

ÚČINEK PŘETRŽENÍ LANA KOTVENÉHO STOŽÁRU
THE EFFECT OF CABLE FAILURE ON THE GUYED MAST

Abstract

The paper deals with the phenomena causing failures of anchoring cables of guyed masts and with the theoretical analysis of the mast response to the breaking of a cable using the equivalent static method as well as the time-domain response. Further it discusses the input data of the corresponding damping characteristics of the structure. A numeric example is presented to illustrate the evaluation of impact factor, static and dynamic deflections and structural stresses.

Key words: Guyed mast, break of guy, energetic method, dynamic factor, damping

Úvod

Při návrhu kotvených stožárů je maximálně využito materiálu kotevních lan. V takovémto případě vzniká zvýšené riziko ztráty funkčnosti nebo zřícení stožáru vlivem poškození či přetržení kotevních lan. Tato otázka vyvstává v souvislosti s přehodnocením funkčnosti a možnou výměnou kotevních lan kotvených stožárů z důvodu přechodu na digitální vysílání TV, viz např. opětovné ověření u RKS Kojál v roce 2002.

Problematika přetržení kotevního lana byla zkoumána našimi autory [1, 2, 3] již v 80. letech 20. století v souvislosti s výstavbou telekomunikační sítě. Otázka přetržení kotevního lana stožáru byla zařazena i do norem [6, 7]. Pro stožáry 3. třídy (zvýšená spolehlivost) norma [6] předepisuje navrhnout stožár na účinek přetržení jednoho kotevního lana. Stožár musí být schopen přenést účinek dynamického zatížení vneseného do konstrukce přetržením lana a dále musí být schopen odolat účinku kvazistatické složky zatížení větrem snížené na 50 %, tj. zatížení větrem o rychlosti rovné 71 % střední rychlosti větru v_m .

Příčiny poškození kotevních lan

K poškození kotevního lana dochází zpravidla při jeho koncovekách. Ačkoliv je namáhání lana osovými silami větší u jeho horní podpory, dochází častěji k poškození u dolní koncovky lana [5]. Tento jev je možné vysvětlit na základě dvou marginálních příčin: Dolní konec lana je vystaven častějším účinkům koroze než konec horní. V případě, kdy není ukončení lana provedeno jako „bezmomentové“, tj. dokonalý kloub, k čemuž může dojít právě korozí v oblasti čepů koncovek, a nebo jsou lanové koncovky či izolátory příliš těžké, vznikají u dolní koncovky lana větší hodnoty ohybových napětí než u koncovky horní.

Při oslabení vinutých lan přetržením některých drátů lana dochází k jejich částečnému rozvinutí na určité, vzhledem k celkové délce lana zpravidla malé délce. V této oblasti je namáhání lana samozřejmě zvýšené, nicméně zbývající část lana přenáší účinky zatížení beze změn, neboť vlivem vinutí lana se neaktivní (přetržené) dráty opět aktivují. Problematickým parametrem zůstává odhad účinné délky oslabení lana.

¹ Ing. Aleš Nevařil, Ústav stavební mechaniky, fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno, Česká republika, e-mail: nevaril.a@fce.vutbr.cz

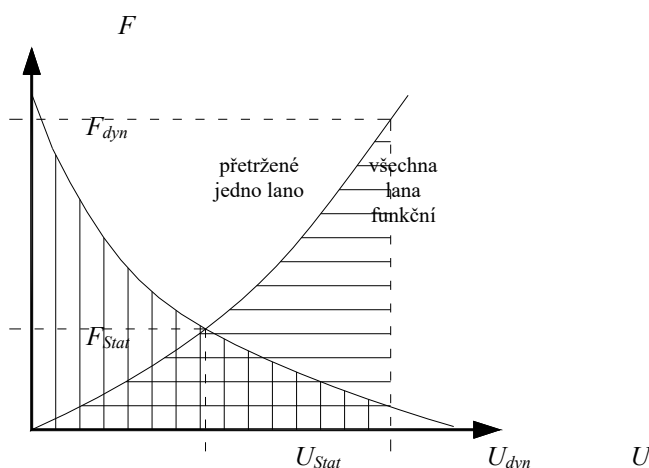
V článku [2] se uvádí, že přibližný odhad byl získán např. při poškození jednoho z lan vysílače Krašov v roce 1977, kdy došlo k přetržení 143 ze 169 drátů lana. Toto poškození se projevilo na délce 6 až 10 m, tj. V oblasti 5 % délky kotevního lana.

