



■ Určování zbytkové životnosti laminátových nástavců a kotevních lan vysílacích stožárů

Štíhlé konstrukce, jako například vysoké stožáry, jsou rozkmitávány větrem. Dochází tak k jejich vysokocyklovému namáhání a zároveň k únavovému porušování materiálu. Článek pojednává o stanovení zbytkové doby života laminátových nástavců na televizních stožárech Vraní vrch, Veselský kopec a Děvín a stanovení zbytkové doby života kotevních lan kotvených stožárů Krašov a Topolná.

Určení zbytkových životností bylo provedeno pro provozovatele vysílačů České radiokomunikace. Práce zahrnovaly měření, prohlídky a únavové posouzení. Cílem bylo zjistit, zda lze nástavce a lana, jejichž životnost by mohla být podle předpokladů brzy vyčerpána, nadále provozovat a pokud ano, určit po jakou dobu.

Laminátové nástavce a kotevní lana jsou umístěny na konstrukcích různých výšek a různých dynamických vlastností. Stožáry se nacházejí v místech s odlišnými vlastnostmi vzdušného proudu. Lze tedy očekávat, že míra únavového poškození bude na různých lokalitách odlišná. Protože výměna laminátů a kotevních lan je poměrně nákladná, bylo pro analýzu použito přesnějších metod, než jaké nabízejí normy ČSN nebo EN, zejména právě s ohledem na přesnější rozlišení místních podmínek a dynamického chování konstrukcí.

LAMINÁTOVÉ NÁSTAVCE

Posuzované nástavce jsou válcové laminátové skořepiny o průměru 1,9 m, výšce 10–20 m a tloušťce stěn 12–16 mm. Jsou umístěny na vrcholech stožárů a slouží jako nosiče a zároveň ochrana antén. Nástavce Vraního vrchu a Veselského kopce jsou samonosné, nástavec stožáru Děvín má nosnou ocelovou konstrukci. Laminátové nástavce byly instalovány před 25–30 lety a byly navrženy s předpokládanou životností 30 let.

Během výluk vysílačů byly provedeny vizuální prohlídky, kontroly případného rozvoje starších trhlin a zjišťování vzniku nových. Pro posudek bylo využito materiálových charakteristik, včetně Woehlerovy křivky, získaných z experimentů na starším dílci laminátového nástavce, který byl vyroben přibližně ve stejné době a s obdobným výrobním postupem.



Obr. 1 – Laminátový nástavec stožáru Děvín



Obr. 2 – Pohled na stožár Krašov

KOTEVNÍ LANA

Kotevní lana byla posuzována na dvou příhradových kotvených stožárech. Krašov je vysoký 340 m, kotvený do tří směrů v pěti kotevních úrovních. Stožár Topolná dosahuje výšky 270 m, je opět kotvený do tří směrů ve čtyřech kotevních úrovních. Na rozdíl od Krašova jsou zde lana opatřena izolátory. Současné stáří kotevních lan je 27 a 30 let. Na stožárech jsou prováděny pravidelné vizuální prohlídky lan a koncovek.

METODY A ZÁKLADNÍ PRINCIPY VÝPOČTU

Byly použity dvě metody lišící se ve způsobu stanovení počtu cyklů:

- stanovení zbytkové životnosti pomocí dlouhodobého měření konstrukce;
- stanovení zbytkové životnosti pomocí krátkodobého měření konstrukce a větru spolu s teoretickým pravděpodobnostním výpočtem a znalostí meteorologických údajů.

Poškození materiálu bylo pro obě metody stanoveno podle lineární teorie reprezentované Palmgren-Minerovým zákonem kumulace poškození.

