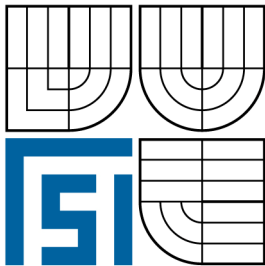


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH STOŽÁRU SATELITNÍHO VYSÍLAČE
DESIGN OF SATELLITE TRANSMITTER PYLON

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL KOVÁŘ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. RADEK VLACH, PH.D.

BRNO 2008

Abstrakt

Zadáním bakalářské práce je návrh stožáru pro satelitní vysílač. Stožár je navržen pro výšku 24 metrů, ve které je satelit umístěn. Dle tohoto předpokladu je navržen typ konstrukce, pro kterou je jediným požadavkem konstantní trojúhelníkový příčný průřez stožáru. V práci je uveden konstrukční návrh a výpočet stožáru.

Abstract

There is solved a task “Design of satellite transmitter pylon” in this bachelor’s thesis. Type of the satellite transmitter pylon structure is designed for application level 24 meters – it is location of satellite transmitter. There is one limitation only, constant trianguloid cross-section of the pylon. This thesis presents engineering design and evaluation of the pylon.

Klíčová slova

konstrukce stožáru, metoda konečných prvků

Key words

Structure of pylon, Finite Element Method

Bibliografická citace mé práce:

KOVÁŘ, P. *Návrh stožáru satelitního vysílače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 41 s.

Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením pana Ing. Radka Vlacha Ph.D. a za pomoci uvedené literatury.

V Brně dne 23.5.2008

.....
Pavel Kovář

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Radku Vlachovi Ph.D. za odbornou pomoc při řešení problémů na dané téma a dále také panu Ing. Tomáši Návratovi, Ph.D. za potřebné získání znalostí pro řešení výpočtového modelu v programu ANSYS.

Obsah

Abstrakt	5
Abstract	5
Klíčová slova	5
Key words	5
Bibliografická citace mé práce:	7
Čestné prohlášení	9
Poděkování	11
Obsah	13
Úvod	14
1 Konstrukce stožáru	15
1.2 Výběr prvků nosných sloupů	15
1.3 Výběr prvků pro vzpěry	15
2 Návrh výpočtového postupu	17
2.1 Výpočet namáhání od síly větru	17
2.2 Rozlišení zastíněných a nezastíněných prvků	18
2.3 Síla působící na nezastíněné prvky stožáru	19
2.4 Síla působící na zastíněné prvky stožáru	21
2.5 Výsledná síla větru působící na stožár	22
2.6 Výsledné velikosti zatěžujících sil od síly větru	22
3 Výpočet a optimalizace konstrukce	23
3.1 Metoda konečných prvků	23
4 Tvorba výpočtového modelu v programu ANSYS	25
4.1 Použití prvky při tvorbě modelu	25
4.1.1 Prvek Beam 188	25
4.1.2 Prvek Link 10	26
4.2 Okrajové podmínky	27
4.2.1 Vazby pro ukotvení stožáru	27
4.3 Zatěžující síla	27
4.3.1 Výsledná zatěžující síla	28
4.4 Použitý materiál	28
4.4.1 Charakteristické vlastnosti použitého materiálu:	28
5 Výsledky výpočtů z programu ANSYS	29
5.1 Výsledky a analýza statického výpočtu	29
5.1.1 Určení nebezpečného místa	29
5.1.2 Výpočet koeficientu bezpečnosti	29
5.2 Rozložení napětí na konstrukci a hodnota bezpečnosti pro:	30
5.3 Rozložení napětí na konstrukci a hodnota bezpečnosti pro:	31
5.4 Rozložení napětí na konstrukci a hodnota bezpečnosti pro:	32
5.5 Rozložení napětí na konstrukci a hodnota bezpečnosti pro:	33
5.6 Rozložení napětí na konstrukci a hodnota bezpečnosti pro:	34
5.7 Zhodnocení výsledků	35
Závěr	37
Seznam literatury	38
Elektronické zdroje informací	38
Seznam použitých zkratk symbolů a veličin	39
Seznam obrázků a grafů	41

Úvod

Cílem bakalářské práce je konstrukční návrh stožáru satelitního vysílače a jeho výpočet.

Stožár by měl sloužit k umístění satelitního vysílače a soustavy antén sloužících pro vysílání a příjem radiových vln. Hlavním požadavkem na tvar konstrukce je konstantní trojúhelníkovitý příčný průřez. Konstantní průřez je volen s ohledem na umístění pohyblivého vozíku pro satelit, který bude vykonávat pohyb po dvou hlavních nosnících stožáru. Volba trojúhelníkovitého průřezu byla zvolena s ohledem na maximální natočení satelitního přijímače, který je umístěn na třetím nosném prvku konstrukce. Pro výpočet konstrukce a její optimalizaci bude užito Metody konečných prvků (MKP). Vstupním parametrem pro tento výpočet bude především celková výška stožáru a plocha systémů antén, které jsou umístěny na vrchu stožáru.

Cíle bakalářské práce

- zvolit konstrukci stožáru;
- navrhnout výpočtový postup;
- provést optimalizaci konstrukce.

1 Konstrukce stožáru

Konstrukce stožáru je řešena jako svařovaná příhradová konstrukce. Dle zadání je zvolen trojúhelníkový průřez v půdorysu, kde strana trojúhelníku je dlouhá 840 mm a výška mezi jednotlivými vzpěrami je 400mm. Hlavním nosným prvkem bude trubka a vzpěry mezi těmito prvky budou realizovány „L“ profilem.

1.2 Výběr prvků nosných sloupů

Jako prvky nosných sloupů byly vybrány trubky z ocelí tříd 11 a 12. Jedním z hlavních důvodů výběru je ten, že tyto prvky mají hutní osvědčení s provedením zkoušky na tah /tlak a tudíž jsou pro případ dané konstrukce vhodné. Máme dále na výběr mezi trubkami bezešvými tvářenými za tepla a trubkami podélně svařovanými hladkými. Pro daný případ byly vybrány právě trubky podélně svařované hladké, třídy 12 a to především s ohledem na cenu, která je u zmíněných trubek nižší.

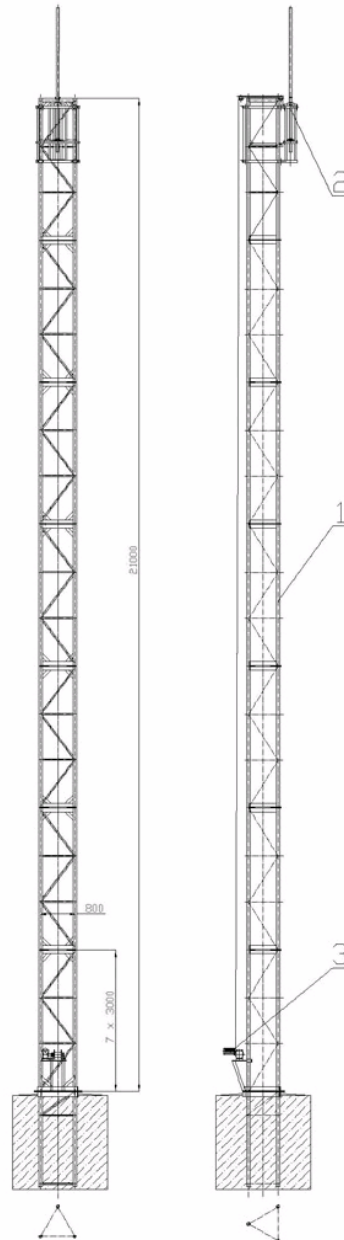
1.3 Výběr prvků pro vzpěry

Pro vzpěry mezi hlavní nosné prvky byly vybrány L profily s ohledem vhodnosti jejich tvaru(průřezu) vůči vzpěrné stabilitě, například oproti plochým tyčím, které by byly vhodnější především, co se týká ceny. Dalším, neméně důležitým faktorem je jejich vhodný tvar pro výrobu a také cena, která je nižší než u další uvažované varianty, kterou byly I profily.

