

STACK STRUCTURE RESPONSE UNDER WIND AND TECHNICAL SEISMICITY EFFECTS

D. Makovička*, J. Král*, D. Makovička**

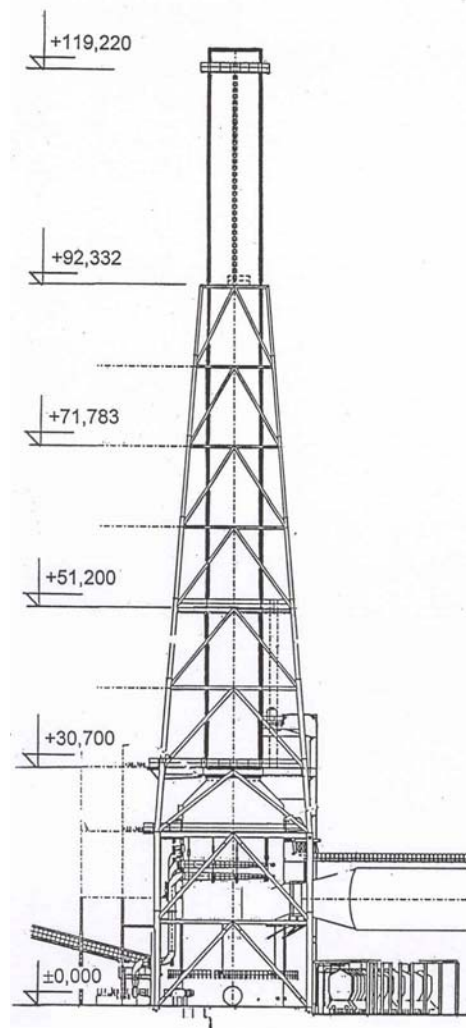
***Summary:** The paper is concerned with the verification analysis of the wind and technical seismicity response of a power plant stack structure. During two weeks the actual history of dynamic response of structure and direction and intensity of actual wind load was measured, reported and processed by computer. The resulting data were used for the verification of design stage data of structure, with natural frequencies and modes assumed by the design and with the dominant effect of technical seismicity on the site. In conclusion the standard requirements are compared with the actual results of measurements and their expansion to the design load.*

1. Úvod

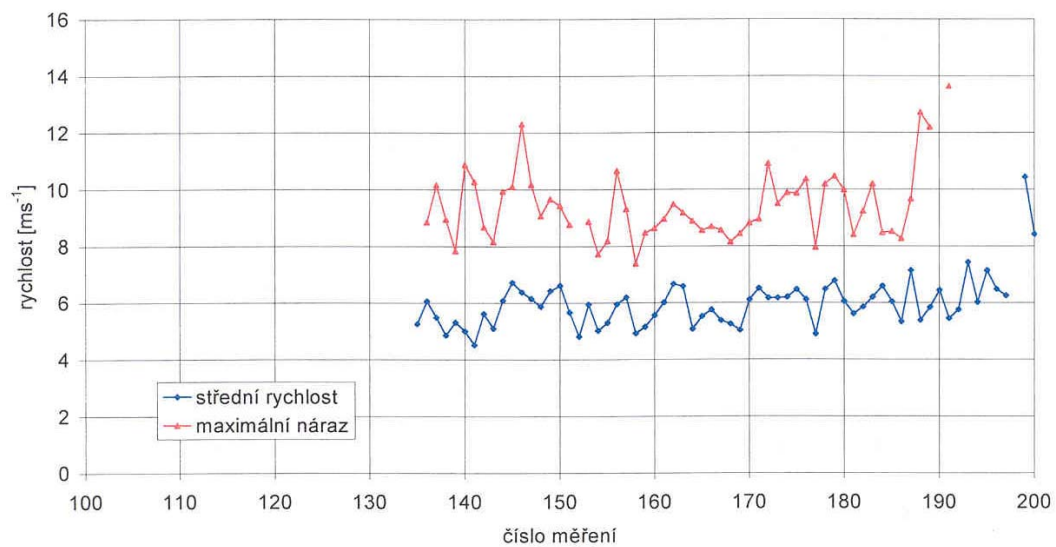
Komínová konstrukce absorbérů odsíření (obr.1), sestávající z ocelové skeletové věžové konstrukce navazující na nádobu absorbérů, je ukončena laminátovým komínovým nástavcem. Cílem řešení je posouzení dynamické odezvy ocelové konstrukce věže a jejího laminátového nástavce v návaznosti na návrhové hodnoty zatížení. Práce vychází z teoretické i experimentální analýzy konstrukce. Experimentální ověření dynamické odezvy bylo založeno na měření vibrací na obou částech konstrukce (ocelové i laminátové) při buzení účinky větru, účinky technické seismicity ze zdrojů v okolí konstrukce a při zatížení zkušebním impulsem, vyvozeného rázem kladiva na stěnu laminátového nástavce. Měření vibrací probíhalo opakovaně v rozšířené formě (co do počtu sledovaných stanovišť) v návaznosti na okamžité hodnoty buzení a dále dlouhodobě na vybraných stanovištích po dobu cca 14 dnů s opakováním po 15 min pro stanovení dlouhodobého vývoje odezvy v závislosti na účincích větru. Naměřené časové průběhy vibrací ve zrychleních, rychlostech a v poměrných přetvořeních spolu s měřením rychlosti a směru větru byly počítačově vyhodnoceny a porovnány s hodnotami odezvy, předpokládanými v projektu, dále pak s vlastními frekvencemi laminátového nástavce podle výpočtu projektanta a s frekvencemi dominantních zdrojů – velkých strojů v okolí komína.