Metody analýzy

Pro analýzu účinků přetržení kotevního lana na stožár se využívá dvou základních metod: energetické metody, kterou uvádí norma [6] v příloze D, a analýzy pomocí odezvy stožáru v časové oblasti.

Energetická metoda

Princip energetické metody vychází z rovnováhy mezi ztracenou energií nepřetržených kotevních lan dané kotevní úrovně (svisle šrafovaná plocha) a akumulovanou energií ve všech lanech dané kotevní úrovně (vodorovně šrafovaná plocha), viz obr. 1.



Obr. 1

Metoda je založena na následujících zjednodušujících předpokladech:

- ☐ porušení lana nastane jeho jednoduchým přetržením,
- ☐ energie kumulovaná v lanu před jeho přetržením je zanedbána,
- ☐ tlumení se zanedbává,
- ☐ zatížení větrem se neuvažuje.

Předpis [6] uvádí dále postup pro určení dynamické výchylky U_{dyn} a součinitele rázu Φ pro případ přetržení kotevního lana. Součinitel rázu je definován poměrem statické a dynamické síly, tj.

$$\Phi = \frac{F_{dyn}}{F_{stat}} \quad (1)$$

Analýza v časové oblasti

Analýzu odezvy stožáru po přetržení kotevního lana je možné řešit např. metodou konečných prvků. V této analýze se obvykle předpokládá, že porušení nastane jednoduchým přetržením a energie kumulovaná v lanu před jeho přetržením je zanedbána. Tlumení systému se bere v úvahu. Úlohu je možné řešit včetně vlivu zatížení větrem, i když zpravidla je zatížení větrem řešeno samostatně.

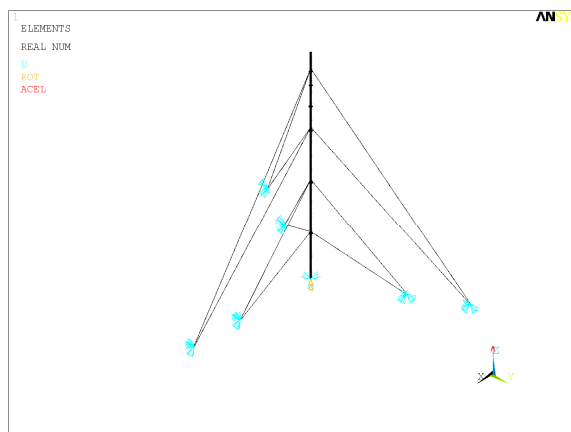
Vzhledem k nutnosti řešit úlohu v oblasti velkých přemístění (lanové prvky v konstrukci) je třeba při použití metody odezvy v časové oblasti využít přímé integrace pohybových rovnic (zpravidla Newmarkova metoda). Tlumící charakteristiky konstrukce je možné zadat do výpočtového modelu např. prostřednictvím Rayleighova útlumu popsaného vztahem (2), kde matice tlumení C je určena na základě matice hmotnostních konstant M konstrukce, matice tuhostních konstant K a součinitelů tlumení.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2)$$

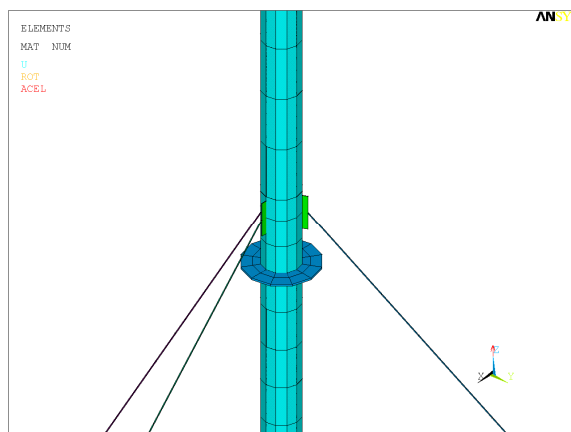
Vzhledem k faktu, že matice tuhosti je měněna během geometricky nelineárního výpočtu (jedná se o tečnou matici tuhosti) použití „tlumení“ se nezdá být výhodné [4]. Dalším z faktů znevýhodňujících tento typ tlumení je situace, kdy lanové části konstrukce nejsou namáhány tahem, tj. jejich tuhost je velmi nízká, a tedy je snížen i tlumící účinek. Tato situace často vede ke konvergenčním problémům při numerickém řešení úlohy. Tlumení je tedy výhodné modelovat pomocí koeficientu tlumení matice hmotnosti.