Stanovení životnosti pomocí dlouhodobého měření konstrukce

V průběhu několika měsíců bylo tenzometry snímáno napětí ve stěně laminátových nástavců. Data byla vyhodnocována metodou stékajícího deště a tříděna do 32 napětových tříd. Vyhodnocování a ukládání výsledků bylo prováděno přímo použitým zařízením, které umožňuje ukládat data po dobu delší než jeden rok. Zís-



Obr. 3 – Horní dvojice kotevních lan – stožár Krašov

kané spektrum rozkmitu napětí bylo poté extrapolováno na posuzovanou dobu života.

Tenzometrické „odečty“ byly provedeny několikrát během roku a počet cyklů byl stanoven přirozeně z nejdelšího záznamu, i když se prokázalo, že překračuje-li délka měření určitou dobu, nemá délka záznamu zásadní vliv na hodnoty výsledného spektra napětí, které lze tedy považovat za stacionární.

Tenzometrické měření se ale neosvědčilo v případě měření kotevních lan, a to vzhledem k opakovanému spálení tenzometrů způsobenému zřejmě indukci proudů v lanech nebo blesky. Po těchto zkušenostech bude v budoucnu dlouhodobé snímání sil v lanech řešeno pomocí akcelerometrických měření.

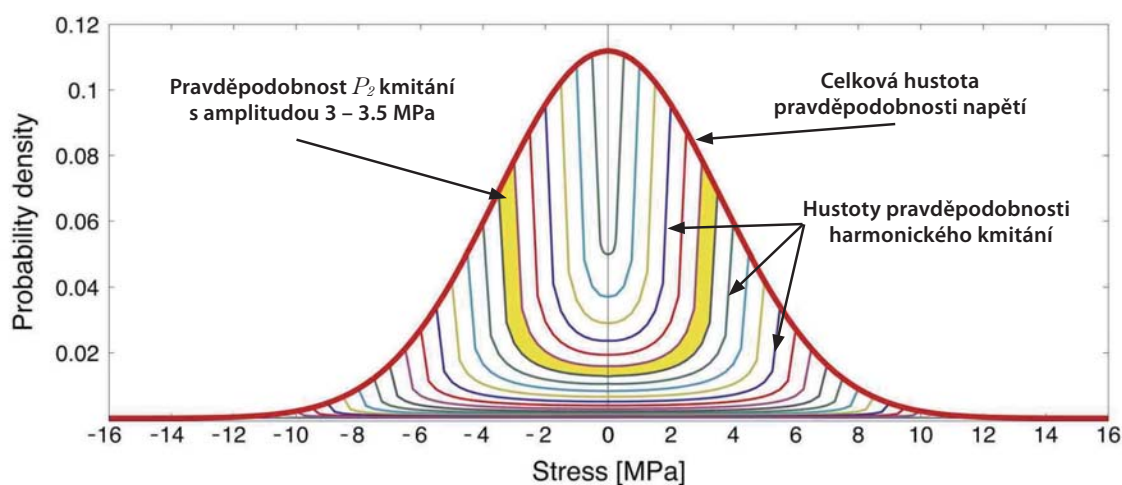
Stanovení životnosti pomocí krátkodobého měření a teoretického pravděpodobnostního výpočtu

Zatížení větrem je náhodnou veličinou, která není předem známa, ale odpovídá určité pravděpodobnosti (vyjádřené příslušnou distribuční funkcí) a její frekvenční složení je možné popsat pomocí výkonové spektrální hustoty, která je specifická pro danou

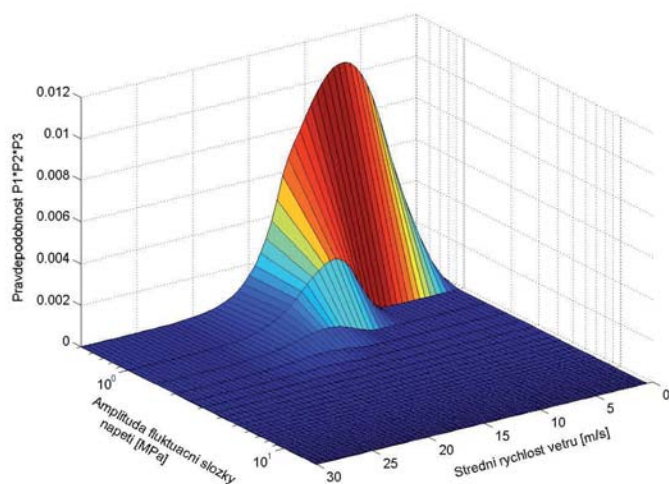
oblast, a je možné ji přímo měřit. Těchto vlastností se s výhodou využívá ve výpočtu, který je založen na původní metodě a který byl rozšířen pro potřeby těchto posudků.