* Doc. Ing. Daniel Makovička, DrSc., Ing. Jaromír Král, CSc.: České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav; Šolínova 7, 166 08 Praha 6; tel.: +420 224 353 856, fax: +420 224 353 511; e-mail: makovic@klok.cvut.cz

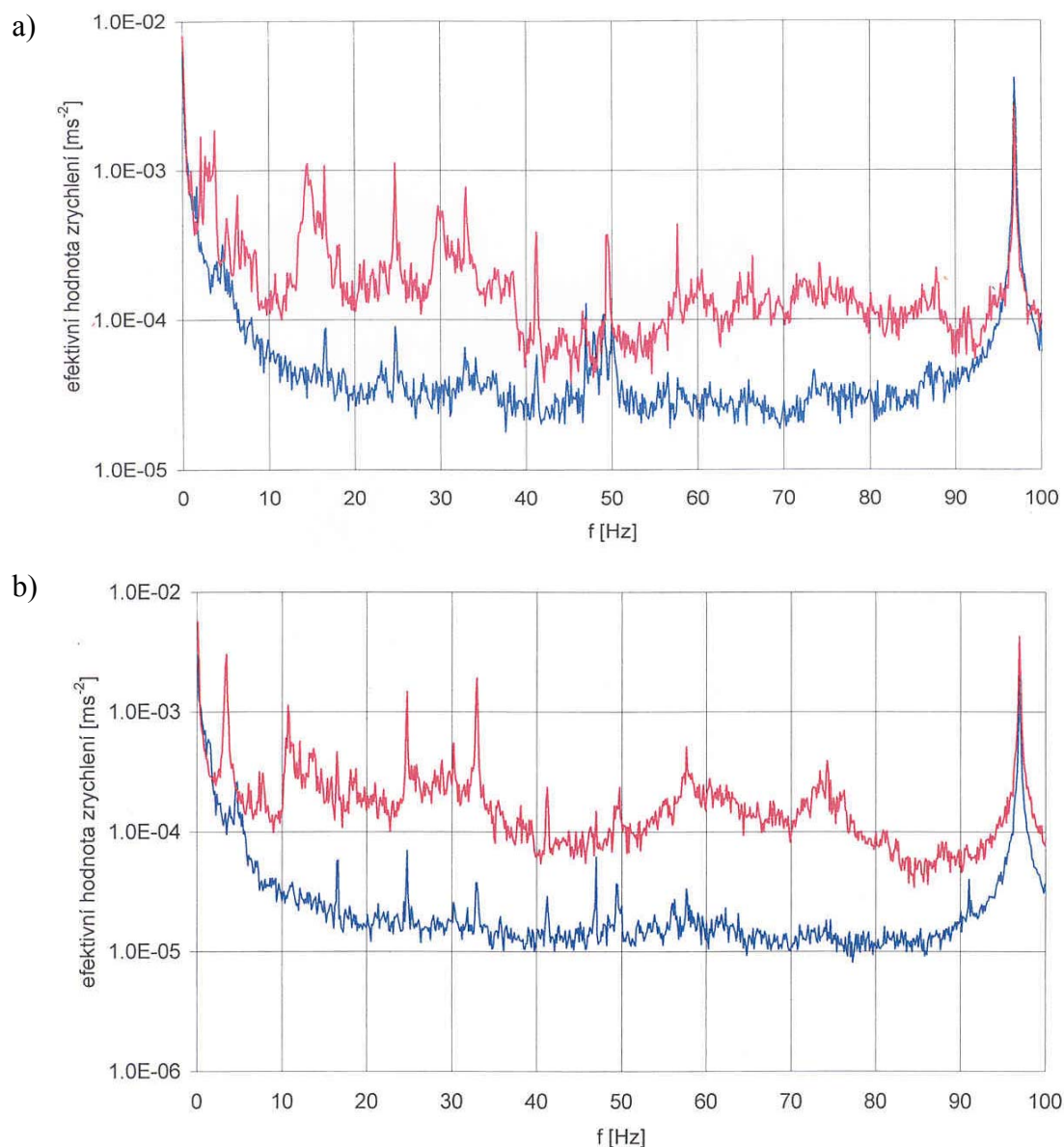
** Ing. Daniel Makovička, Statika a dynamika konstrukcí; Šultysova 167, 284 01 Kutná Hora; tel./fax: +420 327 514 817; e-mail: d.makovic@worldonline.cz