Obecný návrh konstrukce

Pozn.: Obecná volba konstrukce byla zvolena dle požadavků zadání

Dodávka obsahuje:
1. konstrukce stožáru,
2. pojezdový vozík,
3. elektrický vrátek + koncový vypínač,
4. statický posudek



Obr.1-1 Obecný návrh konstrukce stožáru

[6]

2 Návrh výpočtového postupu

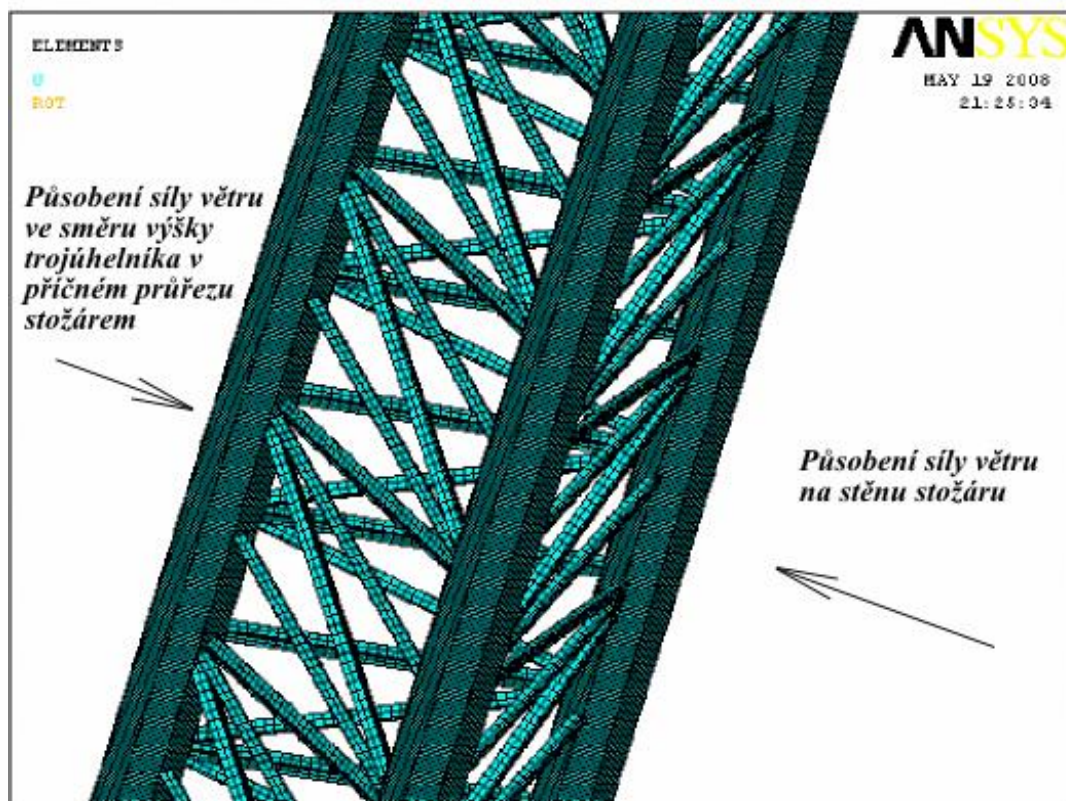
2.1 Výpočet namáhání od síly větru

Při návrhu stožáru je důležitým faktorem typ namáhání na danou konstrukci. Základním předpokladem je, že stožár bude umístěn mimo zastavěnou oblast a tudíž na něj budou působit povětrnostní podmínky, z tohoto důvodu je nutné uvažovat jako hlavní zátěžný prvek sílu větru.

Pro výpočet namáhání od síly větru byla využita norma ČSN 27 0103 „Navrhování ocelových konstrukcí“. Koncepce této normy neslouží přímo k řešení stožárových konstrukcí, ale je určena pro ocelové konstrukce jeřábů. Pro řešení toho problému bylo využito podobnosti mezi normou a daným konstrukčním návrhem. Pro určení namáhání konstrukce proto bylo z normy využito pouze několik úseků a to těch, které nezahrnují parametry při pohybu a pracovních namáhání za provozu.

Při výpočtu namáhání větrem se postupuje tak, že je spočítána zátěžná síla na každý profil z kterých je konstrukce svařena a výsledek celkové zátěžné síly je dán součtem jednotlivých sil v jednom směru.

Při výpočtu byly uvažovány dva směry namáhání od větru. První, je působení větru na stěnu stožáru a druhý je působení větru ve směru výšky trojúhelníku. Síla větru podle druhého způsobu namáhání je menší, než síla větru působící na stěnu stožáru a proto nebude ve výpočtu uvedena. Uvedené způsoby namáhání jsou zobrazeny na Obr. 2-1.



Obr.č.2-1 Směry zatěžující síly na konstrukci stožáru

Uvažujeme-li působení síly větru na stěnu stožáru F_{10} , zahrneme do výpočtu dva nosné prvky konstrukce a výztuhy mezi těmito prvky, ale také třetí nosný prvek s jeho výztuhami, které nejsou stíněny výztuhami na přední straně stožáru.

2.2 Rozlišení zastíněných a nezastíněných prvků

Jako nezastíněný prvek je uvažován prvek, který je vystaven přímému působení toku větru. Zastíněný prvek je ten, který není vystaven přímému působení toku větru, tj. takový prvek, před kterým leží těleso ve směru působení toku větru. Tok větru, který obtéká nezastíněný prvek je narušen a vzniká tak turbulentní proudění, které působí na zastíněný prvek. Síla toku větru je několikrát menší oproti síle laminárního proudění, avšak není zanedbatelná.

[2]

2.3 Síla působící na nezastíněné prvky stožáru

Výpočet zátěžné síly jednoho nezastíněného prvku je realizován dle vzorce:

$$F_{1\omega} = \omega_1 \cdot \xi_\omega \cdot A \quad [2]$$

kde:

- $F_{1\omega}$ [N] - normová síla větru na nezastíněný prvek
 ω_1 [Pa] - normový tlak větru na ocelovou konstrukci
 ξ_ω [-] - tvarový součinitel
 A [m²] - plocha vytvořená průmětem profilu do roviny kolmé na tok větru

