



## Využití měření vlastností větru a odezvy pro navrhování a posuzování konstrukcí

Příspěvek přibližuje několik projektů, při kterých bylo s výhodou využito měření odezvy konstrukce a vlastností větru. Měření a jeho vyhodnocení bylo prováděno v těsné spolupráci s Ústavem teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR.

Měření vlastností větru a odezvy bylo důležitým podkladem pro přípravu rekonstrukcí televizních vysílačů a pro stanovení zbytkové životnosti kotevních lan a laminátových nástavců několika stožárů. Změřené vlastnosti větru mohou rovněž sloužit k realistickému určení kategorie drsnosti terénu v místě stavby.

### MĚŘENÍ PŘI VÝMĚNĚ ANTÉNNÍCH NÁSTAVCŮ A TLUMIČŮ KMITÁNÍ NA TELEVIZNÍCH VYSÍLAČÍCH

V rámci přechodu z analogového na digitální vysílání byly měřeny cca 20 m vysoké anténní nástavce včetně tlumičů kmitání instalovaných ve vrcholech stožárů. Stávající nástavce byly tvořeny laminátovými tubusy o průměru cca 1,6 m (obr. 1 vlevo). Při rekonstrukci byly nahrazeny novými obdobné konstrukce (např. Ještěd, Praděd, Kleť nebo Krásné) anebo častěji štihlejšími ocelovými dřívky se čtvercovým průřezem o šířce stěny cca 0,5 m, na které jsou antény osazovány z vnější strany (obr. 1 vpravo). Kyvadlové nebo kapalinové tlumiče kmitání jsou navrženy na tlumení příčného kmitání způsobeného odtrháváním Strouhalových vírů. V případě většiny stožárů je třeba tlumit více vlastních tvarů kmitání.

Předmětem naší části dodávky bylo stanovení kvazistatického zatížení větrem pro návrh nových nástavců, modálních charakteristik pro návrh a naladění nových tlumičů kmitání, statické posudky stožárů po rekonstrukci a ověření účinnosti tlumičů.

Byly provedeny dvě sady krátkodobých měření – před a po výměně nástavců. Snímače byly umístěny ve dvou až třech výškových úrovních. Bylo měřeno zrychlení konstrukce současně s rychlostí a směrem větru. Rychlost větru byla měřena miskovými ane-

mometry fy Tlusták (obr. 2 vlevo) a Vaisala WAA252, zrychlení akcelerometry Endevco 86 (obr. 2 vpravo). V každé měřené úrovni byly instalovány dva akcelerometry orientované do dvou na sebe kolmých směrů. Snímače byly bezdrátově spojeny pomocí Wi-Fi modulů WSL-9215 s počítačem. Bezdrátová měřicí linka umožnila velmi rychlou a efektivní přípravu měření – zejména v porovnání s měřeními, při kterých byla po výšce stožáru rozváděna sada kabelů v celkové délce až 500 metrů.

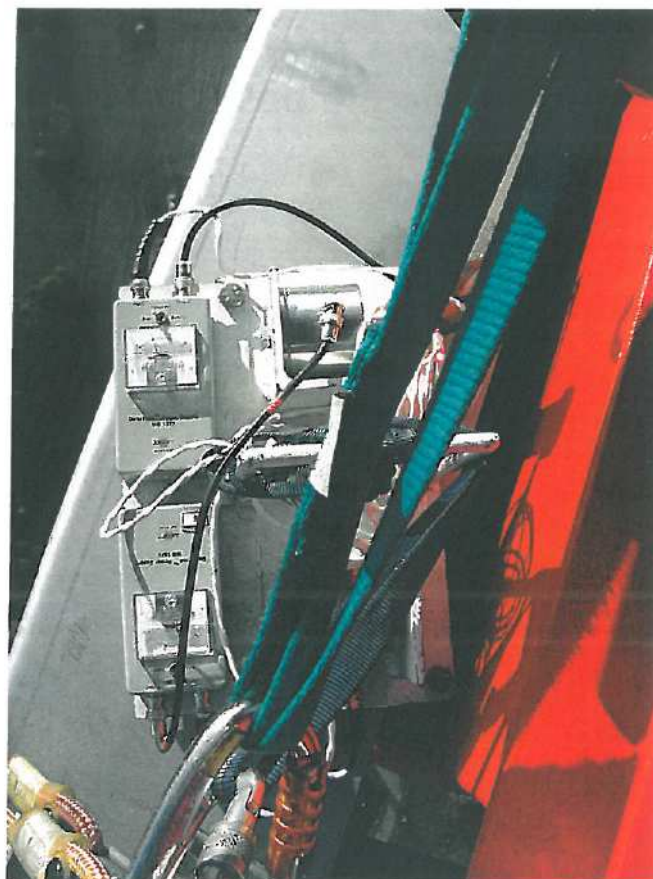
Měření před výměnou sloužilo k ověření dynamických charakteristik konstrukce a ke kalibraci výpočetních modelů. Kalibrované modely s upraveným nástavcem pak byly použity k poměrně přesnému stanovení vlastních tvarů a frekvencí kmitání nového stavu, příp. dalších parametrů potřebných pro návrh i naladění nových tlumičů kmitů. Druhé měření po výměně nástavce bylo provedeno k ověření teoretických předpokladů a účinnosti tlumičů kmitání. Konstrukce byly rozkmitávány na příslušných rezonančních frekvencích a ze záznamů dokmitání byl určován útlum konstrukce. Ve většině případů byla zaznamenána velmi dobrá shoda očekávaných a teoretických rezonančních frekvencí stejně jako teoretického a změřeného logaritmického dekrementu útlumu. V ostatních případech bylo druhé měření použito k jemnému doladění tlumičů.