Obrázek 1 Základní schéma komínové konstrukce



Obrázek 2 Porovnání naměřených desetiminutových středních rychlostí větru s maximálními nárazy větru v průběhu měření



Obrázek 3 Autospektra zrychlení, přenos vibrací ze základové patky na ocelovou konstrukci věže na niveletě +31; a) horizontálně ve směru V-Z; b) vertikálně

2. Popis konstrukce

Hlavní částí konstrukce (obr.1) je vertikální sklolaminátová trouba komína umístěná nad nádobou absorbéru. Laminátová trouba je podepřena a částečně obestavěna podpěrnou ocelovou příhradovou konstrukcí, na které je zavěšen rovněž přívodní horizontální kouřovod v místě jeho zaústění do nádoby absorbéru. Ocelová konstrukce je kotvena na čtyřech pilotových základových patkách.

Laminátová trouba komína mezi úrovněmi +29,680 a +120,220 je sestavena na místě ze 14 segmentů, jež mají vnitřní průměr 7,000 m a montážní délku 6,610 m. Tloušťka stěny je proměnná a pohybuje se od 2,0 + 9,0 mm do 2,0 + 23,6 mm, kde 2,0 mm silná vrstva tvoří chemickou bariéru konstrukce proti účinku povětrnosti. Laminátová trouba je podepřena na výškové úrovni +30,935 ve vertikálním i horizontálním směru ocelovou konstrukcí věže.

Horizontálním posunům je rovněž zabráněno na dalších třech výškových úrovních (+51,190, +71,647 a +92,116), kde je laminátová trouba horizontálně rozeprána vůči ocelové příhradové konstrukci. Toto podepření je provedeno pomocí dorazů po obvodu laminátové trouby a umožňuje vertikální posuny.

Podpěrná věž mezi úrovněmi +0,600 a +92,300 je provedena jako příhradová nosníková konstrukce, sestavená převážně z trubkových průřezů. Tvoří ji čtyři sloupy, které jsou na devíti výškových úrovních vzájemně propojeny vodorovnými nosníky a ztuženy diagonálními výztuhami. Pod úrovní +22,500 má ocelová konstrukce věže půdorysné rozměry 20,0×20,0 m, nad touto úrovní se půdorysný rozměr lineárně zmenšuje až k vrcholu věže na úrovni +92,300, kde má hodnotu 8,6×8,6 m. Ocelová konstrukce věže prostupuje do úrovně +30,700 ocelovou skeletovou konstrukcí haly s technologií absorberu.

Ocelová věž je založená na čtyřech betonových patkách na úrovni +0,600. Každá patka spočívá na velkopřůměrové vrtané pilotě o průměru 1 220 mm na výšku 8 300 mm. Na svém dolním konci jsou piloty vetknuty ve zdravém granitu. Pro zabránění vytažení pilot z podloží (zachycení tahových sil) jsou hlavy pilot přikotveny předepnutými kotvami.

3. Zatížení

Dominantním zatížením věžové konstrukce z hlediska I. skupiny mezních stavů je zatížení větrem. Měření rychlosti a směru větru probíhalo ze zábradlí plošiny ochozu přibližně na niveletě 53 m. Souprava byla vysunuta horizontálně před konstrukci věže cca 2 m, aby obtékání věže ovlivňovalo minimálně měřené hodnoty. Cílem bylo zachycení odezvy při různých okamžitých rychlostech (obr.2) a směru větru.

Dalším použitým zatížením byl zkušební silový impuls. Pro definovanou velikost zkušebního impulsu, kterým byla konstrukce zatížena, bylo použito zkušební kladivo vybavené na svém razníku snímačem síly tak, aby při úderu zkušebního kladiva na plášť laminátové konstrukce přes pryžovou podložku byla měřitelná i velikost síly tohoto impulsu. Odezva konstrukce na impuls kladiva byla měřena v pásmu frekvencí 0 až 1000 Hz. Cílem tohoto měření bylo upřesnění spektra vlastních frekvencí konstrukce. Zkušební kladivo bylo umístěno na západní straně věže přibližně na výškové úrovni 48 m.

Konečně z měření odezvy byla stanovena úroveň technické seismicity, vybuzejí stroji v elektrárně v okolí komínové konstrukce.

4. Popis měření odezvy a jejího vyhodnocování

Pro sledování odezvy konstrukce byla vybrána stanoviště jak na základových patkách hlav pilot, tak také stanoviště na ocelovém skeletu věže a na laminátovém nástavci, tak aby bylo možné stanovit i fázový posuv mezi pohybem obou částí konstrukce (ocelové a laminátové). Výběr míst byl přizpůsoben dále jejich přístupnosti z podlah ochozů, pevných žebříků a jejich odpočívek, tak aby bylo možné sledovat prostorový pohyb konstrukce v návaznosti na velikost a charakter zatížení.

Odezva komínu byla tedy složena z odezvy na technickou seismicitu, která měla prakticky stacionární charakter a z odezvy na účinky větru, která byla převážně nestacionární (nárazový vítr). V případě použití zkušebního impulsu při malých rychlostech větru byla na účinky seismicity a větru superponována odezva na účinky tohoto zkušebního impulsu.