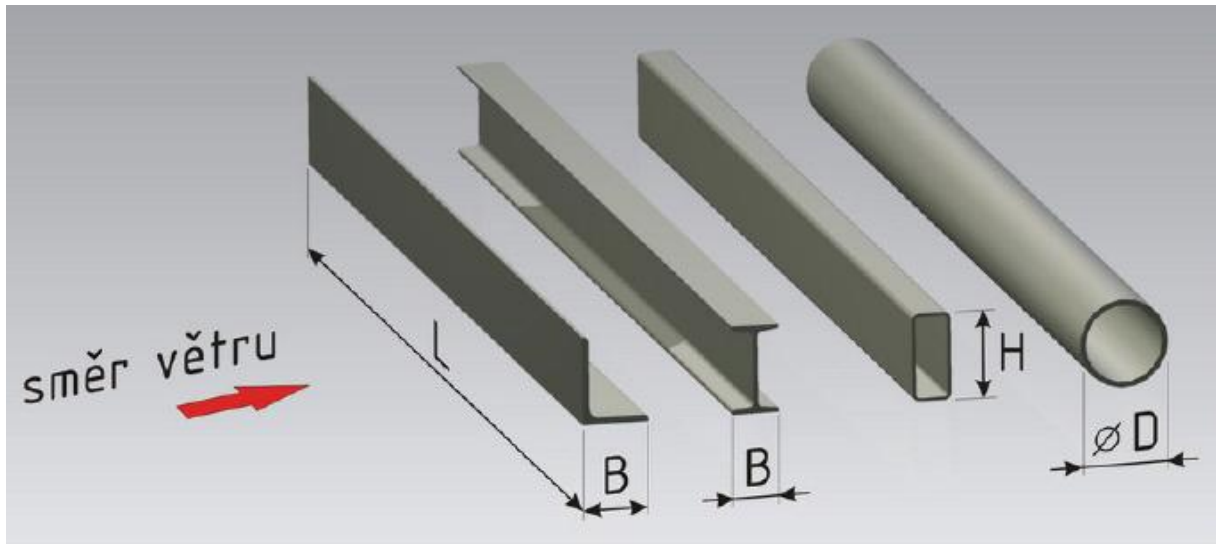
Tvarový součinitel ξ_ω je volen dle normy ČSN 27 0103. Tento součinitel zohledňuje obtékání profilů proudem vzduchu. Například obtékání prvku kruhového průřezu je snadnější než obtékání prvku například „L“ profilu.

Pro zvolení součinitele ξ_ω je nutné vypočítat hodnotu součinitele b_ξ :

$$b_\xi = \frac{L}{H} \quad [2]$$

kde:

- b_ξ [-] - součinitel poměru obtékané výšky a délky profilu
 L [mm] - délka profilu, která je vystavena působení větru
 H [mm] - výška profilu, která je vystavena působení větru



Obr. č.2-2 Směr působení větru na určitý průřez profilu

[1]

Dalším krokem je výpočet plochy kolmé k toku větru:

$$A = \frac{L \cdot H}{10^6}$$

[2]

kde:

A [m²] - plocha vytvořená průmětem profilu do roviny kolmé na tok větru

L [mm] - délka profilu, která je vystavena působení větru

H [mm] - výška profilu, která je vystavena působení větru

Poslední krokem je výpočet velikosti normového tlaku ω_1 na stožár. Tuto hodnotu odečteme z tabulky v již zmíněné normě. K určení ω_1 je nutné znát maximální výšku, ve které bude zátěžná síla působit. Tato výška je dle zadání 24 metrů a k ní příslušná hodnota normového tlaku je $\omega_1 = 1100Pa$.

Po dosazení do vzorce $F_{1\omega}$ zjistíme zátěžnou sílu na jeden prvek stožáru a následným součtem všech těchto sil dostaneme výslednou zatěžující sílu působící na nezastíněné prvky.

2.4 Síla působící na zastíněné prvky stožáru

Síla zátěžného větru na zastíněný prvek je počítána jako násobek síly na nezastíněný prvek a součinitele zastínění φ . Tento součinitel je dále závislý na α , což je součinitel vyplnění předešlého prvku, a dále na poměru v/a , kde „ v “ je výška trojúhelníku a „ a “ je jeho strana.

Výpočet zátěžné síly jednoho zastíněného prvku je realizován dle vzorce:

$$F_{2\omega} = \omega_1 \cdot \xi_\omega \cdot A \cdot \varphi \quad [2]$$

kde:

$F_{2\omega}$	[N]	- normová síla větru na nezastíněný prvek
ω_1	[Pa]	- normový tlak větru na ocelovou konstrukci
ξ_ω	[-]	- tvarový součinitel
A	[m ²]	- plocha vytvořená průmětem profilu do roviny kolmé na tok větru
φ	[-]	- součinitel zastínění

Pro zjištění tabulkové hodnoty součinitele zastínění je nutno vypočítat součinitel vyplnění α a hodnotu v/a

$$\alpha = \frac{\sum A}{A_0} \quad [2]$$

kde:

α	[-]	- součinitel vyplnění
$\sum A$	[m ²]	- součet ploch průmětů všech nezastíněných prvků ve směru působení větru
A_0	[m ²]	- celková plocha stožáru dána jeho obrysem

Z výše uvedených výpočtů, byla odečtena tabulková hodnota součinitele zatížení $\varphi = 0,25$.

Po dosazení do vzorce $F_{2\omega}$ zjistíme zátěžnou sílu na jeden prvek stožáru a následným součtem všech těchto sil dostaneme výslednou zatěžující sílu působící na zastíněné prvky.

2.5 Výsledná síla větru působící na stožár

Výsledná síla, která působí na konstrukci stožáru je určena tak, že sečteme jednotlivé síly působící ve stejném směru na zastíněné i nezastíněné prvky stožáru.

2.6 Výsledné velikosti zatěžujících sil od síly větru

$$F_{\phi 83} = \sum F_{n.p.} + \sum F_{z.p.} = 12256,4 + 4242,5 = 16498,9N$$

$$F_{\phi 89} = \sum F_{n.p.} + \sum F_{z.p.} = 12636,4 + 4169,9 = 16806,3N$$

$$F_{\phi 95} = \sum F_{n.p.} + \sum F_{z.p.} = 13016,6 + 4295,5 = 17312,1N$$

$$F_{\phi 102} = \sum F_{n.p.} + \sum F_{z.p.} = 13460,2 + 4441,5 = 17901,7N$$

$$F_{\phi 114} = \sum F_{n.p.} + \sum F_{z.p.} = 13983,1 + 4641,7 = 18624N$$

kde:

$F_{n.p.}$ [N] - síla větru působící na nezastíněné prvky

$F_{z.p.}$ [N] - síla větru působící na zastíněné prvky

$F_{\phi 83-\phi 114}$ [N] - síla větru působící na celou konstrukci stožáru pro různé průměry nosného potrubí

Protože předpoklad, že nejvíce namáhaným prvky budou nosné trubky, byly vypočteny síly pro čtyři různé průměry potrubí dle normy ČSN 42 5723. Tyto hodnoty budou vstupními veličinami při výpočtu namáhání konstrukce.

3 Výpočet a optimalizace konstrukce

3.1 Metoda konečných prvků

Při návrhu stožáru satelitního vysílače, tvorbu výpočtového modelu a kontrolního výpočtu bylo k jeho řešení využito znalosti Metody konečných prvků.

Mezi moderními metodami napěťově-deformační analýzy dnes jednoznačně dominuje Metoda konečných prvků (dále jen MKP), používaná i v jiných oblastech inženýrských výpočtů (vedení tepla, proudění kapalin, elektřina a magnetismus). V oblasti mechaniky těles MKP umožňuje řešit tyto základní typy úloh:

- Napěťově-deformační analýza při statickém, cyklickém i dynamickém zatěžování, včetně nejrůznějších nelineárních úloh.
- Vlastní i vynucené kmitání soustav s tlumením i bez tlumení
- Kontaktní úloha pružnosti (rozložení stykového tlaku)
- Stabilitní problémy (ztráta tvarové stability konstrukcí)
- Analýza stacionárního i nestacionárního vedení tepla a určení teplotní napjatosti (včetně zbytkové).