Měření rychlosti a směru větru sloužilo zejména jako informace o zatěžování konstrukce během měření a vlivu aerodynamické složky útlumu na měřený útlum. Lze jej rovněž použít ke zpřesnění charakteristik větru potřebných pro statický posudek jako je drsnost terénu a spektrální hustoty rychlosti větru.



Obr. 1 – Výměna laminátového tubusu pomocí vrtulníku (vlevo), nový ocelový nástavec s kapalinovým tlumičem kmitů ve vrcholu (vpravo).





Obr. 2 – Miskový anemometr a akcelerometry umístěné na stožáru

### POSOUZENÍ ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI KONSTRUKCE

Měření vlastností větru a odezvy konstrukce je užitečným podkladem pro stanovení zbytkové životnosti konstrukce. Na laminátových nástavcích několika televizních vysílačů a kotevních lanecch několika kotvených stožárů byla provedena dlouhodobá měření rozkmitů napětí. Napětí bylo měřeno tenzometricky (obr. 3 vpravo). Spektrum rozkmitů napětí bylo stanoveno ze záznamů měření pomocí metody Rainflow. Naměřené počty cyklů mohou být následně extrapolovány na celkovou dobu života konstrukce a zároveň slouží k ověření a případnému upřesnění teoretických výpočtů

[1,2]. Únavové poškození materiálu bylo posuzováno pomocí Palmgren-Minerova pravidla kumulace poškození. Přesnější stanovení spekter rozkmitů napětí umožnilo ve většině případů prodloužení doby života konstrukce.

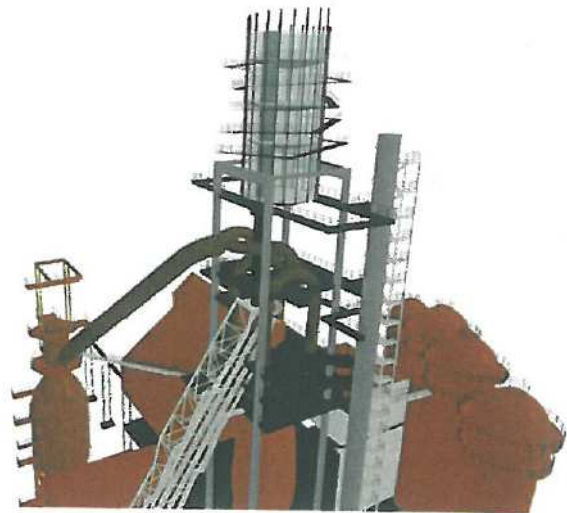
### URČENÍ KATEGORIE TERÉNU PRO STANOVENÍ ZATÍŽENÍ VĚTREM

Zatížení větrem má náhodný charakter. K jeho popisu se proto často používají statistické veličiny jako výkonové spektrální hustoty rychlosti větru a rovněž korelační funkce flukuační složky větru (turbulence), které jsou v dané lokalitě a pro daný směr větru při-



Obr. 3 – Ultrazvukový anemometr a tenzometry nalepené na napínacích tyčích kotevních lan





Obr. 4 – Vysoká pec č. 1 (vlevo), nástavba vysoké pece – vizualizace (vpravo)

blíže stálé. Tyto veličiny lze získat přímo z naměřených záznamů rychlosti větru. Pro jejich měření jsou vhodné například ultrazvukové anemometry (obr. 3 vlevo). Setrvačnost točícího se kříže miskových anemometrů (obr. 2 vlevo) totiž neumožňuje zaznamenat fluktuace větru ve vyšší frekvenční oblasti (cca nad 0,4 Hz).

