
ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem nosné konstrukce pro fotovoltaické sluneční panely o celkové ploše 200m². Nosná konstrukce je navrhována jako součást sluneční elektrárny. V úvodní části práce pojednává o fotovoltaických elektrárnách, jejich typech, výhodách a nevýhodách. Druhá část se zabývá samotným konstrukčním návrhem nosné konstrukce. Součástí je i upevnění fotovoltaických panelů a uložení nosné konstrukce včetně návrhu jejího ovládání. Ve třetí části jsou řešeny pevnostní výpočty pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS 11.0. Závěrečná část je věnována zhodnocení a ekonomickému rozboru konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Sluneční energie, solární elektrárny, nosná konstrukce, metoda konečných prvků.

SUMMARY

The purpose of this dissertation is to discuss the engineering design of the supporting structure for solar photovoltaic panels with a total area of 200 metres square. The supporting structure is intended for implementation as part of a solar power station.

The preamble of the dissertation examines photovoltaic power stations, their types, advantages and disadvantages. The focus of the second part is directed toward the project of constructing the supporting structure and it also deals with the tasks of attaching the photovoltaic panels and putting the panel's supporting structure in place. This section will also propose methods of continuously monitoring both the panel and its support-structure once they have been constructed and brought into operation. The purpose of part three is to perform the calculations concerning the entire structure's required load-bearing properties through the use of the Final Element Method in the program "ANSYS 11.0". The conclusion of this dissertation is devoted to the evaluation and economic analysis of the construction.

KEYWORDS

Solar energy, solar power station, carrier construction, Final Element Method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KULHÁNEK, Martin. *Návrh nosné konstrukce pro fotovoltaické sluneční články*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Venclík, Dr.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Čestně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, za použití uvedené literatury a pod odborným vedením Ing. Jiřího Venclíka, Dr.

V Brně, dne 15.5.2008

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří se podíleli na vzniku této diplomové práce. Zvláště bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Venclíkovi, Dr. a Ing. Vladimíru Fuisovi, Ph.D. za jejich odborné rady a pomoc při řešení technických problémů.

OBSAH

Obsah	11
Úvod	13
1 Přehled současného stavu poznání.....	14
1.1 Fotovoltaické články	14
1.2 Fotovoltaické panely	15
1.3 Fotovoltaické elektrárny	16
1.3.1 Elektrárny bez možnosti natáčení za sluncem.....	16
1.3.2 Střešní a fasádní systémy.....	17
1.3.3 Elektrárny na volných plochách (solární parky).....	18
1.3.4 Elektrárny s možností natáčení kolem jedné osy	18
1.3.5 Elektrárny s možností natáčení kolem dvou os	19
2 Formulace řešeného problému a jeho technická a vývojová analýza.....	21
3 Vymezení cílů práce	22
4 Návrh metodického přístupu k řešení	23
4.1 Získání dostatečných informací.....	23
4.2 Výběr vhodné varianty konstrukce.....	23
4.3 Výběr materiálu	23
4.4 Návrh samotné konstrukce	23
4.5 Volba použitého softwaru	23
4.6 Účinky působící na konstrukci	24
4.7 Pevnostní výpočet nosné konstrukce.....	24
4.8 Povrchová úprava	24
5 Návrh variant řešení a výběr optimální varianty.....	25
5.1 Konstrukce z ocelových trubek	25
5.2 Konstrukce ze speciálních profilů	25
5.3 Příhradová ocelová konstrukce	26
6 Konstrukční řešení	27
6.1 Popis navrhované nosné konstrukce	27
6.1.1 Modul č. 1.....	28
6.1.2 Modul č. 2.....	28
6.1.3 Modul č. 3.....	29
6.1.4 Modul č. 4.....	29
6.2 Fotovoltaické panely KC200GHT-2.....	30
6.3 Upevnění fotovoltaických panelů	31
6.3.1 KlickTop systém	31
6.3.2 Přichytky.....	32
6.4 Uložení nosné konstrukce.....	32
6.4.1 Volba ložiska.....	33
6.4.2 Statická únosnost.....	34
6.4.3 Ložisková tělesa SNL 532	34
6.5 Přímočaré hydromotory	34
6.6 Reakční síly na ložiskách a přímočarých hydromotorech	36
6.7 Zatížení nosné konstrukce větrem.....	38
6.7.1 Výpočet sil působících od větru.....	38
6.8 Pevnostní výpočet konstrukce.....	43
6.8.1 Metoda konečných prvků	43
6.8.2 Prvky použité při tvorbě modelu	44

6.8.3	Tvorba výpočtového modelu	44
6.8.4	Postup při tvorbě modelu	45
6.8.5	Analýza výsledků výpočtového modelu.....	48
6.9	Šroubové spojení modulů nosné konstrukce.....	51
6.10	Povrchová úprava.....	51
6.10.1	Nátěrové hmoty	52
6.10.2	Galvanické zinkování.....	52
6.10.3	Žárové zinkování.....	52
6.11	Ideový návrh celkového uspořádání elektrárny	53
6.12	Porovnání výkonu jednotlivých typů elektráren	54
7	Konstrukční, technologický a ekonomický rozbor řešení.....	55
	Seznam použitých zdrojů	58
	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin.....	60
	Seznam obrázků a grafů.....	62
	Seznam tabulek	63
	Seznam příloh.....	64

ÚVOD

Nepochybně nejvýznamnější a dnes již nepostradatelnou formou energie je pro člověka elektrina. Většinu elektrické energie, kterou naše civilizace spotřebuje pro svůj život, je však vyrobena z tzv. fosilních paliv. Tyto paliva byly vytvářeny přírodou miliony let a člověk je v dnešní době spotřebovává nepřiměřenou rychlostí přispívající tak k nežádoucí změně našeho životního prostředí a tím i k oteplování planety. Problémem je vysoká produkce skleníkových plynů vznikající právě při spalování fosilních paliv. Dnes je již dokázáno, že např. koncentrace CO_2 (oxidu uhličitého) v atmosféře je za posledních 500 let nejvyšší a neustále roste. Tyto fakta tak stavějí svět před nelehký avšak nevyhnutelný úkol. Je třeba omezit výrobu elektrické energie z fosilních paliv a upřednostnit výrobu z obnovitelných zdrojů.

Úsilí o přechod k obnovitelným zdrojům se tak intenzivně začíná stávat jedním z hlavních bodů národních i mezinárodních politických programů všech zemí. Především Evropská Komise stanovila pevné body podporující cíle Kyotského protokolu (Konference stran Rámcové úmluvy OSN o klimatické změně o snížení skleníkových plynů). Každý člen EU, včetně České republiky, je zavázán ke snížení emisí skleníkových plynů. Do roku 2010 tak musí být dosaženo 12% podílu energie vyrobené z alternativních zdrojů.

Mezi obnovitelné zdroje patří např. voda, vítr nebo sluneční energie. V České republice se investoři začali intenzivně věnovat především sluneční energii, která je Státním fondem životního prostředí poměrně vysoce dotována (dotace 30% na instalaci solárních systémů). Sluneční energie se tak postupem času začíná stávat lukrativním odvětvím.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Výroba elektrická energie ze slunečního záření pomocí fotovoltaických článků byla historicky jako první použita roku 1958 v oblasti kosmického výzkumu. Z důvodu drahých materiálů byla jejich výroba velmi nákladná, avšak v tomto případě cena nehrála roli, protože toto byla v podstatě jediná praktická cesta, jak zajistit napájení elektrickou energií. V sedmdesátých letech se však výroba zlevnila a články začaly být dostupné také pro širokou veřejnost.



Obr. 1-1 Mezinárodní kosmická stanice Imagery [1]

1.1 Fotovoltaické články

Fotovoltaický článek je velkoplošná polovodičová součástka schopná přeměňovat světlo na elektrickou energii [2]. K přeměně světla na energii využívá tzv. fotovoltaického jevu. Článek se skládá z tenkého plátku křemíku, ve kterém je v malé hloubce pod povrchem vytvořen p-n přechod, který je z obou stran opatřen vhodnými kovovými kontakty. Když na něj dopadá sluneční záření, generují se volné elektrony a díry. Elektrické pole p-n přechodu je oddělí a pošle na opačné strany; elektrony do vrstvy typu n, která se tak stane záporným pólem fotovoltaického článku, a díry do vrstvy typu p, která tvoří kladný pól [3]. Aby bylo možné získat využitelné napětí, je nutné zapojovat řady článků do série, či paralelně. Tím vznikají tzv. panely skládající se obvykle z 36 nebo 72 články, které jsou schopny dodávat napětí o velikosti 18 nebo 36 V. Napětí jednoho článku závisí na použitém polovodiči; udává se, že při maximálním výkonu křemíkového článku se dosahuje napětí 0,5 V.

Od roku 1958 bylo vyvinuto několik generací fotovoltaických článků. Pro lepší přehlednost se rozlišují 4 generace:

- První generace
 - z destiček monokrystalického křemíku s velkoplošným p-n přechodem.
- Tento článek je pro svou dobrou účinnost a dlouhodobou stabilitu výkonu nejpoužívanější.

- Druhá generace
 - z polykrytalického, mikrokrytalického nebo amorfního křemíku. Hlavní nevýhodou je znatelně nižší účinnost a menší stabilita (klesá s časem).
- Třetí generace
 - k separaci nábojů využity jiné metody, než p-n přechod. Často jiné materiály než polovodiče. Např. fotogalvanické nebo polymerní články. Uplatnění nanostruktur ve formě nanotrubiček a nanotyčinek. Z důvodu malé účinnosti, stability a životnosti se téměř nepoužívají.
- Čtvrtá generace
 - z kompozitů schopných využívat širokou část slunečního záření. Jednotlivé vrstvy využívají světlo určitých vlnových délek. Nevyužité záření pohltí jiné následující vrstvy.



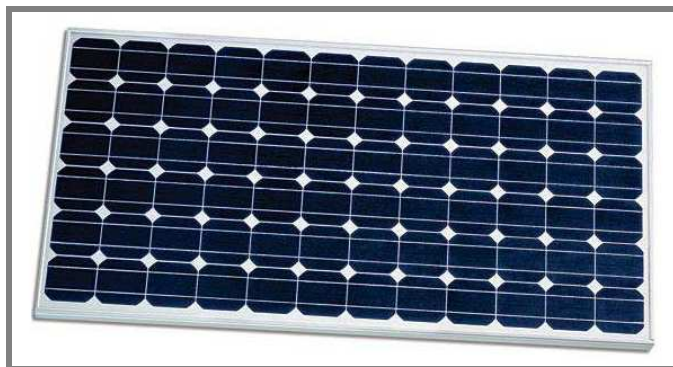
Obr. 1-2 Fotovoltaické články [4]

1.2 Fotovoltaické panely

1.2

Jak již bylo zmíněno, zapojením několika řad článků do série, či paralelně vzniká tzv. fotovoltaický panel. Konstrukce panelu mohou být velmi rozmanité, záleží na využití v praxi. Nejčastěji bývají panely, z důvodu zpevnění konstrukce a lepší instalace, opatřeny duralovými rámy. Povrch článků se zakrývá speciálním kaleným sklem, odolávající silnému krupobití. Panel musí zajistit hermetické zapouzdření solárních článků, musí zajišťovat dostatečnou mechanickou a klimatickou odolnost (např. vůči silnému větru, krupobití, mrazu apod.) [4].

Zcela odlišná je výroba panelů z tenkovrstvých článků. Výroba se liší především její odlišnou technologií. Struktura je deponována plazmaticky v jednotlivých krocích na skleněný velkoplošný substrát.



Obr. 1-3 Fotovoltaický panel [5]

1.3 Fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaické elektrárny neboli systémy jsou elektrotechnické zařízení schopné vyrábět elektrickou energii ze slunečního záření. V podstatě je to jeden, nebo více panelů připojených pomocí kabeláže k měniči napětí (střídači), sledovači slunce a elektroměru. V dnešní době, kdy se obnovitelné zdroje energie stávají běžnou součástí člověka, se můžeme setkat s poměrně rozsáhlým množstvím fotovoltaických elektráren. Zásadní výhodou těchto elektráren jsou především:

- Levná energie
- Jednoduchá instalace
- Nulová nutnost dodatečného zdroje energie
- Nulové emise skleníkových plynů do ovzduší
- Nulová produkce radioaktivního odpadu
- Nulové hlukové emise
- Relativně nízké náklady na údržbu a provoz
- Větší dostupnost materiálů na výrobu panelů
- Dlouhodobá životnost
- Příznivý poměr ceny a kvality

Největším průkopníkem v Evropě v této tolik atraktivní oblasti je Německo. V celosvětovém měřítku pak především USA a Japonsko.

Díky vysoké poptávce po fotovoltaických elektrárnách se značně zvýšil vývoj a výroba instalačního materiálu, elektroniky a nosných konstrukcí pro fotovoltaické panely.

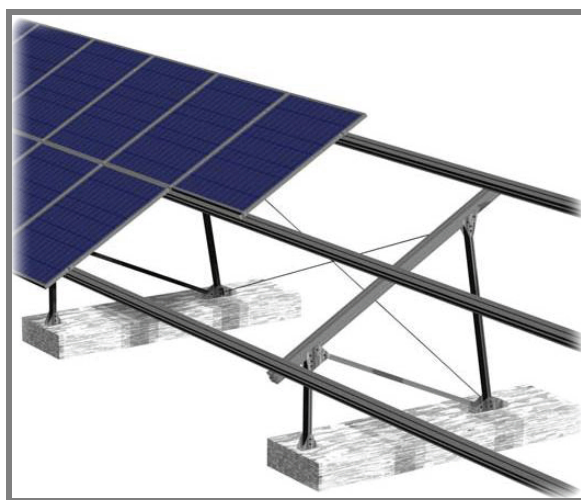
Pro maximální výkon elektráren je důležité, aby sluneční paprsky dopadaly co nejvíce kolmo na plochu panelů. Tohoto lze dosáhnout natáčením panelů za sluncem. Elektrárny tak můžeme dělit dle možnosti natáčení fotovoltaických panelů.

1.3.1 Elektrárny bez možnosti natáčení za sluncem

Typem fotovoltaických elektráren, které jsou v dnešní době nejčastěji instalovány, jsou elektrárny bez možnosti natáčení panelů za sluncem. Toto řešení však zabraňuje získání maximálního výkonu z fotovoltaických desek. Nepracují s maximální účinností. Z tohoto důvodu jsou tyto elektrárny stavěny tak, aby jejich konstrukce

byly nasměrovány co nejvýhodnějším směrem a měli možnost zachytit nejvyšší možné množství slunečních paprsků. Nejideálnějším řešením je nasměrování elektrárny na jižní stranu s desetistupňovým vychýlením na západ a sklonem desek 38° vůči vodorovné rovině.

Instalace tohoto typu elektráren je velmi jednoduchá a z finančního hlediska ve srovnání s jinými poměrně nenáročná. Cena je snížena o mechanismy obstarávající natáčení za sluncem a zařízení sledující jeho polohu.



Obr. 1-4 Elektrárna bez možnosti natáčení za sluncem [8]

1.3.2 Střešní a fasádní systémy

1.3.2

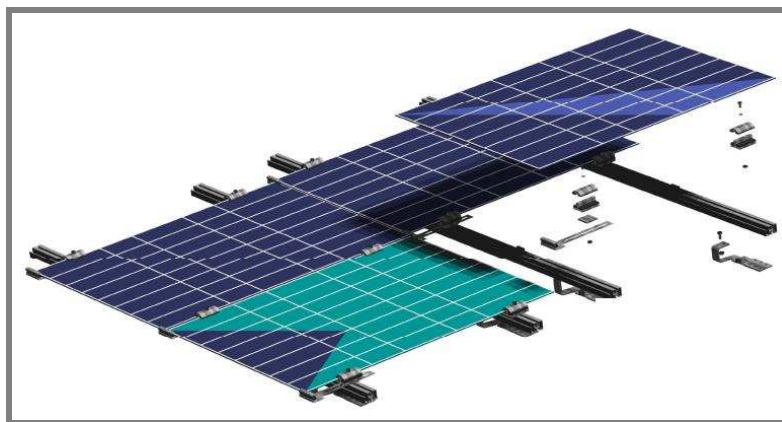
Především z hlediska úspory místa je u drobných investorů velmi oblíbeným řešením umístění elektráren, bez možnosti natáčení za sluncem, na střešní krytiny, prostorově nevyužité fasády domů nebo stěny průmyslových hal. Tyto konstrukce jsou také hojně rozšířeny mezi chataři a chalupáři.

Velmi vhodná je sedlová střecha, díky níž se dá ušetřit část nákladů na konstrukci potřebnou k nastavení panelů do požadovaného úhlu sklonu. Kladem montáže na střechu je přirozená ochrana před zcizením a minimální zásah do střešní konstrukce [6]. Problémem se však stává údržba. Umístění na střeších totiž často znemožňuje dostatečný přístup, obzvláště v období zimních měsíců. U střech s nízkým sklonem je problém s úklidem sněhu z povrchu fotovoltaických panelů. Jinak se během roku panely čistit nemusí. Pokud by nedocházelo k údržbě, snížila by se účinnost, což je u slunečních elektráren nežádoucí. Nejčastěji se tohoto modelu využívá na rodinných domech. Elektřina bývá využita především pro domácí spotřebiče.

Tyto elektrárny se mnohdy instalují přímo do částí nejrozličnějších budov. Panely se používají například pro zastřešení parkovišť a hal, jako fasádní obklad budov [7]. V letních obdobích jsou díky chladivým účinkům stěn panely chráněny před přehříváním. Umístění slunečních elektráren působí mnohdy velmi esteticky.

Přípevnění panelů na fasády a střešní krytiny bývá vyřešeno pomocí jednoduchých systémů, skládající se z různých duralových profilů, spojovacích šroubů, závlaček a speciálních ocelových háků. V profilech jsou vytvořeny drážky, do kterých se panely pevně přichytávají pomocí několika speciálně vyvinutých upínek. V některých případech se panely připevňují přímo do podkladu, bez použití duralových profilů.

Panely musejí být kvalitně připevněny a odolávat nežádoucím vlivům, aby nedošlo k uvolnění a způsobení nežádoucích škod.



Obr. 1-5 Systém upevnění panelů na stěny a střešní krytiny [8]

1.3.3 Elektrárny na volných plochách (solární parky)

V posledních letech se stala trendem stavba fotovoltaických elektráren na velkých volných plochách. Na celé tyto plochy je umístěno několik desítek menších elektráren. Jen v České republice již můžeme napočítat kolem deseti projektů. Jedná se o velké systémy s výkony v řádech stovek kW až MW. Výkon těchto elektráren je dán především jejich velikostí a také charakterem pozemku (sklon, poloha), na kterém jsou umístěny. Velikost pozemku musí být rozlohou zhruba 2,6 násobek plochy samotných fotovoltaických panelů. Mezi jednotlivými plochami panelů musí být dostatečný odstup, aby si navzájem nestínily. Nároky na velikost pozemku jsou tím menší, čím více je pozemek jižně svažitéjší, tedy pokud mohou být jednotlivé řady mírně nad sebou – nejsou nutné tak velké rozestupy mezi jednotlivými řadami [9].

Na volné plochy může být instalován jakýkoliv ze tří druhů elektráren. V případě elektráren bez možnosti natáčení za sluncem je opět stavba poměrně jednoduchá. Konstrukce bývají nejčastěji vyrobeny z ocelových, či duralových profilů různých průřezů. Dohromady jsou buď svařovány, nebo pro jednodušší demontáž spojovány pomocí šroubových spojů. Desky se k těmto konstrukcím připevňují stejným způsobem jako v případě střešních a fasádních systémů. Z důvodu odolnosti vůči nežádoucímu větru bývají konstrukce připevněny k těžkým betonovým blokům, případně zabetonovány do země.