K popisu časových průběhů záznamů odezvy na uvedená zatížení byly použity základní statistické charakteristiky (střední a efektivní hodnota, maximum a minimum). Vzhledem k tomu, že nebylo možné změřit nezatížený stav, byly záznamy popisovány efektivní hodnotou a maximálním rozkmitem (maximum - minimum). Integrací filtrovaných záznamů zrychlení byly získány záznamy rychlosti a dynamické výchylky, které byly opět popsány výše uvedeným způsobem.

Záznamy odezvy byly frekvenčně analyzovány; z autospekter (obr.3) jsou patrné jak frekvence vynuceného kmitání od technické seismicity, tak i vlastní frekvence konstrukce. Dále byly vyhodnoceny koherenční funkce mezi záznamy odezvy na různých stanovištích a odpovídající „přenosové funkce“. Z nich byly vyhodnoceny tvary kmitání konstrukce při nejnižších vlastních frekvencích (obr.5).

Pro extrapolaci naměřené odezvy na návrhové hodnoty zatížení byla naměřená rychlost větru pro jednotlivé záznamy přepočtena na základní tlak větru:

$$w = v^2 / 1600$$

kde v rychlost větru v [m/s], w ... tlak větru v [kN/m²].

Měření rychlosti a směru větru bylo realizováno na vybraném stanovišti souběžně s měřením odezvy na ostatních stanovištích. Zjednodušeně bylo předpokládáno, že rozdělení měřeného tlaku větru v ostatních bodech (po výšce i po vodorovném obvodu laminátového nástavce a ocelové konstrukce věže) odpovídá normovým požadavkům. S ohledem na výšku komína a výšku zástavby v návětrném směru bylo předpokládáno, že změna rychlosti s výškou odpovídá kategorii terénu II (Eurokód, otevřený terén). Rychlost ve výšce cca 53 m nad terénem je oproti rychlosti ve výšce 10 m cca 1,32 krát vyšší. Směr větru v období měření byl východní až severovýchodní. Za střední hodnotu rychlosti větru lze zjednodušeně uvažovat průměrnou hodnotu rychlosti větru v desetiminutovém intervalu. Maximální naměřené desetiminutové střední rychlosti větru dosáhly rychlosti 6 až 7 m/s. Rozdíly mezi průměrnou hodnotou z celého intervalu a okamžitou hodnotou (špičkovou) rychlosti lze považovat za vliv nárazu větru. Součinitel nárazu větru byl v návrhovém zatížení uvažován hodnotou $G = 1,8$... naměřené hodnoty jsou zřejmé z porovnání křivek na obr.2. Referenční rychlost větru (10-minutová střední rychlost větru ve výšce 10 m nad terénem s roční pravděpodobností výskytu 0,02 pro oblast 2) byla uvažována projektovou hodnotou

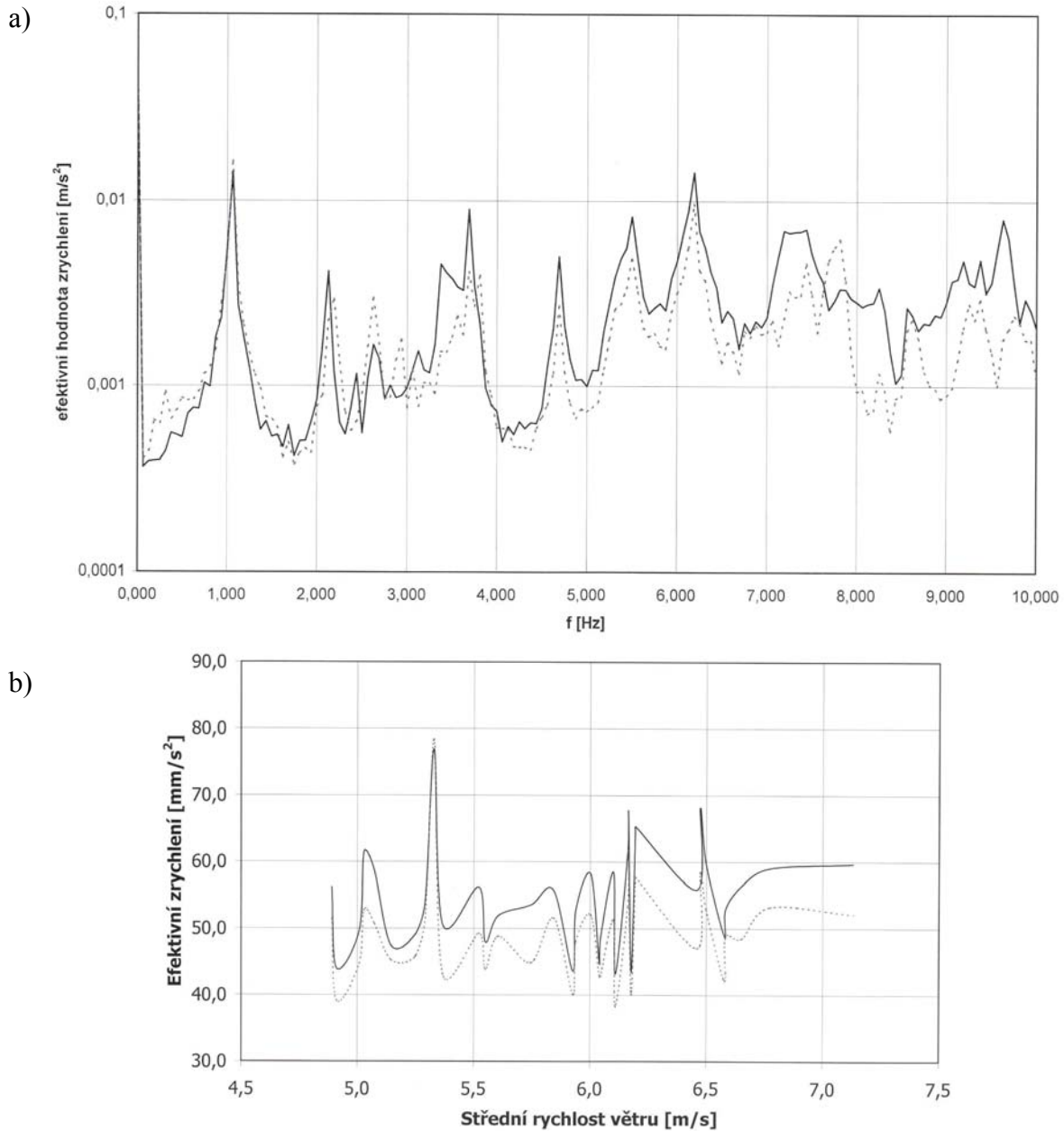
$$v_{\text{ref},0} = 26,7 \text{ m/s.}$$