Numerický příklad

Analyzovanou konstrukcí je 294 m vysoký anténní stožár kotvený lany ve čtyřech výškových úrovních +61,25 m, +128,75 m, +196,25 m a +271,25 m, obr. 2. Těleso stožáru je kotveno do tří směrů, kdy dvě nižší a dvě vyšší úrovně kotvení mají vždy v daném směru jeden společný kotevní blok umístěný ve vzdálenosti 105 m, resp. 175 m. Kotevní lana jsou ocelová, předběžně vytažená, s jednou vrstvou Z-drátů. Dřík je tvořen ocelovou troubou o průměru 2,1 m a má po výšce proměnnou tloušťku stěny 7 - 12 mm. V patě je kloubově uložen. Od úrovně +273,3 m navazuje na dřík sklolaminátový anténní nosič o průměru 1,9 m. Stožár je vybaven anténním systémem a revizními lávkami, viz obr. 3. Úloha byla modelována s použitím programového systému ANSYS, a to jeho prutových prvků BEAM44 pro dřík stožáru a prvků LINK10 pro kotevní lana. Výpočtový model se skládá z 1048 prvků lokalizovaných 1971 uzly.



Obr. 2

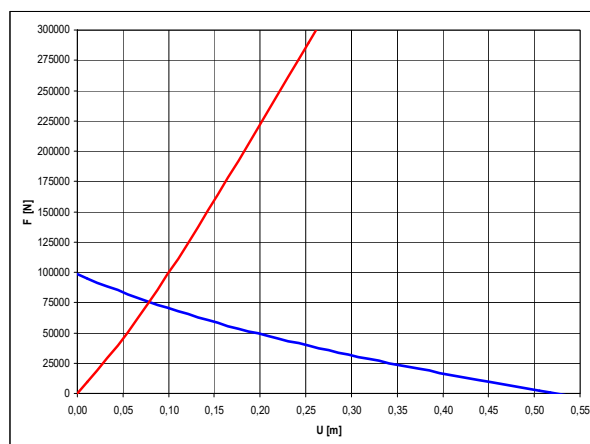


Obr. 3

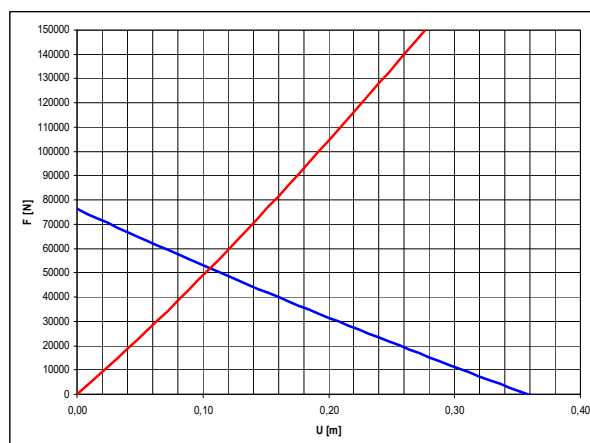
Energetická metoda

Dřík stožáru byl v místech připojení kotevních lan postupně zatěžován předepsanými deformacemi a byla sledována velikost reakce v této lanové podpoře. Vynesení této závislosti pro stožár se všemi lany funkčními a s jedním přetrženým (odstraněným) kotevním lanem je možné na základě odst. 3.1 určit velikost součinitele rázu dle vztahu (1).

Grafy pro určení součinitele rázu v případě přetržení lana na jednotlivých kotevních úrovních jsou uvedeny v pořadí od nejnižší (graf 1) po nejvyšší (graf 4) úroveň kotvení. Červeně je vyznačena křivka pro stav s přetrženým kotevním lanem a modře křivka, kdy jsou všechna lana funkční.