1.3.4 Elektrárny s možností natáčení kolem jedné osy

V případě fotovoltaických elektráren, které jsou konstruovány bez možnosti natáčení panelů za sluncem, dochází ročně při výrově elektrické energie k nemalým ztrátám. Z tohoto důvodu bylo vyvinuto několik řešení. Jedním z nich je konstrukce elektrárny s možností natáčení panelů kolem jedné osy. Významné zvýšení denní produkce elektřiny lze tak dosáhnout montáží fotovoltaických panelů na pohyblivý stojan, který sleduje slunce, a zajistí tak trvalý kolmý dopad paprsků v průběhu dne [3].

Celá konstrukce elektrárny je postavena z duralových a nerezových profilů. Hlavní nosnou část představuje robustní trubka těž z hliníku (duralu) nebo nerez. Na trubku jsou stejně jako u předchozích konstrukcí upevněny profily nesoucí fotovoltaické panely. Hlavní trubka je situována šikmo v ose sever/jih. V jejím těle je nainstalován motor s převodovkou, který konstrukci natáčí díky impulzům přicházejícím ze speciálního PV modulu sledující pohyb slunce. Systém je schopen provozu i v zimních podmínkách. Odolnost vůči poryvům větru je zabezpečena samosvornou převodovkou a též betonovými bloky. Konstrukce je velmi variabilní a díky tomu umožňuje stavbu v různých velikostech. S přispěním možnosti natáčení konstrukce za sluncem se oproti stacionární konstrukci zvýší výroba elektřiny až o celých 30%. Postupem let již bylo vyvinuto několik dalších konstrukcí.



Obr. 1-6 Elektrárna s možností natočení kolem jedné osy [10]

1.3.5 Elektrárny s možností natáčení kolem dvou os

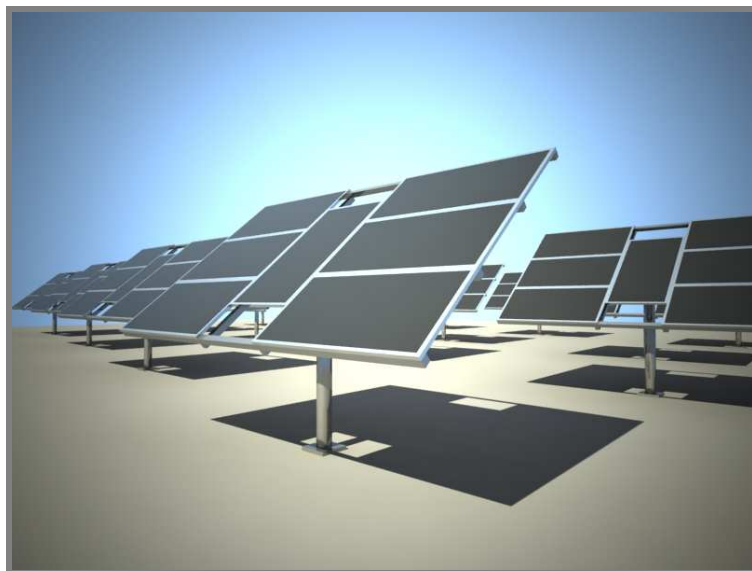
1.3.5

Pod názvem elektrárna s možností natáčení kolem dvou os rozumíme elektrárnu, která je schopna natáčet fotovoltaické panely za sluncem jak kolem osy horizontální, tak kolem osy vertikální. Tato konstrukce se používá především u velkých systémů, jako jsou solární parky. Výjimkou však nejsou ani malé privátní elektrárny.

Zpravidla je systém řízen počítačem a nastavení modulů do polohy kolmé ke slunci je založeno na tom, že systém má v paměti uloženu (nebo jí počítá) pozici slunce v každém okamžiku [3]. Fotovoltaická elektrárna díky těmto vlastnostem umožňuje získání maximálního výkonu z fotovoltaických desek. V porovnání s elektrárnou s možností natáčení kolem jedné osy se výkon navýší o dalších 5%. Celkově se tak jedná o 35% navýšení výkonu.

Konstrukce těchto elektráren bývá postavena nejčastěji z ocelových tenkostěnných profilů typu „L“, „I“, „U“ nebo trubek čtvercového, obdélníkového či speciálního průřezu. Jako podstava elektrárny se používají ocelové sloupy, jejichž velikost a průměr závisí na ploše a hmotnosti fotovoltaických panelů. Sloupy bývají zapuštěny v betonových blocích. V mnoha případech se sloupy zajišťují lany, žebry nebo

jinými podporami, aby elektrárny odolávaly poryvům větru, který může na volném prostranství dosahovat velmi vysoké rychlosti. Druhý konec sloupu je opatřen přírubou, na kterou je připevněn tzv. tracker, elektromotor zajišťující pohyb kolem vertikální a horizontální osy, a samotná příhradová konstrukce s připevněnými panely. Dnes se již můžeme setkat s elektrárnami o plochách až kolem 300 m².



Obr. 1-7 Elektrárna na volné ploše (solární park) [11]



Obr. 1-8 Elektrárna s možností natáčení kolem dvou os [11]

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA 2

Zvyšující spotřeba elektrické energie a její výroba převážně z fosilních paliv spolu přinášejí negativní dopad na životní prostředí. Alarmujícím úkazem je zhoršení klimatických podmínek přinášející nemalé změny veškerých přírodních systémů.

Z těchto důvodů se výroba elektrické energie začíná ubírat směrem alternativních zdrojů. Alternativní zdroje jsou totiž schopné poskytnout energii s minimálním vlivem na životní prostředí. Mezi alternativní energii patří energie:

- Větrná (využití síly větru)
- Vodní (využívá síly vody)
- Solární (ze slunečního záření)
- Geotermální (ze Země)
- Gravitační (z moře)

Především solární energie patří z hlediska životního prostředí k nejčistším a nejšetrnějším způsobům výroby elektrické energie.

Ačkoliv jsou v České republice sluneční elektrárny teprve na samém počátku, jejich rozvoj nabral poměrně vysokou rychlost. Nejčastěji se stavějí tzv. solární parky skládající se z velkého počtu slunečních elektráren o poměrně velkých plochách. Jak je již patrné, pro jejich realizaci je třeba volné plochy o velkých rozlohách, což bývá často problém. U plochy musíme navíc počítat s volným prostorem mezi elektrárnami, aby bylo zabráněno vzájemnému stínění. Pokud jsou jednotlivé elektrárny realizovány s možností natáčení kolem jedné nebo dvou os pro zvýšení výkonu, rostou náklady na prvky zajišťující tento pohyb. Z důvodů snížení ploch pro elektrárny a nákladů na potřebné mechanismy je cílem navrhovat elektrárny s možností natáčení kolem dvou os o velkých plochách.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je navrhnout nosnou konstrukci pro fotovoltaické sluneční články, která bude součástí sluneční elektrárny. Dle požadavků zadavatele by měla konstrukce splňovat celkovou plochu 200m^2 . Rozměry budou uzpůsobeny dle nejvýhodnějšího pokrytí fotovoltaickými panely KYOCERA s označením KC200GHT-2. Konstrukce musí odolávat poryvům větru do rychlosti 130 km/h . Nosná konstrukce bude realizována jako ocelová konstrukce.

Z důvodu maximálního využití slunečního záření dopadajícího na fotovoltaické panely musí být nosná konstrukce schopna natáčení kolem vertikální a horizontální osy.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

4

Ještě dříve než dojde k samotné realizaci návrhu nosné konstrukce pro fotovoltaické sluneční články, je třeba si ujasnit, které metodické přístupy je možné při návrhu použít. Zhodnotíme jejich výhody a nevýhody a vybereme přístupy nejvhodnější.

4.1 Získání dostatečných informací

4.1

Prvním krokem je získání dostatečných informací týkající se oblasti řešeného problému. V tomto případě se jedná o informace především z oblasti výroby elektrické energie ze slunečního záření.

4.2 Výběr vhodné varianty konstrukce

4.2

S ohledem na požadavky kladené na navrhovanou konstrukci je třeba zvolit nejvhodnější variantu, jejímž směrem se bude návrh ubírat. Součástí výběru vhodné varianty bude i volba konečných rozměrů vycházejících z požadavků na zařízení instalovaném na konstrukci.

4.3 Výběr materiálu

4.3

Při návrhu konstrukce je třeba zvolit materiály splňující veškeré požadavky konstrukce. Materiál byl nakonec vybrán u společnosti Feron, a.s., která nabízí široký výběr.

4.4 Návrh samotné konstrukce

4.4

Návrh konstrukce bude realizován s ohledem na okolní požadavky. Bude třeba zohlednit již zvolené rozměry, požadavky na usnadnění výroby, montáže konstrukce a realizaci povrchové úpravy. Konstrukce musí být navrhována pro možnost horizontálního a vertikálního pohybu přinášející nutnost vyřešení jejího uložení. Nezbytnou částí je vyřešení upevnění Fotovoltaických slunečních panelů na konstrukci.

4.5 Volba použitého softwaru

4.5

Pro vytvoření konečného 3D modelu navrhované konstrukce a následně její výkresové dokumentace je třeba zvolit vhodný software. Jako nejpříjemnějším se z důvodů dosažitelnosti a uživatelské přijatelnosti jevil parametrický komerční software *CATIA v5 r16* vyvíjený společností *Dassault Systemes*. Pro tvorbu výkresové dokumentace bude využito také programu *AutoCAD 2005*.

4.6 Účinky působící na konstrukci

Pro výpočtovou část návrhu konstrukce je velmi důležité znát veškeré účinky působící na konstrukci. Tyto účinky jsou nezbytné jako okrajové podmínky použité v pevnostní analýze pomocí metody konečných prvků. Jejich zanedbáním by mohlo dojít ke značnému ovlivnění konečného výsledku. Velikost těchto účinků se bude s ohledem na možnost natáčení konstrukce jistě měnit, proto by bylo vhodné hodnoty těchto účinků tabelovat či vyjádřit graficky.

4.7 Pevnostní výpočet nosné konstrukce

Nutnou součástí realizace návrhu nosné konstrukce pro fotovoltaické sluneční panely je pochopitelně pevnostní analýza počítána v našem případě pro jednotlivé úhly natočení nosné konstrukce. Zde by bylo opět vhodné výsledky tabelovat či graficky znázornit. Pokud se jedná o složitost a časovou náročnost námi řešeného problému, bude nejvhodnější využití metody konečných prvků. Z důvodů snadné dostupnosti byl zvolen program ANSYS 11.0.

4.8 Povrchová úprava

Při návrhu nosné konstrukce, která je koncipována jako ocelová, nesmí být opomenuta povrchová úprava. V tomto případě se jedná o ochranu proti korozi.

Dnes je nabízeno hned několik způsobů protikorozní ochrany. Je tedy třeba zvolit nejvhodnější řešení.

5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

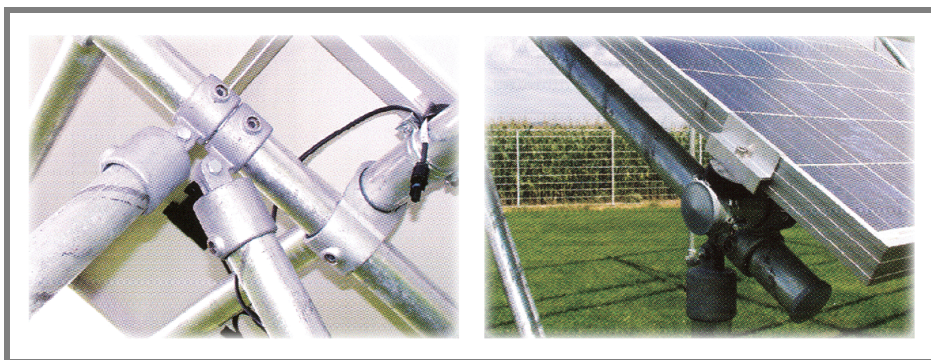
5

Při návrhu nosné konstrukce pro fotovoltaické panely bylo možné zvolit z několika variant konstrukcí. Vlastnosti jednotlivých variant byly porovnány s veškerými požadavky na konstrukční řešení. Nejvhodnější z variant pak byla aplikována na řešený problém.

5.1 Konstrukce z ocelových trubek

5.1

Jednou z možností je využití nosných konstrukcí z ocelových trubek. Tyto konstrukce jsou navrženy jako stavebnice. Trubky jednotlivých rozměrů jsou spojovány pomocí speciálních spojek opatřených šroubovým uchycením, jak je vidět na obrázku 5-1. Rozměry trubkových konstrukcí lze díky tomuto řešení dle velikosti použitých panelů jednoduše měnit. Z důvodů zvýšení životnosti bývají trubky galvanicky pokovovány. Stabilita konstrukce je zajištěna speciálními vruty zavrtanými přímo do země.



Obr. 5-1 Ukázka detailů nosné trubkové konstrukce pro fotovoltaické panely [12]

Maximální plocha těchto konstrukcí se pohybuje pouze okolo 70 m², což nesplňuje požadavky na navrhovanou konstrukci. Tento systém je ve většině případů aplikován jako fixní bez možnosti natáčení. Systém natáčení je možný pouze u konstrukcí menších rozměrů. Při návrhu konstrukce o větší ploše, než je uvedeno, by hrozilo při poryvech větru o rychlosti 130km/h ke zborcení. Tato varianta konstrukce se tedy jevila pro zadané požadavky jako nevyhovující.

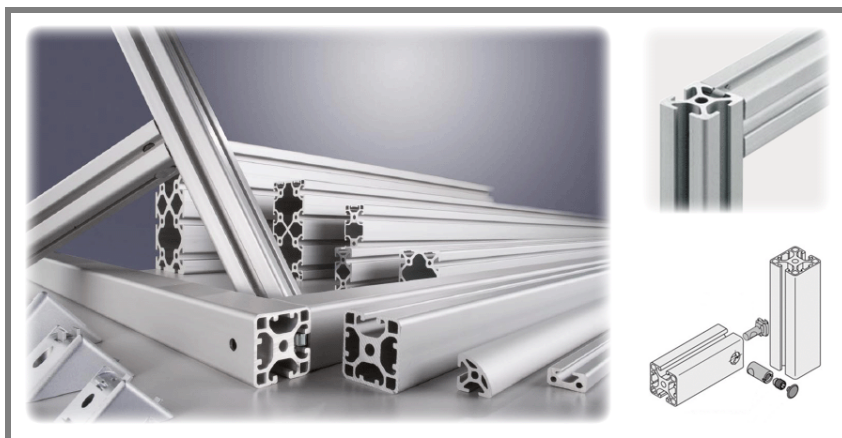
5.2 Konstrukce ze speciálních profilů

5.2

Nosnou konstrukci by také bylo možné postavit z montážního systému Kit firmy Item. Tento systém se skládá ze speciálních hliníkových profilů a spojovacího materiálu. Profily jsou nejčastěji čtvercového průřezu se speciálními drážkami (Obr. 5-2). Drážky jsou určeny především pro spojení profilů pomocí spojovacích prvků. Mohou však sloužit i k jiným účelům, jako například k připevnění solárních panelů. Středem profilu je možné tažení kabeláže. Z tohoto systému lze postavit konstrukce různých rozměrů, které podle příslušné dimenze profilů jsou schopny odolávat poryvům větru a přenášet příslušná zatížení od panelů.

Výhodou konstrukce je rychlá montáž, ale i demontáž. Po demontáži lze materiál bez problémů opětovně použít.

Tento systém by se jevil pro řešení problému jako vhodný. Vzhledem k příliš vysoké ceně těchto profilů nebylo použití u nosné konstrukce akceptováno. Systém navíc nesplňuje požadavky na materiál, ze kterého má být dle zadavatele konstrukce realizována.



Obr. 5-2 Montážní systém Kit firmy Item [13]

5.3 Příhradová ocelová konstrukce

Tato varianta konstrukce se z hlediska zadaných požadavků jeví jako nejvhodnější. U ocelových konstrukcí se nejčastěji využívá ocelových profilů a trubek, které jsou doplňovány plechy.

Varianta umožňuje návrh konstrukcí velkého rozpětí. Mohou být navrhнутy jako jeden celek nebo být sestaveny z několika menších modulů. Nosná konstrukce pro fotovoltaické panely bude navržena jako jedno velké křídlo o ploše 200m^2 poskládané z několika menších modulů, které budou z důvodu větší pevnosti koncipovány jako svařence. Jednotlivé moduly budou v celek spojeny pomocí šroubových spojů. Moduly umožní výrobu v menších výrobních halách s příslušným zařízením potřebným k jejich přesné výrobě, jednoduchý transport na místo určení a také možnost povrchové úpravy žárovým zinkováním. Návrh konstrukce jako jeden velký svařenec by byl z předchozích důvodů nevhodným řešením.

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

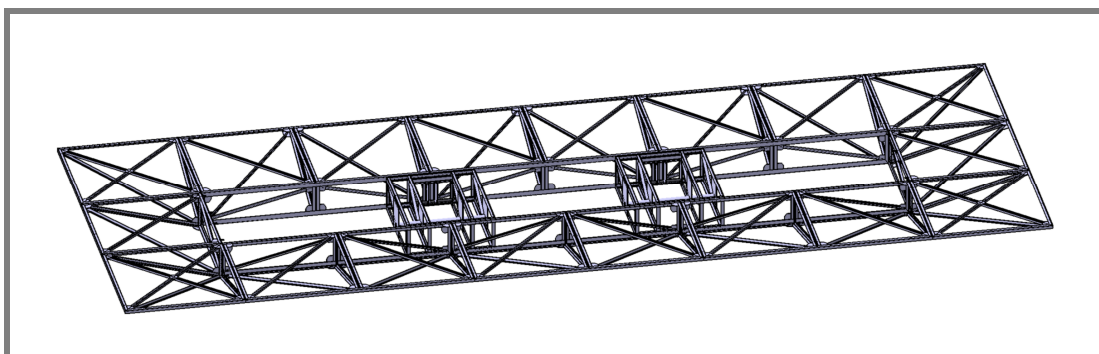
6

6.1 Popis navrhované nosné konstrukce

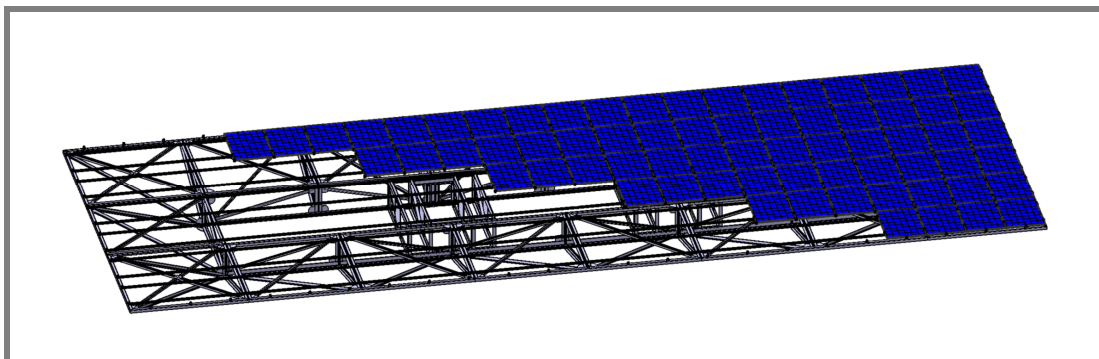
6.1

Nosná konstrukce pro fotovoltaické sluneční panely je navržena jako příhradová konstrukce o celkových rozměrech 23.100 x 8.650 x 900 mm. Z důvodu velkého plošného rozměru nosné konstrukce, manipulace při povrchové úpravě zinkováním a snadnější dopravě je konstrukce navržena jako stavebnice skládající se z modulů čtyř různých typů koncipovaných jako svařence. Jednotlivé moduly jsou navrženy tak, aby byly co nejuniverzálnější a pro jejich svařování nebylo třeba vyrábět zbytečné množství svařovacích přípravků, které by navyšovaly celkové náklady na výrobu. Moduly nosné konstrukce jsou svařeny z válcovaných profilů, trubek a plechů z konstrukční oceli 11 373. Profily jsou různých délek.