Tato hodnota rychlosti je vyšší, než požaduje národní aplikační dokument příslušného Eurokódu (ČSN P ENV 1991-2-4) $v_{\text{ref},0} = 26,0$ m/s. Naměřeným rychlostem 6 až 7 m/s odpovídá střední rychlost větru ve výšce 10 m (kat.II): $(6 \text{ až } 7) / 1,32 = 4,5 \text{ až } 5,3$ m/s. Odezvu konstrukce při návrhovém zatížení lze tedy odhadnout z naměřených hodnot odezvy pomocí poměru kvadrátů rychlostí referenční a naměřené rychlosti větru ve výšce 10 m, tedy:

$$\begin{aligned} & (\text{návrhové referenční rychlosti})^2 / (\text{měřené rychlosti přepočtené na výšku 10 m})^2 = \\ & = 26,7^2 / (4,5 \text{ až } 5,3)^2 = 35 \text{ až } 25 \text{ násobek měřených hodnot odezvy.} \end{aligned}$$

V projektu konstrukce použité návrhové zatížení resp. z něho vypočtená velikost odezvy vyjadřuje ekvivalentní účinek střední a časově proměnné náhodné složky zatížení. Přímé změření takové odezvy vyžaduje změření nezatíženého stavu, tj. odezvu při rychlosti větru 0 m/s a odezvy při definovaném stacionárním zatížení. Nezatížený stav se v průběhu měření nevyskytl. Z tohoto důvodu bylo nutné vyjít z okamžité rychlosti větru, při níž byla měřena odezva konstrukce ve zrychleních v pásmu 0 až 100 Hz. Dvojnásobnou integrací

centrovaného záznamu zrychlení z vybraných záznamů byl získán časový průběh výchylky vybuzečné účinky větru a technické seismicity. Záznam výchylky měl výraznou kvazistatickou složku, která odpovídala měnící se okamžité rychlosti větru okolo střední hodnoty rychlosti větru.



Obrázek 4 Závislost efektivních zrychlení ve vrcholu laminátu (+121)

(a) na frekvenci odezvy konstrukce; (b) na střední rychlosti větru pro směr působení větru (plná čára) a příčný směr vůči směru větru (tečkovaná čára)

Na kvazistatickou složku byla superponovaná dynamická složka výchylky konstrukce. Z časově dlouhých záznamů bylo možné nalézt úseky záznamu, kde rychlost větru i kvazistatická složka výchylky konstrukce poklesla na minimum, blízké nezátíženému stavu. V takovém případě lze rozdíl maximální a minimální výchylky považovat za celkovou odezvu odpovídající střední rychlosti větru při daném záznamu. Pravděpodobnou velikost odezvy

konstrukce na účinky větru při návrhovém zatížení lze pak odhadnout přenásobením zjištěné odezvy v poměru kvadrátů návrhové a měřené rychlosti větru podle výše uvedených úvah.