Graf 1

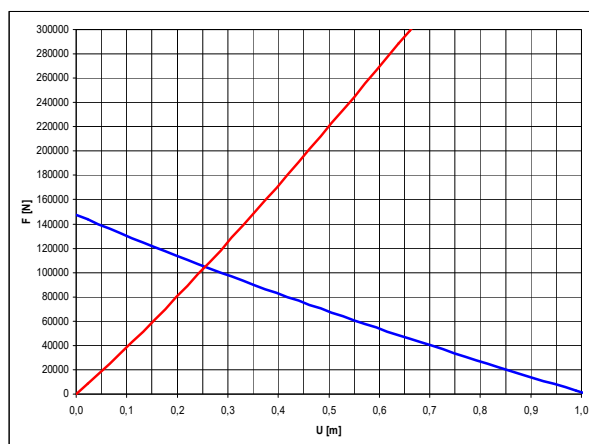


Graf 2

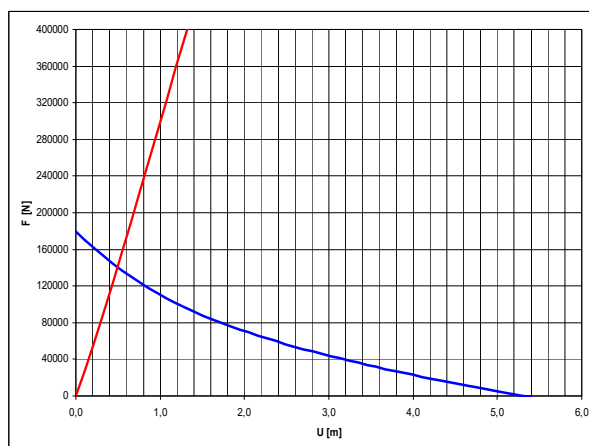
Součinitelé rázu Φ a dynamické a statické výchylky U_{dyn} a U_{stat} v úrovni kotvení přetrženého lana jsou pro jednotlivá přetržení uvedeny v následující tabulce.

Tab. 1

kotevní úroveň	I	II	III	IV
Φ [-]	2,01	2,01	2,02	1,82
U_{dyn} [m]	0,14	0,2	0,47	0,92
U_{stat} [m]	0,083	0,108	0,253	0,486



Graf 3



Graf 4

Pro zajímavost je možné uvést velikost dynamického součinitele odvozeného z poměru dynamické a statické výchylky. Pro jednotlivé kotevní úrovně je (od nejnižší po nejvyšší kotevní úroveň, tj. I až IV) roven 1,69, 1,85, 1,86 a 1,89.

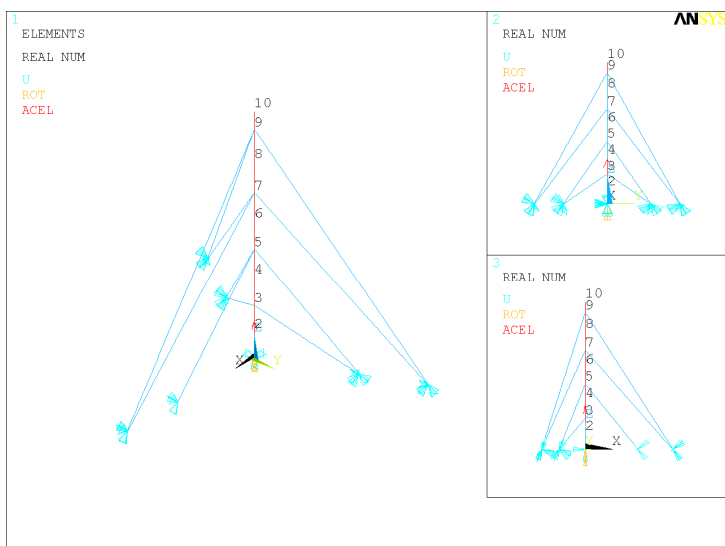
Odezva v časové oblasti

Dynamická odezva stožáru na přetržení kotevního lana I. až IV. kotevní úrovně získaná přímou integrací pohybových rovnic Newmarkovou metodou je prezentována v grafech 5 – 12. Odezva dříku stožáru je uvedena v 9 charakteristických místech (uprostřed jednotlivých polí, v místech lanových podpor a ve vrcholu stožáru). Jednotlivá místa jsou označena číslicemi 2 až 10 a zobrazena na následujícím obrázku.