Ve středu nosné konstrukce je umístěna dvojice modulů č. 4 sloužící k uchycení celé konstrukce na nosné zařízení. Pro uchycení je v modulu navržena ocelová trubka středově uložená v ložiskovém tělese. Natáčení konstrukce kolem horizontální osy zajišťuje dvojice přímočarých hydromotorů. V konečné sestavě jsou moduly spojeny přesnými šrouby s šestihrannou hlavou velikosti M16. Na ocelovou konstrukci jsou pomocí speciálního montážního systému německé firmy Schletter uchyceny fotovoltaické sluneční panely KC200GHT-2. Tento systém je z velké části tvořen hliníkovými profily o průřezu 40x40 mm. Tyto profily se částečně podílejí na zvýšení tuhosti nosné konstrukce.



Obr. 6-1 Sestava nosné konstrukce (bez instalace fotovoltaických panelů)



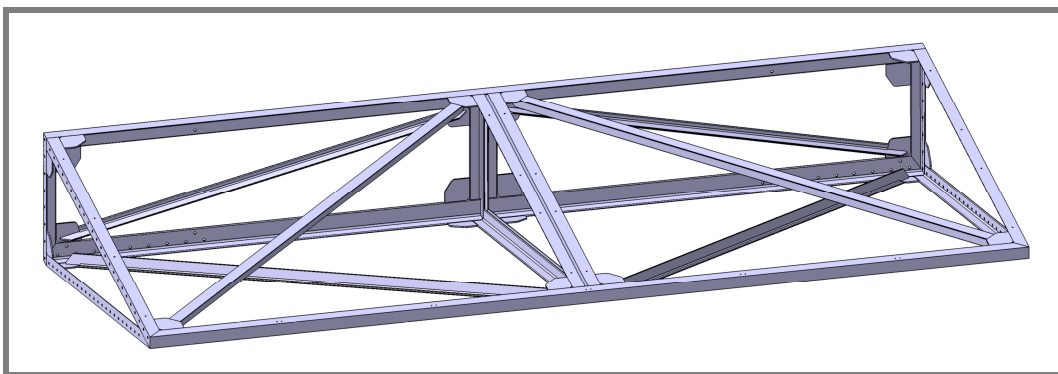
Obr. 6-2 Sestava nosné konstrukce (včetně části fotovoltaických panelů)

6.1.1 Modul č. 1

Modul je navržen jako svařovaná příhradová konstrukce klínového tvaru. Skládá se ze dvou větších polí, které jsou pevnostně vyztuženy příčnicíky a rohově zpevněny ocelovými styčníky. Celkové rozměry modulu jsou 5.700 x 3.000 x 900 mm. Tento modul je ze všech čtyř typů největší. Jeho velikost je omezena především maximální velikostí van používaných pro povrchovou úpravu žárovým zinkováním.

Do profilů umístěných na stranách dotýkajících se dalších modulů jsou vyvrtány otvory průměru 17,5 mm. Tyto otvory jsou určeny pro šroubové spoje M16 zajišťující spojení jednotlivých modulů v jeden celek. Rozmístění otvorů závisí na poloze daného modulu v celkové sestavě nosné konstrukce. V horních styčných profilech jsou otvory opatřeny závitem M8 a M9. Tyto otvory jsou určeny pro připevnění speciálních hliníkových profilů sloužících k instalaci slunečních panelů a zářezek zabráňujících samovolnému uvolnění solárních panelů.

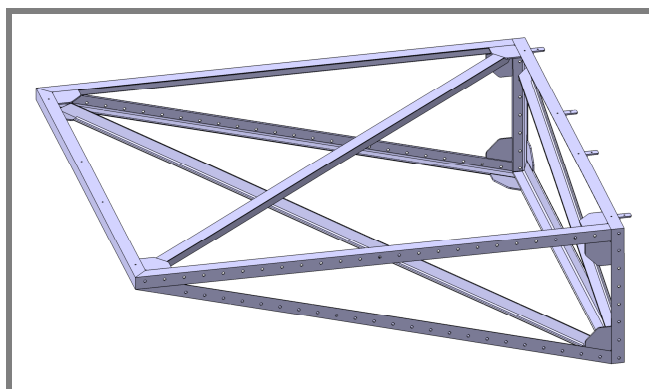
Umístění těchto modulů je na delších stranách horní a spodní části nosné konstrukce jak je vidět na obrázku 6-1. Pro navrženou konstrukci je třeba vyrobit celkem 6 kusů modulu tohoto typu. Hmotnost jednoho modulu je 702,7 kg.



Obr. 6-3 Modul č. 1

6.1.2 Modul č. 2

Modul typu č. 2 je rovněž příhradové konstrukce klínového tvaru. Skládá se na rozdíl od prvního modulu pouze z jednoho pole vyztuženého příčnicíky a rohově zpevněný ocelovými styčníky. Jeho celkové rozměry jsou 2.650 x 3.000 x 900 mm.



Obr. 6-4 Modul č. 2

Pro spojení s dalšími obvodovými moduly jsou do bočních profilů vyvrtány díry o průměru 17,5 mm pro šroubové spoje M16. Stejně jako u modulu číslo jedna jsou v horních profilech vyvrtány otvory se závitem M9 pro připevnění hliníkových profilů. Pro fixaci hliníkových profilů jsou na čelní straně navařeny příchytky s otvory stejné velikosti.

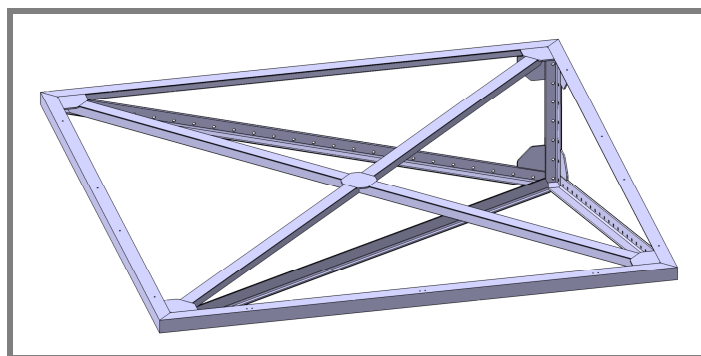
Tento typ modulu je umístěn ve střední části kratších stran nosné konstrukce. Pro navrženou konstrukci je třeba vyrobit 2 kusy. Hmotnost jednoho modulu je 340,8 kg.

6.1.3 Modul č. 3

6.1.3

Tento modul je příhradové konstrukce s čtvercovým půdorysem. Konstrukce je vyztužena příčnicí a rohově zpevněna ocelovými styčníky. Její rozměry jsou 3.000 x 3.000 x 900 mm. V bočních profilech jsou pro šroubové spojení s moduly č. 1 a č. 2 navrtány otvory průměru 17,5 mm pro šroubové spoje M16. Jako u modulu č. 1 jsou rovněž v horních profilech navrtány otvory se závity M8 a M9. Otvory jsou v modulu navrtány dle jeho polohy v sestavě.

Modul je umístěn ve všech čtyřech rozích nosné konstrukce. Pro navrženou konstrukci je třeba vyrobit 4 kusy. Hmotnost jednoho modulu tohoto typu je 314,5 kg.



Obr. 6-5 Modul č. 3

6.1.4 Modul č. 4

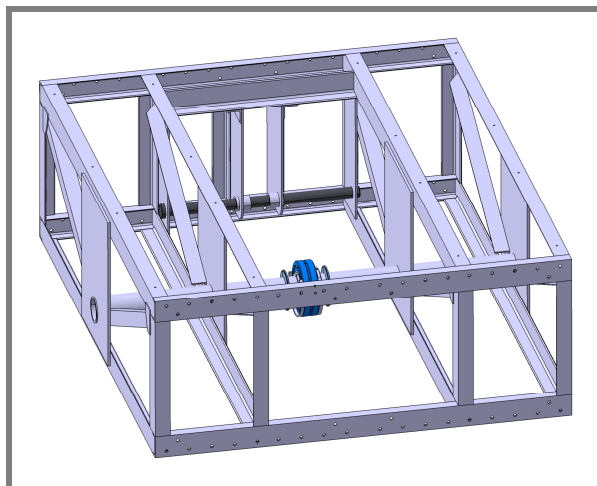
6.1.4

Moduly č. 4 jsou hlavní částí celé nosné konstrukce. Jejich umístění je ve střední části celkové sestavy zobrazené na obrázku 6-1. Hlavní nosné moduly jsou opět navrženy jako svařence. Konstrukce kopíruje tvar kvádru o rozměrech 2.650 x 2.200 x 900 mm.

Ve střední části modulu jsou na L profilech navařeny ocelové desky s otvory, do kterých je uložena nosná trubka průměru 160 mm. Tato trubka je do desek zavařena a uložena v ložiskovém tělese. Ve spodní části modulů jsou přivařeny držáky s čepem pro uchycení přímočarého hydromotoru.

Do bočních profilů průřezu U jsou navrtány otvory o velikosti 17,5 mm určené pro šroubové spoje M16 spojující moduly s moduly č. 1. Do profilů na horní straně jsou vyvrtány otvory se závitem M9.

Pro navrženou nosnou konstrukci je třeba vyrobit dva kusy modulu tohoto typu. Hmotnost jednoho modulu je 914,3 kg.



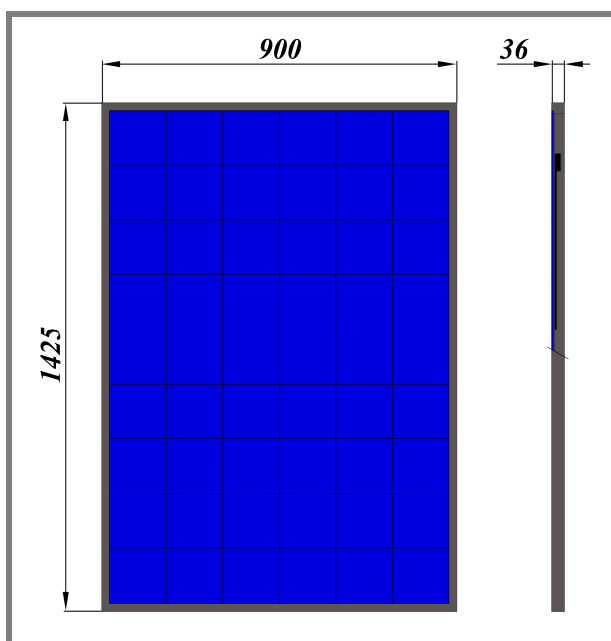
Obr. 6-6 Modul č. 4

6.2 Fotovoltaické panely KC200GHT-2

Nosná konstrukce je navrhována pro solární panely KC200GHT-2 od firmy KYOCERA. Tyto panely se vyznačují vysokou účinností a dlouhodobou životností zaručující zachování technických parametrů. Panel tvoří články z polykrystalického křemíku. Články jsou zapouzdřeny v EVA folii. Ochranu proti nepříznivým přírodním podmínkám zajišťuje přední tvrzené sklo a na zadní straně tzv. Tedlar. Celá tvrzená deska je umístěna v eloxovaném hliníkovém rámu, který poskytuje konstrukční pevnost a umožňuje snadnou instalaci [14].

Celkové rozměry navržené nosné konstrukce byly stanoveny tak, aby fotovoltaické panely maximálně využily její plochy. Celkem je na nosné konstrukci nainstalováno 144 kusů (6x24) panelů tohoto typu.

Na výstupní výkon je záruka 20 let s garancí maximálně 10% ztráty během 10 let.



Obr. 6-7 Fotovoltaický panel KC200GHT-2 - rozměry

Elektrické parametry:

- Maximální výkon $P_{max} = 200 \text{ W}$
- Maximální napětí $U_{max} = 26,3 \text{ V}$
- Maximální proud $I_{max} = 7,61 \text{ A}$

6.3 Upevnění fotovoltaických panelů

6.3

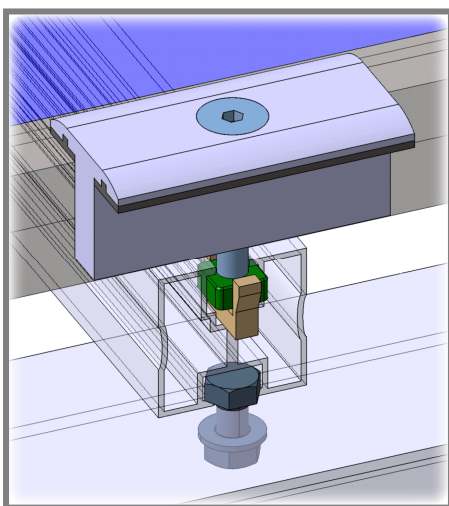
Při návrhu nosné konstrukce je také třeba vyřešit otázku připevnění fotovoltaických panelů. Panely nejsou příliš levnou záležitostí, proto musí být připevněny tak, aby při pohybu konstrukce nebo pomocí přírodních vlivů (vítr, déšť, sníh) nedošlo k jejich samovolnému uvolnění s následkem poškození. Tento fakt by mohl vést k nemalým finančním škodám.

Panely lze prakticky připevnit dvěma způsoby. Jedním z řešení je připevnění pomocí montážních šroubů, které se zašroubovávají přímo do hliníkového rámu slunečních panelů. Tento způsob se však díky rozměrům jednotlivých polí nosné konstrukce jeví jako nerealizovatelný. Řešením je druhý způsob, kde se jedná o speciální systém, díky kterému jsou panely pouze pevně přitlačovány na podložku (hliníkové profily) a nedochází tak k zásahu do rámu. Jedním z takových systémů vyrábí německá firma Schletter zabývající se zařízením v oblasti sluneční energetiky. Jako doplněk tohoto systému byly navrženy 3 nové příchytky.

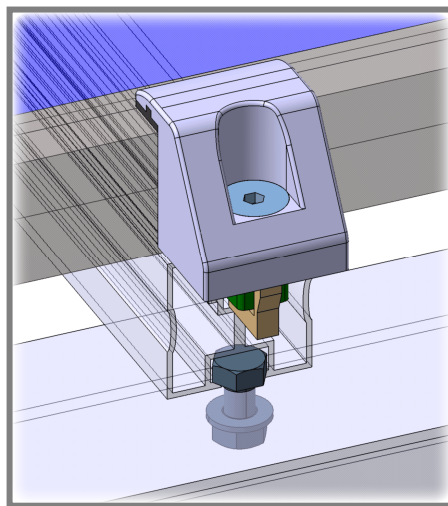
6.3.1 KlickTop systém

6.3.1

Tento systém je jádrem nové technologie spojování. Lze jej použít pro různé kombinace spojovaného materiálu. Často se tento systém používá pro chycení panelů přímo na šikmé střechy budov. Výhodou tohoto systému je jeho rychlá montáž a vysoká kvalita spoje.



Obr. 6-8 KlickTop systém, T-příchytky



Obr. 6-9 Jiné užití KlickTop systému

V případě nosné konstrukce je KlickTop systém aplikován na hliníkový profil *Solo 05* o rozměrech 40 x 40 mm připevněné na horní ploše nosné konstrukce. V příčném řezu profilu jsou dvě „T“ drážky. Do horní z těchto drážek je vložena tzv.

Klick součástka do které se vloží matice čtvercového tvaru M8. Do této matice se již pomocí šroubu M8 se zápusťnou hlavou s vnitřním šestihranem přišroubuje „T“ příchytky, přitlačující fotovoltaický panel k hliníkovému profilu, jak je vidět na obrázku 6-8. „T“ příchytky je vypodložena pryžovými vložkami, aby nedocházelo k poškození povrchu panelu. Do spodní drážky se vkládá hlava přesného šroubu s šestihrannou hlavou M9 a matkou přitáhne k ocelovému profilu.

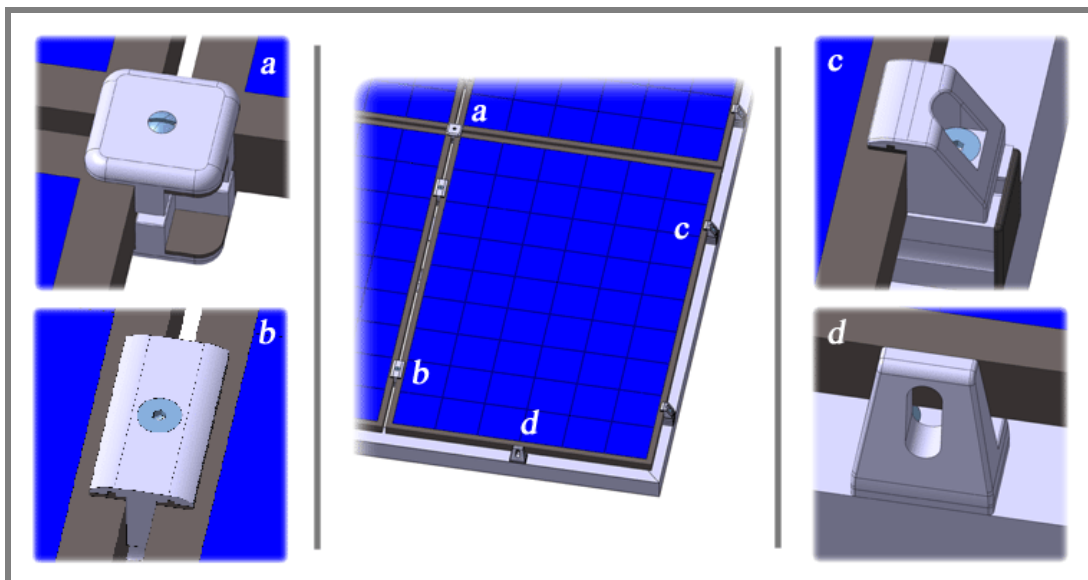
6.3.2 Příchytky

Pro přichycení fotovoltaických panelů v krajních polohách a jejich vymezení bylo nutno navrhnout příchytky vlastní konstrukce. První se skládá ze dvou polovin. V obou polovinách je z důvodu vymezení polohy čtyř panelů vyfrézován kříž. Středem prochází otvor pro šroub M6. Ve spodní polovině je zapuštěna matka M6, v horní pak zahluubení pro hlavu šroubu. Mezi poloviny jsou vloženy rohy panelů a pomocí šroubu se zápusťnou čokovitou hlavou pevně staženy, jak je vidět na obrázku 6-10a.

Druhá z příchytek slouží k uchycení krajních panelů na kratších stranách nosné konstrukce. Její návrh vychází z „T“ příchytky firmy Schletter a rovněž využívá uchycení KlickTop systému, jak je vidět na obrázku 6-9 a 6-10c.