MKP je založena na zcela jiném principu než analytické metody pružnosti. Zatímco analytické metody jsou založeny na diferenciálním a integrálním počtu, MKP je založena na obecně méně známém počtu variačním, hledá minimum nějakého **funkcionálu**.

Pozn.:

Funkce – zobrazení mezi množinami čísel. Je to tedy matematický termín pro pravidlo, kterým jednoznačně přiřadíme nějaké číselné hodnotě (z definičního oboru funkce) jinou číselnou hodnotu (z oboru funkčních hodnot).

Funkcionál – zobrazení z množiny funkcí do množiny čísel. Je to tedy pravidlo, podle něhož přiřadíme funkci na jejím definičním oboru (nebo jeho části) nějakou číselnou hodnotu. Příkladem je určitý integrál funkce.

Základním funkcionálem v deformačně-napěťové analýze pružných těles je jejich **energie napjatosti**. Je to práce spotřebovaná na deformaci tělesa, která je v případě pružné deformace vratná, tj. dá se z tělesa při návratu do původního nedeformovaného tvaru zpětně získat (pružiny). V souladu s definicí funkcionálu je to číselná hodnota, přiřazená např. funkcím popisujícím deformační posuvy jednotlivých bodů tělesa (jsou-li posuvy základními neznámými funkcemi, jedná se o nejběžnější, tzv. deformační variantu MKP). Pro libovolný deformovaný tvar tělesa je možné tuto energii napjatosti určit z přetvoření a napětí ve všech bodech tělesa. Při daném zatížení a vazbách k okolí nemůže v praxi těleso zaujmout libovolný tvar, nýbrž jeho deformovaný tvar je jednoznačně definován (s výjimkou některých stabilitních problémů). Z různých možných deformovaných tvarů tělesa je to ten energeticky nejméně náročný, což matematicky vyjadřuje tzv. **věta o minimu kvadratického funkcionálu**. Formuluje obecný přírodní princip, že z možných dějů proběhne ve skutečnosti vždy ten, k jehož uskutečnění je zapotřebí minimální energie (např. ostří nože nebo sekery projde materiálem vždy cestou nejmenšího odporu). Z možných deformovaných tvarů tělesa, odpovídajících definovaným okrajovým podmínkám (zatížení, vazby), se proto realizuje ten, jenž je energeticky nejméně náročný. Příslušným energetickým funkcionálem, jehož minimum určí skutečný deformovaný tvar tělesa, je celková potenciální energie tělesa Π , definovaná jako rozdíl energie napjatosti tělesa W a potenciálu vnějšího zatížení P .

$$\Pi = W - P$$

Celková potenciální energie tělesa je samozřejmě funkcí posuvů jeho jednotlivých bodů. Variační metody matematiky pak umožňují najít minimum funkcionálu, tedy nalézt takový tvar, v němž bude při daných okrajových podmínkách funkcionál Π nejmenší a který se proto ve skutečnosti jako jediný realizuje. Z deformačních posuvů jednotlivých bodů v tomto stavu tělesa je možno určit složky tenzoru přetvoření a z nich pomocí konstitutivních vztahů (při známých materiálových charakteristikách) následně složky tenzoru napětí.

[9]

4 Tvorba výpočtového modelu v programu ANSYS

Tvorba konečnoprvkového modelu byla provedena v klasickém prostředí programu ANSYS.

Prvním krokem při tvorbě modelu bylo zadání klíčových bodů (Key points), které následně vytvořily síť, což bylo základním prvkem celého modelu. Tyto prvky byly spojeny úsečkami (Lines) mezi sebou tak, aby byl vytvořen přesný model celé konstrukce dle návrhu. Jako vhodným prutovým prvkem těchto úseček byl vybrán prvek Beam 188, kterému lze v odkazu Section přiřadit průřez dle zvolených velikostí. Dalším krokem ve zhotovení modelu byla tvorba sítě (Mesh). Při tvorbě sítě se dle potřeby prvkům přidělí materiál a typ prvku. Na modelu byly vytvořeny dva druhy sítě. První typ sítě byl vytvořen pro nosné prvky, tato varianta měla větší dělení prvků, které bylo zvoleno tak, že každý prvek modelu se rozdělil na 20 elementární dílků. V druhém typu sítě, pro vzpěry, bylo použito dělení prvků menší a to deset elementárních dílků na jeden prvek, z důvodu ulehčení výpočtového procesu, protože vzpěrné prvky konstrukce, jsou namáhány méně než nosné. Po vytvoření konečnoprvkového modelu byly zadány okrajové podmínky, v položce Loads, kterými bylo zatížení od síly větru na vrcholu modelu a úplné vetknutí na spodní části nosných prvků.

Po vytvoření úplného modelu stožáru následuje výpočet (Solution) a zhodnocení výsledků (Postprocessing).

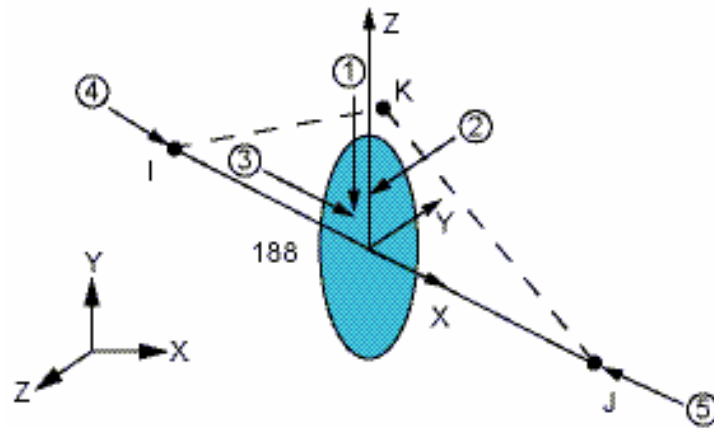
4.1 Použité prvky při tvorbě modelu

4.1.1 Prvek Beam 188

Jedná se o 3-D lineární kvadratický prvek, který je vhodný pro tvorbu příhradových konstrukcí a je schopen zahrnout ohybové namáhání.

Prvek má dva uzly, na začátku a na konci. Beam 188 může mít šest, nebo sedm stupňů volnosti pro každý uzel. Při hodnotě Keypoint(1) = 0 má prvek šest stupňů volnosti, kterými jsou posuvy ve všech směrech, tj. v osách x , y , z a rotace okolo těchto os. Pokud je hodnota Keypoint(1) = 1 můžeme sedmým stupněm volnosti uvažovat veličinu zkroucení prutu. Pro prvek Beam 188 lze přiřadit průřez, který lze dále definovat.

