
ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem dvouosého solárního trackeru pro koncentrační fotovoltaické panely. V úvodní části je stručně popsán vývoj fotovoltaických čipů až k pokročilým koncentračním technologiím a jsou ukázány běžné konstrukce pro solární elektrárny.

Druhá část se zabývá samotným konstrukčním návrhem trackeru. Obsahuje volbu varianty nejlépe splňující zadané požadavky, výpočty pro zatížení od větru a dimenzování jednotlivých uzlů.

V závěrečné části je poté zhodnocení práce a ekonomický rozbor s návrhy možných zlepšení konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dvouosý solární tracker, sluneční energie, koncentrační fotovoltaika.

SUMMARY

The purpose of this dissertation is to design the dual-axis solar tracker carrying the concentrator photovoltaic panels. The preamble of the dissertation shortly examines a photovoltaic cells development up to concentrators and the common support structures of solar power plants.

The second part focuses on the engineering process itself. It includes the choice of the variant that suits best the requirements, the calculations of wind load and design of the various joints.

The conclusion part is devoted to the evaluation, economy analysis of the construction and proposals for improvements.

KEYWORDS

Dual-axis solar tracker, solar power, concentrator photovoltaics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍ, David. *Konstrukce dvouosého solárního trackeru*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 73 s. Diplomová práce. VUT Brno, FSI UK. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Klapka, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Čestně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, za použití uvedené literatury a pod odborným vedením Ing. Milana Klapky, Ph.D.

V Brně, dne 19.5.2011

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mi byli nápomocní při tvorbě této diplomové práce. Zvláště bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Milanovi Klapkovi, Ph.D. za vstřícný přístup a pomoc při shánění některých zdrojů a dále těm, kteří mi obětovali svůj čas při konzultacích. To byli především pánové doc. Ing. Michal Černý, CSc. a Ing. Jan Brandejs z VUT FSI a dále pan pplk. Doc. Ing. Pavel Mañas, Ph.D. z Univerzity obrany v Brně.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Přehled současného stavu poznání	12
1.1 Běžné fotovoltaické technologie.....	12
1.1.1 Technologie tlustých vrstev	13
1.1.2 Technologie tenkých vrstev	13
1.1.3 Trendy vývoje	13
1.2 Nosné konstrukce pro FV panely.....	15
1.2.1 Střešní panely, panely na volných prostranstvích	15
1.2.2 Jednoosé solární trackery.....	16
1.2.3 Dvouosé solární systémy	16
1.3 Koncentrační technologie	17
1.3.1 Zrcadlové	18
1.3.2 Čočkové	21
1.3.3 Speciální.....	21
1.4 Nosné konstrukce pro koncentrační panely.....	21
1.4.1 Sloupové	22
1.4.2 Nízkoprofilové	22
1.5 Řízení a pohyb trackerů.....	23
1.5.1 Aktivní	23
1.5.2 Pasivní.....	24
1.5.3 Časovací.....	25
1.6 Pohony.....	25
1.6.1 Lineární aktuátor	25
1.6.2 Slewing drives	25
2 Formulace řešeného problému a jeho technická a vývojová analýza	27
3 Vymezení cílů práce	29
4 Návrh metodického přístupu k řešení	30
4.1 Návrh postupu prací konstrukce v DP.....	30
4.2 Prostředky využitě pro konstrukci v DP.....	30
5 Návrh variant řešení a výběr optimální varianty	32
5.1 Funkční požadavky na konstrukci.....	32
5.2 Koncepce trackeru.....	32
5.2.1 Pohon náměru.....	34
5.2.2 Pohon odměru	35
5.2.3 Stavba a výtěžnost	36
5.2.4 Korozivzdornost	37
5.2.5 Závity v tenkostěnných profilech.....	37
6 Konstrukční řešení.....	39
6.1 Určení zátěžných účinků	39
6.1.1 Obecná rovnice pro výpočet účinku větru na řady panelů.....	39
6.1.2 Určení nejnebezpečnějšího způsobu zatěžování	44
6.2 Pohybová soustava	46
6.2.1 Pohon náměru.....	46
6.2.2 Pohon odměru	52
6.3 Pojezd	54
6.3.1 Rozmístění a popis rolen.....	54

6.3.2 Ochrana proti nadzvednutí	56
6.4 Nosné trubky panelů	57
6.4.1 Jednotlivá uložení	57
6.5 Ochrana proti korozi	59
6.5.1 Ochrana aktuátoru a elektrického příslušenství.....	59
6.5.2 Ochrana konstrukce	60
6.6 Smontovatelnost	60
7 Závěr.....	62
7.1 Ekonomický rozbor řešení	62
Seznam použitých zdrojů	64
Seznam použitých symbolů a veličin.....	67
Seznam obrázků a grafů	69
Seznam tabulek.....	71
Seznam příloh.....	72
Tabulkové přílohy TB	72
Obrázkové přílohy OP	72
Výpočtové přílohy VP	72
Výkresové přílohy VDP	72

ÚVOD

Lidská společnost je závislá na elektrické energii. Tempo spotřeby elektřiny ve společnosti a průmyslu roste zhruba o tři procenta ročně s rostoucí prognózou. Zároveň ubývá fosilních paliv, která nyní tvoří hlavní zdroj elektrické energie. Elektřina se z fosilních paliv získává spalováním, což sebou nese také ekologické zatížení planety. Nakolik jsou tyto alarmující studie pravdivé, nebo zdali se jedná pouze o nafouknuté bubliny, je v tuto chvíli obtížně prokazatelné. Průmysl, včetně toho energetického, se však řídí státními regulemi a případně i mezinárodními dohodami. Ty momentálně dávají za úkol snižování objemu vypouštěných skleníkových plynů a zvyšování podílu obnovitelných zdrojů při výrobě elektřiny. Příkladem budiž samotná Evropská unie, která jednotlivým státům určuje limity pro vypouštění skleníkových plynů rozdělováním tzv. emisních povolenek.