Třetí z příchytek je připevněna přímo k nosné konstrukci, konkrétně na delších stranách. Tato příchytky slouží jako zarážka, která brání vyklouznutí krajních panelů. Zde je z důvodu zamezení možnosti otáčení příchytky využito k připevnění k ocelovému profilu dvojice šroubů M8 (Obr. 6-10d).

Všechny tři navrhované příchytky jsou vyrobeny z hliníku.



Obr. 6-10 Upevnění fotovoltaických panelů pomocí speciálních příchytek

6.4 Uložení nosné konstrukce

U nosné konstrukce je třeba zvolit správné uložení, které by umožňovalo natáčení kolem horizontální osy. Tento problém je vyřešen pomocí soudečkových ložisek uložených v ložiskových tělesech (domcích).

6.4.1 Volba ložiska

Navrhovaná nosná konstrukce se bude otáčet kolem horizontální osy, což vede k volbě ložisek *radiálních*.

Je nezbytné také zhodnotit, jak budou ložiska během svého života nejvíce namáhány. Pokud se týče návrhu nosné konstrukce, bude provoz ložisek v tomto případě zcela neobvyklý. Konstrukce se bude v ložiscích natáčet pouze v rozmezí od 0° do 70° (respektive od 26° do 70°) od horizontální roviny, což znamená, že nedojde k úplnému otočení. Bude docházet pouze k jakému si kývavému pohybu. V závislosti na pohybu slunce se konstrukce pootočí vždy jen o malý úsek a po většinu času bude ve stacionární poloze. Ložiska tedy budou namáhána především statickou silou, vyvozenou vlastní hmotností a vlivem působení větru. Tato síla bude rozdělena do dvou ložisek a přímočarých hydromotorů, zajišťujících pohyb konstrukce kolem horizontální osy.

Důležitou roli hraje i volba maziva, které přispívá k prodloužení životnosti ložiska. Každý jednotlivý faktor má vliv na výkon, spolehlivost a hospodárnost uložení [15].



Obr. 6-11 Soudečkové ložisko [16]

Jako nejvhodnější byla zvolena soudečková ložiska firmy SKF. Označení těchto vybraných ložisek je 22232 CCK/W33. Tento typ ložisek byl rovněž vybrán tak, aby korespondoval s vybraným ložiskovým tělesem a splňoval veškeré požadavky.

Ložisko je navíc opatřeno ve vnějším kroužku obvodovou drážkou s trojicí mazacích otvorů. U ložiska je umožněno vyklonění do 2° . Jelikož bude ložisko upevněno na trubce, je opatřeno kuželovou dírou. Ložisko je opatřeno upínacím pouzdrem H 313.

Technické parametry:

$d_h = 140$	[mm]	- průměr hřídele
$D = 290$	[mm]	- průměr ložiska
$B = 80$	[mm]	- tloušťka ložiska
$C = 1000$	[kN]	- dynamická únosnost
$C_0 = 1290$	[kN]	- statická únosnost
$m_l = 29,3$	[kg]	- hmotnost ložiska (včetně pouzdra)

6.4.2 Statická únosnost

V případě navrhované nosné konstrukce nedochází k úplnému otočení ložiska, ale pouze k tzv. kývavému pohybu. U ložisek tedy bylo nutné vypočítat statickou únosnost. *Statické únosnost* C_0 udává, při jakém zatížení dojde v ložisku k trvalé deformaci o velikosti 0,0001 průměru valivého elementu.

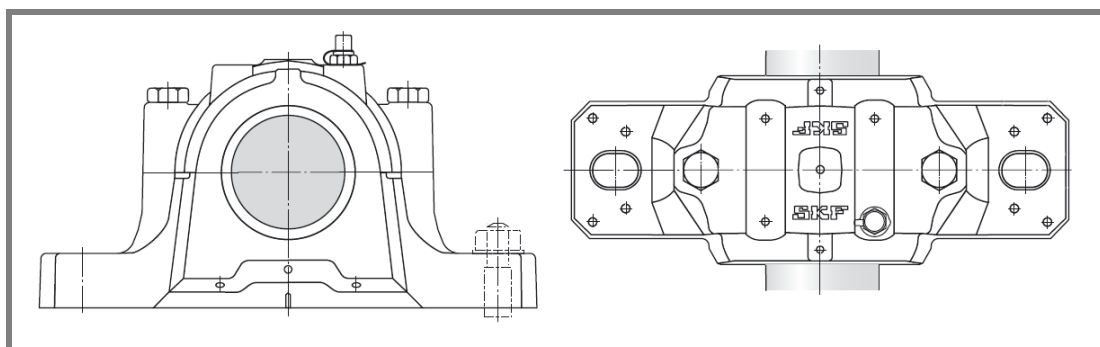
$$1290 \text{ kN} > 240,2 \text{ kN}$$

Největší síla působící na ložisko, která byla získána z výpočtového modelu, je menší než maximální dovolená síla. Podmínka statické únosnosti je tedy splněna.

6.4.3 Ložisková tělesa SNL 532

Ložisková tělesa byla z důvodů dobré kompatibility, stejně jako soudečková ložiska vybrána u firmy SKF. Veškeré požadavky splňovala stojatá tělesa typu SNL řady 5. Tento typ patří v nabídce SKF mezi nejrozšířenější. Konstrukce jednotlivých modelů je naprosto stejná a liší se pouze rozměry. Ve spodní části jsou tělesa pro větší tuhost a odvod tepla opatřena žebry. Dále jsou zde umístěny dva otvory pro upevňovací šrouby zajišťující připevnění k základové desce. Horní části těles SNL jsou standardně opatřeny dvěma závitovými otvory pro mazací hlavice, které jsou zaslepeny kovovými zátkami [17]. V kombinaci s ložisky je možné vytvořit velké množství kombinací.

Veškeré požadavky splňuje model SNL 532. Společně s tělesy byly zvoleny těsnící kroužky TSN 532 G, upínací pouzdro H 313 a axiální vodící kroužky FRB 17/290.



Obr. 6-12 Ložiskové těleso SNL 532 [17]

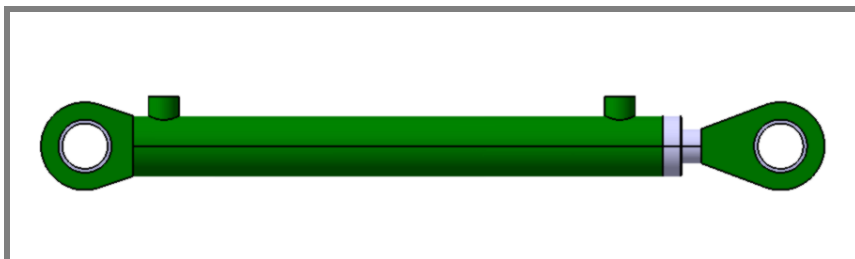
6.5 Přímochařé hydromotory

Pro zajištění pohybu konstrukce kolem horizontální osy, bylo třeba zvolit vhodné řešení. U konstrukce je požadováno, aby byla schopna pootáčení v závislosti na dráze slunce vždy jen o malý úsek. V poloze pootáčení pak vytrvat i při poryvu větru. Tento problém byl vyřešen dvojicí přímochařých hydromotorů.

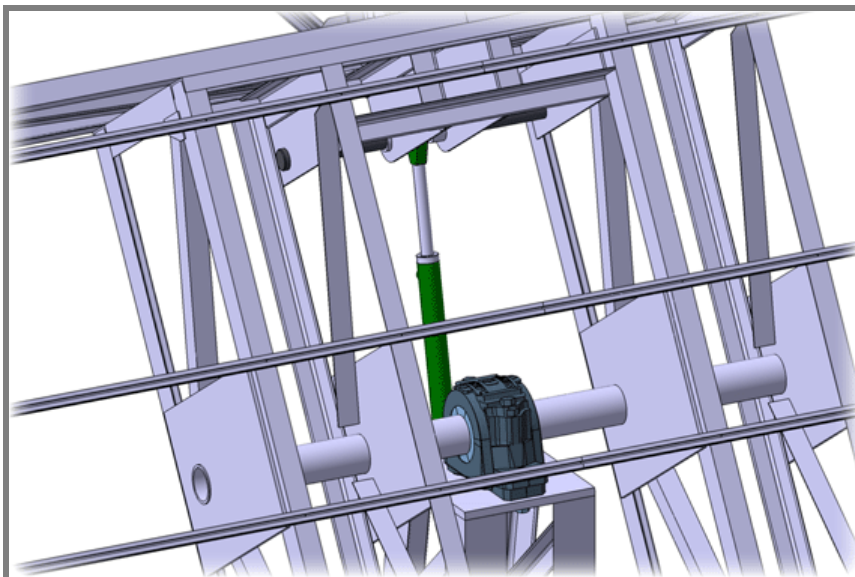
Jako nejvhodnější byly vybrány přímochařé hydromotor UHN210 od firmy ULBRICH (obr. 6-13). Konkrétně pak HZ-UHN210-R-SB-80/45-540-D-S2-V-0. Tento přímochařý hydromotor je trubkový dvojčinný. Z obou stran je píst opatřen okem s válcovým pouzdem pro čep o průměru 60 mm.

Technické parametry:

Jmenovitý tlak	- 21 MPa
Zdvih pístnice	- 540 mm
Průměr pístu	- 80 mm
Průměr pístnice	- 45 mm
Tlaková kapalina	- minerální olej HM DIN 51524
Teplotní rozsah kapaliny	- -30°C až +60°C

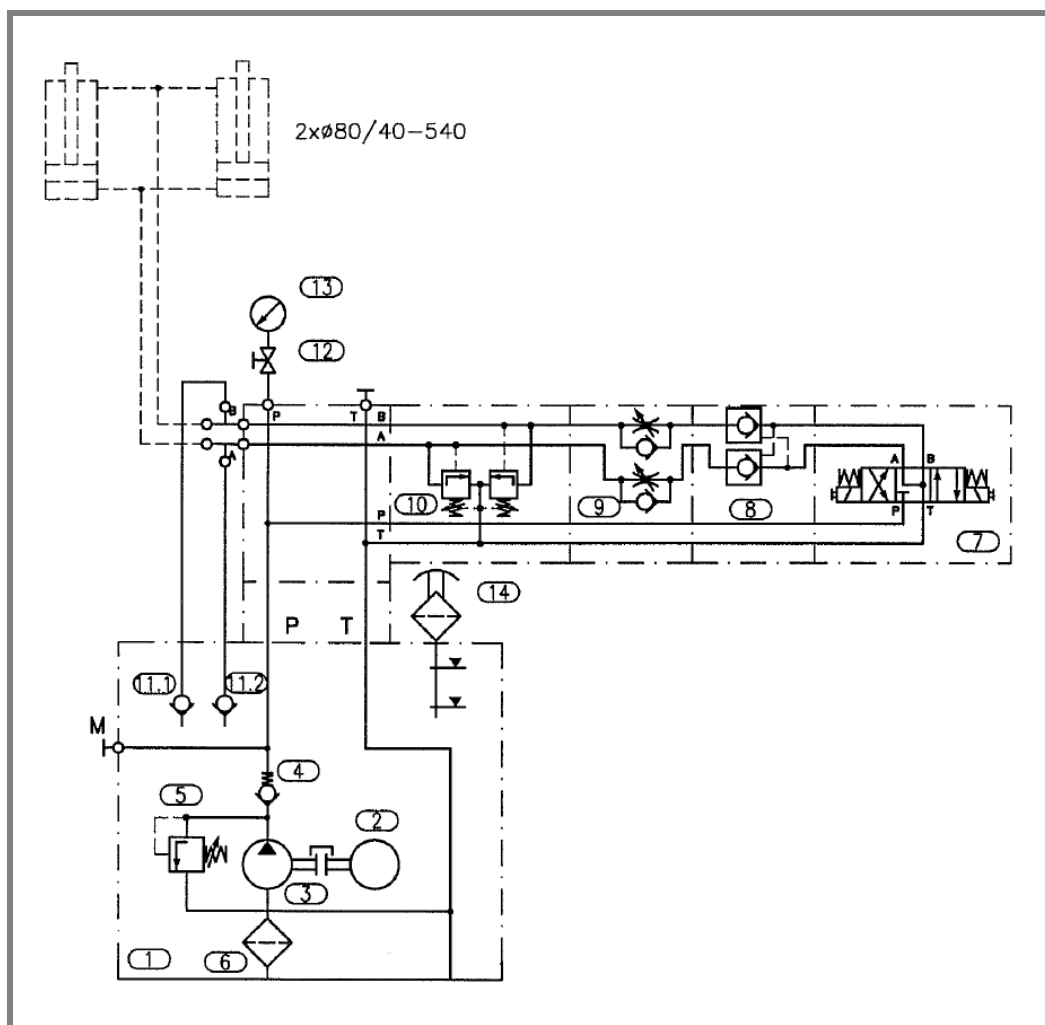


Obr. 6-13 Přímočarý hydromotor UHN 210



Obr. 6-14 Detailní pohled na uložení nosné konstrukce

Přímočaré hydromotory budou ovládány hydraulickým agregátem, který se skládá z elektromotoru *MA-AL63* o výkonu *0,12 kW*, hydrogenerátoru *X-0,4L.61030*, rozváděcího hliníkového bloku a ventilů. Rychlost zdvihu pístnice bude regulován škrtícími ventily. Při jednotlivých polohách naklopení nosné konstrukce bude poloha pístnic zajištěna pomocí zámků (č. 8). Pokud by se do konstrukce opřel silný vítr a přímočaré hydromotory nestačili včas sklopit panel, zvýší se tlak ve válcích a kapalina bude přepouštěcími ventily (č. 10) unikat do nádrže (č. 1). Tento „násilný“ pohyb je možný jak pro tah, tak i pro tlak. Chybějící olej ve válcích bude přísáván jednosměrným ventilem.



Obr. 6-15 Schéma zapojení ovládání přímočarých hydromotorů

Popis jednotlivých částí v nákresu: 1-nádrž, 2-elektromotor, 3-hydrogenerátor, 4-jednosměrný ventil, 5-přepouštěcí ventil, 6-sací filtr, 7-rozvaděč, 8-hydraulický zámek, 9-škrťací ventil, 10-přepouštěcí ventil, 11-jednosměrný ventil, 12-uzavírací ventil, 13-manometr, 14-nalévací zátka.

6.6 Reakční síly na ložiskách a přímočarých hydromotorech

Pro volbu ložisek a přímočarých hydromotorů je třeba znát maximální reakční síly. Tyto síly jsou vypočteny ze složek získaných z výpočtového modelu, který byl vymodelován v programu ANSYS 11.0. Ve výpočtu bylo použito složek ve směru osy X a Z, vycházející z orientace výpočtového modelu. Výsledné reakční síly na trubce (uložení ložisek) se vypočítaly jako vektorový součet jednotlivých složek.

$$F_{R,t} = \sqrt{F_{R,tX}^2 + F_{R,tZ}^2}$$

$F_{R,t}$	[N]	- reakční síla na trubce
$F_{R,tX}$	[N]	- složka X reakční síly na trubce

$F_{R,tz}$ [N] - složka Z reakční síly na trubce

Reakční síly jsou z důvodu polovičního modelu vypočteny přímo pro jedno ložisko a jeden hydraulický válec, proto není třeba tyto síly dělit dvěma. Reakční síly jsou vypočteny se sklonem po pěti stupních. Výsledné reakční síly působící na trubce a na čepu jsou vypsány v tabulkách 6-1 a 6-2.

Sklon β [°]	$F_{R,tX}(P)$ [N]	$F_{R,tZ}(P)$ [N]	$F_{R,t}(P)$ [N]	$F_{R,tX}(Z)$ [N]	$F_{R,tZ}(Z)$ [N]	$F_{R,t}(Z)$ [N]
0	5.440	124.526	124.644	25.104	100.030	103.132
25	40.370	61.287	73.388	15.659	92.463	93.779
26	42.685	58.075	72.074	17.458	96.083	97.656
30	51.725	44.226	68.054	24.373	111.941	114.564
35	62.306	50.829	80.409	32.240	134.501	138.311
40	140.907	41.808	146.979	39.015	159.461	164.164
45	156.562	31.116	159.624	44.494	186.058	191.305
50	169.398	18.903	170.449	48.512	213.490	218.933
55	179.323	5.581	179.410	50.945	240.918	246.246
60	185.972	99.280	210.814	51.134	266.687	271.545
56	189.324	124.197	226.426	50.815	266.687	296.844
70	189.473	147.685	240.231	43.980	298.682	301.903

Tab. 6-1 Reakční síly na trubce (P – od předního větru, Z – od zadního větru)

Zcela stejným způsobem se vypočítaly výsledné reakční síly na čepu (uložení přímočarých hydromotorů):

$$F_{R,\epsilon} = \sqrt{F_{R,\epsilon X}^2 + F_{R,\epsilon Z}^2}$$

$F_{R,\epsilon}$ [N] - reakční síla na čepu
 $F_{R,\epsilon X}$ [N] - složka X reakční síly na čepu
 $F_{R,\epsilon Z}$ [N] - složka Z reakční síly na čepu

Sklon [°]	$F_{R,\epsilon X}(P)$ [N]	$F_{R,\epsilon Z}(P)$ [N]	$F_{R,\epsilon}(P)$ [N]	$F_{R,\epsilon X}(Z)$ [N]	$F_{R,\epsilon Z}(Z)$ [N]	$F_{R,\epsilon}(Z)$ [N]
0	27.192	1.582	27.238	713	4.634	4.688
25	22.806	43.435	49.059	22.806	6.386	23.683
26	13.916	47.953	49.932	23.387	7.146	24.454
30	11.325	50.641	51.892	26.163	9.833	27.950
35	7.545	53.154	53.687	29.758	12.348	32.218
40	3.271	54.657	54.755	34.032	13.849	36.742
45	1.365	55.104	55.121	38.670	14.296	41.228
50	6.225	54.581	54.835	43.529	13.673	45.626
55	11.160	52.806	53.976	48.465	12.000	49.928
60	15.909	49.975	52.447	53.257	9.431	54.086
65	20.658	46.540	50.919	57.962	5.732	58.244
70	13.971	42.330	44.576	60.306	1.429	60.323

Tab. 6-2 Reakční síly na čepu (P – od předního větru, Z – od zadního větru)

6.7 Zatížení nosné konstrukce větrem

Při navrhování ocelové nosné konstrukce pro fotovoltaické články je třeba uvažovat s řadou zatížení, které často značně ovlivňují její chování. Dle doby trvání, změn velikosti, polohy, smyslu nebo směru působení dělíme zatížení na *stálá* (zatížení od vlastní hmotnosti), *nahodilá* (např. vliv větru) a *mimořádná* (např. zatížení při dopravě a montáži).

Sluneční elektrárna, jejíž součástí je i navrhovaná nosná konstrukce, bude z důvodů maximálního dopadu slunečního záření při všech úhlech sklopení a natočení stát na volném prostranství. Musíme tedy uvažovat, že konstrukce bude vystavena poryvům větru o maximální síle. Proto nemůžeme zatížení od větru nikterak zanedbat.

V oblasti výroby sluneční energie nebyly doposud stanoveny žádné normy, které by se zabývaly návrhem ocelových nosných konstrukcí pro fotovoltaické panely, obzvláště pak jejich zatížení od větru. Z tohoto důvodu muselo být využito podobné normy ČSN 27 0103 (Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů.). Tato norma se zabývá výpočtem podle mezních stavů. Pro výpočet vlivu větru bylo využito pouze kapitoly „Zatížení větrem“.