Tabulka 1 Naměřené zrychlení kmitání [mm/s^2] ve frekvenční oblasti od 0 do 40 Hz ve dvou na sebe kolmých horizontálních směrech (první snímač je přibližně ve směru větru V-Z)

Veličina	Výška a označení snímače					
	Laminátová konstrukce		Ocelová konstrukce věže			
	+120		+91		+51	
	S1	S2	S24	S25	S22	S23
Zrychlení [mm/s^2] ... efektivní hodnota dynamické složky odezvy						
průměr	55,0	49,4	16,9	11,1	7,4	8,0
max	76,9	78,3	21,5	22,6	10,5	12,4
min	43,2	38,2	12,7	7,0	5,3	5,7
Zrychlení [mm/s^2] ... maximální naměřená efektivní hodnota						
průměr	254,1	217,8	73,1	48,4	33,4	38,2
max	398,0	367,5	93,8	84,4	46,1	60,6
min	175,0	168,6	53,0	31,0	22,5	23,9
Zrychlení [mm/s^2] ... minimální naměřená efektivní hodnota						
průměr	-256,1	-222,9	-72,3	-47,9	-34,8	-37,8
max	-185,6	-167,1	-52,6	-29,0	-20,4	-26,3
min	-328,4	-404,9	-93,9	-76,8	-55,3	-65,8

Tabulka 2 Naměřené úrovně výchylky kmitání [mm] ve frekvenční oblasti od 0 do 40 Hz, přepočtené na projektové hodnoty

Veličina	Výška a označení snímače					
	Laminátová konstrukce		Ocelová konstrukce věže			
	+120		+91		+51	
	S1	S2	S24	S25	S22	S23
Výchylka [mm] ... efektivní hodnota dynamické složky odezvy						
průměr	50,1	45,0	15,4	10,1	6,8	7,3
max	47,6	48,5	13,3	14,0	6,5	7,7
min	56,8	50,3	16,7	9,2	6,9	7,5
Výchylka [mm] ... naměřená efektivní hodnota celkových výchylek (kvazistacionární + dynamická složka)						
průměr	239,1	206,1	67,7	44,8	31,9	35,5
max	399,2	427,8	101,5	89,3	52,2	64,9
min	148,7	128,0	48,4	26,0	19,1	21,9

Poznámka:

Hodnoty v tabulce jsou přepočteny na projektovou hodnotu rychlosti větru pro dominantní frekvenci ohybového kmitání komína (na 1,06 Hz). Vliv vyšších frekvencí je odfiltrován.

5. Vlastní frekvence

Z naměřených časových průběhů odezvy (při účincích větru a při impulsním buzení pomocí zkušebního kladiva) byla vypočtena frekvenční spektra odezvy. Z těchto spekter odezvy je zřejmé, že nejnižší naměřené frekvence odpovídají vlastním frekvencím kmitání konstrukce.

Ze záznamů provedených na niveletě +121 jsou patrné dominantní frekvence (obr.4a) na úrovni cca: 1,06 Hz; 2,13 Hz - 2,19 Hz (tuhost komínu není stejná v obou horizontálních směrech díky obslužným žebříkům, proto interval naměřených frekvencí vyjadřuje tuto skutečnost); 2,63 Hz - 2,94 Hz; 3,69 Hz - 3,82 Hz; 4,75 Hz; 5,56 Hz; 6,19 Hz,... Na obr.5 jsou uvedeny nejnižší tvary kmitání pro směr „V-Z“.

Vyhodnocené vlastní frekvence odpovídají vypočteným vlastním tvarům kmitání. Nejnížší základní ohybový tvar konstrukce na 1,06 Hz je patrný na všech záznamech kmitání i na nižších vertikálních úrovních konstrukce. Frekvence na 3,4 Hz odpovídá zřejmě vertikálnímu vlastnímu tvaru kmitání ve srovnání s vypočtenou vlastní frekvencí vertikálního kmitání na 2,8 Hz. Z frekvenčního posunu naměřené vlastní frekvence vůči vypočtené lze usuzovat, že provedená konstrukce je oproti uvažování v projektu mírně tužší.