Figure 188.1 BEAM188 Geometry



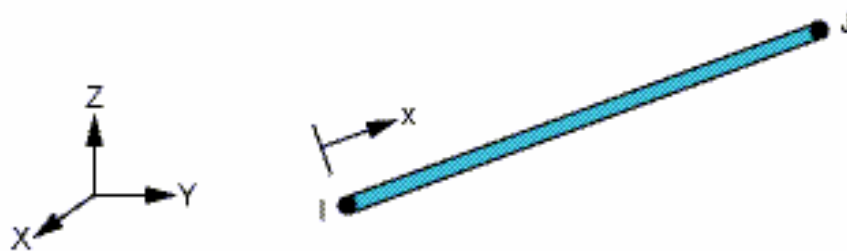
Obr. 4-1 prvek Beam 188

[5]

4.1.2 Prvek Link 10

Jedná se o lineární 3-D prutový prvek s unikátní vlastností bilineární matice tuhosti, která dovoluje prvek zatížit pouze ve směru jeho osy. Link10 má tudíž dva stupně volnosti a to posuvy ve směru os x a y . Prvek nezahrnuje ohybové namáhání, což bylo při jeho výběru hlavním parametrem. Tento prvek byl v modelu použit pouze pro umístění bodu, který představuje působíště vektoru silového namáhání.

Figure 10.1 LINK10 Geometry



Obr. 4-2 prvek Link 10

[5]

4.2 Okrajové podmínky

4.2.1 Vazby pro ukotvení stožáru

Konstrukce stožáru pro satelitní vysílač bude ukotvena v zemi pomocí betonových patek, do kterých budou zabetonovány tři hlavní nosné prvky konstrukce, jejichž délka bude delší, než výška stožáru uvedená v zadání, právě o velikost zabetonované části.

Z tohoto důvodu je při tvorbě modelu uvažováno úplné vetknutí, které zamezuje posuvům ve všech směrech (ux , uy , uz) a také všem rotacím okolo os ($rotx$, $roty$, $rotz$).

4.3 Zatěžující síla

Hlavním zátěžným prvkem, působícím na konstrukci stožáru je síla větru. Při výpočtu uvedené síly postupujeme dle části normy ČSN 27 0103 „Navrhování ocelových konstrukcí“, dle které je realizováno zatížení modelu. Podrobný popis výpočtu je uveden v bodu 2 (*Výpočtový postup*). Dále musíme ještě uvažovat zatížení stožáru vlastní vahou, která je také důležitým zatěžujícím prvkem. K zahrnutí vlastní tíhy použijeme formulaci 2. Newtonova zákona pro tíhové pole Země:

$$F = m \cdot g$$

[2]

kde:

F	[N]	- zatěžující síly
m	[kg]	- hmotnost celé konstrukce
g	[m/s ²]	- tíhové zrychlení Země

4.3.1 Výsledná zatěžující síla

S uvažováním vlastní tíhy konstrukce se celková síla zvýší na hodnotu:

$$F_{\phi 83} = 22193N$$

$$F_{\phi 102} = 24490N$$

$$F_{\phi 89} = 22855N$$

$$F_{\phi 114} = 25163N$$

$$F_{\phi 95} = 23608N$$

Pozn.: Hodnoty těchto sil budou vstupními parametry při zatížení výpočtového modelu

4.4 Použitý materiál

Pro nosné i vzpěrné prvky v modelu byl použit shodný materiál označený v modelu jako *mat1*. Tento materiál byl přiřazen jednotlivým prvkům při tvorbě sítě modelu.

4.4.1 Charakteristické vlastnosti použitého materiálu:

E [MPa] $2,1 \cdot 10^5$ - Youngův modul pružnosti

μ [-] 0,3 - Poissonovo číslo

ρ [kg/m³] 7800 - hustota materiálu

5 Výsledky výpočtů z programu ANSYS

Pro statický výpočet redukovaného napětí σ_{RED} byla v programu ANSYS použita podmínka HMH. Označení podmínky HMH je v již zmíněném programu von Mises stress. Pro názorné vyobrazení bylo v programu užito zobrazení uzlového výpočtu σ_{RED} (Nodal solution).

5.1 Výsledky a analýza statického výpočtu

5.1.1 Určení nebezpečného místa

Z výsledků je patrné, že největší napětí je dle předpokladu na hlavním nosném prvku v místě ukotvení v betonové patce a nejvíce zatíženým prvek je vždy ten, který není přímo namáhaný větrem, tj. zadní nosný prvek.

5.1.2 Výpočet koeficientu bezpečnosti

Volba materiálu konstrukčních prvků stožáru byla určena dle normy ČSN 73 1401 „Navrhování ocelových konstrukcí“, která doporučuje materiál 11523, jehož mez kluzu je $R_m = 441 - 677 \text{ MPa}$. Hodnota meze kluzu pro výpočet je $R_m = 550 \text{ MPa}$, což je střední hodnota uvedeného rozsahu.

$$k_k = \frac{R_m}{\sigma_{RED}}$$

kde:

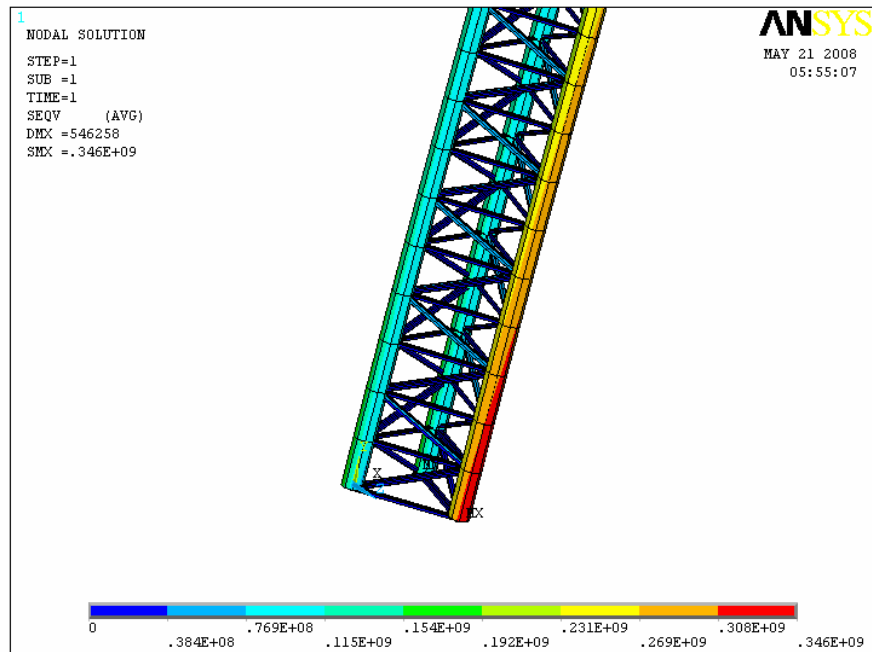
k_k [-] - prostá bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti

R_m [MPa] - mez pevnosti v kluzu

σ_{RED} [MPa] - maximální redukované napětí

5.2 Rozložení napětí na konstrukci a hodnota bezpečnosti pro:

Tr. $\varnothing 83 \times 3$



Obr. 5-1 Detail rozložení redukovaného napětí na konstrukci stožáru

Pozn.: hodnoty σ_{RED} v obrázku jsou Pascalech [Pa].

Hodnota maximálního redukovaného napětí je $\sigma_{RED} = 346MPa$.