Je třeba navrhnout a vypočítat nosnou konstrukci, která by odolávala větru o rychlosti 130km/h , což odpovídá dle *Beaufourtovi stupnice* síle orkánu. Pro tyto výpočty využijeme právě již zmiňované normy.

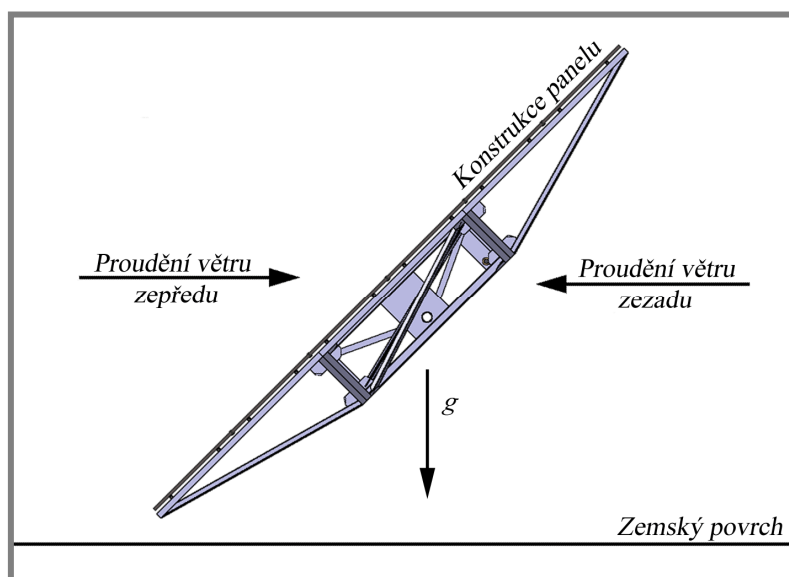
Počítá se pochopitelně s tím, že při dosažení větru o této rychlosti bude nutné konstrukci sklopit do bezpečnostní polohy, aby nedošlo k poškození solárních panelů.

6.7.1 Výpočet sil působících od větru

Při výpočtu sil působících od vlivu větru je třeba uvažovat veškeré části konstrukce, které budou větru vystaveny a bránit mu tak v přímé cestě. Mezi tyto části musíme zahrnout všechny typy ocelových profilů, desek, trubek a kulatiny, duralové nosníky potřebné k připevnění fotovoltaických panelů a samotné panely, kde se síla větru bude projevovat nejvíce. Dle normy bude uvažován vodorovný směr větru ze přední a zadní strany, jak je vidět na obrázku 6-16. V těchto dvou polohách se totiž vítr jeví jako nejnebezpečnější. Z boční strany je vliv větru zanedbán, protože s této strany není konstrukce pokryta solárními panely a tudíž na ní budou vyvinuty podstatně nižší síly než v obou předchozích případech.

Dle normy je třeba u každého elementu vypočítat namáhání větrem zvlášť. Počítá se vždy síla působící na průmět plochy elementu kolmý ke směru proudění větru. Tyto síly jsou nakonec sečteny a získána tak výsledná normová síla větru F_w působící na nosnou konstrukci.

Jak již bylo uvedeno, konstrukce panelu je vyvíjena pro sluneční elektrárnu s možností vertikálního a horizontálního natáčení. Z tohoto důvodu musíme výslednou normovou sílu F_w propočítat pro rozsah úhlů od 0° (konstrukce je ve vodorovné bezpečnostní poloze) do 70° (konstrukce je v maximálním natočení vůči vodorovné poloze) od horizontální roviny. Maximální úhel vychází z požadavků zadavatele za účelem dosažení maximálního výkonu elektrárny, který je dosažen v rozsahu úhlů od 26° do 70° , dle polohy slunce na obloze.

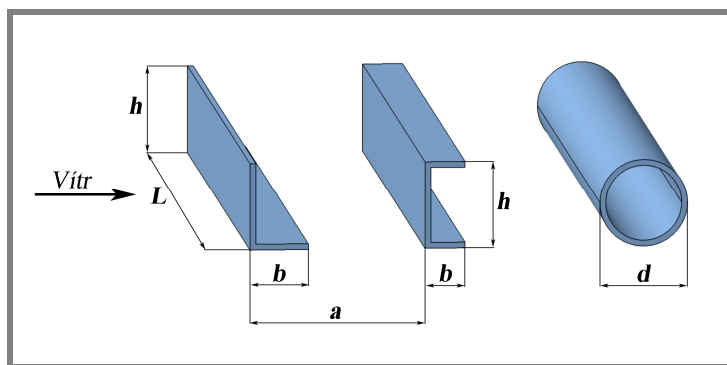


Obr. 6-16 Uvažované směry proudění větru

Zastíněné a nezastíněné prvky

Ve výpočtu síly větru je třeba rozlišovat mezi prvky zastíněnými a nezastíněnými. Mezi *nezastíněné* prvky řadíme ty, které jsou vystaveny přímému působení větru. Naopak zastíněné prvky jsou takové, před kterými je vystavena překážka v podobě prvku mající průmět do roviny kolmé ke směru větru o stejné ploše. Tato překážka způsobuje roztržení proudu větru, díky kterému dochází ke snížení jeho síly působící na zastíněný prvek, který pak není tolik namáhán.

Síla působící na zastíněný prvek se vypočítá tak, že účinek na předchozí prvek je vynásoben tzv. *součinitel zastínění* φ . Součinitel zastínění je funkcí *součinitele vyplnění* α předešlého prvku a poměru a/h dle obrázku 6-17. Pokud se jedná o trubky, musí být použit vztah d/h .



Obr. 6-17 Ukázka zastínění prvků

Součinitel zastínění se poté vybírá z tabelovaných hodnot. Součinitel vyplnění získáme ze vztahu:

$$\alpha = \frac{\sum A}{A_0}$$

A	[m ²]	- čistá plocha prvku bez otevřených polí a děr
A_0	[m ²]	- celková plocha prvku dána jeho obrysem
a	[mm]	- vzdálenost mezi jednotlivými profily
h	[mm]	- výška profilu vystaveného větru
d_t	[mm]	- průměr trubky
L	[mm]	- délka profilu vystaveného větru

Výpočet normové síly

Při výpočtu nosné konstrukce je třeba rozlišovat, zda se jedná o zatížení větrem za provozu, či mimo provoz.

Pokud budeme provádět výpočet konstrukce *za provozu*, musíme uvažovat, že je zatěžována největším tlakem od větru ve stavu, kdy ještě může pracovat. V našem případě tento stav použijeme pro všechny polohy v rozmezí od 26° do 70°, kdy je nosný panel ve stavu provozním. Velikost normové síly $F_{1\varpi}$ působící na daný prvek za provozu se stanoví ze vzorce [18]:

$$F_{1\varpi} = \omega_1 \cdot \xi_{\varpi} \cdot A_k$$

$F_{1\varpi}$	[N]	- normová síla působící na konstrukci za provozu
ϖ_1	[Pa]	- tlak větru působící na konstrukci za provozu
ξ_{ϖ}	[-]	- tvarový součinitel
A_k	[m ²]	- průmět čisté plochy do roviny kolmé na směr větru

Tlak od větru na ocelovou konstrukci je možné určit dle tabelovaných hodnot v normách. Velikost tlaku je závislá na výšce od povrchu Země, která je v našem případě do 10m. Přesnější hodnoty však vypočteme ze vztahu:

$$\omega_{1,2} = \frac{v_{\varpi}^2}{1,6}$$

v_{ϖ}	[m/s]	- rychlost větru
$\varpi_{1,2}$	[Pa]	- tlak od větru působící na konstrukci

V zadání diplomové práce byla stanovena rychlost větru 130 km/h, což odpovídá tlaku o velikosti 815 Pa.

Tvarový součinitel ξ_{ϖ} se určuje též dle tabelovaných hodnot. Zde je však třeba znát vztah L/h nebo L/d a přesnou charakteristiku počítaného prvku. Tento součinitel nám říká, s jakými problémy bude vítr obtékat daný prvek. Pokud porovnáme profil tvaru L a trubku, uvidíme, že s překonáním trubky si vítr poradí mnohem snadněji. To znamená, že na trubku nebude vyvíjena taková síla jako na profil L.

Plocha A jako průmět čisté plochy prvku do roviny kolmé na směr větru s ohledem na úhel sklopení nosné konstrukce se vypočítá dle upraveného vzorce:

$$A_k = \frac{L \cdot h \cdot \sin \beta}{1000}$$

β	[°]	- úhel natočení konstrukce vůči horizontální rovině
---------	-----	---

Pokud bychom však prováděli výpočet konstrukce *mimo provoz*, musíme uvažovat, že je zatěžována největším tlakem od větru ve stavu, kdy již nepracuje a je zajištěna proti samovolnému pohybu. Tento stav ve výpočtu použijeme pouze ve stavu, který odpovídá stavu při rychlosti větru 130 km/h a poloze sklopení 0° vůči horizontální ose. Velikost normové síly $F_{2\omega}$ působící na daný prvek mimo provoz se stanoví ze vzorce [18]:

$$F_{2,\omega} = \omega_2 \cdot \xi_{\omega} \cdot A_k$$

$F_{2\omega}$	[N]	- normová síla působící na konstrukci mimo provoz
ω_2	[Pa]	- tlak od větru na konstrukci mimo provoz
ξ_{ω}	[°]	- tvarový součinitel
A_k	[m ²]	- průmět čisté plochy do roviny kolmé na směr větru

Výsledná síla působící na konstrukci

Pro pevnostní výpočty nosné konstrukce je třeba vypočítat všechny potřebné síly působící od větru. Tyto síly jsou vypočteny pro každých pět stupňů sklonu konstrukce vůči horizontální ploše. Síla se skládá z normovaných sil jednotlivých prvků vystavených proudění větru. Výpočet výsledných sil pro jednotlivé úhly sklonu vypočteme dle rovnic:

$$F_{\omega P\beta} = \sum F_{\omega}$$

$$F_{\omega Z\beta} = \sum F_{\omega}$$

$$F_{\omega P0} = \sum F_{\omega 2P}$$

$$F_{\omega Z0} = \sum F_{\omega 2Z}$$

$F_{\omega P\beta}$	[N]	- výsledná síla působící na konstrukci se sklonem β zepředu
$F_{\omega Z\beta}$	[N]	- výsledná síla působící na konstrukci se sklonem β zezadu
$F_{\omega P0}$	[N]	- výsledná síla působící na konstrukci zepředu
$F_{\omega Z0}$	[N]	- výsledná síla působící na konstrukci zezadu
$F_{\omega 1P\beta}$	[N]	- normová síla působící na průmět roviny prvku pod úhlem β do roviny kolmé na směr větru zepředu
$F_{\omega 1Z\beta}$	[N]	- normová síla působící na průmět roviny prvku pod úhlem β do roviny kolmé na směr větru zezadu
$F_{\omega 2P}$	[N]	- normová síla působící na plochu prvku zepředu
$F_{\omega 2Z}$	[N]	- normová síla působící na plochu prvku zezadu

Hodnoty sil jsou zezadu i zepředu zcela stejné, liší se pouze směrem působení větru, proto je zbytečně počítat tyto síly dvakrát. Rozdíl byl očekáván pouze u konstrukce v poloze 0°, ale díky téměř dokonalé symetrii je výsledek stejný. Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulce 6-3.

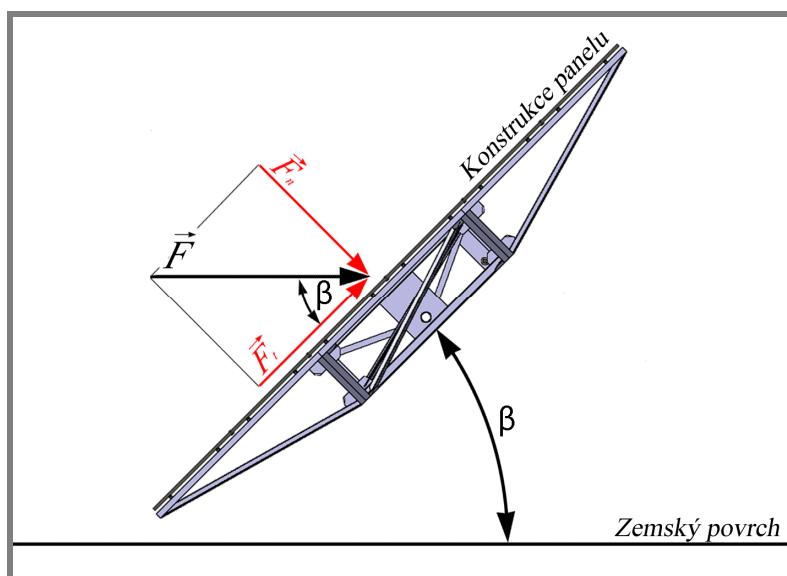
Normálová a tečná složka výsledné síly

Pro posouzení bezpečnosti konstrukce k meznímu stavu pružnosti pomocí metody konečných prvků a výpočtového programu ANSYS 11.0 je třeba výslednou sílu působící na konstrukci rozložit do dvou složek a to složky tečné F_t a složky normálové F_n . Obě složky jsou vypočítány užitím jednoduchých goniometrických funkcí

$$F_n = F \cdot \sin\theta$$

$$F_t = F \cdot \cos\theta$$

F	[N]	- výsledná síla
F_n	[N]	- normálová síla
F_t	[N]	- tečná síla
θ	[°]	- úhel natočení konstrukce vůči horizontální rovině



Obr. 6-18 Rozložení normové síly na složku tečnou a normálovou

Průběh normové síly s jejími složkami normálové a tečné síly v závislosti na úhlu natočení konstrukce vůči horizontální rovině jsou zaznamenány v tab. 6-3. Hodnoty se týkají průběhu sil v rozmezí od 26° do 70°, které jsou ještě společně s nulovým úhlem (bezpečnostní poloha) pro naše výpočty v programu ANSYS 11.0 nejdůležitější. Tečná síla je ve stavu mimo provoz, tudíž se sklonem 0° je pochopitelně nulová.

Sklon β [°]	Normová Síla F [N]	Tečná Síla F_t [N]	Normálová Síla F_n [N]
0	45.027	45.027	0
25	89.469	81.087	37.811
26	92.804	83.412	40.683
30	105.852	91.670	52.926
35	121.428	99.468	69.648
40	136.080	104.243	87.470
45	149.697	105.852	105.852
50	162.174	104.243	124.233
55	173.417	99.468	142.055
60	183.341	91.670	158.777
56	191.868	81.087	173.892
70	198.936	68.040	186.939

Tab. 6-3 Síly působící na konstrukci od větru

6.8 Pevnostní výpočet konstrukce

6.8

Při návrhu nosné konstrukce pro fotovoltaické sluneční články bylo nezbytné provést pevnostní analýzu. Nosná konstrukce je určen pro fotovoltaickou elektrárnu schopnou natáčení kolem horizontální a vertikální osy. To znamená, že pevnostní analýza musí být provedena, pro každou variantu natočení panelu zvlášť. Jedná se tedy o časově velmi náročný výpočet. Pro řešení tohoto problému, bylo využito metody konečných prvků. Výpočty pomocí metody konečných prvků byly provedeny ve výpočtovém programu ANSYS 11.0.

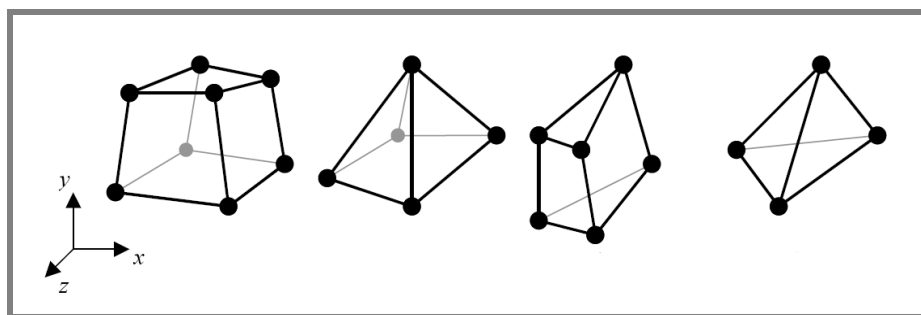
6.8.1 Metoda konečných prvků

6.8.1

Metoda konečných prvků neboli MKP je numerická metoda, díky níž je možné řešit rozsáhlé třídy inženýrských problémů. Vznik této metody se datuje zhruba do 50. let minulého století. Její rozvoj byl značně spojen s postupným rozvojem výpočetní techniky. Původně byla metoda konečných prvků vyvinuta pro výpočet konstrukcí v leteckém (stavba letounů společnosti Boeing), kosmickém (vývoj raket Apollo), jaderném či vojenském průmyslu. Teprve odtud se postupem let rozšířila i do průmyslové praxe.

Název metody zdůrazňuje skutečnost, že základním stavebním kamenem je prvek konečných rozměrů na rozdíl od infinitesimálního pohledu klasické pružnosti, která vychází z představy rovnováhy na nekonečně malém elementu [19].

Podmínkou výpočtu MKP je rozdělení oblasti, která je zájmem řešení, na konečný počet prvků neboli podoblastí. Tomuto rozdělení se říká *diskretizace*. Pro výpočet pomocí MKP existuje množství nejrozličnějších prvků, jak je vidět na obrázku 6-19. Použití typu prvků se liší dle řešeného problému. Každý tento prvek je charakterizován dimenzí, tvarem, počtem a polohou uzlů a pochopitelně i použitím. V těchto uzlech jsou pak hledány posuvy a natočení, potřebné k výpočtu napětí, sil a momentů. Pokud jsou požadovány kvalitnější výsledky, je třeba na modelu vytvořit hustější síť prvků.



Obr. 6-19 Prvky konečných rozměrů [19]

6.8.2 Prvky použité při tvorbě modelu

Nosná konstrukce je realizována jako příhradová konstrukce o rozměrech 23.100 x 8.650 x 900 mm. Z důvodů velikosti a složitosti konstrukce bylo využito zjednodušeného modelu. Při tvorbě modelu se využilo prvků BEAM 189, SHELL 93 a SOLID 92.

Prvek BEAM 189

Prvek tohoto typu je vhodný pro analýzu štíhlých, středně štíhlých až mírně silnějších příhradových konstrukcí. Prvek je založen na tzv. *Timoshenkovi* teorii nosníků. Zahrnuje i účinky namáhání. BEAM 189 je 3D kvadratický (tří-uzlový) prutový prvek. Jeden ze tří uzlů slouží pro orientaci prvku. Počet uzlů zajišťuje na rozdíl od prvku BEAM 188 (dvou-uzlový) přesnější výsledky. V každém uzlu může být celkem šest případně sedm stupňů volnosti. Tři posuvy a tři rotace jsou doplněny o sedmý stupeň, kterým je krut [20].

U tohoto prvku lze aplikovat klasické průřezy prutu nebo průřezy dle vlastních požadavků. Prvek umožňuje lineární zužování příčného průřezu.

Prvek SHELL 93

SHELL 93 je osmi-uzlový konstrukční prvek. Jeho geometrie je vhodná pro modelování zakřivené skořepiny. U prvku je možné nastavit proměnnou tloušťku. Tato tloušťka se mění hladce přes oblast prvku s tloušťkou v rohových uzlech. Každý uzel má celkem šest stupňů volnosti. Mezi tyto stupně jsou zahrnuty tři posuvy ve směru os X, Y, Z a tři rotace kolem os X, Y a Z [20].

