z těchto hodnot je patrné, že klíčovými vstupními veličinami, které nejvíce ovlivňují funkci spolehlivosti, jsou rychlost větru a práh citlivosti. Ačkoliv jak účinek zatížení S , tak i referenční funkce R silně závisí na frekvenci kmitání f_0 , funkce spolehlivosti

Obr. 4 – Interakce odezvy konstrukce na zatížení S a referenční funkce R

RF se jeví být závislou v mnohem menší míře, což souvisí s tím, že hodnoty obou těchto dílčích funkcí při rostoucí hodnotě f_0 klesají, a tedy hodnota RF , která je dána jejich rozdílem, se nemusi příliš měnit.

Protože histogram funkce spolehlivosti narůstá poměrně strmě v oblasti kolem hodnoty 0, tedy rozhraní mezi spolehlivou oblastí ($R > S$) a oblastí poruchy ($R < S$), může i malý posun hodnoty RF ovlivnit pravděpodobnost poruchy P_f . Proto bylo dále sledováno, jaký vliv má na hodnotu pravděpodobnosti poruchy relativní změna každé vstupní veličiny o ± 10 , resp. 20 %. Výsledek je uveden v tab. 3 a na obr. 6. Zdá se, že i změna střední hodnoty o ± 20 % je v porovnání s rozptylem této veličiny poměrně malá.

Parametrická studie

Předmětem práce byla také parametrická studie, kdy se zkoumala změna spolehlivosti z uvedeného kritéria použitelnosti podle vztahů uvedených v předchozí kapitole pro různou výšku budovy h (v rozsahu 50 až 250 m) a s ní související změny dynamických parametrů (vlastní frekvence f_0 a poměrného útlumu ζ). Výsledné hodnoty pravděpodobnosti poruchy P_f jsou uvedeny v tab. 4 a na obr. 7. Zároveň je vyznačeno rozhraní pro jednotlivé úrovně spolehlivosti podle normy [10].

Je patrné, že pro výšku budovy $h > 100$ m se v případě uvažovaných parametrů konstrukce a zatížení pravděpodobnost poruchy sice pohybuje v oblasti snížené úrovně spolehlivosti ($0,07 < P_f < 0,16$), avšak zřejmě nedosahuje úrovně, kdy by konstrukce musela být prohlášena za nespolehlivou.

ZÁVĚR

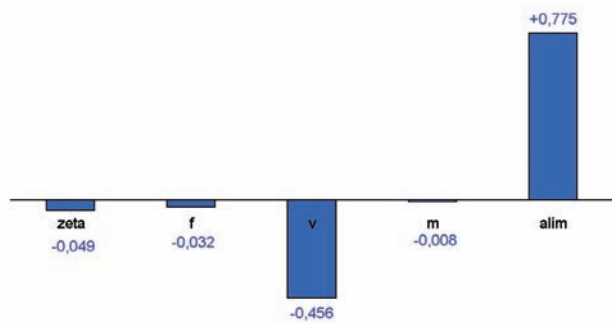
Předložená práce ukazuje možnost aplikace plně pravděpodobnostní metody SBRA při posuzování spolehlivosti vysokých budov z hlediska použitelnosti, kdy jsou kritériem hygienické limity přípustného vodorovného zrychlení. Výstupem posudku je pravděpodobnost poruchy P_f , jejímž porovnáním s návrhovou pravděpodobností P_d lze rozhodnout o úrovni spolehlivosti konstrukce z daného hlediska.

Tab. 3 – Vliv relativní změny vstupních veličin na pravděpodobnost poruchy

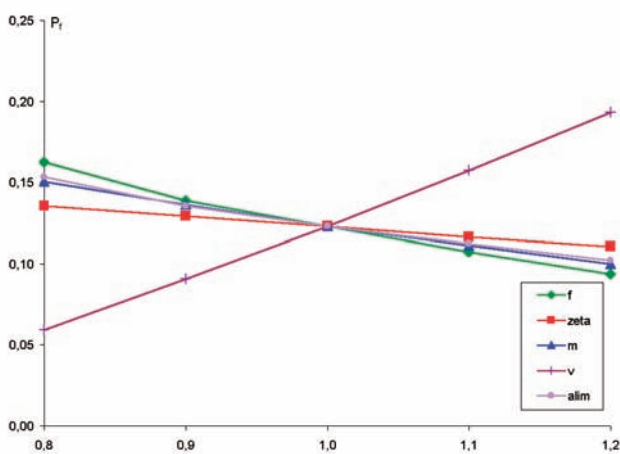
Relativní změna	Pravděpodobnost poruchy P_f při změně:				
	f_0	ζ	m	v_t	$a_{lim,var}$
- 20 %	0,16235	0,13547	0,15032	0,05935	0,15338
- 10 %	0,13874	0,12932	0,13602	0,09077	0,13553
0 %			0,12281		
+ 10 %	0,10724	0,11652	0,11136	0,15728	0,11221
+ 20 %	0,09362	0,11059	0,10003	0,19321	0,10199