Jedním z alternativních řešení je získávání energie z obnovitelných zdrojů, ovšem má mnoho úskalí. Větrné, vodní, solární, přílivové a další obdobné elektrárny vyžadují ke svému provozu specifické přírodní podmínky, jinak jejich stavba a provoz nejsou ekonomicky ospravedlnitelné. V našich podmínkách v ČR jsme tedy nuceni největší prostor věnovat pro využití solární energie, protože nemáme ani vhodné vodní toky, ani planiny s mohutnými větry. I tato však musela být státem dotována vzhledem k vysokým pořizovacím cenám. Díky velkým dotacím, garantované zvýhodněné výkupní ceně za kWh a nízkému zdanění energie ze slunce došlo v naší republice k obřímu solárnímu boomu. Ten během jediného roku snížil cenu solárních článků o 1/3. To však mělo i svou stinnou stránku. Podpora státu byla přemrštěná a jen během roku 2010 bylo nově nainstalováno 535 MW, což v součtu s již nainstalovaným výkonem činilo 997,9 MW. Pro srovnání ještě na začátku roku 2009 byl celkový nainstalovaný výkon 65,7 MW. Stát zasáhl tak, aby předešel neúměrnému zdražení elektřiny a nebezpečí nárazového přetížení sítě – výkon solárních elektráren kolísá v závislosti na denním období a počasí. Aktuální situace (poloviční cena za kWh oproti původní garantované, 26% daň a hlavně STOP stav ohledně přijímání nových projektů solárních elektráren s účinností pod 25%) je krajně nepříznivá, pro menší investory likvidační a stát čelí arbitrážím s většími investory.

I přesto však má význam tuto technologii rozvíjet, protože pokrok v posledních letech ukázal, že nabízí solidní potenciál. I u nás velmi pravděpodobně dojde k opětovnému otevření trhu s lépe nastavenou regulací a bylo by proto nevhodné uložit solární elektrárny k ledu.

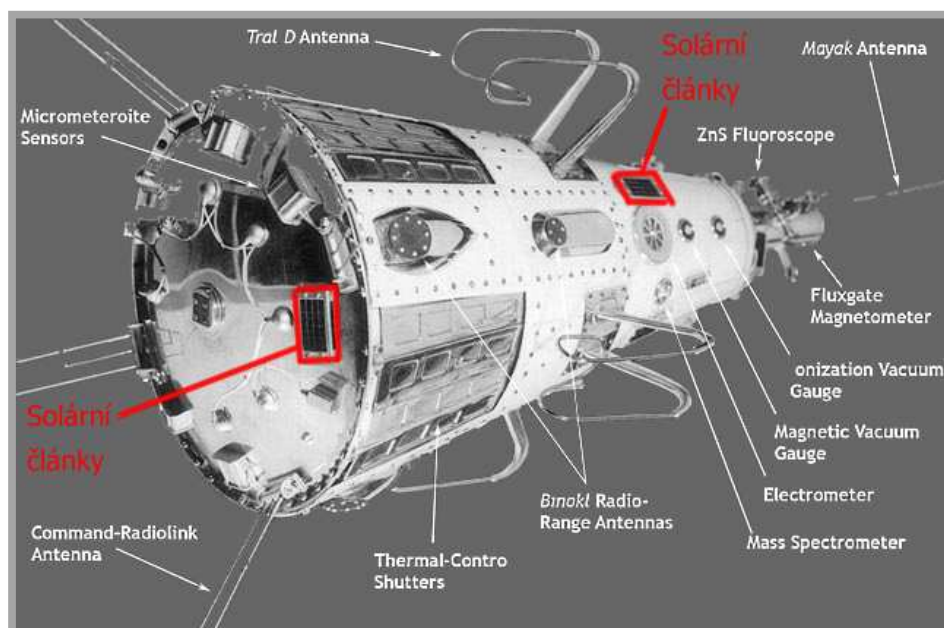
Diplomová práce se zabývá konstrukcí solárního trackeru pro moduly s koncentrační fotovoltaikou, která je schopna dosahovat účinností vyhovujících aktuální nové legislativě (2011).

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Využitím energie ze slunce se člověk zabývá od nepaměti. Jedná se o relativně neomezený a dostupný zdroj energie. Problém ovšem je tuto energii dopadající na povrch Země ve formě světla a tepla převést na pro společnost užitečnější elektřinu. Moderní technologie v posledních desetiletích daly vzniknout použitelným fotovoltaickým (dále jen FV) čipům. Dále je energie ze slunce využívána pomocí méně známých termálních kolektorů a infrared (dále jen IR) čipů. Tyto technologie získávají energii při využití neviditelné části dopadajícího spektra, tedy tepla. Energie je buď využita k ohřevu vody (kolektory), ohřevu pracovního média pro turbíny (vakuové trubky) nebo je přímo přeměněna na elektrickou energii (IR čipy). Masovému rozšíření však brání několik faktorů. Pomineme-li cenu technologií, která ale v čase velmi výrazně klesá, je zde problém se stabilitou tohoto zdroje energie (záleží na počasí a denní době). Elektrická energie nejde zatím akumulovat bez výrazných ztrát a je proto nutné ji spotřebovat ihned, což klade zvýšené nároky na rozvodnou síť. V době výpadku v případě oblačnosti apod. je nutné zase nedostatek pokrýt z jiného zdroje.