Tento prvek se jeví jako nejvhodnější při vytváření konečnoprvkové sítě modelu rozměrných ocelových plechů a fotovoltaických slunečních panelů.

6.8.3 Tvorba výpočtového modelu

Výpočtový model nosné konstrukce byl vytvořen směrem tzv. *odspodu nahoru*. Tento název nám napoví, že model byl postaven od nejjednoduššího prvku (*odspodu*), až po požadovaný objem modelu (*nahoru*). Při postupu *odspodu nahoru* se nejprve vytvoří klíčové body, neboli jak je zvykem tzv. *keypointy*. Poté jsou *keypointy* postupně propojeny lajnami (*line*). Při vytvoření uzavřené oblasti lajnami je již možné aplikovat plochu (*area*). Pokud se opět z ploch vytvoří uzavřenou

oblast, můžeme aplikovat objem (*volume*). Na tomto objemu již může být vytvořena konečnoprvková síť. Stejně jako např. v parametrickém programu *Catia* lze využít při modelování funkcí jako je rotace nebo tažení po křivce. Model může být vytvořen i přesně opačným způsobem. Tomuto postupu říkáme *odshora dolů*. Při modelování byl však preferován způsob první.

Při tvorbě výpočtového modelu je nutné dodržovat předepsaný postup. Tento postup se řadí do tří základních etap:

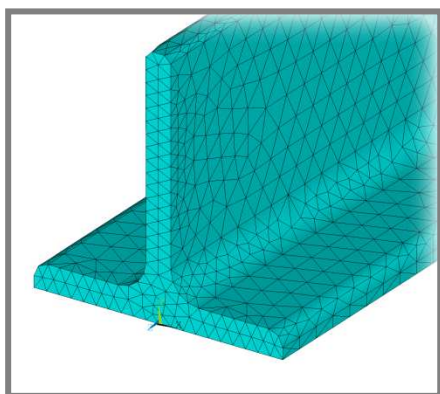
- *Preprocessing* - součástí je volba mechanických vlastností a konečnoprvkového modelu.
- *Solution* - volba okrajových podmínek a nastavení způsobu řešení
- *Postprocessing* - vyhodnocení konečných výsledků

Při nedodržení tohoto postupu, není možné dosáhnout požadovaného výsledku.

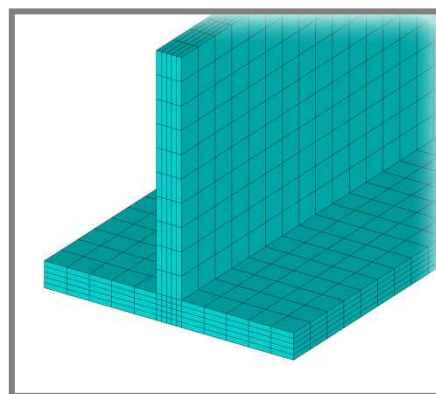
6.8.4 Postup při tvorbě modelu

6.8.4

Jak již bylo řečeno, při realizaci pevnostních výpočtů konstrukce bylo využito zjednodušeného výpočtového modelu vytvořeného pomocí prvků BEAM 189 a SHELL 93. Rozdíl od klasického modelování příhradových konstrukcí je ten, že není nutné pracně modelovat přesný tvar profilů, ale pouze jejich střednice, kterým jsou později přiřazeny jednotlivé vlastnosti profilů (průřez, materiál). Toto řešení značně urychluje čas výpočtu a snižuje požadavky na hardwarové a softwarové vybavení. Dochází ke značnému snížení počtu neznámých. Na obrázku 6-20 a 6-21 je vidět rozdíl těchto dvou variant.



Obr. 6-20 Náročné objemové modelování



Obr. 6-21 Využití prvku BEAM 189

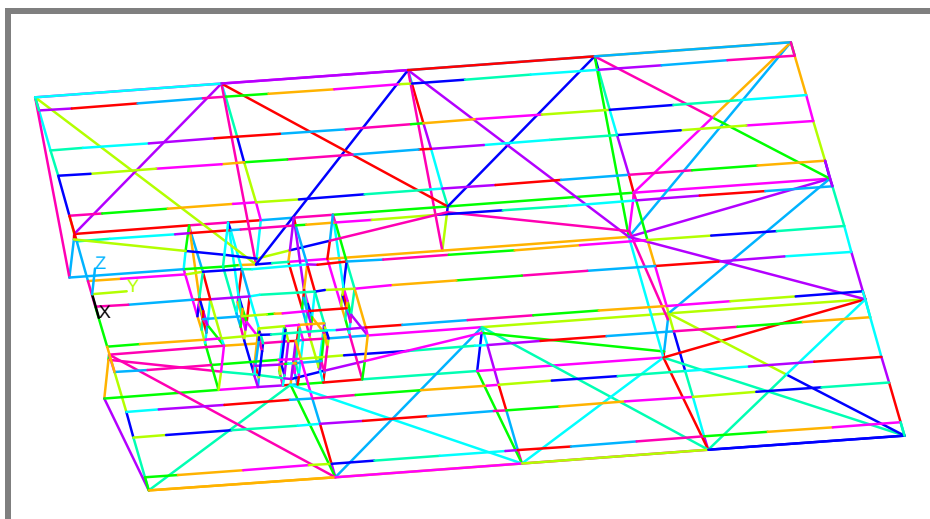
Před vlastním modelováním konstrukce bylo v bodě *preprocesor* nutné zadat mechanické vlastnosti materiálů a typy použitých prvků. Nosná konstrukce je navržena z ocelových a hliníkových profilů, které jsou modelovány prvkem BEAM 189, ocelové desky a solární panely pak prvkem SHELL 93. Solárním panelům byl přidělen materiál o hustotě $356,9 \text{ kg/m}^3$ vypočtený z objemu a hmotnosti jednoho panelu. Přesné údaje prvků a materiálů jsou zadány v tabulce 6-4.

Název	Prvek	ρ [t/mm ³]	E [MPa]	μ [-]
Ocelové profily	BEAM 189	$7,85 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^5$	0,3
Hliníkové profily	BEAM 189	$2,8 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^5$	0,3
Ocelové desky	SHELL 93	$7,85 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^5$	0,3
Solární panely	SHELL 93	$0,356 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^5$	0,3

Tab. 6-4 Mechanické vlastnosti materiálů a typy použitých prvků

E	[MPa]	- Yongův modul pružnosti
μ	[-]	- Poissonovo číslo
ρ	[t/mm ³]	- hustota materiálu

Prvním krokem při modelování nosné konstrukce, bylo vytvoření mraku bodů (*keypointů*). Souřadnice těchto jednotlivých keypointů byly získány z 3D modelu konstrukce v parametrickém modeláři Catia v5r16. Pro urychlení modelování byly souřadnice bodů zapsány do tabulky a do ANSYSu načteny hromadně. Poté byly keypointy propojeny lajnami (*line*) stejně jako je tomu u 3D modelu pomocí ocelových a hliníkových profilů (obrázek 6-22). V místech, kde bylo třeba namodelovat ocelové plechy nebo fotovoltaické panely se vymodelovali v lajnami uzavřených oblastech plochy (*areas*).



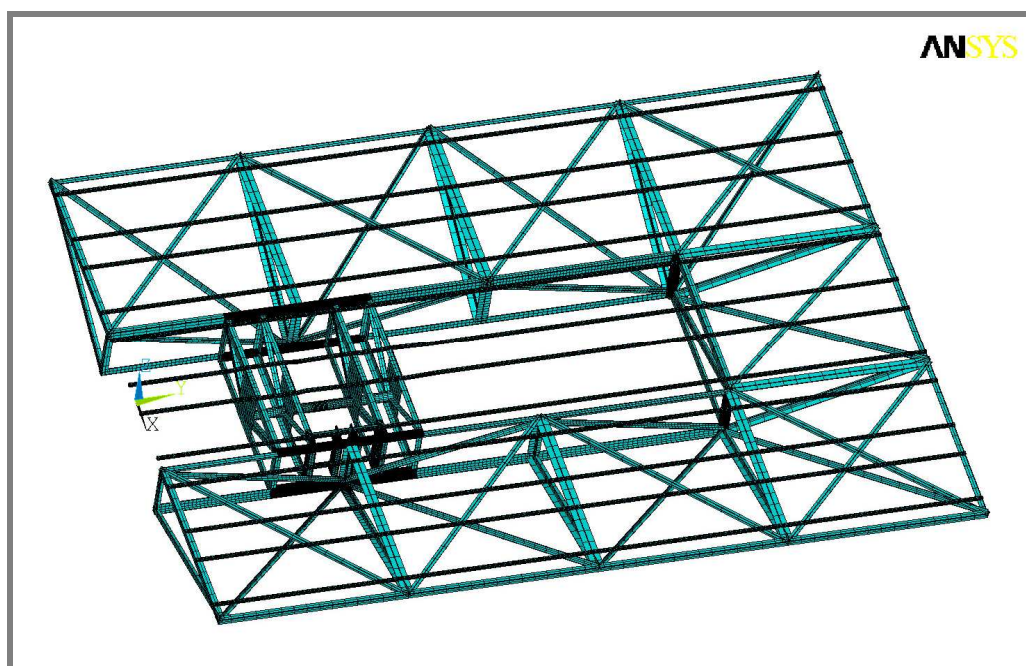
Obr. 6-22 Tvorba modelu nosné konstrukce pomocí lajn

Jednotlivé lajny bylo třeba nadělit na vhodný počet dílků. Počet, velikost a hustota těchto dílků byla volena dle umístění lajny. Pokud se jednalo o místa v oblasti uzlu, oblast byla z důvodů získání přesnějších výsledků dostatečně zahuštěna. Jednalo-li se o místa bez větší důležitosti, stačilo lajny nadělit hruběji. Počet dílků na lajně je roven počtu elementů.

Dalším krokem bylo přiřazení průřezových charakteristik jednotlivým lajnám. Úsečky se po jejich přiřazení budou v modelu tvářit jako plnohodnotné objemové profily. Veškeré průřezy profilů použitých na navrhované nosné konstrukci, jejich rozměry, poloha vůči lajnám či vzhled konečnoprvkové sítě, bylo třeba nejdříve vyplnit do knihovny prvků BEAM 189 (vlastnosti profilů lze průběžně zaměňovat). Z této knihovny se průřezy přiřazovali přímo na příslušné lajny. Pokud se jednalo o

symetrické průřezy, nebylo třeba průřez nijak orientovat. V případě průřezů L, T či U se k orientaci použily již stávající nebo speciálně vytvořené keypointy.

Posledním krokem v této etapě je vytvoření konečnoprvkové sítě. Kromě ocelových profilů na lajnách bylo zapotřebí vytvoření sítě i na plochách (ocelové desky, solární panely). Síť byla vytvořena jako *free*, v důležitých místech pak jako *mapovaná* (kvalitnější). K těmto plochám a panelům byly přiřazeny prvky SHELL 93.



Obr. 6-23 Nameschovaný poloviční výpočtový model nosné konstrukce

Okrajové podmínky

Před samotným výpočtem nosné konstrukce bylo nutné v etapě *solution* pečlivě zadat veškeré okrajové podmínky. Tyto okrajové podmínky mají za úkol maximálně přiblížit vlastní model a jeho pevnostní výpočet skutečnosti.

Jednou z nejdůležitější okrajových podmínek je vliv větru působící na nosnou konstrukci. Dle kapitoly „Zatížení větrem“ normy ČSN 27 0103 (Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů.) byly v kapitole 6.7 vypočteny normálové (složka Z) a tečné (složka X) síly působící na konstrukci při jednotlivých úhlech natočení konstrukce vůči větru. Tyto síly byly rozpočítány do keypointů na horní ploše konstrukce reprezentující fotovoltaické panely. Směr normálových a tečných sil záleží na směru působení větru (zepředu nebo zezadu).

Ve výpočtu bylo též nutné uvažovat vlastní tíhu konstrukce, což znamenalo aplikovat na model konstrukce tíhové zrychlení. Program ANSYS 11.0 obsahuje funkci, která je schopná tíhové zrychlení automaticky aplikovat na celý model. Aplikaci tohoto zrychlení opět komplikovalo natáčení konstrukce. Zrychlení muselo být stejně jako síla od větru rozloženo do složek X a Z dle jednoduchých vzorců:

$$g_x = g \cdot \sin \theta$$

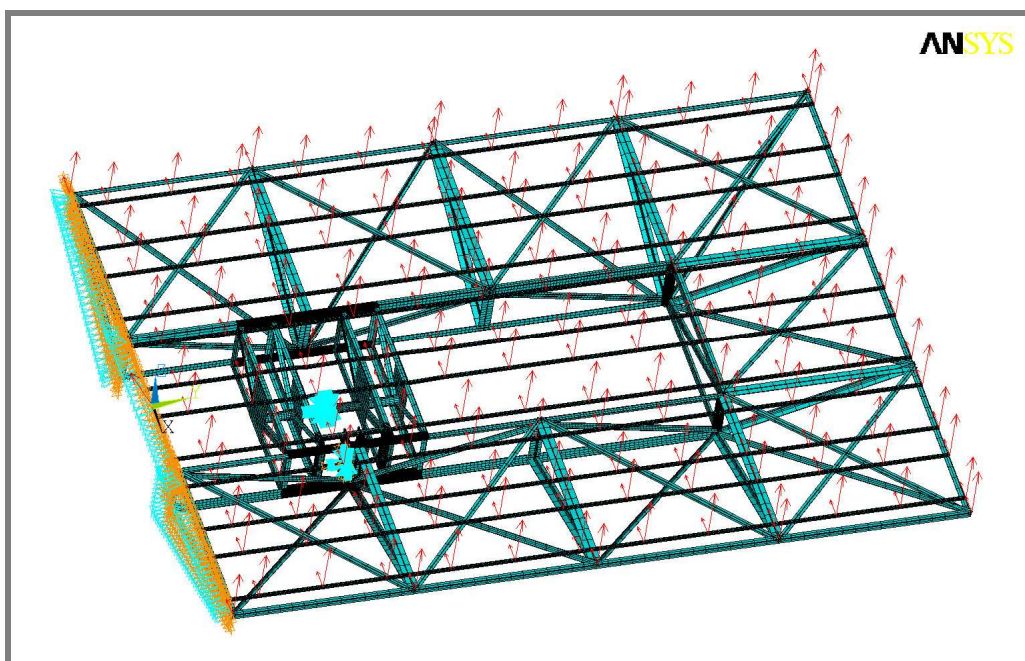
$$g_z = g \cdot \cos \theta$$

g	$[\text{mm/s}^2]$	- tíhové zrychlení
g_x	$[\text{mm/s}^2]$	- složka X tíhového zrychlení
g_z	$[\text{mm/s}^2]$	- složka Z tíhového zrychlení
β	$[\circ]$	- úhel natočení konstrukce vůči horizontální rovině

Součástí okrajových podmínek je i podmínka vazební. Celá konstrukce je uložena v ložiskách a její natáčení ovládáno přímočarými hydromotory. Jak ložiska, tak přímočaré hydromotory odebírají konstrukci stupně volnosti. Tyto stupně volnosti bylo třeba odebrat i na výpočtovém modelu. Místa, ve kterých je konstrukce uložena (*trubka, čep*) jsou vytvořeny pomocí prvků BEAM 189, které mají šest stupňů volnosti. V místech, kde jsou ložiska a hydraulické válce upevněny, bylo tedy odebráno všech šest stupňů volnosti (posuvy v osách X, Y a Z a rotace kolem os X, Y a Z).

Navrhovaná nosná konstrukce pro fotovoltaické panely je symetrická. Tvorba výpočtového modelu celé konstrukce by byla zcela zbytečná. Z těchto důvodů byla namodelována pouze polovina konstrukce. Při zadávání okrajových podmínek jsme tak museli všem nodům v dělicí rovině XZ modelu zadat symetrii, aby se model choval jako by to byl celý panel. Aplikovaná symetrie je vidět na obrázku 6-24.

Po zadání všech okrajových podmínek bylo již možné spustit výpočet konstrukce.



Obr. 6-24 Aplikace okrajových podmínek na poloviční model nosné konstrukce

6.8.5 Analýza výsledků výpočtového modelu

Při výpočtu nosné konstrukce bylo uvažováno několik zátěžných stavů. Tyto stavy se vycházely z možnosti natáčení konstrukce kolem horizontální osy v rozmezí 0° až 70° od horizontální roviny a směru uvažovaného větru. Pro oba uvažované směry působení větru na konstrukci (zepředu a zezadu) byly zátěžné stavy voleny po 5° . Do výpočtů byl zahrnut také zátěžný stav odpovídající sklonu 26° (krajní úhel maximálního dopadu slunečního záření). Pro zvolené stavy byl proveden výpočet konstrukce k meznímu stavu pružnosti.

Po dokončení výpočtu nosné konstrukce bylo třeba provést vyhodnocení získaných výsledků. Při vyhodnocení výsledků bylo použito normy ČSN 73 1401 (Navrhování ocelových konstrukcí.). Mez pevnosti v kluzu je u profilů a desek o tloušťce menší než 40 mm z materiálu 11 373 a 11 375 předepsána 235 MPa. Dle této normy je součinitel spolehlivosti konstrukce stanoven na hodnotu $k_k = 1,15$ což znamená, že maximální dovolené napětí v konstrukci nesmí přesáhnout hodnotu **204 MPa**.

Mezní stav pružnosti

Při analýze výsledků z výpočtového modelu navrhované nosné konstrukce bylo zjištěno, že konstrukce bude nejvíce namáhána při natočení konstrukce 70° od horizontální roviny s působením větru ze zadní strany. Tento výsledek byl předpokládán, neboť konstrukce je v této poloze nejvíce vystavena působení větru. Na konstrukci jsou nejvíce zatížena místa v oblasti modulu č. 4.

Pro výpočet součinitele bezpečnosti k meznímu stavu pružnosti k_k bylo použito podmínky plasticity *HMH*. Na konstrukci je maximální redukované napětí *HMH* rovno **197,389 MPa**.

Součinitel bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu pružnosti je dán vztahem:

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

k_k	[-]	- bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti
R_e	[MPa]	- mez pevnosti v kluzu
σ_{red}	[MPa]	- maximální redukované napětí

Součinitel bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu pružnosti je **$k_k = 1,19$** . Z tohoto výsledku vyplývá, že při zatížení větrem o 130 km/h nedojde u navrhované konstrukce k překročení mezního stavu pružnosti.