Tab. 4 – Výsledky parametrické studie

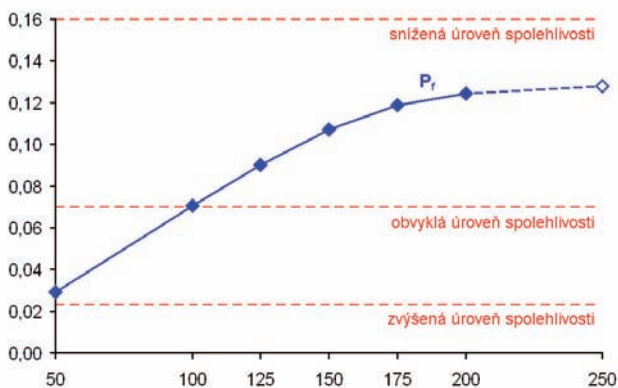
Výška h [m]	Vlastní frekvence f_0 [s ⁻¹]	Poměrný útlum ζ	Pravděpodobnost poruchy P_f
50	1,00	0,015	0,029465
100	0,50	0,022	0,070675
125	0,40	0,023	0,090275
150	0,33	0,025	0,107220
175	0,28	0,028	0,118960
200	0,25	0,030	0,124410
250	0,20	0,040	0,128045



Obr. 5 – Výsledek citlivostní analýzy pro jednotlivé vstupní veličiny. Zleva poměrný útlum ζ , vlastní frekvence f_0 , rychlost větru v , hmotnost budovy m a práh citlivosti a_{lim} .



Obr. 6 – Změna pravděpodobnosti poruchy P_f při relativní změně vstupních veličin



Obr. 7 – Výsledky parametrické studie – pravděpodobnost poruchy v závislosti na výšce budovy. Vyznačeny jsou jednotlivé úrovně spolehlivosti podle [10].

Jako náhodné vstupní veličiny, které mají na spolehlivost konstrukce největší vliv, citlivostní analýza identifikuje rychlost větru v a práh citlivosti člověka na vodorovné zrychlení a_{lim} . Z analytického transformačního modelu je patrné, že na poruše se zdaleka nejvíce podílejí případy, kdy jsou rychlosti větru extrémní, proto bude vhodné dále zkoumat vliv rozdílných rozdělení této veličiny. Rozdělení práhu citlivosti je dáno převzatými rozděleními zjištěnými experimentálně pro různou polohu člověka, výsledek posudku je ovlivněn způsobem, s jakou vahou jsou tato rozdělení kombinována. Parametrická studie pak potvrzuje předpoklad, že nebezpečí překročení přípustných hodnot zrychlení je větší ve vyšších budovách, naznačuje však také, že nárůst tohoto rizika se od určité výšky budovy zpomaluje.

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M0579, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS. (This outcome has been achieved with the financial support of the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic, project No. 1M0579, within activities of the CIDEAS research centre.)

Jakub Valihrach,
Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební,
VŠB – Technická univerzita Ostrava,
Pavel Marek,
Ústav teoretické a aplikované mechaniky,
Akademie věd ČR

LITERATURA:

- [1] Chen, P.; Robertson, L.: Human Perception Thresholds of Horizontal Motion. In: *Journal of the Structural Division*, vol. 92, no. 8, ASCE, 1972, pp. 1681–1695
- [2] Fischer, O.; Koloušek, V.; Pirner, M.: *Aeroelasticita stavebních konstrukcí*, Academia, Praha 1977
- [3] Kahn, F.; Parmelee, R.: Service criteria for tall buildings for wind loading. In: *Proceedings of third international conference on wind effects on buildings and structures*, Tokyo 1971
- [4] Marek, P.; Guštar, M.; Anagnos, T.: *SimulationBased Reliability Assessment for Structural Engineers*, Boca Raton, CRC Press, 1995
- [5] Marek, P.; Brozzetti, J.; Guštar, M.; Tikalsky, P., editors: *Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo Simulation*, 2nd edition, ITAM CAS, Prague 2003
- [6] Pirner, M.; Fischer, O.: *Zatížení staveb větrem*, ČKAIT, Praha 2003
- [7] Pospíšil, S.: *Dynamické chování vysokých budov zatížených větrem*. Disertační práce, ČVUT, Praha 2002
- [8] Reed, J.; Hansen, R.; Vanmarcke, E.: *Human Response to Tall Building WindInduced Motion*. In: *Structural Design of Tall Steel Buildings, Design Methods Based on Stiffness*. Bethlehem, PA, ASCE, 1972
- [9] Valihrach, J.; Marek, P.: Probabilistic Serviceability Assessment of Structures. In: *Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Structures Technology*, Stirlingshire, Civil-Comp Press, paper 43, 2006
- [10] ČSN 73 1401 – Navrhování ocelových konstrukcí, příloha A, Český normalizační institut, Praha 1998
- [11] ČSN ISO 6897 – Směrnice pro hodnocení odezvy obyvatel staveb, obzvláště pak budov a mořských plošin na nízkofrekvenční horizontální pohyb (0,063 až 1 Hz), Český normalizační institut, Praha 1994
- [12] ČSN P ENV 199124: Eurokód 1 – Zásady navrhování a zatížení konstrukcí, Část 2–4: Zatížení konstrukcí – Zatížení větrem, Český normalizační institut, Praha 1996
- [13] Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Sbíрка zákonů České republiky, č. 148/2006