6. Naměřené účinky zatížení větrem na pozadí účinků technické seismicity

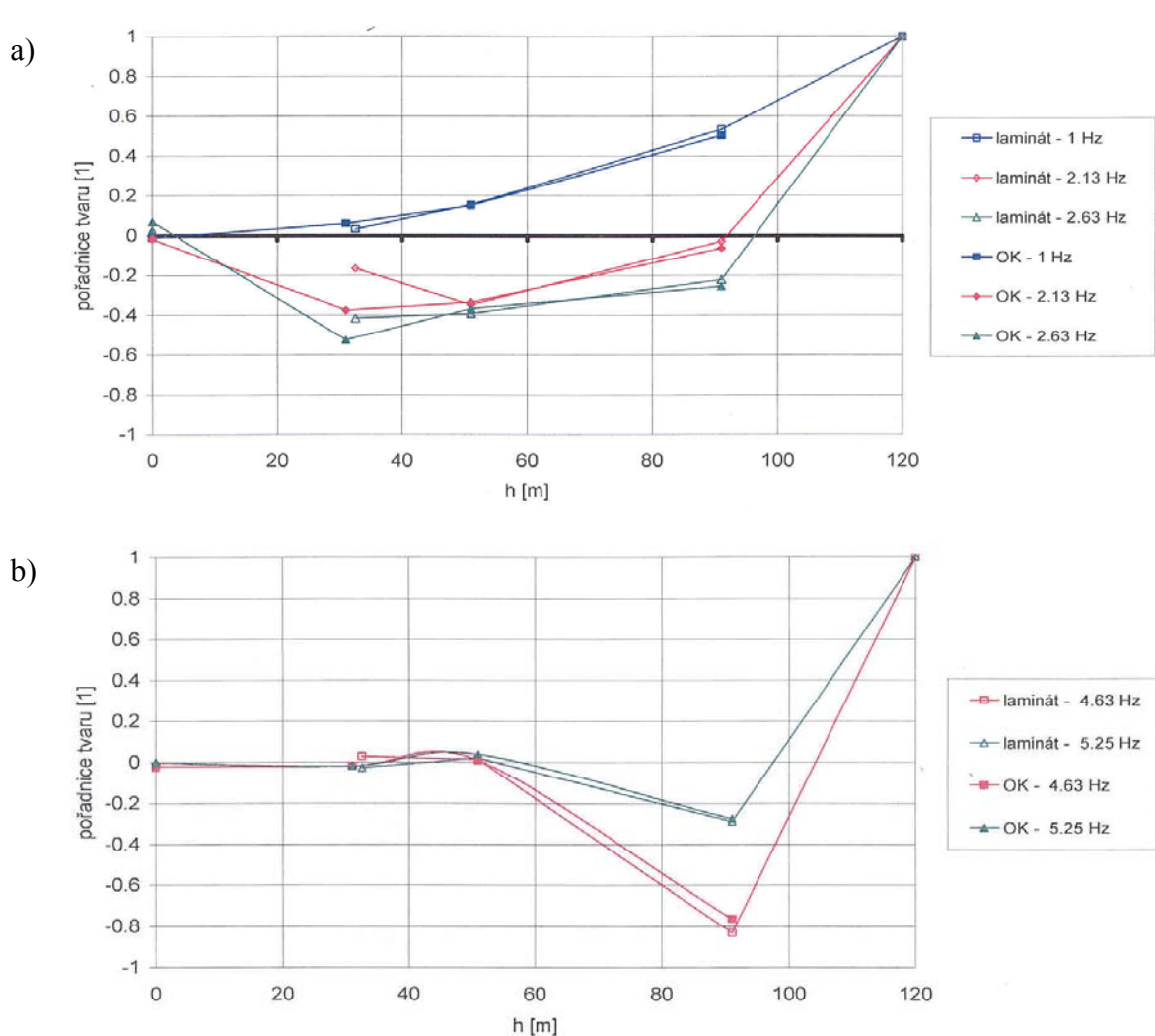
Vyhodnocovány byly efektivní hodnoty z naměřených vibrací a dále maximální a minimální výkmity hodnot v měřeném pětiminutovém intervalu. Pro vyhodnocení byly použity záznamy, při nichž:

- maximální náraz větru se pohyboval od 7,4 do 10,9 m/s (se střední hodnotou 9,1 m/s),
- střední rychlost větru se pohybovala od 4,9 do 7,1 m/s (se střední hodnotou 5,9 m/s).

Na frekvenčních spektrech vypočtených z naměřených časových průběhů odezvy jsou patrné další dominantní frekvenční špičky (kromě frekvencí vlastních tvarů) – viz obr.3 a obr.4. Dominantní seismické účinky jsou zpravidla vyvozeny provozem větších strojů nebo mechanismů v areálu objektu. Porovnejme vyšší frekvenční špičky s otáčkovými frekvencemi strojů a jejich vyšších harmonických složek. Turbosoustrojí mají základní otáčkovou frekvenci na 50 Hz a vyšší harmonické na 100 Hz, 150 Hz atd., včetně poloviční harmonické na 25 Hz. Čerpadla chladicích věží mají základní otáčkovou frekvenci 8,18 Hz. Kompresory mají základní otáčkovou frekvenci na 94,3 Hz v jedné stanici a 153,3 Hz ve druhé stanici, pohony obou typů kompresorů jsou na 25 Hz. U kompresorů je známo, že při větší zátěži jejich otáčky kolísají okolo štítkových hodnot a tedy naměřené hodnoty mají - mohou mít diferenci i řádu 1 Hz. Z porovnání naměřených frekvencí záznamů s otáčkovými frekvencemi strojů ve zdrojích je zřejmé, že na buzení komína technickou seismicitou mají významný vliv zejména čerpadla chladicích věží na úrovni 8,2 Hz a jejich násobky a dále kompresory s frekvencemi v blízkosti 100 Hz, 150 Hz a jejich vyšší násobky. Vliv provozu turbosoustrojí s ohledem na jejich kvalitnější vyvážení a zřejmě dokonalejší údržbu se na odezvě konstrukce mokrého komína podílí nižší měrou než čerpadla chladicích věží a kompresory.