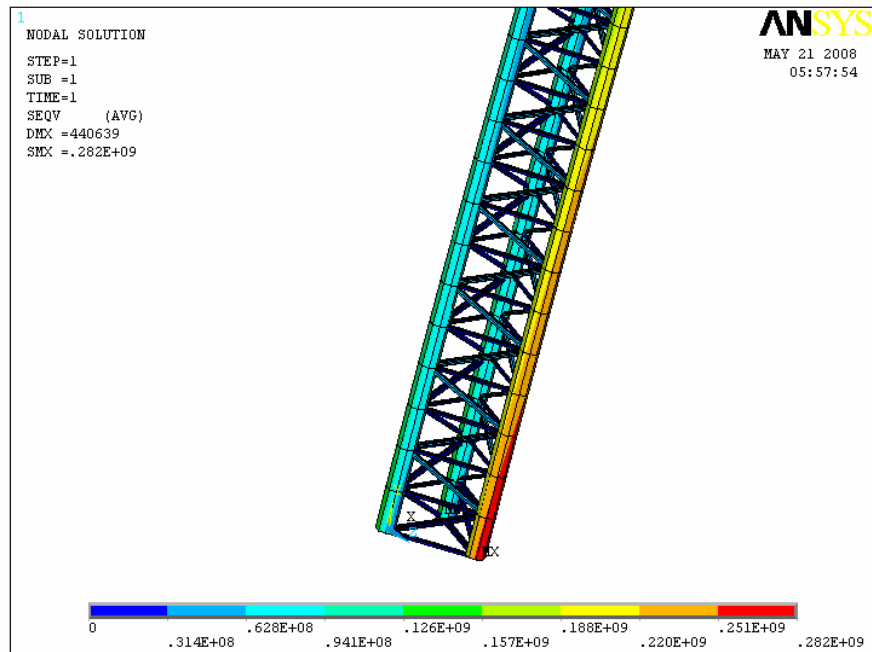
Výsledná bezpečnost:

$$k_{k1} = \frac{R_m}{\sigma_{RED1}} = \frac{550}{346} = 1,58$$

Nedojde k meznímu stavu pružnosti.

5.3 Rozložení napětí na konstrukci a hodnota bezpečnosti pro:

Tr. $\varnothing 89 \times 4$



Obr. 5-2 Detail rozložení redukovaného napětí na konstrukci stožáru

Pozn.: hodnoty σ_{RED} v obrázku jsou Pascalech [Pa].

Hodnota maximálního redukovaného napětí je $\sigma_{RED} = 282 \text{ MPa}$.

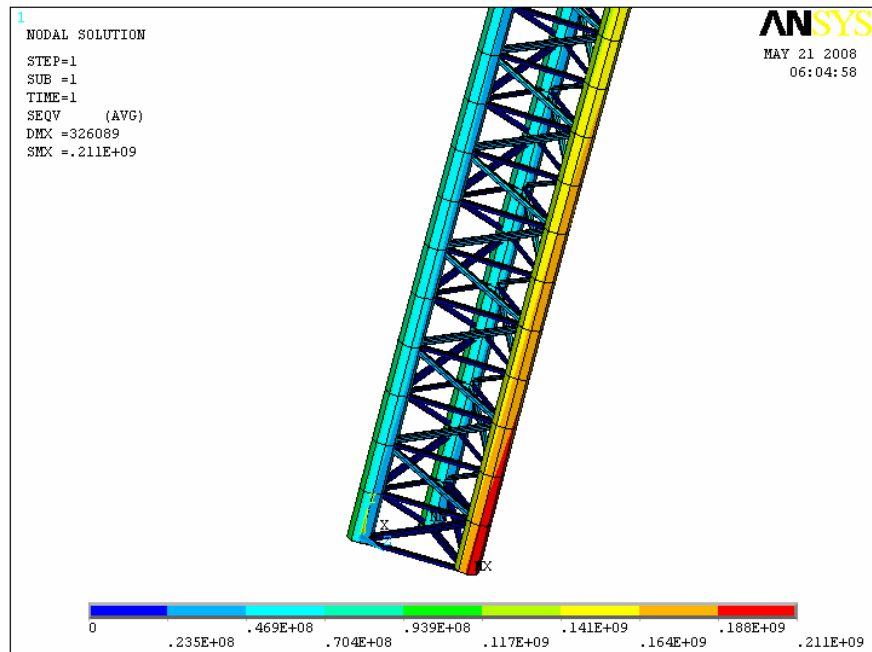
Výsledná bezpečnost:

$$k_{k2} = \frac{R_m}{\sigma_{RED2}} = \frac{550}{282} = 1,95$$

Nedojde k meznímu stavu pružnosti.

5.4 Rozložení napětí na konstrukci a hodnota bezpečnosti pro:

Tr. $\varnothing 95 \times 4$



Obr. 5-3 Detail rozložení redukovaného napětí na konstrukci stožáru

Pozn.: hodnoty σ_{RED} v obrázku jsou Pascalech [Pa].

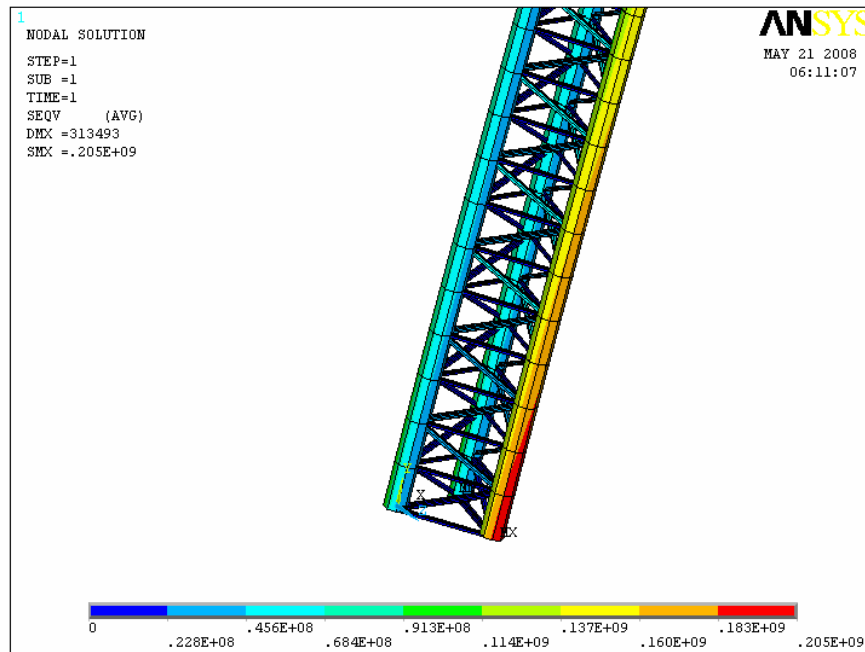
Hodnota maximálního redukovaného napětí je $\sigma_{RED} = 211MPa$.

Výsledná bezpečnost:

$$k_{k3} = \frac{R_m}{\sigma_{RED3}} = \frac{550}{211} = 2,60$$

Nedojde k meznímu stavu pružnosti.

5.5 Rozložení napětí na konstrukci a hodnota bezpečnosti pro: Tr. Ø102 x 5



Obr. 5-4 Detail rozložení redukovaného napětí na konstrukci stožáru

Pozn.: hodnoty σ_{RED} v obrázku jsou Pascalech [Pa].