1.1 Běžné fotovoltaické technologie

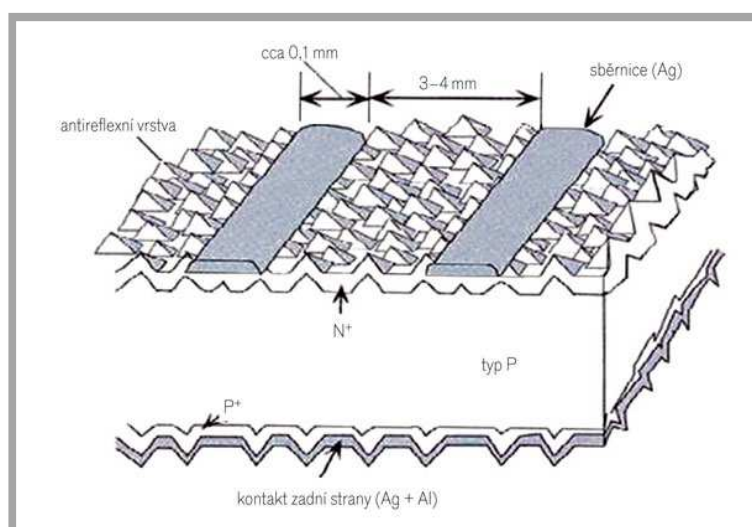
Fotoelektrický jev byl objeven již v roce 1839, ale první fotovoltaický článek byl do provozu uveden až o 44 let později. Ten měl pouze 1% účinnost a byl založen na reakci mezi tenkou vrstvou zlata a selenovou destičkou. Dnešní články založené na vysoké citlivosti křemíku na světlo byly objeveny v roce 1954 ve firmě Bell. Velmi vysoké ceny výroby a nízké účinnosti předurčily tuto technologii k použití pouze na místech s nemožností získání energie z jiného zdroje. To byly komunikační přístroje v odlehlých částech světa, vodní pumpy v pouštích a především při dobývání vesmíru. Zde mají prvenství Rusové, díky družici Sputnik 3, ta jako první nesla na své palubě do vesmíru solární články v roce 1957 [1].



Obr. 1.1 Sputnik 3 [2]

1.1.1 Technologie tlustých vrstev

Články první generace, jsou tvořeny p-n diodou (polovodičem) na bázi křemíku. Vyrábí se buď z monokrystalického (vyšší cena, lepší účinnosti) nebo multikrystalického (nižší cena i účinnost) křemíku. Ten tvoří nejvýraznější část celkové ceny FV článku. Díky rozvoji využití solární energie a navýšení výroby však jen mezi lety 2008 – 2010 došlo ke snížení pořizovací ceny 1kg křemíku na 1/9 původní. Tento trend bude pravděpodobně nadále pokračovat. Panely vyrobené touto technologií nyní tvoří 85% zapojených solárních elektráren na světě. Teoretická účinnost těchto článků dosahuje 33%. V reálu je dosahováno 11 - 15% účinnosti [3,4,5].



Obr. 1.2 Schéma FV článku na bázi křemíkového polovodiče [3]

1.1.2 Technologie tenkých vrstev

Moduly vyráběné touto technologií bývají nazývány také moduly 2. generace. Jak napovídá název, jedná se o velmi tenké vrstvy nanesené na základní materiál - platformu. Pro platformy se používá sklo nebo ohebné materiály – různé textilie a fólie. Vrstva je natolik tenká, že dovoluje ohýbání modulu. K výrobě se používá amorfni křemík, CdTe nebo CuInSe₂. Díky tloušťce vrstvy (v řádu několika μm) dochází k velké úspoře materiálu a tedy rapidnímu snížení ceny. Dochází však také k podstatnému snížení účinnosti, která se v provozních podmínkách pohybuje okolo 6 – 10%. Za zmínku stojí také nižší životnost než u tlustých vrstev [3,4,5].

1.1.3 Trendy vývoje

V posledních pár letech se objevilo několik nových směrů vývoje. Nejvýznamnější jsou vícevrstvé a koncentrační články.

Vícevrstvé články přímo navazují na technologie tenkých vrstev, těch je zde použito několik. Každá vrstva zužitkuje určitou část spektra dopadajícího světla s maximální účinností. Celková účinnost dosahuje až 30% v provozu, nicméně je vykoupena 2-3 násobně vyšší cenou než jednovrstvé technologie.

Další novou technologií je výroba solárních článků z vodivých polymerů. Tato technologie je zaměřena především na snížení pořizovací ceny. Nicméně tyto články také vykazují mnohem lepší mechanickou odolnost než křemíkové. Nynější dosažené účinnosti však zatím nesplňují předpoklady vědců - nejvyšší se pohybovaly okolo

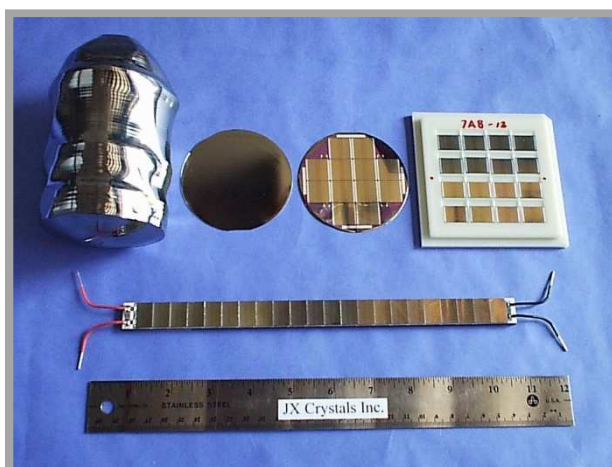
6% na článku tvořeného kombinací polymeru a fullerenu. Nicméně výzkum ukazuje, že je zde velký potenciál. Jejich odolnost, pružnost a nízká cena je předurčuje použití v mobilních zařízeních [3,4,5,11].



Obr. 1.3 Polymerový panel [6]

V neposlední řadě za zmínku stojí tzv. termovoltaika, ta vyrábí elektrický proud na základě rozdílu teplot mezi dvěma různými materiály. Tento princip byl poprvé objeven okolo roku 1800, nicméně první využití je spojeno až s kosmickým průmyslem. Spojené státy tuto technologii využily pro napájení družic letících mimo Sluneční soustavu, kde již byla příliš malá intenzita viditelného světla pro FV články (sondy Cassini, Galileo, Viking) [7].