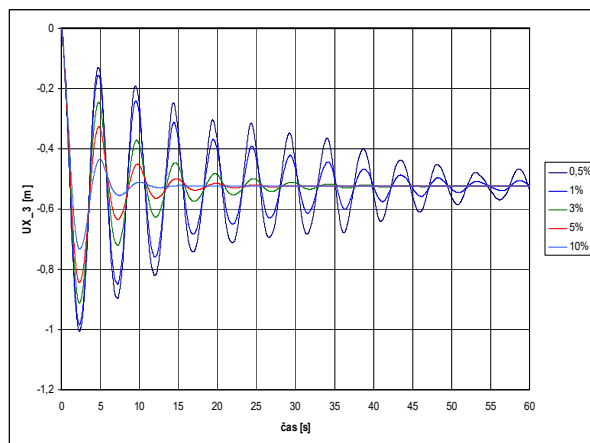
Odezvu stožáru po přetržení kotevního lana významně ovlivňuje velikost útlumu konstrukce. Protože tato hodnota patří k nesnadno určitelným vstupním parametrům, byla provedena studie závislosti odezvy stožáru na velikosti poměrného útlumu.

Velikost poměrného útlumu byla uvažována hodnotami $\xi = 0,5, 1, 3, 5$ a 10% . Vzhledem k faktu, že je třeba nahradit poměrný útlum ξ tlumením Rayleighovým, viz odst. 3.2, byla velikost součinitele určena tak, aby výsledný poměrný útlum odpovídal přibližně první vlastní ohybové frekvenci dříku plně funkčního stožáru o hodnotě cca $0,5$ Hz.

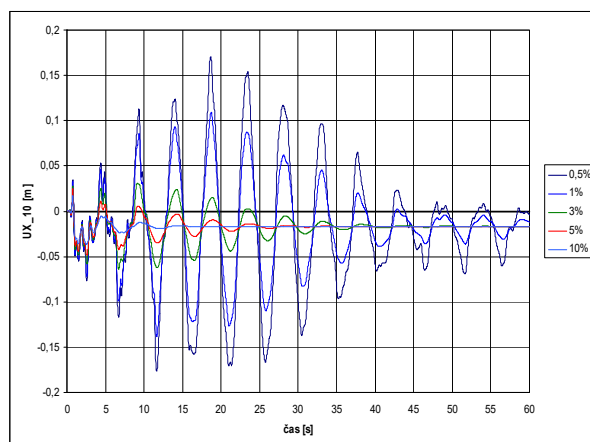
V grafu 5 a 6 je zobrazena odezva v místě I. kotevní úrovně a ve vrcholu stožáru po přetržení kotevního lana I. kotevní úrovně. Obdobně v grafech 7 a 8 je zobrazena odezva v místě II. kotevní úrovně a vrcholu stožáru po přetržení lana II. kotevní úrovně.