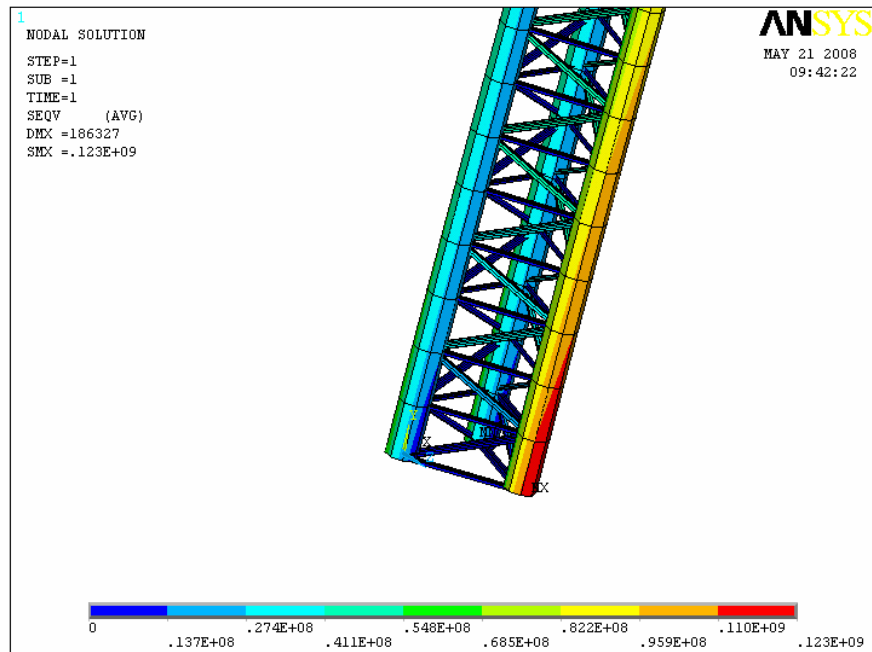
Hodnota maximálního redukovaného napětí je $\sigma_{RED} = 205MPa$.

Výsledná bezpečnost:

$$k_{k4} = \frac{R_m}{\sigma_{RED4}} = \frac{550}{205} = 2,68$$

Nedojde k meznímu stavu pružnosti.

5.6 Rozložení napětí na konstrukci a hodnota bezpečnosti pro: Tr. Ø114 x 6,5



Obr. 5-5 Detail rozložení redukovaného napětí na konstrukci stožáru

Pozn.: hodnoty σ_{RED} v obrázku jsou Pascalech [Pa].

Hodnota maximálního redukovaného napětí je $\sigma_{RED} = 110\text{MPa}$.

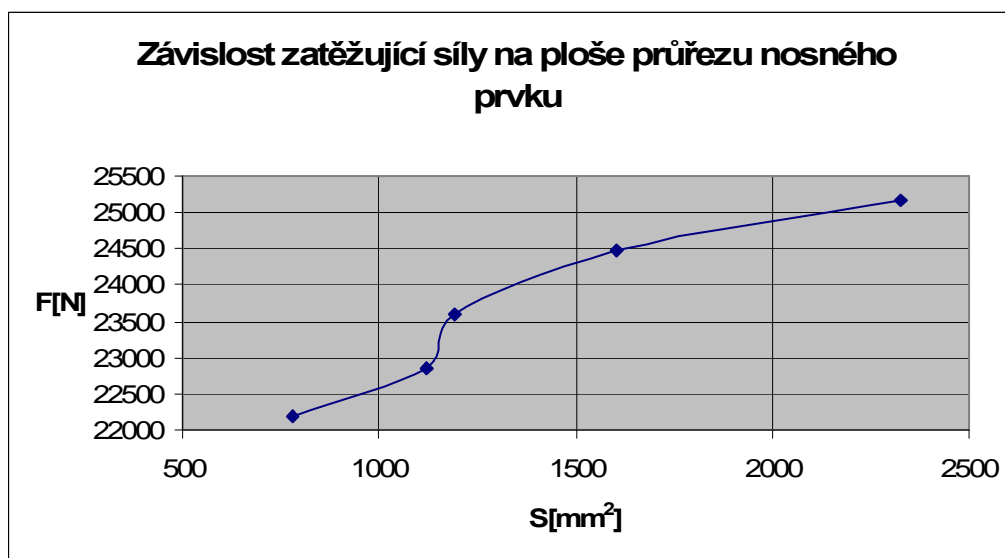
Výsledná bezpečnost:

$$k_{k5} = \frac{R_m}{\sigma_{RED5}} = \frac{550}{110} = 5,0$$

Nedojde k meznímu stavu pružnosti.

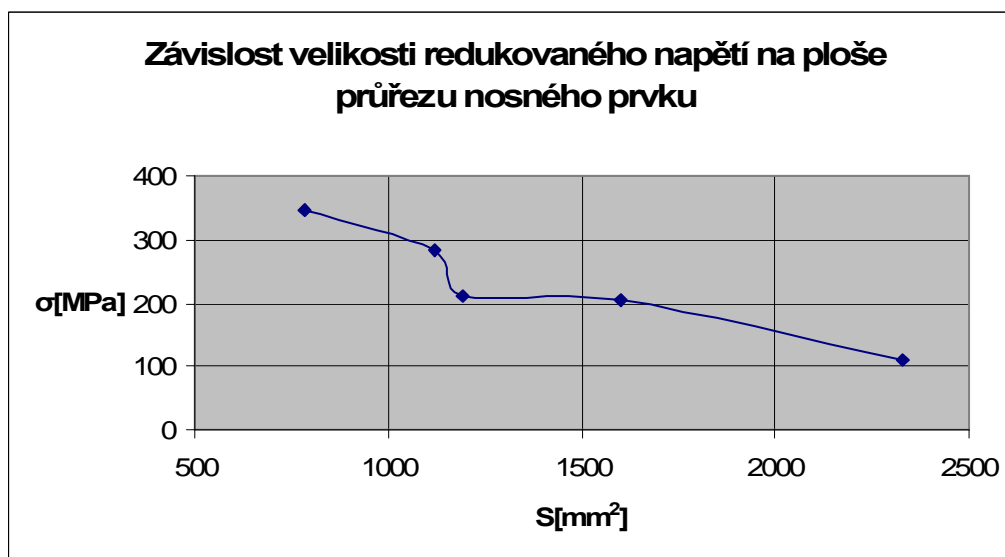
5.7 Zhodnocení výsledků

Dle uvedené závislosti (Graf 5-1) je patrné, že s rostoucí velikostí hlavního nosného prvku roste i zátěžná síla na konstrukci, která je závislá na hmotnosti stožáru a tudíž i na velikosti prvku stojny.



Graf 5-1 Závislost zatěžující síly na průřezu nosného prvku

Druhá závislost zobrazuje, že s rostoucí velikostí nosného prvku klesá napětí na konstrukci a zároveň se tedy zvyšuje celková bezpečnost stožáru.



Graf 5-2 Závislost redukovaného napětí na průřezu nosného prvku

Nejvyšší bezpečnosti bylo dosaženo u konstrukce navržené pro stojnu zhotovenou z trubky $\emptyset 114 \times 6,5$. Bezpečnost byla definována hodnotou 5. Tato hodnota je dostačující i přesto, že pro ocelové konstrukce podobného typu je doporučená bezpečnost 6 – 10 s uvážením, zda-li je stožár umístěn v zastavěné, či nezastavěné oblasti. Důvodem, proč můžeme hodnotu brát jako dostačující je fakt, že při výpočtu síly, byla použita hodnota normového tlaku větru ($\omega_1 = 1100 Pa$) pro pásmo 20 -100 metrů nad zemí, což je hodnota pro uvedený stožár o výšce 24 metů značně předimenzovaná.

Závěr

Cílem bakalářské práce byl návrh konstrukce stožáru pro satelitní vysílač. Vstupními parametry zadání byly celková výška věže, konstantní příčný průřez po celé délce stožáru a vzdálenost mezi jednotlivými hlavními nosnými prvky.