IR čipy dnes dosahují reálných účinností okolo 7 – 10% a vyrábí je zatím velmi málo firem. Řadí se mezi ně např. JX Crystals, produkující čipy na bázi GaSb. Čipy jsou naladěny pro provoz ve vysokých teplotách, je tedy reálné je použít v koncentrační fotovoltaice. Vyrábí se i malé spalovací generátory na plyn, které vyrábí teplo a elektřinu bez pohyblivých součástí. V Japonsku běží výzkumy technologie založené na GaN polovodiči a vědci si v budoucnu slibují reálné účinnosti blížící se 20% [8,9].



Obr. 1.4 Postup výroby IR panelu ve firmě JX crystals (zleva doprava) [8]

Co se energetické návratnosti dnešních FV článků týká (tedy jak dlouho trvá čipu vrátit energii nutnou pro jeho vlastní výrobu), tak na území ČR dosahujeme návratnosti u běžných technologií 3,86 – 5,22 let. U tenkovrstvých technologií je možné dosáhnout i půl roku a méně. Vzhledem k životnostem moderních článků okolo 35 let se jedná o velmi slušnou hodnotu. Především vzhledem ke skutečnosti, že první generace článků, včetně těch na kosmických stanicích, nedokázaly energii potřebnou k jejich výrobě vrátit nikdy. Tento parametr se s novými generacemi článků bude také nadále zlepšovat [14].

1.2 Nosné konstrukce pro FV panely

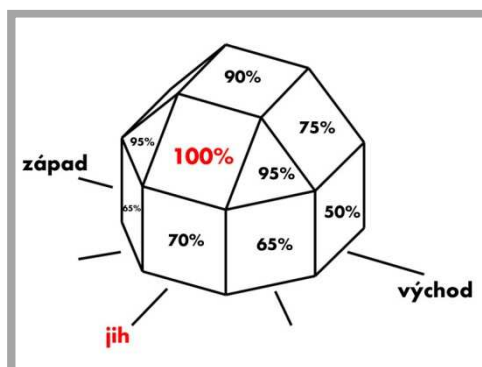
1.2

1.2.1 Střešní panely, panely na volných prostranstvích

1.2.1

Jedná se o panely umístěné bez možnosti pohybu. Jejich umístění se řídí několika pravidly. Dle zeměpisné šířky se mění také požadavky na co nejefektivnější umístění FV panelu.

Následující podmínky se vztahují k území České Republiky. Panely by měly být umístěny čelem k jihu, dle požadavků na využití by měl být zvolen sklon panelů. Pro panely v tzv. ostrovních systémech, kde chceme dosáhnout pokud možno celoročně stabilního výkonu, tak ideální sklon panelů od země (za předpokladu že je povrch kolmý ke směru gravitace) je 49° . Pro instalace, kde je hlavním zájmem výdělek a tedy maximalizace výnosu energie, je ideální úhel cca 32° . To je způsobeno faktem, že 75 procent využitelné energie ze slunce dopadne v létě, kdy se slunce pohybuje mnohem výše nad obzorem než v zimě. S tímto rozdílem výšek je spojena nejen délka dnů, ale také potřebná plocha pro rozmístění panelů tak aby se nestínily. Pokud je slunce nízko nad obzorem, zvětší se také vzdálenost, kterou paprsky musí absolvovat skrz atmosféru (což jsou vysoké ztráty). Jaké účinnosti vzhledem k maximální možné se dosahuje v případě různé orientace panelů je vidět na obr.1.5. [12].



Obr. 1.5 Dosažitelný výnos v závislosti na poloze vůči poloze ideální [12]

Panely lze umístit na střechy domů. To v ČR využívá čím dál větší množství lidí, jelikož takovýto panel využitý pro spotřebu v domácnosti má návratnost okolo šesti let. Jeho montáž na šikmou střechu obvykle nevyžaduje žádné velké stavební úpravy a je tedy levná. Panel je většinou uchycen pouze na ocelovém rámu pomocí speciálních úchytek. Před nájezdy zlodějů ho chrání právě jeho poloha na střeše a panel samotný odolá i krupobití. Jediná nevýhoda tohoto umístění se objevuje při odklizení sněhu v zimě.

Tyto panely se však nejmasověji využívají při stavbě velkých solárních parků dodávajících energii do rozvodné sítě. V případě sklopení panelů o 32° je třeba, aby pozemek byl cca 2,6x větší než je plocha panelů aby nedocházelo k jejich stínění. Vzhledem k obvyklému sériovému zapojení panelů dochází v případě zastínění i menší části k velkým ztrátám získané energie. Novější projekty se snaží toto území dále využít, protože se obvykle jedná o větší povrchy využitelné plochy. Některé solární parky jsou proto zvýšené nad úroveň země a plochy pod nimi jsou využity jako pastviny užitkové zvěře. Dalším, komerčně velmi dobrým řešením, je vybudování parkovacích ploch stíněných solárními panely.

1.2.2 Jednoosé solární trackery

Elektrárny s natáčením kolem jedné osy (trackery) tvoří alternativu ke statickým zařízením. Osou otáčení zpravidla bývá nosná trubka v rovině panelu ležící na spojnici severního a jižního pólu. Takto pohyblivé nosné systémy dokáží zvýšit zisk energie o 25 – 30%. Zvýšení zisku velmi záleží na zeměpisné šířce. Tento benefit je však vykoupen mnoha zásadními nevýhodami ve srovnání s pevným systémem. Jednou z nejzásadnějších nevýhod je především vyšší pořizovací cena. Díky pohyblivému upevnění na jedné ose je zde větší nebezpečí poškození větrem, což vyžaduje dodatečné nadimenzování a obecně je konstrukce složitější. Přibýly zde také prvky jako zdroj pohybu a řídicí systém. Další náklady pak tvoří energie potřebná k pohonu systému a nutnost údržby pohonů a ložisek po celou dobu životnosti (dnešní panely cca 25 - 35 let).