Princip metody stanovení životnosti pomocí krátkodobého měření konstrukce a větru spočívá ve výpočtu pravděpodobnosti výskytu různých amplitud kmitání. Tyto pravděpodobnosti závisí na rychlostech větru, vlastnostech větru v dané lokalitě a dynamickém chování konstrukce. Jestliže jsou vyšetřovány dlouhé časové úseky, potom hodnoty těchto pravděpodobností korelují velmi dobře s hledanými počty cyklů.

Měření rychlosti a směru větru bylo prováděno spolu s měřením zrychlení konstrukce a tenzometrickým měřením napětí. Ze záznamu rychlosti větru byla získána intenzita turbulence, výkonová spektrální hustota rychlosti větru a bylo také možné přesněji stanovit součinitele drsnosti terénu. Ze záznamu zrychlení byl vypočten průběh rychlosti a výchylky stožáru, dále pak jejich spektrální hustoty, ze kterých byly přibližně určeny vlastní frekvence, směrodatné odchylky odezvy a vliv jednotlivých vlastních tvarů kmitání na celkové kmitání konstrukce.



Obr. 4 – Příklad celkové hustoty pravděpodobnosti flukuační složky napětí v laminátu a rozkladu na pravděpodobnosti parciálních harmonických kmitů



Obr. 5 – Příklad sdružené pravděpodobnosti P_1, P_{2i}, P_3 jako funkce amplitudy flukuační složky napětí a střední rychlosti větru

Výsledný počet cyklů je vyjádřen pomocí poměrně jednoduchého vztahu, který obsahuje čtyři níže uvedené pravděpodobnosti a hodnoty vlastních frekvencí konstrukce:

Pravděpodobnost P_1 je pravděpodobnost výskytu středních rychlostí větru, tj. toho, že střední hodnota rychlosti větru bude ležet v určitém intervalu. Bylo uvažováno Weibullovo rozdělení hustoty pravděpodobnosti:

$$f(v_m) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_m}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v_m}{c}\right)^k\right]$$

Koeficienty k a c vycházejí z dlouhodobých meteorologických měření.

Pravděpodobnosti P_{2i} jsou pravděpodobnosti různých velikostí amplitud flukuační složky napětí při určité střední rychlosti větru. Jsou vypočteny na základě předpokladu Gaussova rozdělení kolem střední hodnoty napětí:

$$f(\sigma) = \frac{1}{\sigma_\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\sigma - \bar{\sigma})^2}{2\sigma_\sigma^2}\right),$$

kde σ je napětí, $\bar{\sigma}$ je napětí odpovídající střední rychlosti větru, σ_σ je směrodatná odchylka napětí, která může být vypočtena pomocí součinitele odezvy nárazu podle ČSN P ENV 1991-2-4.

Uvažuje se, že kmitání konstrukce je složeno z harmonických kmitů o amplitudách $\sigma_{amp,fl,i}$. Pro jednotlivé amplitudy $\sigma_{amp,fl,i}$ byly stanoveny hustoty pravděpodobnosti napětí P_{2i} , které lze vepsat do celkové hustoty pravděpodobnosti (viz obr. 4). Výpočet pravděpodobností P_{2i} pro kotvené stožáry je složitější v tom, že musí zohlednit nelineární chování lan.