Z provedených vyhodnocení byla sledována zejména velikost zesílení signálu od technické seismicity na úrovni cca +31 na ocelové konstrukci vůči kmitání patek sloupů věže (obr.3). Toto zesílení může být i 20 až 30-ti násobné v závislosti na frekvenci dominantní špičky. Porovnejme zrychlení vyvozená technickou seismicitou na dominantní frekvenci 96 Hz s účinky odezvy na zatížení větrem (při naměřené střední rychlosti větru 5 – 7 m/s) při dominantní frekvenci 1,06 Hz (základní ohybový tvar kmitání):

stanoviště +31, ocelová konstrukce (zrychlení): poměr vítr/ technická seismicita = 1,6,
 stanoviště +91, ocelová konstrukce (zrychlení): poměr vítr/ technická seismicita = 2,5.



Obrázek 5 Normalizované naměřené vlastní tvary horizontálního kmitání konstrukce ve směru působení větru; a) nejnižší tři tvary; b) vyšší dva tvary

Z uvedeného porovnání je zřejmé, že účinky technické seismicity jsou srovnatelné s účinky větru při běžných rychlostech větru okolo 5 – 7 m/s. Pokud bychom porovnávali seismické účinky s návrhovými účinky větru, tak vliv technické seismicity je nižší než účinek návrhového zatížení větrem. Při účincích větru pro posuzovanou konstrukci se jedná zpravidla o velké amplitudy pohybu konstrukce ve výchylkách na nízkých frekvencích, zatímco při technické seismicitě se jedná o nižší až malé hodnoty výchylek, ale na vyšších a vysokých frekvencích, které mohou být významné pro některé detaily konstrukce (např. styky konstrukčních částí, nejrůznější měřicí sondy v konstrukci, ochranné osvětlení komína apod.).

7. Přenos účinků mezi ocelovou konstrukcí a základovými patkami

Na obr.3a je uvedeno srovnání spekter zrychlení ve vodorovných směrech cca V-Z, tedy ve směru větru pro stanoviště na výškové úrovni +31 a stanoviště na základových patkách. Ocelová konstrukce zesílí účinky na frekvencích, které se šíří do konstrukce přes patky od okolních zdrojů jako technická seismicita. Výrazné zesílení se projeví na nízkých frekvencích od cca 1 do 8 Hz, v oblasti kde leží nejnižší vlastní frekvence konstrukce. Na vyšších frekvencích má konstrukce vyšší útlum, přesto vliv vnějších dynamických účinků je významný ve frekvenčním okolí 16,5 Hz, 25 Hz, 33 Hz, 45 až 50 Hz a v okolí 96 Hz. Na obr.3b je uvedeno obdobné porovnání spekter pro vertikální vibrace. Při vertikálním kmitání je přenos z patek do konstrukce dominantní jak na nízkých frekvencích v okolí 1 až 3 Hz, tak také na vyšších frekvencích nad 16,5 Hz.

8. Závěr

Na příkladu složené konstrukce byl analyzován vliv účinků větru a technické seismicity na její dynamickou odezvu a porovnána významnost obou typů zatížení z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti konstrukce. Z porovnání vyplývá, že dominantní účinek na konstrukci z hlediska její bezpečnosti (maximální výchylky, extrémní napjatost ve vybraných průřezích apod.) představuje návrhová hodnota zatížení větrem. Technická seismicita má srovnatelné účinky se zatížením od dynamického větru v běžném intervalu obvyklých rychlostí větru. Může však být dominantní pro spolehlivost konstrukce vzhledem k rozkmitání vybraných částí, např. přípojů, měřicích sond osazených v konstrukci s ohledem na technologické určení konstrukce apod. a konečně umožňuje i kvantifikaci těchto účinků, jež bývají někdy v projekčním stádiu podceňovány. Z provedených měření odezvy konstrukce při „silnějším“ větru (5 – 7 m/s) je dále zřejmá výhodnost extrapolace tohoto relativně běžného větru na návrhové zatížení. Z porovnání naměřené odezvy s předpokládanou návrhovou jsou dále stanovitelné rezervy konstrukce v jejím skutečném chování a dále vliv nejrůznějších imperfekcí, plynoucích ze spolupůsobení konstrukce jako celku: piloty – ocelová věž – laminátový nástavec.

8. Poděkování

Práce na této problematice byla zčásti sponzorována firmou Fortum Engineering, Ltd Pardubice a dále podporována grantovým projektem GAČR: 103/03/0082 „Dynamické zatížení a odezva konstrukcí způsobené lidským činitelem.“ Autoři si dovoluji touto cestou vyslovit sponzorské firmě i grantové agentuře svůj dík.

9. Literatura

ČSN P ENV 1991 - 1(1996) Zásady navrhování a zatížení konstrukcí. Část 1: Zásady navrhování.

ČSN P ENV 1991 - 2-4 (1997) Zásady navrhování a zatížení konstrukcí. Část 2-4: Zatížení konstrukcí - Zatížení větrem.

Model Code for Steel Chimneys (1988) Cicind, Switzerland.

Commentaries for the Model Code for Steel Chimneys (1989) Cicind, Switzerland.

Tichý, M. a kol.(1987) Zatížení stavebních konstrukcí, TP 45, SNTL Praha 1987.