Obr. 1.6 Jednoosý solární tracker s koncentračními zrcadly firmy Traxler [13]

1.2.3 Dvouosé solární systémy

Tyto instalace se natácejí za sluncem ve dvou osách, jsou tedy schopny neustále vystavovat panely maximálnímu množství přímého světla. Takový tracker je schopen zvýšit výnos o 35 – 40% ve srovnání s pevně stojícím systémem. Vyžaduje však již z pravidla složitější systém sledování slunce. Samotná konstrukce je také komplikovanější především proto, že tyto trackery mohou dosahovat i velikostí 300m^2 pro jediný pohybový systém. Tato plocha je již velmi významně ovlivněna zatížením od větru, obzvlášť pokud vezmeme v úvahu, že podle nejnovější normy (2007) konstrukce vystavené povětrnostním podmínkám musí odolat náporu větru podle geografické polohy o střední rychlosti až 130 km/h. Jednotlivé řady panelů na

takovém trackeru by ideálně měly být proti sobě posunuty tak, aby tvořily schodovitou strukturu. To nejen odlehčí zatížení od větru, ale především umožní ofukování a tím i chlazení jednotlivých panelů, což má pozitivní vliv na účinnost v řádech procent. Toto opatření však není obvykle dodržováno.



Obr. 1.7 Dvouosý solární tracker se schodovitým odstupňováním jednotlivých řad panelů [15]

1.3 Koncentrační technologie

1.3

Jak napovídá název, je dopadající světlo nasměrováno na menší plochu za pomoci optického systému, čímž se zvýší jeho intenzita. Koncentrační poměry v závislosti na technologii mohou dosahovat hodnot $c = 1,4 - 4600$ [19]. Výhoda je v menší ploše, na které dochází k přeměně energie. Nevýhodou je ovšem využití pouze přímého slunečního záření, jelikož difuzní¹ se od zrcadel odrazí mimo požadovaný směr. Ač jsou koncentrační články zpravidla několika násobně dražší na kus než běžné články, cenově díky úspoře v množství na plochu vyjdou obdobně. Díky vysokému koncentračnímu poměru můžou také pracovat s vyšší efektivitou. Je však třeba využít článků vyráběných pro daný koncentrační poměr. V ohnisku optického systému vznikají vysoké teploty, které zhoršují účinnost článků, pokud nejsou správně chlazeny a na články pro běžné použití by měly devastující účinky. V pořizovacích nákladech se však velmi promítne nutnost směřování zařízení přímo na slunce. Význam přesnosti navádění totiž roste se zvětšujícím se koncentračním poměrem. V zásadě se v praxi vyskytují dvě možnosti koncentrace.

2D – Světlo je směřováno do přímky, to sebou nese menší nároky na přesnost sledování, v praxi se běžně vyskytuje s jednoosým trackingem.

3D – Světlo je směřováno do bodu, toto umožňuje využití maloplošných koncentračních článků. Je však vyžadována nosná konstrukce s dvouosým trackingem. Dosažitelná velmi vysoká míra koncentrace je vhodná také pro použití s

¹ Difuzní záření – záření odražené od okolí a atmosféry. Nesměruje tedy přímo od slunce. V podmínkách ČR má u běžných FV panelů podíl na výkonu zhruba 20%.

technologiami stirlingova motoru i solárních věží se solnými roztoky popsanými níže v textu.

Další dělení se odvíjí od technologie koncentrace.

1.3.1 Zrcadlové

Dnes nejvyužívanější způsob s nejširšími možnostmi pro realizaci.

S rovinným zrcadlem – Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější způsob koncentrace. Zrcadlo je obvykle zhotoveno z válcovaného plechu se speciální povrchovou úpravou [13]. Pokud se jedná o jednoduché zrcadlo, koncentrační poměr z pravidla dosahuje okolo $c = 1,5$. V případě Fresnelovy instalace zrcadel je dosahováno koncentračního poměru až k $c = 10$ [19]. Technologie se zpravidla používá pro klasické čipy, které vydrží takto nízké navýšení intenzity, případně pro technologii vakuových trubek.



Obr. 1.8 Koncentrátor s prostým rovinným (vlevo) a Fresnelovým zrcadlem (vpravo) [13,22]

Dalším uplatněním rovinných zrcadel je solární věž. Veškerá zrcadla s dvouosým naváděním odráží světlo z rozlehlé plochy do jediného místa na věži. Dosahuje se koncentračního poměru až $c = 2000$. Ve věži se ohřívá solný roztok na vysoké teploty, který je pak použit k pohonu turbíny.



Obr. 1.9 Solární věž

Parabolická zrcadla – Také bývají označována jako parabolické žlaby, což vystihuje jejich tvar. Tyto žlaby bývají vybaveny jednoosým trackingem, který se, poněkud netradičně, přizpůsobuje pouze výšce slunce nad obzorem (má tedy řízený pouze náměr²). Žlaby díky svému umístění nízko u země a s osou rotace rovnoběžnou s povrchem mívají velkou délku, řádově 100 – 150m. Byla postavena i elektrárna využívající dvouosý tracking, ale navýšení účinnosti dostatečně nevyvážilo náklady spojené s údržbou a dalšími nevýhodami tohoto zařízení. Tato technologie se využívá pouze ve spojení s vakuovými trubkami a turbínou [20].