Obr. 4

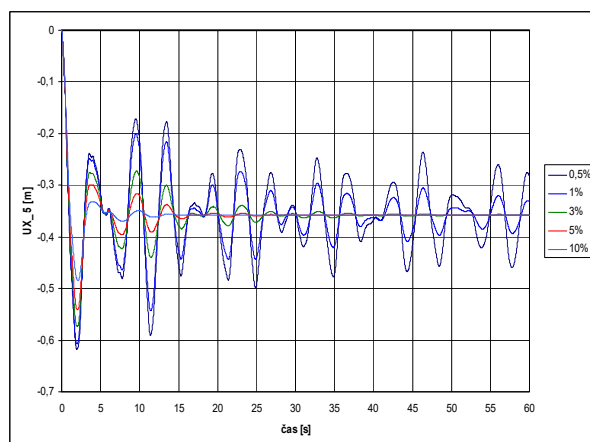


Graf 5

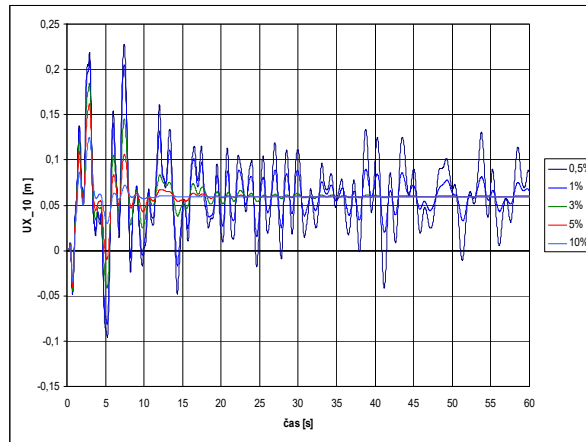


Graf 6

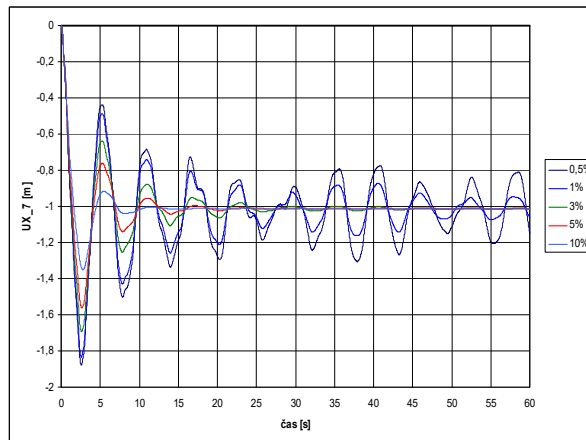
Odezva na přetržení lana III. kotevní úrovně je zobrazena v grafech 9 a 10, a to v místě připojení lan III. kotevní úrovně ke stožáru, tj. místo č. 7, a ve vrcholu stožáru, tj. místo č. 10. Obdobně je uvedena odezva pro přetržení kotevního lana nejvyšší kotevní úrovně v místě jeho připojení ke dříku, tj. místo 9, v grafu 11 a ve vrcholu stožáru v grafu 12.