Redukované napětí podle podmínky *HMH* a celkový posun konstrukce ve všech zátěžných stavech jsou zaznamenány v tabulce 6-5 (vliv větru zepředu) a 6-6 (vliv větru zezadu)

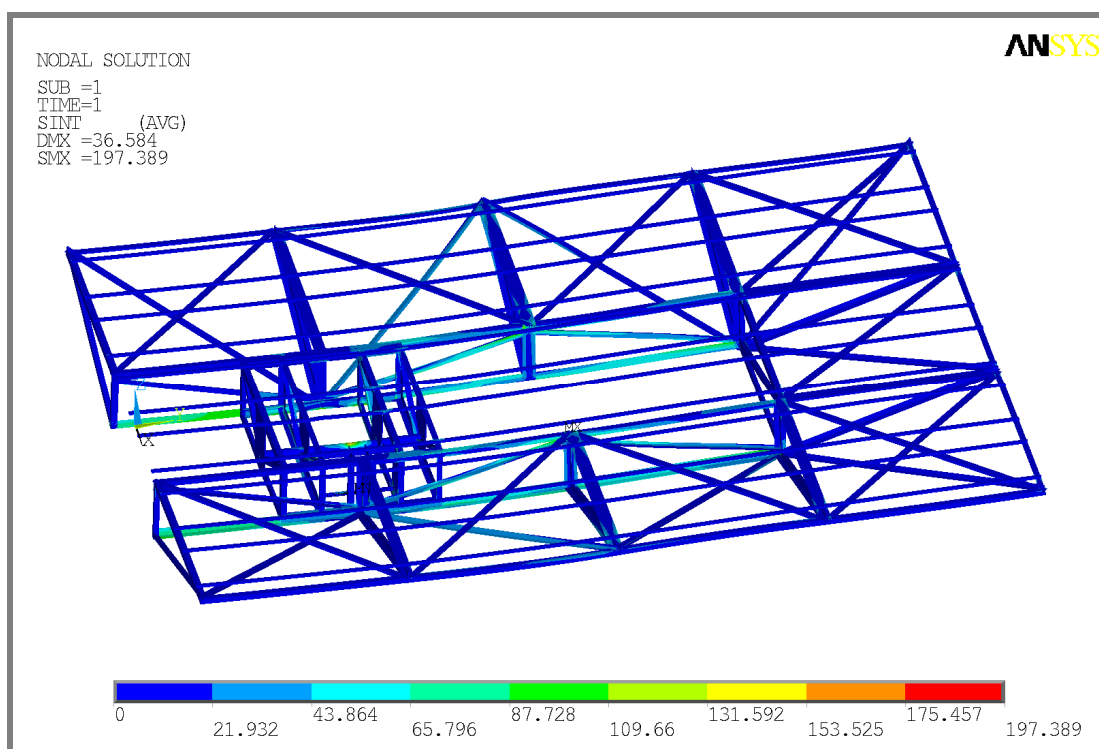
Sklon β [°]	Redukované napětí podle podmínky <i>HMH</i> [MPa]	Celkový posun konstrukce [mm]
0	77,943	16,492
25	86,361	12,197
26	86,315	11,687
30	85,490	9,536
35	81,427	6,478
40	77,476	4,293
45	80,874	7,213
50	99,183	10,152
55	116,697	13,024
60	132,790	15,763
65	146,917	18,36
70	159,394	21,82

Tab. 6-5 Redukované napětí podle podmínky *HMH* a celkový posun konstrukce (vliv větru zepředu)

Sklon β [°]	Redukované napětí podle podmínky HMM [MPa]	Celkový posun konstrukce [mm]
0	77,943	16,492
25	121,780	20,719
26	123,633	21,036
30	131,272	22,384
35	141,412	24,25
40	151,739	26,239
45	162,071	28,315
50	171,723	30,353
55	180,295	32,28
60	187,452	34,016
65	192,680	35,472
70	195,897	36,583

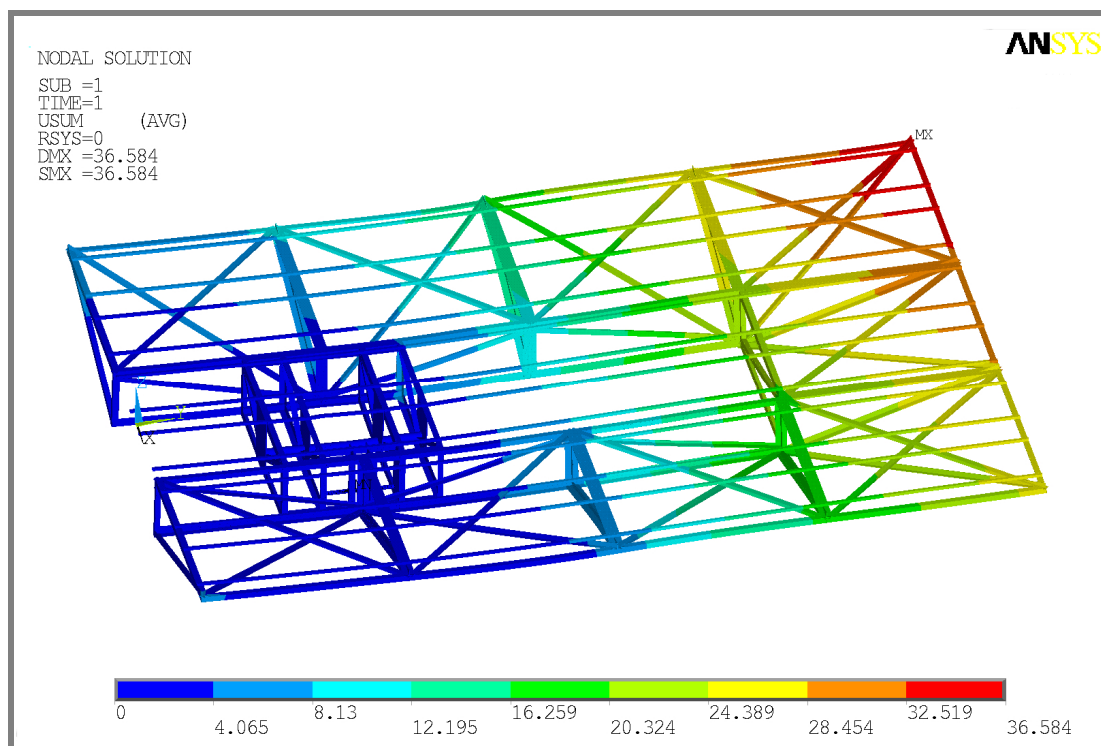
Tab. 6-6 Redukované napětí podle podmínky HMM a celkový posun konstrukce (vliv větru zezadu)

Obrázek 6-25 ukazuje rozložení redukovaného napětí podle podmínky *HMM* na nosné konstrukci se sklonem 70° od horizontální roviny. Konstrukce je nejvíce namáhána větrem zezadu. Na obrázku nejsou z důvodu lepší názornosti zobrazeny solární panely.



Obr. 6-25 Rozložení redukovaného napětí dle podmínky HMM

Na obrázku 6-26 je vidět celková deformace konstrukce. Podle barev můžeme vidět, kde dochází k největším posuvům konstrukce. Maximální celkový posun konstrukce je **36,6 mm**. Jedná se o stejný zátěžný stav jako u obrázku 6-25. U tohoto zátěžného stavu opět dochází k maximálním hodnotám.



Obr. 6-26 Zobrazení posuvů v jednotlivých místech konstrukce

6.9 Šroubové spojení modulů nosné konstrukce

6.9

Při návrhu nosné konstrukce, bylo nutné vyřešit spojení jednotlivých modulů v celek. Bylo potřeba zvolit takový spoj, který by z důvodu přepravy jednotlivých modulů umožňoval snadnou montáž.

Jako nejvhodnější bylo použito šroubových spojů. Tyto spoje jsou schopny přenášet veškeré druhy zatížení (v případě navrhované konstrukce je to stříh a tah). Výhodou je snadná rozebíratelnost. Při poškození některých z modulů umožňují jejich výměnu. Pro zvýšení spolehlivosti a zabránění uvolnění spoje je možno konstrukčních úprav.

Veškeré díly šroubového spoje jsou standardizovány. Při vhodném návrhu šroubového spoje je to tedy z hlediska výroby nenákladný spoj s nulovými provozními náklady. Náklady na případnou demontáž jsou minimální.

Pro spoj mezi jednotlivými moduly byly navrženy šrouby M16 se vzájemnou roztečí 120 mm. Návrh byl proveden podle doporučení normy ČSN 73 1411 (Rozteče, roztečné čáry, průměry šroubů nebo nýtů a těžištní osy pro šroubové a nýtové spoje.) [22].

Z důvodů zabránění napadení konstrukce korozí, byly z katalogu vybrány šrouby s povrchovou úpravou žárovým zinkováním.

6.10 Povrchová úprava

6.10

Při návrhu nosné konstrukce je také třeba navrhnout způsob povrchové úpravy. Tato úprava zabrání vzniku nežádoucí koroze na povrchu konstrukce.

6.10.1 Nátěrové hmoty

Jedním z mnoha možností, jak chránit konstrukci před korozí, je použití nátěrových antikorozních hmot. Díky velkému množství druhů nátěrových hmot, včetně barev s kovovými lamelami zvyšující korozní odolnost, se touto oblastí zabývá velké množství firem. Tento způsob ochrany patří dnes mezi nejpoužívanější.

Pokud ovšem porovnáme tento způsob například se zinkováním, je často nutné provádět opravné nátěry, což by bylo u takto velké konstrukce velmi náročné.

6.10.2 Galvanické zinkování

Dalším řešením je galvanické zinkování. Tento způsob je založen na elektrolytickém ději, při kterém se na vodivý materiál (funguje jako katoda) elektrochemicky vyloučí zinkový povlak. Povlak vzniká rozpouštěním zinku (funguje jako anoda). Vhodné pro zinkování jsou především železné díly a zinkové nebo litinové odlitky. Standardní tloušťka povlaku galvanických technologií se pohybuje v rozmezí 8-12 μm [23].

V České republice ovšem není galvanická zinkovna, která by měla okno (rozměry) potřebných rozměrů. U galvanického zinkování navrženého modulu č. 1 by musely být elektrody daleko od sebe, což by nezaručovalo kvalitní povrchovou úpravu po celém povrchu.

Tato povrchová úprava se ani nedoporučuje vzhledem k nízké korozní odolnosti a krátké životnosti. Mohlo by velmi rychle dojít ke korozi základního materiálu.

6.10.3 Žárové zinkování

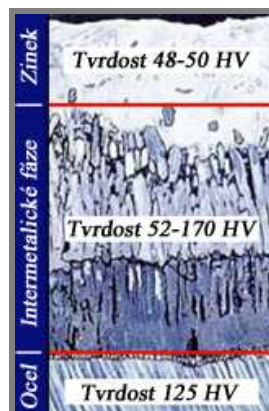
Jako nejvhodnějším řešením byla zvolena povrchová úprava žárovým zinkováním. Tvorba ochranného povrchu spočívá v ponoření dílů do roztaveného zinku. Na povrchu se tak vytvoří povlak slitiny železa a zinku (intermetalické fáze) s vrchní vrstvou čistého zinku. Tvrdost jednotlivých vrstev je vidět na obrázku 6-28). Tloušťka ochranné vrstvy se pohybuje v rozmezí od 40 μm do 150 μm .

Tento povrch zaručuje vysokou korozní odolnost. Mnohdy až po celou dobu životnosti konstrukce. Díky částečné a rovnoměrné oxidaci není nutná údržba. Povlak dobře odolává i mechanickému namáhání při transportu, skladování nebo montáži. Kvalitní povlak vzniká i v místech s obtížným přístupem (např. trubky je možné pozinkovat i uvnitř). Pokud bychom na povrch nanášeli nátěrovou hmotu, na rozích by byla vrstva velmi slabá. V případě žárového zinkování je v rozích stejně tlustá vrstva jako na okolních plochách.

V České republice je několik firem, které se žárovým zinkováním zabývají. Jednou z nejmodernějších zinkoven tohoto druhu je zinkovna Wiegel sídlící v Hradci Králové, kde jsou schopni takto rozměrově i hmotnostně velké konstrukce pokovit i bez příliš velkého dodatečného dočišťování zinkových steklin.

Dříve, než bude tato operace provedena, je třeba konstrukci řádně odmastit, odstranit barvu nebo porézní povrch. Tyto nečistoty by vedly k vadám zinkování. Aby nedocházelo po vytažení ze zinkové lázně v místech svaření a na styčných plochách k hromadění přebytečného zinku, je třeba v místech tvoření kapes vyvrtat technologické otvory pro jeho odtok. Odtokové otvory se musejí vyvrtat i do profilů, které jsou uzavřené.

Po zinkování je třeba provést kontrolu styčných ploch. Pokud by na některých místech bylo velké množství zinku, které by vadilo při spojování jednotlivých modulů, je třeba tyto plochy odstranit jemným broušením. Kontrolovat se musí též otvory pro šrouby. V případě těsnosti je třeba otvory upravit (kalibrovat), aby šel šroub zašroubovat volně.

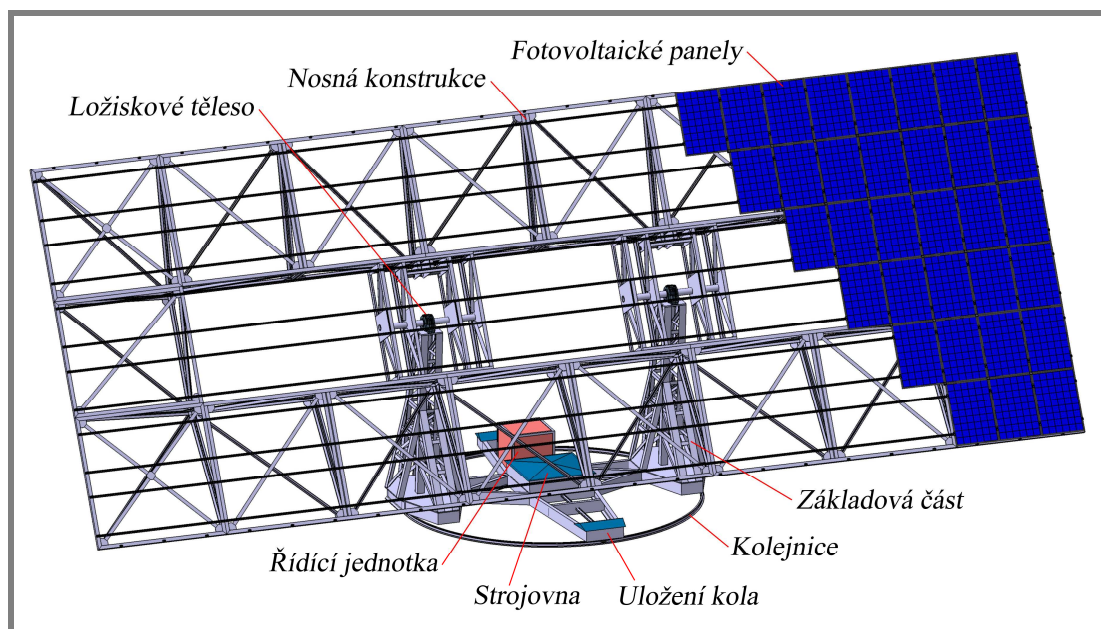


Obr. 6-27 Tvrdost povrchu po zinkování

6.11 Ideový návrh celkového uspořádání elektrárny

6.11

Na obrázku 6-28 je vidět předpokládané zařazení navrhované nosné konstrukce pro fotovoltaické panely do zástavby fotovoltaické elektrárny.

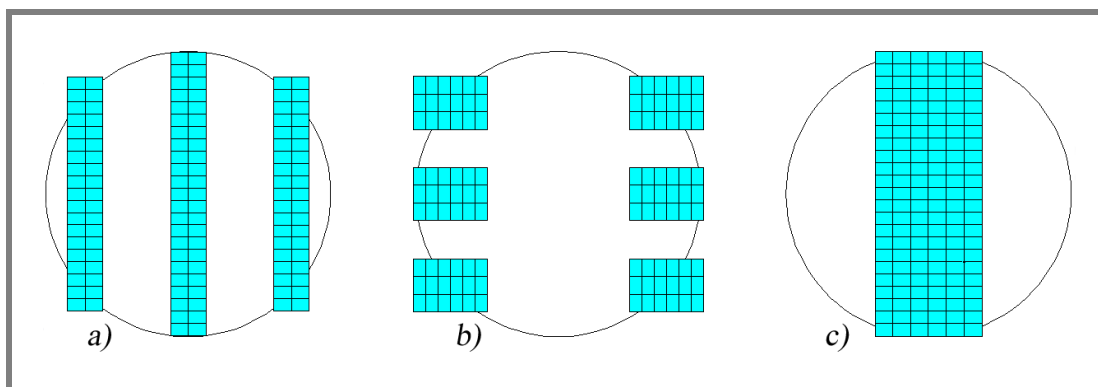


Obr. 6-28 Ideový návrh celkového uspořádání fotovoltaické elektrárny

6.12 Porovnání výkonu jednotlivých typů elektráren

Nosná konstrukce pro fotovoltaické panely byla navržena s cílem zvýšení výkonu fotovoltaických elektráren v závislosti na ploše pozemku, na které jsou elektrárny instalovány. Pro porovnání s navrhovanou konstrukcí byly vybrány dva typy fotovoltaických elektráren používané již v praxi. Jednalo se o elektrárnu bez možnosti natáčení za sluncem a elektrárnu s možností natáčení kolem jedné osy. U všech tří typů elektráren bylo užito fotovoltaických panelů KC200GHT-2 s maximálním výkonem 200 W.

Ve výpočtech maximálního možného výkonu jednotlivých elektráren byl uvažován pozemek o velikosti 415 m², který bude zabírat navrhovaná nosná konstrukce při natočení kolem vertikální osy o 360°. Na tento pozemek byl rozmístěn maximální počet elektráren daného typu. Mezi elektrárnami byla dodržována minimální vzdálenost, která je nutná z důvodu zabránění vzájemného stínění. Minimální vzdálenost byla vypočtena při natočení fotovoltaických panelů o 70° vůči horizontální rovině. Rozmístění elektráren bez možnosti natáčení je vidět na obrázku 6-29a, elektrárny s možností natáčení kolem jedné osy na obrázku 6-29b a elektrárna s možností natáčení kolem dvou os s navrhovanou nosnou konstrukcí na obrázku 6-29c.



Obr. 6-29 Rozložení jednotlivých typů elektráren na ploše 415m²

Při pokrytí pozemku prvním typem elektráren bylo použito 122 panelů s maximálním celkovým výkonem 24,4 kW. Je dokázáno, že u elektráren bez možnosti natáčení dochází ke snížení výkonu o 35%. Výsledný výkon je tedy **15,86kW**. U druhého typu bylo na pozemku použito pouze 108 fotovoltaických panelů s celkovým maximálním výkonem 21,6 kW. Zde dochází ke ztrátě pouze 5%. Konečný výkon elektrárny je tedy po přepočítání **20,52kW**. Navrhovaná nosná konstrukce byla navržena pro 144 panelů s celkovým výkonem **28,8kW**.

Z porovnání všech tří typů elektráren vyplývá, že největšího výkonu na ploše 415m² bude dosaženo při použití fotovoltaické elektrárny s možností natáčení kolem dvou os a nosnou konstrukcí o ploše 200m².

7 KONSTRUKČNÍ, TECHNOLOGICKÝ A EKONOMICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ

Zadáním diplomové práce bylo navržení ocelové nosné konstrukce pro fotovoltaické sluneční články, která by byla schopna natáčení kolem horizontální a vertikální osy. Nosná konstrukce bude součástí sluneční elektrárny. Podmínkou byla plocha konstrukce o rozloze 200m², která má vzdorovat z pevnostního hlediska větru o maximální rychlosti 130 km/h .

Nosná konstrukce byla navržena jako příhradová konstrukce skládající se ze čtyř typů menších modulů koncipovaných jako svařence. Jednotlivé typy se v sestavě nosné konstrukce opakují. Díky možnosti opakování modulů se docílilo podstatného snížení nákladů na výrobu svařovacích šablon. Dle polohy v konstrukci se mohou moduly daného typu lišit rozmístěním připojovacích otvorů. Panel byl složen celkem ze čtrnácti modulů. Jejich rozměry jsou navrženy tak, aby mohl být povrch konstrukce chráněn proti korozi žárovým zinkováním. Spojení modulů v jeden celek bude zajištěno pomocí šroubů. Moduly nosné konstrukce jsou svařeny z válcovaných profilů, trubek a plechů z konstrukční oceli 11 373. Ve střední části navrhovaného panelu jsou umístěny dva moduly umožňující uchycení celé konstrukce k základové části s možností natáčení kolem horizontální osy. Natáčení umožňuje uložení konstrukce do valivých soudečkových ložisek, které jsou přichyceny k základové konstrukci prostřednictvím ložiskových těles. Vlastní natáčení je zajištěno pomocí dvou přímočarých hydromotorů. Tlakový olej pro pohon přímočarých hydromotorů bude dodáván ze speciálně navrženého hydraulického agregátu, který bude řešen příslušným hardwarem a softwarem.