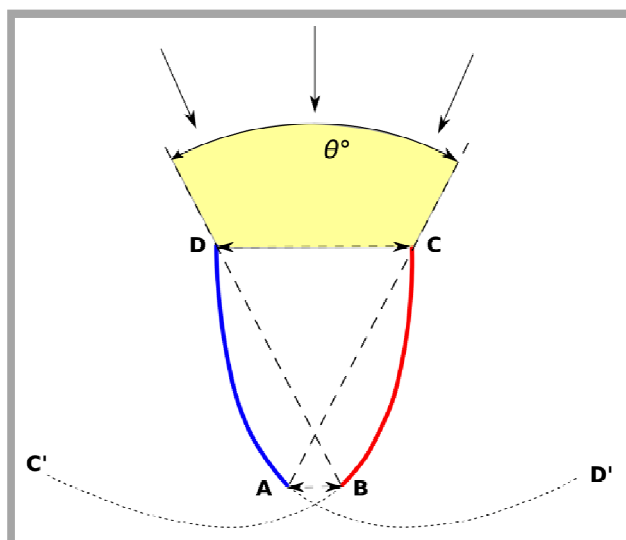


Obr. 1.10 Parabolický koncentrátor jednoosý (vlevo) a dvouosý (vpravo) [23]

CPC – Označení je zkratka Compound Parabolic Concentrator. Tyto koncentrátoři jsou na první pohled podobné parabolickým, avšak skládají se ze dvou parabol a mají uzavřenější tvar. Nejsou z pravidla vybaveny žádným systémem sledování slunce, pouze je nutné je dvakrát ročně manuálně nastavit. Téměř nulová mechanizace je

² Náměr – Pohyb trackeru s osou otáčení rovnoběžnou se zemí. Sleduje se výška slunce nad horizontem.

jejich největší výhodou. Jejich tvar způsobuje, že i světlo, které nedopadá v ideálním úhlu, je zachyceno a svedeno k absorberu, případně k běžným solárním článkům. Ty je možno použít díky nižšímu stupni koncentrace, který dosahuje hodnot cca $c = 5$. Úhel, pod kterým může světlo dopadat, se nazývá akceptační a nabývá hodnot od $5,5^\circ$ - $19,5^\circ$. Nevýhodou je nutnost větší plochy zrcadel než u běžného parabolického koncentrátoru a nerovnoměrnost osvětlení pracovní plochy³ [20,21].



Obr. 1.11 Tvar CPC koncentrátoru

Talíře – Jedná se o 3D koncentraci, tedy do jednoho bodu. Z toho důvodu je nutné zajistit dvouosý tracking. Tyto parabolické talíře nabízejí největší koncentrační poměry a to až do $c = 4600$. Nahromaděná energie je zpravidla využívána ve formě tepla, buď pro ohřev média pro turbínu, nebo pro stirlingův motor umístěný přímo v ohnisku talíře [20,21]. Další možností je využití malých talířů v kombinaci s dalším usměrňovacím členem a zátěžovým FV článkem schopným akceptovat velmi vysoký koncentrační poměr.

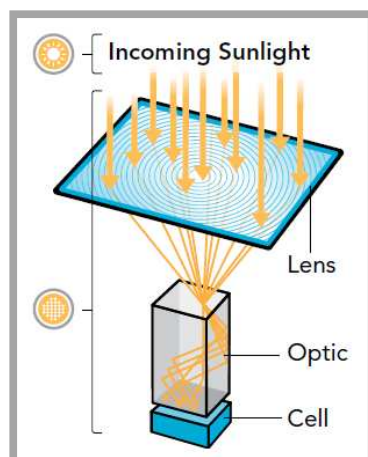


Obr. 1.12 Talířový koncentrátor se stirlingovým motorem (vlevo) a panel s FV články (vpravo)

³ Nerovnoměrnost osvětlení pracovní plochy se negativně projevuje na účinnosti koncentračních FV čipů

1.3.2 Čočkové

Tyto koncentrátory se vyskytují v 3D i 2D variantách. Ve 2D se používají levné válcované čočky, díky vyšším stupňům koncentrace a přímkovému charakteru obrazu světla se využívají především pro technologie pracující na bázi tepla. Druhý typ aplikace, využívající 3D koncentraci, je vhodný především pro koncentrační čipy pracujícími s vysokými hodnotami koncentrace ($c = 1000$ apod.). Pro nízkou hmotnost a tloušťku se ke koncentraci nejvíce používají Fresnelovy čočky, lze však použít i čočky běžné. V aplikacích v kombinaci s FV čipem je obvykle nutný ještě další usměrňovací člen regulující odchylky v úhlu dopadajícího světla.



Obr. 1.13 Fresnelova čočka s usměrňovačem

1.3.3 Speciální

Dielektrické - V zásadě se jedná o speciální články, kde kontakty a plochy pájených spojů jsou zakryty speciálně tvarovanými skleněnými liniemi. Tyto jsou o velikosti 0,1 – 1mm [23].

Fluorescenční – Základní části FV modulu při použití této technologie je deska z průhledného materiálu. Na horní a spodní ploše se nachází několik speciálních vrstev, které při dopadu slunečního záření emitují na druhé straně světlo větší vlnové délky, vhodnější pro FV čipy. Vrstvy jsou z vnitřní strany odrazivé, takže proniknuvší světlo již zůstane v průhledném materiálu obklopeném speciálními vrstvami, dokud nedoputuje k okraji. Tam jsou instalovány FV čipy s chlazením [24].

1.4 Nosné konstrukce pro koncentrační panely

Konstrukce trackeru pro koncentrační technologie musí splňovat několik požadavků. Je nutná dobrá celková tuhost, k minimalizaci efektu větru. Potřeba přesného směřování panelů i za nepříznivých povětrnostních podmínek roste s koncentračním poměrem. Dále je důležitá spolehlivost a co nejmenší potřeba pravidelné údržby. V neposlední řadě je nutné zmínit také snadnou smontovatelnost, přepravitelnost na místo provozu a nízké výrobní náklady. V zásadě lze existující konstrukce rozdělit na dva základní typy:

1.4.1 Sloupové

Toto je jeden z nejčastěji používaných konceptů pro solární trackery. Panely jsou uchyceny v jediném bodě, který obstarává obě osy rotace. Ukotvení v zemi zajišťuje jediný sloup. Ten však díky malé základně vyžaduje masivní betonový základ. Rovněž nároky na otočný uzel jsou zvýšené ve srovnání s ostatními druhy konstrukcí. Tento koncept je nejsnadnější k vyprojektování, ovšem nejvíce trpí na zatížení větrem a nutnost masivních základů. Proti velmi silným větrům je obvykle chráněn systémem na natočení se do polohy s nejmenším odporem. Celá síla se však stále přenáší přes pohybové prvky.