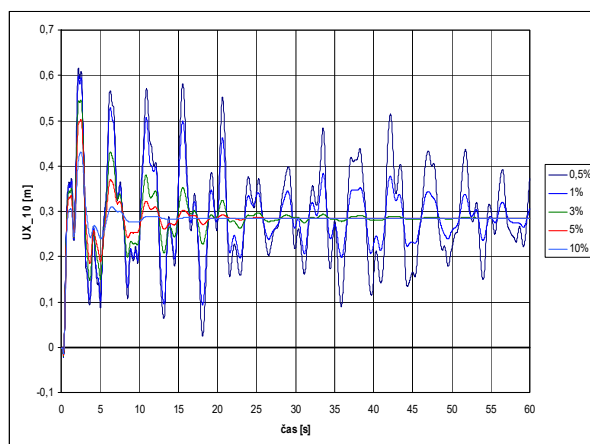
Graf 7



Graf 8



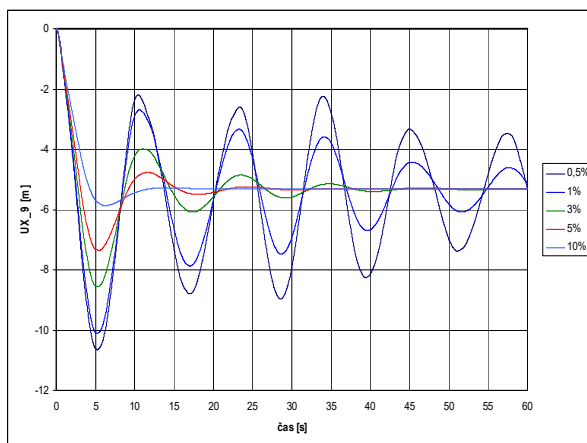
Graf 9



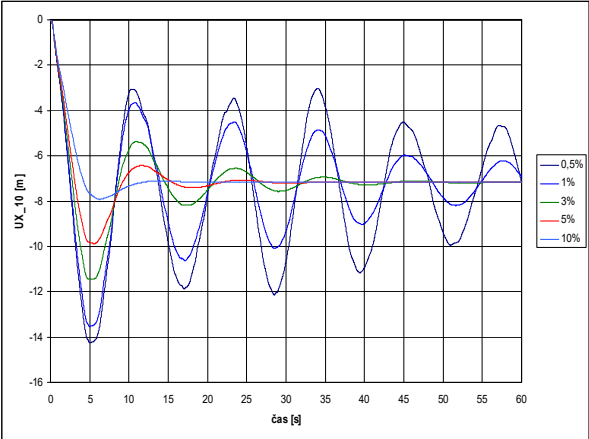
Graf 10

Extrémy napětí dříku stožáru

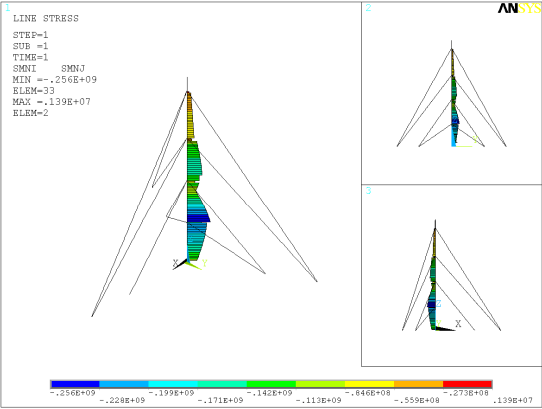
S využitím součinitelů rázu Φ byly určeny extrémní hodnoty normálových napětí dříku stožáru násobením výsledného napjatostního stavu konstrukce po přetržení daného kotevního lana odpovídajícím součinitelem rázu. Získaná pole napětí jsou zobrazena na obr. 5 (přetržení kotevního lana nejnižší kotevní úrovni) až obr. 8 (přetržení kotevního lana nejvyšší kotevní úrovni).