Pravděpodobnost P_3 je pravděpodobnost, se kterou vítr vane v jednom směru. Je stanovena z histogramu získaného z dlouhodobých meteorologických měření, prováděných na různých místech České republiky.

Pravděpodobnost P_i je pravděpodobnost kmitání konstrukce příslušející určité vlastní frekvenci. Je určena ze spektrální hustoty napětí vyjadřující množství energie při kmitání jako poměr směrodatné odchylky v okolí vlastní frekvence a celkové směrodatné odchylky napětí.

Výsledný počet cyklů je vyjádřen vztahem:

$$n_i = P_1 \cdot P_{2i} \cdot P_3 \cdot d_i \cdot \sum_j (P_{i,fl,j} \times f_j),$$

kde d_i je doba života, f_j vlastní frekvence konstrukce.

Příslušné rozkmity napětí byly vypočteny jako:

$$\Delta\sigma_i = 2 \cdot \sigma_{amp,fl,i},$$

kde $\sigma_{amp,fl,i}$ značí amplitudu flukuační složky napětí.

ZÁVĚR

Životnost laminátových nástavců byla posouzena na základě dlouhodobého měření a paralelně pravděpodobnostním výpočtem s využitím měření dynamické odezvy konstrukcí a vlastností větru v dané lokalitě. Výsledky obou metod se dobře shodují a v některých datech doplňují. Dobrá shoda výsledků umožňuje použití teoretické analýzy v případě, kdy na konstrukci není možné z některého důvodu provést dlouhodobé měření. Životnost kotevnicích lan byla posouzena teoretickým pravděpodobnostním výpočtem.

Na základě zjištěných výsledků bylo možné prodloužit životnosti většiny zkoumaných konstrukcí, dále stanovit míru jejich únavového poškození a odhadnout dobu vyčerpání jejich životnosti. Česká radiokomunikace získaly tak cenný podklad pro strategické rozhodování při plánování obnovy a modernizace své sítě vysílačů.

Jiří Lahodný, Vladimír Janata,

Excon, a. s.,

Stanislav Pospíšil, Shota Urushadze,

ÚTAM AV ČR

ZDROJE INFORMACÍ:

- Amzallag, C., Gery, J. P., Robert, J. L., Bahuau, J.: Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis. *Fatigue 16* (1994) 287–293
- Degriek and W. Van Paepegem: Fatigue damage modelling of fibre-reinforced composite materials: review, *Appl Mech Rev 54* (2001) (4), pp. 279–300
- Pirner, M., Fischer, O.: Long-time observation of wind and temperature effects on TV towers, *J Wind Eng. Ind. Aerodynamics*, 79 (1999) 1–9
- Pospíšil, S., Bavestrello, F., De Col, M.: A method for the calculation the number of cycles of the lattice tower due to the wind turbulence. IASS WG 4 meeting, Chicago, 1997
- Pospíšil, S., Lahodný, J., Janata, V., Urushadze, S.: Life-time prediction of slender structures subjected to turbulent wind, *Engineering Mechanics 2006 Svratka*, paper no. 101
- Simiu, E., Scanlan, R.: *Wind effects on structures*. 1996
- Wahl, N. et al: Spectrum fatigue lifetime and residual strength for fiberglass laminates in tension, AIAA-2001-0025

The authors of the article deal with the durability of laminate extensions, which was assessed based on long-term measurements and, at the same time, based on a probability calculation using the measurement of dynamic response of structures and the characteristics of wind in given location. The results of both methods match well and even complement each other in some respects. According to the authors, the good match of results makes it possible to use theoretical analysis if, for some reason, long-term measurements cannot be applied to a structure. The durability of anchorage cables was assessed using a theoretical probability calculation. Based on the results, it was possible to extend the durability of most examined structures, to determine their fatigue damage, and to estimate their final service life. In conclusion, the authors point out that the Czech Radio company has obtained a valuable basis for strategic decisions during the planning of renewal and modernization of its transmitter network.