Obr. 1.14 Sloupový tracker s moduly složenými z FV čipů s talířovými koncentrátory [28]

1.4.2 Nízkoprofilové

Tyto trackery se vyznačují tím, že se svým profilem drží u země. Toho je docíleno díky oddělené ose náměru pro každou řadu panelů. Naproti tomu ve sloupovém uspořádání se všechny panely natáčí ve formě velké desky jako jediné těleso. Nízkoprofilové provedení je sice konstrukčně složitější, s větším počtem dílů, nicméně zatížení je lépe rozloženo. Toto řešení se používá především u koncentrační fotovoltaiky s čočkovou technologií, v případě malých talířových modulů a u parabolických jednoosých koncentrátorů, protože se příliš nehodí pro velké moduly.

Zvláštním případem je pak třeba konstrukce firmy Pyron Solar, která má kruhový tvar a obsahuje několik řad Fresnelových modulů, celé zařízení je uloženo jako plovoucí na vodě. Voda je použita k chlazení modulů a zajišťuje naprosto přesnou referenční rovinu. To usnadňuje přesné navádění modulů ke slunci a tím umožňuje využít velmi vysoké koncentrační poměry. Dále toto řešení zvyšuje odolnost proti otřesům půdy. Nevýhodou však je nutnost pozemní stavby a zázemí [29].



Obr. 1.15 Řešení firmy Pyron Solar, konstrukce bez modulů (nahore) a uspořádání modulů v řadách (dole)

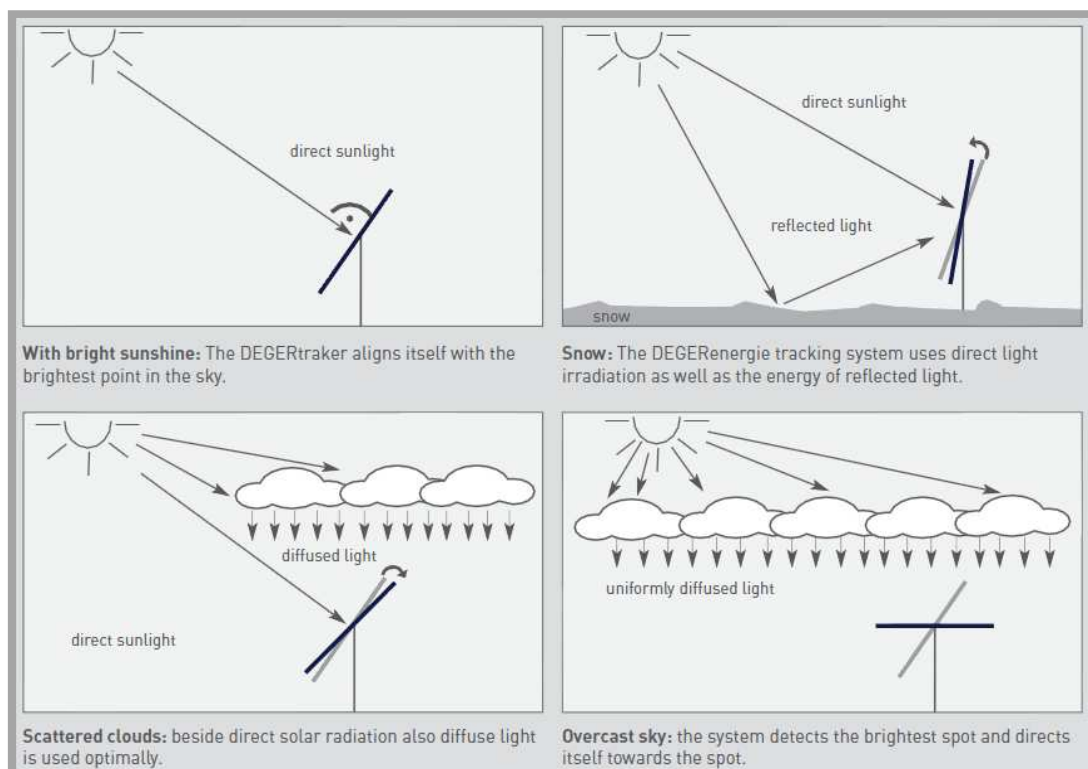
1.5 Řízení a pohyb trackerů

1.5

1.5.1 Aktivní

1.5.1

Aktivní pohon (elektromotor, aktuátor apod.) přes speciální senzor pro sledování polohy slunce samostatně nastavuje FV panely do nejvýhodnější polohy. V závislosti na typu FV panelů a zda využívají nebo nevyužívají i difúzní záření, nastavuje celek buď přímo ke slunci, nebo přímo k nebi, v závislosti na množství a hustotě oblačnosti.



Obr. 1.16 Schopnost inteligentního řízení trackeru

1.5.2 Pasivní

Tento typ trackeru nevyužívá žádnou řídicí elektroniku a pohyb se neuskutečňuje za pomoci motoru. Je založen na nízkém bodu varu některých látek (často se využívají například zkapalněné freony). Tracker je z pravidla jednoosý, ukotvený ve středu a vyvážený do nulové polohy. Na koncích se nacházejí dvě trubkové nádrže na pracovní látku, propojené spojovací trubkou. Tracker se otáčí za sluncem změnou svého těžiště. Pracovní kapalina při osvitě zásobníku začne vřít a v plynné formě se přemístí do stíněného zásobníku. Ty jsou kryty speciálně tvarovaným stínítkem, které zajišťuje, aby zásobníky byly osvětleny pouze, pokud se tracker nachází v nevhodné pozici vůči slunci. Svůj pracovní cyklus tracker končí natočen k západu. Ranní paprsky osvětlí plný zásobník a pracovní médium se přemístí zpět do druhého zásobníku, čímž se tracker opět dostane do pracovní polohy.