Porovnáním měřených spektrálních hustot rychlosti větru, které jsou na drsnosti terénu závislé, s teoretickými je možné přesněji určit kategorii terénu [3].

Přesnější stanovení kategorie terénu bylo provedeno pro návrh nástavby vysoké pece č. 1 v oblasti Dolní Vítkovice v Ostravě, která bude sloužit jako vyhlídkový objekt (obr. 4). Výška stávající konstrukce je cca 60 m. Nástavba dosáhne úrovně přibližně 75 m. Kategorie terénu v okolí stavby je IV podle normy ČSN EN 1991-1-4 [4]. Vzdálenost od okraje města, k hranici mezi kategoriemi terénu II a IV, je pro většinu směrů větru přibližně 3,5 km.

Norma [4] v Příloze A (čl. A.2) uvádí vzdálenosti stavby od změny drsnosti terénu, při kterých lze větší drsnost terénu při návrhu kon-

strukce uvažovat. Při použití „Postupu 2“ dle čl. A.2 v souladu s národní přílohou je nutné pro návrh této stavby uvažovat kategorii terénu II. Literatura ovšem pro tento případ udává mnohem nižší vzdálenosti, viz např. [5].

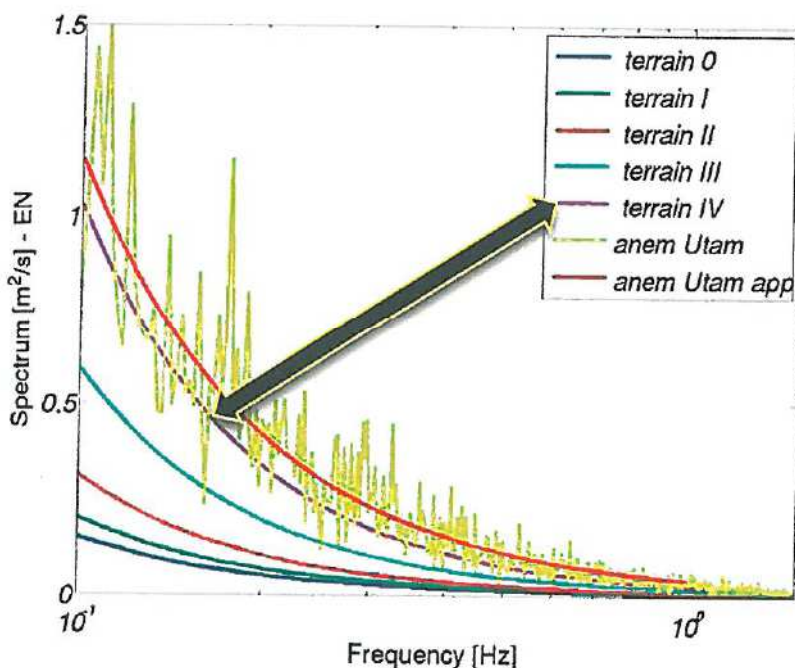
Pro zjištění skutečných vlastností turbulence větru v dané lokalitě a výšce nad terénem bylo provedeno cca jednoměsíční měření a zaznamenávání rychlosti větru. Ultrazvukový anemometr Wind Horizon 100 byl umístěn na stávající konstrukci ve výšce 56 m. Typický výsledek měření a porovnání s teoretickými hodnotami je zobrazen na obr. 5.

Z příkladu je patrné, že měřené spektrální hustoty rychlosti větru ve výšce 56 m nejlépe odpovídají kategorii terénu IV. Vyhodnocení bylo provedeno pro více středních rychlostí větru vždy s obdobnými výsledky. Zatížení větrem mohlo být tedy na základě výsledků měření uvažováno až do výšky 56 m, ve které byl anemometr umístěn, odpovídající kategorii terénu IV. Protože turbulentní pole větru se při přechodu hranice mezi dvěma odlišnými terény mění postupně – nejprve v menších a až později ve větších výškách, mohou se vlastnosti větru lišit v horní a dolní části konstrukce. Z tohoto důvodu byla pro část stavby nad 56 m uvažována méně příznivá kategorie terénu III.

Zpřesnění drsnosti terénu znamenalo snížení zatížení větrem o 30 % na části stavby do výšky 56 m a 15 % na části horní. To výrazně snížilo náklady na dostavbu objektu, zejména na zesilování stávající konstrukce vysoké pece.