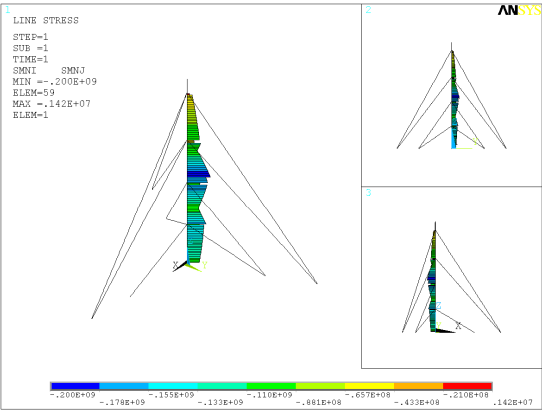
Graf 11



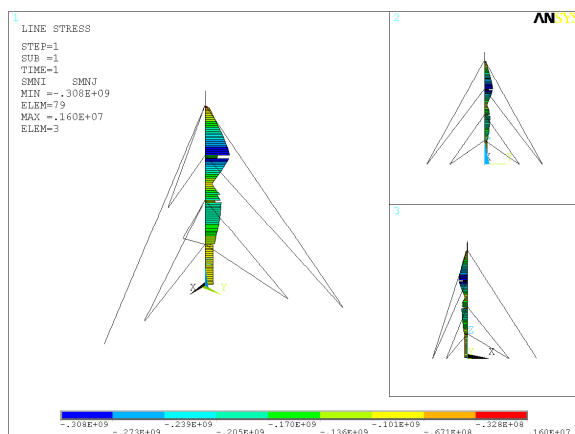
Graf 12



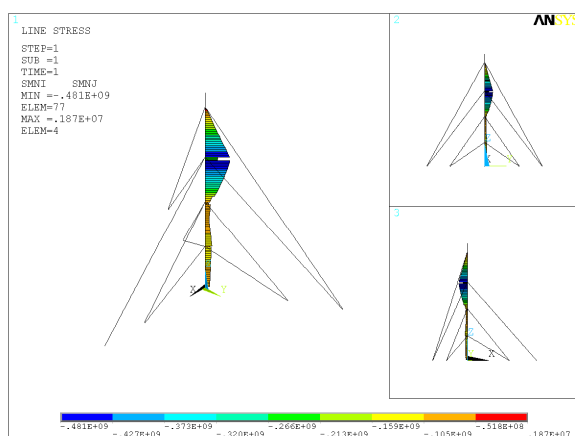
Obr. 5



Obr. 6

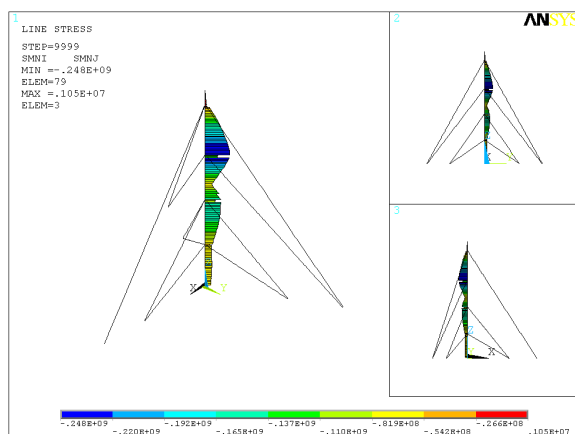


Obr. 7

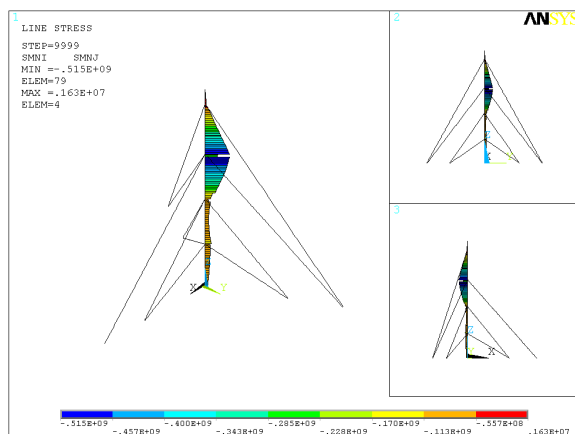


Obr. 8

Extrémní napětí v případě odezvy stožáru v časové oblasti byly získány výpočtem obálky napětí v jednotlivých časových krocích analýzy. Pro variantu s poměrným útlumem o velikosti $\xi = 0,5 \%$ jsou pole extrémních normálových napětí (v tlaku) dřívku stožáru zobrazena na obr. 9 (přetržení lana nejnižší kotevní úrovně) až obr. 12 (přetržení lana nejvyšší kotevní úrovně).



Obr. 11



Obr. 12

Závěr

Na základě energetické metody byly stanoveny velikosti součinitelů rázu pro jednotlivé kotevní úrovně. Pro danou konstrukci se součinitel rázu pohybuje v rozsahu 1,8 až 2,0. Velikost dynamického součinitele určená na základě poměru dynamické a statické výchylky se pohybuje v rozsahu 1,7 až 1,9. Velikost součinitele rázu obdržená z odezvy stožáru v časové oblasti se pohybuje v rozsahu 1,1 až 2,0 v závislosti na velikosti poměrného útlumu.

Odezvu konstrukce na přetržení kotevního lana výrazně ovlivňuje velikost poměrného útlumu, jak je zřejmé z výše prezentovaných grafů 5 – 12. V případech, kdy je $\xi < 3 \%$, je patrné poměrně dlouhé dokmitávání stožáru. Pro $\xi = 10 \%$ naopak stožár téměř nekmitá.

Pro prezentovaný stožár se jeví jako kritické přetržení kotevního lana nejvyšší úrovně, kdy výkmit vrcholu stožáru dosahuje více jak 14 metrů. Extrémní hodnoty

normálových napětí odpovídající maximálnímu výkmitu při přetržení kotevního lana nejvyšší úrovně dosahují hodnoty 515 MPa v případě $\xi = 0,5 \%$, 418 MPa v případě $\xi = 3 \%$ a 295 MPa pro $\xi = 10 \%$.

Srovnání součinitelů rázu obdržených výše prezentovanými metodami ukazuje, že numericky a časově méně náročnou energetickou metodu je možné použít pro stanovení extrémů odezvy kotveného stožáru po přetržení kotevního lana.

Poděkování

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt IM0579, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

Literatura

- [1] Fischer, O. (1976): Účinek přetržení kotevního lana stožáru. Inženýrské stavby 4. 1976. p. 207-212.
- [2] Fischer, O. a Novotný, R. (1983): Příspěvek k diagnostice poškození kotvených stožárů. Inženýrské stavby 2. 1983. p. 93-97.
- [3] Fischer, O. a Pirner, M. (1987): Dynamika kotvených stožárů. Studie ČSAV č. 2. Praha, Academia Praha. 1987. 148 stran.
- [4] Koenke, P. (2005): ANSYS User's Manual, Revision 10.0, SAS IP, Inc., 2005.
- [5] Koloušek, V., Pirner, M., Fischer, O. and Náprstek, J. (1983): Wind Effects on Civil Engineering Structures. Academia Praha. 1983. 572 p.
- [6] ČSN P-ENV 1993-3-1 Navrhování ocelových konstrukcí – Část 3-1: Věže, stožáry a komíny – Věže a stožáry, ČNI Praha, 90 stran, 2000.
- [7] ČSN 73 1430 Navrhování ocelových konstrukcí stožárů, ČNI Praha, 48 stran, 1985.