Při návrhu konstrukce bylo uvažováno, že pohyb kolem vertikální osy bude zajišťovat základová část konstrukce, která však nebyla problémem řešení.

Nosná konstrukce byla navržena pro fotovoltaické sluneční panely KC200GHT-2. Připevnění panelů bylo vyřešeno pro svou jednoduchost využitím KlickTop systému a několika speciálních příchytů. Toto řešení by mohlo být využito i pro upevnění fotovoltaických panelů o jiných rozměrech.

Navrhovaná nosná konstrukce byla podrobena pevnostní analýze ve výpočtovém programu ANSYS 11.0. Na konstrukci byla aplikována síla od větru, jejíž hodnoty byly vypočteny dle normy ČSN 27 0103 (Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů.). Výpočty byly provedeny pro dva směry působení větru a to zepředu a zezadu při úhlu natočení nosné konstrukce vůči horizontální rovině od 0° do 70°. Bylo zjištěno, že konstrukce bude nejvíce namáhána při působení větru zezadu při natočení panelu o 70° od horizontální roviny, přičemž mezní stav pružnosti nebyl překročen.

Šroubové spoje byly navrženy dle normy ČSN 73 1411 (Rozteče, roztečné čáry, průměry šroubů nebo nýtů a těžištní osy pro šroubové a nýtové spoje.).

Součástí diplomové práce bylo vytvoření 3D modelu. Model a výkresová dokumentace byla vytvořena v programu Catia v5r16 a AutoCAD 2005.

Návrh nosné konstrukce pro fotovoltaické sluneční články o rozměrech 200 m² s možností natáčení kolem vertikální a horizontální osy s sebou přináší navýšení zisku výkonu fotovoltaických elektráren v závislosti na zastavěné ploše.

Na tuto diplomovou práci by bylo vhodné navázat návrhem základové konstrukce s možností natáčení kolem vertikální osy.

Součástí diplomové práce je i ekonomický rozbor. Rozbor byl rozdělen do čtyř tabulek níže.

Tab. 7-1 Hutní materiál

Název polotovaru	Rozměr [mm]	Norma	ks	Cena Kč/m(tab)	Cena Kč/Σks
Plech 5	1000x2000	ČSN 42 5310	1	2146,20	2146,20
Plech 8	1250x2500	ČSN 42 5310	3	5365,47	16096,41
Plech 10	1000x2000	ČSN 42 5310	1	4292,38	4292,38
Plech 14	1000x2000	ČSN 42 5310	2	6009,33	12018,66
Tyč kruhová	ø80x1100	DIN 1013-1	2	1084,76	2386,47
Tyč čtvercová Al.	4HR 50-1100	EN 755-4	1	920,16	1012,18
Tyč čtvercová Al.	4HR 63-5000	EN 755-4	2	1458,62	14586,20
Tyč rovnoramenná	L 80x80-6000	ČSN 42 5541	65	223,80	14547,00
Tyč průřezu U	U 120-6000	ČSN 42 5570	4	331,50	1326,00
Tyč Průřezu T	T 80-6000	ČSN EN 10055	47	277,90	13061,30
Tyč nerovnoramenná	L 120x80-6000	ČSN EN 10056	25	294,90	7372,50
Trubka bezešvá	TR ø80x10-400	ČSN 42 5715.01	1	1 121,30	448,52
Trubka bezešvá	TR ø140x10-2240	ČSN 42 5715.01	2	1 189,20	5327,62
Al. Profil Solo 05	40x40-6000	430 070	48	580,00	27840,00
				Celková cena	122 461 Kč

Tab. 7-2 Normalizované součástky

Název	Norma	ks	Cena Kč/100ks	Cena Kč/ks	Cena Kč/Σks
Šroub M8x30	DIN 7991	24	207,80	2,08	49,87
Šroub M8x40	DIN 7991	96	179,87	1,80	172,68
Šroub M8x50	DIN 7991	276	407,60	4,08	1124,98
Šroub M6x60	ČSN 02 1155.59	115	279,70	2,80	321,66
Šroub M8x20	ČSN 02 1103.59	184	213,33	2,13	392,53
Šroub M16x40	ČSN 02 1103.59	836	900,44	9,00	7527,68
Matka M6	ČSN 02 1401.59	115	29,48	0,29	33,90
Matka M8	ČSN 02 1401.59	280	41,37	0,41	115,84
Matka M16	ČSN 02 1401.59	836	217,84	2,18	1821,14
Podložka 8,4	ČSN 02 1702.19	280	36,29	0,36	101,61
Podložka 17	ČSN 02 1702.19	836	205,40	2,05	1717,14
Podložka 16	ČSN 02 1740.19	836	42,27	0,42	353,38
Podložka 63	ČSN 02 1702.19	2	243,24	2,43	4,86
Závlačka 8x80	ČSN 02 178	2	336,60	3,37	6,73
				Celková	13 744 Kč

Tab. 7-3 Ostatní prvky

Název	Označení	ks	Cena Kč/ks	Cena Kč/Σks
Fotovoltaický panel	KH200GHT-2	144	20300,00	2923200,00
KlikTop systém	Klick In	276	2,50	690,00
Těčko	Eco 6	252	58,80	14817,60
Plastové Záslepky 40x40	CZ 556	24	6,70	160,80
Soudečkové ložisko	22232 CCK/W33	2	21644,48	43288,96
Ložiskové těleso	SNL 532	2	17727,75	35455,50
Upínací pouzdro	H 313	2	432,45	864,90
Axiální vodící kroužky	FRB 17/290	4	856,35	3425,40
Těsnící kroužky	TSN 532 G	4	673,65	2694,60
Hydraulické válce	HZ-UHN210	2	25000,00	50000,00
Agregát		1	17000,00	17000,00
			Celková cena	3 091 598 Kč

Tab. 7-4 Povrchová úprava

Druh povrchové úpravy	Hmotnost konstrukce [kg]	Cena Kč/kg	Cena Kč
Žárové zinkování	7984	12,25	97804,00
			Celková cena 97 804 Kč

V ekonomickém rozboru byla uvažována konstrukce včetně fotovoltaických panelů KH200GHT-2 a zařízení sloužící k ovládání natáčení konstrukce kolem horizontální osy. Do rozboru nebyla zahrnuta cena za veškerou práci.

Cena navrhované nosné konstrukce pro fotovoltaické panely byla vyčíslena na **3.325.607 Kč** (133.371 € při kurzu 24,935CZKEUR ke dni 16.5.2008).

Cena samotné nosné konstrukce bez fotovoltaických panelů činí **402.407 Kč** (16.138 €). Veškeré ceny jsou uvedeny bez DPH.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NASA [online]. c2008, [cit. 2008-01-05].
Dostupné z: < <http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/assembly/html/sts088-719-059.html> >
- [2] *Internetová encyklopedie Wikipedia* [databáze online]. USA, 2006 [cit. 2008-05-02]. Dostupné z URL < http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8Dl%C3%A1nek >
- [3] Murtinger, Karel. *Fotovoltaika – elektřina ze slunce*. 1. Vyd. Brno: ERA group spol. s r.o., 2007. 92 s. ISBN 978-80-7366-100-7.
- [4] *Czech RE Agency* [online]. c2008, [cit. 2008-03-20].
Dostupné z: < <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika> >
- [5] *Pesos – solární produkty* [online]. c2008, [cit. 2008-03-20].
Dostupné z: < http://www.cz-elektronika.cz/fotovoltaika-produkty-FV_panely_SHARP >
- [6] *Bydlení pro každého* [online]. c2007, [cit. 2008-01-11]. Dostupné z: < http://www.bydleniprokazdeho.cz/clanek.php?id_clanky=845 >
- [7] *PRE fórum: časopis pro zákazníky*. Č. 8 (červenec 2004). Praha: Pražská energetika, a.s. Vychází měsíčně.
- [8] *Schletter – Solar montagesysteme* [online]. c2008, [cit. 2008-01-13].
Dostupné z: < <http://solar.schletter.de/index.php?lang=DE&seite=produkte#32> >
- [9] *Solarenvi, s.r.o.- Sluneční elektrárny* [online]. c2008, [cit. 2008-01-05].
Dostupné z: < <http://www.solarenvi.cz/show.php?ida=6&ids=3&par=> >
- [10] *Solar-Solar.com* [online]. c2008, [cit. 2008-03-20]. Dostupné z: < <http://www.solar-solar.com/default.asp?p=fotogalerie&lang=cz> >
- [11] *Foto.eu* [online]. c2008, [cit. 2008-03-20]. Dostupné z: < <http://www.fovo.eu/projekt.htm> >
- [12] *Solar energy systems*, Straßkirchen: KRINNER, 2008. 8s.
- [13] *Item - General catalogue MB7* [online]. c2008, [cit. 2008-05-03]
Dostupné z: < <http://www.item.info/en/products/novelties.html> >
- [14] *KC240GHT2*, Praha: KYOCERA, 2007. 2s.

- [15] *SKF – Principy a volby použití ložisek* [online]. c2008, [cit. 2008-03-05]. Dostupné z: < http://www.skf.com/portal/skf_cz/home/products?contentId=259570&lang=cs >
- [16] *Jingtong Bering co. , LTD.* [online]. c2008, [cit. 2008-05-06]. Dostupné z: <<http://www.jtbearing.net/english/uploadfiles/200741495519991.gif>>
- [17] *SNL plummer block housing*, Sweden: SKF, 2008. 98s.
- [18] ČSN 27 0103 „*Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů*“, vyd. Praha: Český normalizační institut, 1990. 68s.
- [19] Vrbka, Vaverka. *Metoda konečných prvků - přednáška*. Brno. 2007. 134s.
- [20] SAS IP, Inc. *Nápověda programového systému ANSYS 11.0*
- [21] ČSN 73 1411 „*Rozteče, roztečné čáry, průměry šroubů nebo nýtů a těžištní osy pro šroubové a nýtové spoje*“, vyd. Praha: Český normalizační institut, 1998. 28s.
- [22] *GALVA – galvanické zinkování* [online]. c2008, [cit. 2008-05-06]. Dostupné z: < <http://www.galva.cz/zinkovani> >

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

A	[m ²]	- čistá plocha prvku bez otevřených polí a děr
A_0	[m ²]	- celková plocha prvku dána jeho obrysem
A_k	[m ²]	- průmět čisté plochy do roviny kolmé na směr větru
B	[mm]	- tloušťka ložiska
C	[kN]	- dynamická únosnost
C_0	[kN]	- statická únosnost
D	[mm]	- průměr ložiska
E	[MPa]	- Yongův modul pružnosti
F	[N]	- výsledná síla
$F_{1\varpi}$	[N]	- normová síla působící na konstrukci za provozu
$F_{2\varpi}$	[N]	- normová síla působící na konstrukci mimo provoz
F_n	[N]	- normálová síla
$F_{R,\check{c}}$	[N]	- reakční síla na čepu
$F_{R,\check{c}x}$	[N]	- složka X reakční síly na čepu
$F_{R,\check{c}z}$	[N]	- složka Z reakční síly na čepu
$F_{R,t}$	[N]	- reakční síla na trubce
$F_{R,tx}$	[N]	- složka X reakční síly na trubce
$F_{R,tz}$	[N]	- složka Z reakční síly na trubce
F_t	[N]	- tečná síla
F_{ϖ}	[N]	- výsledná normová síla
$F_{\varpi 1P\beta}$	[N]	- normová síla působící na průmět roviny prvku pod úhlem β do roviny kolmé na směr větru zepředu
$F_{\varpi 1Z\beta}$	[N]	- normová síla působící na průmět roviny prvku pod úhlem β do roviny kolmé na směr větru zezadu
$F_{\varpi 2P}$	[N]	- normová síla působící na plochu prvku zepředu
$F_{\varpi 2Z}$	[N]	- normová síla působící na plochu prvku zezadu
$F_{\varpi P0}$	[N]	- výsledná síla působící na konstrukci zepředu
$F_{\varpi P\beta}$	[N]	- výsledná síla působící na konstrukci se sklonem β zepředu
$F_{\varpi Z0}$	[N]	- výsledná síla působící na konstrukci zezadu
$F_{\varpi Z\beta}$	[N]	- výsledná síla působící na konstrukci se sklonem β zezadu
I_{max}	[A]	- maximální proud
L	[mm]	- délka profilu vystaveného větru
P_{max}	[W]	- maximální výkon
R_e	[MPa]	- mez pevnosti v kluzu
U_{max}	[V]	- maximální napětí
a	[mm]	- vzdálenost mezi jednotlivými profily
d_h	[mm]	- průměr hřídele
d_p	[mm]	- průměr pístu
d_{pst}	[mm]	- průměr pístnice
d_t	[mm]	- průměr trubky
g	[mm/s ²]	- tíhové zrychlení
g_x	[mm/s ²]	- složka X tíhového zrychlení
g_z	[mm/s ²]	- složka Z tíhového zrychlení
h	[mm]	- výška profilu vystaveného větru
k_k	[-]	- bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti
l	[mm]	- zdvih pístnice

m_l	[kg]	- hmotnost ložiska (včetně pouzdra)
p	[MPa]	- jmenovitý tlak
p_c	[MPa]	- tlak v závitu
v_{ϖ}	[m/s]	- rychlost větru
α	[-]	- součinitele vyplnění
θ	[°]	- úhel natočení konstrukce vůči horizontální rovině
ζ_{ϖ}	[-]	- tvarový součinitel
μ	[-]	- Poissonovo číslo
ρ	[t/mm ³]	- hustota materiálu
σ_{red}	[MPa]	- maximální redukované napětí
φ	[-]	- součinitel zastínění
ϖ_1	[Pa]	- tlak od větru působící na konstrukci za provozu
$\varpi_{1,2}$	[Pa]	- tlak od větru působící na konstrukci
ϖ_2	[Pa]	- tlak od větru působící na konstrukci mimo provoz

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Mezinárodní kosmická stanice Imagery [1]	14
Obr. 1-2 Fotovoltaické články [4]	15
Obr. 1-3 Fotovoltaický panel [5]	16
Obr. 1-4 Elektrárna bez možností natáčení za sluncem [8]	17
Obr. 1-5 Systém upevnění panelů na stěny a střešní krytiny [8]	18
Obr. 1-6 Elektrárna s možností natočení kolem jedné osy [10]	19
Obr. 1-7 Elektrárna na volné ploše (solární park) [11]	20
Obr. 1-8 Elektrárna s možností natočení kolem dvou os [11]	20
Obr. 5-1 Ukázka detailů nosné trubkové konstrukce pro fotovoltaické panely [12]	25
Obr. 5-2 Montážní systém Kit firmy Item [13]	26
Obr. 6-1 Sestava nosné konstrukce (bez instalovaných fotovoltaických panelů)	27
Obr. 6-2 Sestava nosné konstrukce (včetně části fotovoltaických panelů)	27
Obr. 6-3 Modul č. 1	28
Obr. 6-4 Modul č. 2	28
Obr. 6-5 Modul č. 3	29
Obr. 6-6 Modul č. 4	30
Obr. 6-7 Fotovoltaický panel KC200GHT-2 - rozměry	30
Obr. 6-8 KlickTop systém, T-příchytka	31
Obr. 6-9 Jiné užití KlickTop systému	31
Obr. 6-10 Upevnění fotovoltaických panelů pomocí speciálních příchytok	32
Obr. 6-11 Soudečkové ložisko [16]	33
Obr. 6-12 Ložisková těleso SNL 532 [17]	34
Obr. 6-13 Přímočarý hydromotor UHN 210	35
Obr. 6-14 Detailní pohled na uložení nosné konstrukce	35
Obr. 6-15 Schéma zapojení ovládání přímočarých hydromotorů	36
Obr. 6-16 Uvažované směry proudění větru	39
Obr. 6-17 Ukázka zastínění prvků	39
Obr. 6-18 Rozložení normové síly na složku tečnou a normálovou	42
Obr. 6-19 Prvky konečných rozměrů [19]	44
Obr. 6-20 Náročné objemové modelování	45
Obr. 6-21 Využití prvku BEAM 189	45
Obr. 6-22 Tvorba modelu nosné konstrukce pomocí lajn	46
Obr. 6-23 Nameschovaný poloviční výpočtový model nosné konstrukce	47
Obr. 6-24 Aplikace okrajových podmínek na poloviční model nosné konstrukce	48
Obr. 6-25 Rozložení redukovaného napětí dle podmínky HMM	50
Obr. 6-26 Zobrazení posuvů v jednotlivých místech konstrukce	51
Obr. 6-27 Tvrdost povrchu po zinkování	53
Obr. 6-28 Ideový návrh celkového uspořádání fotovoltaické elektrárny	53
Obr. 6-29 Rozložení jednotlivých typů elektráren na ploše 415 m ²	54

SEZNAM TABULEK

Tab. 6-1 Reakční síly na trubce (P - od předního větru, Z – od zadního větru)	37
Tab. 6-2 Reakční síla na čepu (P – od předního větru, Z – od zadního větru)	37
Tab. 6-3 Síly působící na konstrukci od větru.....	43
Tab. 6-4 Mechanické vlastnosti materiálů a typy použitých prvků.....	46
Tab. 6-5 Redukované napětí podle podmínky HMM a celkový posun konstrukce (vliv větru zepředu)	49
Tab. 6-6 Redukované napětí podle podmínky HMM a celkový posun konstrukce (vliv větru zezadu).....	50
Tab. 7-1 Hutní materiál	56
Tab. 7-2 Normalizované součástky	56
Tab. 7-3 Ostatní prvky	57
Tab. 7-4 Povrchová úprava	57

SEZNAM PŘÍLOH

Vytištěné přílohy:

Sestava nosné konstrukce	S – 0 – D91 – 13/00
Sestava modulu č. 1a	S – 2 – D91 – 13/01
Sestava modulu č. 1b	S – 2 – D91 – 13/02
Sestava modulu č. 1c	S – 2 – D91 – 13/03
Sestava modulu Modul č. 2a	S – 3 – D91 – 13/04
Sestava modulu č. 2b	S – 3 – D91 – 13/05
Sestava modulu č. 3a	S – 3 – D91 – 13/06
Sestava modulu č. 3b	S – 3 – D91 – 13/07
Sestava modulu č. 4	S – 1 – D91 – 13/08
Kusovník sestavy modulu č.1a	K – 4 – D91 – 13/01
Kusovník sestavy modulu č.1b	K – 4 – D91 – 13/02
Kusovník sestavy modulu č.1c	K – 4 – D91 – 13/03
Kusovník sestavy modulu č.2a	K – 4 – D91 – 13/04
Kusovník sestavy modulu č.2b	K – 4 – D91 – 13/05
Kusovník sestavy modulu č.3a	K – 4 – D91 – 13/06
Kusovník sestavy modulu č.3b	K – 4 – D91 – 13/07

Poznámka: Výkresová dokumentace neobsahuje svařovací sestavy jednotlivých modulů.