#### PROGRAMOVÝ PROJEKT MPO TIP

Měření vlastností větru a odezvy konstrukce je také důležitou součástí programového projektu TIP Ministerstva průmyslu a obchodu „Pokročilé metody v navrhování, posuzování a monitorování štíhlých dynamicky namáhaných konstrukcí. Projekt se zabývá zejména metodikou návrhu a posuzování štíhlých konstrukcí, které nesplňují kritéria pro použití metod obsažených v evropských normách [4,6,7] anebo které je vhodné posuzovat přesněji. Jedním z cílů projektu je výběr a doplnění vstupních hodnot výpočtů jako jsou spektrální hustoty, koherenční funkce pro podélný i příčný směr zatížení větrem vhodných pro použití



Obr. 5 – Spektrální hustota rychlosti větru. Porovnání měření (značeno UTAM) s teoretickými hodnotami pro různé drsnosti terénu



na území ČR. Dále je vyvíjen software pro analýzu stožárů v souladu s novými evropskými normami a automatický čítač dat, který bude sloužit pro dlouhodobé zaznamenávání rozkmitů napětí a pro posuzování životnosti konstrukcí v praxi. V rámci projektu je prováděno dlouhodobé měření rychlosti větru a odezvy konstrukce na několika stožárech, jehož výsledky slouží k výběru vhodných charakteristik větru a ověřování teoretických předpokladů zpracovávané metodiky výpočtů odezvy.

## ZÁVĚR

Měření vlastností větru a odezvy konstrukce se ukázalo jako užitečné a efektivní při rekonstrukcích staveb zatížených větrem a při návrzích a ověřování účinnosti tlumičů kmitání. Měření umožnilo zpracování přesnějších analýz a v řadě případů hospodárnější návrh konstrukce.

### *Application of Monitoring of Wind Properties and Response for Design and Evaluation of Constructions*

*The article deals with several projects within which monitoring of construction responses and wind properties was successfully applied. Monitoring and its evaluation was performed in a close cooperation with the Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences of the CR. Monitoring of wind properties and responses represented an important material for preparation of television transmitter reconstruction and for determination of remaining lifetime of anchor ropes and laminate extension of several poles. The monitored wind properties can likewise serve for realistic categorization of terrain roughness at a construction site.*

*Příspěvek vznikl za finanční podpory Ministerstva průmyslu a obchodu České Republiky, číslo projektu TIP FR-T13/654.*

*Materiál byl prezentován na konferenci Konstrukce 2012 v Lednici.*

*Ing. Jiří Lahodný, Ph.D.,  
lahodny@excon.cz,  
Ing. Vladimír Janata, CSc.,  
EXCON a.s.*

*doc. Ing. Stanislav Pospíšil, Ph.D.,  
Ing. Shota Urushadze, CSc.,  
Ing. Radomil Král, Ph.D.,  
ÚTAM AV ČR, v.v.i.*

## LITERATURA:

- [1] Pospíšil, S., Lahodný, J., Janata, V., Urushadze, S.: Life-time prediction of slender structures subjected to turbulent wind, *Engineering Mechanics, Svratka, 05/2006.*
- [2] Lahodný, J., Janata, V., Pospíšil, S., Urushadze, S.: Určování zbytkové životnosti laminátových nástavců a kotevních lan vysílacích stožárů, *časopis Konstrukce 6/2007.*
- [3] S. Pospíšil, R. Král, J. Lahodný, S. Urushadze, V. Janata: Comparison of wind spectral densities from different locations, *IASS Meeting WG4 – Masts and Towers, Copenhagen, 09/2011.*
- [4] ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: Zatížení stavebních konstrukcí – Část 1-4: Obecné zatížení – Zatížení větrem
- [5] Simiu, E. – Scanlan, R. H.: *Wind effects on structures*, 3. vydání, John Wiley and sons, inc., New York, 1996
- [6] ČSN EN 1993-3-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 3-1: Stožáry a komíny – Stožáry
- [7] ČSN EN 1993-3-2 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 3-1: Stožáry a komíny – Komíny

**Oroštujte to!**

**Dodáváme podlahové rošty na klíč.**  
Využijte možnosti objednávat typizované rošty na internetu: [www.e-rosty.com](http://www.e-rosty.com)

**TENZONA**



Člen České asociace ocelových konstrukcí

TENZONA s.r.o.  
Novoveská 101  
709 00 Ostrava

Ostrava  
596 622 204

Jihlava  
567 302 098

Přerov  
585 313 670



[obchod@tenzona.cz](mailto:obchod@tenzona.cz), [www.tenzona.cz](http://www.tenzona.cz)