Návrh stožáru byl řešen jako svařovaná příhradová konstrukce. Prvky, z kterých je stožár navržen, jsou zvoleny z běžné konstrukční oceli 11 523, která je doporučována normou (ČSN 73 1401). Jako hlavní nosný prvek byly zvoleny podélné svařované trubky hladké (ČSN 42 5723), které jsou propojeny výztuhami z L profilu válcovaného za tepla (ČSN 42 5541). Při návrhu konstrukce byl brán také zřetel na celkovou výrobní cenu a na snížení odporových ploch při působení větru.

Pro výpočtový postup bylo použito několika pasáží z normy (ČSN 27 0103 „Navrhování ocelových konstrukcí“), které zahrnují výpočet ocelových konstrukcí namáhaných působením okolního větru. Výpočet byl koncipován tak, že se v úvahu vzal případ největšího působení větru na danou konstrukci, tj. působení zátěžné síly na stěnu stožáru ve směru výšky trojúhelníka příčného průřezu. Dle uvedené normy byla spočítána zátěžná síla větru, která však není jedinou působící silou na konstrukci. Dalším nezanedbatelným silovým působením je tíha vlastního stožáru. Výsledná celková síla byla použita jako vstupní parametr u výpočtového modelu v programu ANSYS.

Výsledná bezpečnost stožáru byla určena pomocí Metody konečných prvků v programu ANSYS, kde byl proveden výpočet redukovaného napětí v nebezpečném místě konstrukce. Bezpečnost stožáru byla vypočítána jako poměr materiálové charakteristiky meze pevnosti a zmíněného redukovaného napětí.

Seznam literatury

- [1] ZIMMERMAN, MARTIN . *Návrh mobilní věže pro Savoniův větrný generátor o malém výkonu*, Diplomová práce, VUT Brno, 2006
- [2] ČSN 27 0103 „*Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů*“, Praha: Vydavatelství norem, 1990.
- [3] ONDRÁČEK, VRBKA, JANÍČEK, BURŠA. *Mechanika těles – Pružnost a pevnost II*, VUT Brno, 2006
- [4] VÁVRA, ŘASA, LEINVEBER. *Strojnické tabulky*, Scientia, Praha, 1999

Elektronické zdroje informací

- [5] SAS IP, Inc. *Návod k programu Ansys 11.0*.
- [6] MOLEMBUS. Anténní stožáry [online].
<<http://www.kolembus.cz/antenni-stozary>>
- [7] Feron. [online].
<<http://62.168.62.45/cze/katalog/search.php?kat=1>>
- [8] WIKIPEDIA. *Metoda konečných prvků* [online].
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF>
- [9] BURŠA, JIŘÍ. *MKP* [online]. [cit. 2008-20-04].
<http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/>
- [10] NÁVRAT, PETRUŠKA, IVÁN. *Řešené úlohy metodou konečných prvků* [online].
<<https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=30504>>

Seznam použitých zkratk symbolů a veličin

A	[m ²]	- plocha vytvořená průmětem profilu do roviny kolmé na tok větru
A ₀	[m ²]	- celková plocha věže daná jejím obrysem
ΣA	[m ²]	- součet ploch všech nezastíněných prvků v daném směru
E	[Pa]	- Yongův modul pružnosti
F	[N]	- vektor síly působící na věž v daném směru
F _{1 ω}	[N]	- normová síla větru na nezastíněný prvek
F _{2 ω}	[N]	- normová síla větru na zastíněný prvek
F _{φ83}	[N]	- zátěžná síla na konstrukci stožáru pro trubku Ø 83 mm
F _{φ89}	[N]	- zátěžná síla na konstrukci stožáru pro trubku Ø 89 mm
F _{φ95}	[N]	- zátěžná síla na konstrukci stožáru pro trubku Ø 95 mm
F _{φ102}	[N]	- zátěžná síla na konstrukci stožáru pro trubku Ø 102 mm
F _{φ114}	[N]	- zátěžná síla na konstrukci stožáru pro trubku Ø 114 mm
H	[mm]	- výška profilu vystavená působení větru
L	[mm]	- délka profilu vystavená působení větru
P	[J]	- potenciál vnějšího zatížení
R _m	[MPa]	- mez pevnosti v kluzu
W	[J]	- energie napjatosti tělesa
a	[mm]	- strana trojúhelníka příčného průřezu
b _ξ	[-]	- součinitel poměru obtékané výšky a délky profilu
g	[m/s ²]	- tíhové zrychlení Země
k _{k1}	[-]	- prostá bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti pro trubku Ø 83 x 3 mm
k _{k2}	[-]	- prostá bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti pro trubku Ø 89 x 4 mm
k _{k3}	[-]	- prostá bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti pro trubku Ø 93 x 4 mm
k _{k4}	[-]	- prostá bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti pro trubku Ø 102 x 5 mm
k _{k5}	[-]	- prostá bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti pro trubku Ø 114 x 6,5 mm
m	[kg]	- hmotnost konstrukce
u _x	[mm]	- posuv v ose x
u _y	[mm]	- posuv v ose y

Seznam použitých zkratk symbolů a veličin

uz	[mm]	- posuv v ose z
$rotx$	[rad]	- rotace okolo osy x
$roty$	[rad]	- rotace okolo osy y
$rotz$	[rad]	- rotace okolo osy z
v	[mm]	- výška trojúhelníka příčného průřezu
α	[-]	- součinitel vyplnění
μ	[-]	- Poissonovo číslo
$\xi\omega$	[-]	- tvarový součinitel
Π	[J]	- celková potenciální energie
ρ	[kg/m ³]	- hustota
σ_{RED}	[Pa]	- redukovaného napětí dle podmínky HMMH
σ_{RED1}	[Pa]	- redukovaného napětí dle podmínky HMMH
σ_{RED2}	[Pa]	- redukovaného napětí dle podmínky HMMH
σ_{RED3}	[Pa]	- redukovaného napětí dle podmínky HMMH
σ_{RED4}	[Pa]	- redukovaného napětí dle podmínky HMMH
σ_{RED5}	[Pa]	- redukovaného napětí dle podmínky HMMH
φ	[-]	- součinitel zastínění
ω_1	[Pa]	- normový tlak větru na ocelovou konstrukci

Seznam obrázků a grafů

Obr. 1-1 Obecný návrh konstrukce stožáru [6].....	str.9
Obr. 2-1 Směr zatěžující síly na konstrukci stožáru	str.11
Obr. 2-2 Směry působení větru na určitý průřez profilu [1].....	str.13
Obr. 4-1 Prvek Baem 188	str.19
Obr. 4-2 Prvek Link 10.....	str.19
Obr. 5-1 Detail rozložení redukovaného napětí na konstrukci stožáru	str.23
Obr. 5-2 Detail rozložení redukovaného napětí na konstrukci stožáru	str.24
Obr. 5-3 Detail rozložení redukovaného napětí na konstrukci stožáru.....	str.25
Obr. 5-4 Detail rozložení redukovaného napětí na konstrukci stožáru.....	str.26
Obr. 5-5 Detail rozložení redukovaného napětí na konstrukci stožáru	str.27
Graf 5-1 Závislost zatěžující síly na průřezu nosného prvku	str.28
Graf 5-2 Závislost redukovaného napětí na průřezu nosného prvku	str.28