Zásadní nevýhodou tohoto trackeru je jeho nulová odolnost proti nárazovému větru. To je obvykle vyřešeno soustavou tlumičů, ty však tracker pouze chrání před nárazy, avšak nezajišťují jeho polohu. Pokud tedy fouká vytrvalejší vítr, a to i nižších rychlostí, správnou orientaci sabotuje. Po uklidnění větru se zařízení sice vrátí do správné polohy, nicméně instalace na větrná místa je nevhodná. Trackery vyžadují ručně provedené zajištění v případě větru o rychlostech vyšších než 80 km/h nebo při snížení teploty. Při poklesu teploty dochází ke zvýšení viskozity kapaliny v tlumičích, což znemožňuje správnou funkci trackeru.

V případě montáže na vhodně zvoleném místě je však tento tracker výhodný oproti pevné instalaci výrazným zvýšením energetického zisku z daných panelů, za cenu téměř bezúdržbového provozu. Je nutné pouze 2-3 ročně promazat ložiska, zkontrolovat tlumiče a v letní a zimní sezóně nastavit sklon [25,26].



Obr. 1.17 Pasivní sledovací systém, nádrže na pracovní médium viditelné po stranách [27]

1.5.3 Časovací

1.5.3

Je složen z aktivního pohonu. Řízení však obstarává předprogramovaná jednotka. Ta systém natáčí bez zpětné vazby na základě očekávané polohy slunce.

1.6 Pohony

1.6

V zájmu provozovatele solární elektrárny se sledováním slunce je samozřejmě co nejmenší spotřeba energie a nízká nutnost údržby pohonů. Proto pohyb obvykle není kontinuální, nýbrž realizovaný po malých krůčcích. Aplikace v solární energetice v ČR také obvykle nevyžaduje otočení zařízení o více než 260° , čímž odpadají problémy s namotáváním kabelů a příslušenství. Velké nároky se ale v případě pohonů kladou na samosvornost a v závislosti na ovládané ose i na přenos velkých krouticích momentů. Tato nutnost vzniká vystavením konstrukce vnějším vlivům, především větru, který tvoří nejvýznamnější složku zatížení při dimenzování trackerů. Podle typu konstrukce pak pro jednotlivé aplikace volíme:

1.6.1 Lineární aktuátor

1.6.1

Díky charakteru pohybu se využívá především k ovládání náměru, kde vystačíme se sledováním v rozmezí 65° (v našich podmínkách, v extrémních podmínkách na rovníku 90° , případně 180° při jednoosém trackování). V solární energetice se téměř výlučně používá provedení mechanického šroubového aktuátoru obvykle z převodovaného přes planetovou převodovku. Tato kombinace zajišťuje samosvornost, dostatečnou sílu a přesnost. Tu pneumatické, hydraulické ani jiné typy nabídnout nemohou.

1.6.2 Slewing drives

1.6.2

Volně přeloženo jako otočné pohony, jedná se o mohutnou šnekovou převodovku s motorem. Jedna řada děr pro šrouby je umístěna na těle s motorem, druhá potom na mohutném šnekovém kole. Převodovky jsou navrženy tak, aby dokázaly přenést velmi velké krouticí momenty a zároveň nemalé axiální i radiální zatížení. Většinou

jsou využity pro pohon odměru⁴. Někteří výrobci ale využívají jejich odolnost naplno, a ve sloupových instalacích je využívají k pohonu obou os.



Obr. 1.18 Jednoosá (vlevo) a dvouosá (vpravo) šneková převodovka

⁴ Odměr – Pohyb trackeru s osou otáčení kolmou se zemí. Sleduje se tedy pohyb slunce od východu k západu.

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

2

V poslední době se v České Republice aplikace solární energetiky orientovaly (díky nastavení systému) především na nákup levných technologií s nejnižšími počátečními investicemi [16].

Solární zařízení uvažované v této diplomové práci naproti tomu má sice několikanásobně vyšší cenu, využívá však pokrokové technologie s velmi vysokou účinností a velmi efektivním způsobem využití prostoru.

Solární článek Ditech je založen na koncentračním FV článku firmy Spectrolab s koncentračním poměrem $c = 1102$. V praxi to znamená, že na přeměnu slunečního záření dopadajícího na plochu 1102cm^2 ($333 \times 331\text{mm}$) na elektřinu postačuje jediný čip (CDO-100) o rozměrech $1 \times 1\text{cm}$ s vysokou účinností přeměny energie – až 38.5% u většiny vyrobených čipů⁵ (obr. 2.1). Článek je umístěn v olejové lázni, sloužící jako chladicí médium a další koncentrační prvek (díky indexu lomu přechodu sklo/olej), což příznivě ovlivňuje jeho účinnost. Do budoucna se uvažuje o přidání polopropustného zrcadla, které infra červenou část spektra odrazí na IR čip. Tímto se odlehčí tepelné zatížení na FV čipu a zároveň dojde k nárůstu celkového výkonu panelu. Jeden FV čip má výkon $41,6\text{ Wp}$ ⁶ a garantovaných 95% původního výkonu po 25 letech provozu [17].



Obr. 2.1 Koncentrační FV čipy firmy Spectrolab (Boeing) – celkový výkon 28 čipů na obrázku dosahuje 1165 Wp

Vzhledem k tomu, že koncentrační technologie pracuje pouze s přímým světlem, je nutné moduly osadit na dvuosý tracker s přesným naváděním.

⁵ Výkon vyrobených čipů kolísá od 36 po 40% účinnost. 90% vyrobených kusů však spadá do rozsahu 38% – 39%.

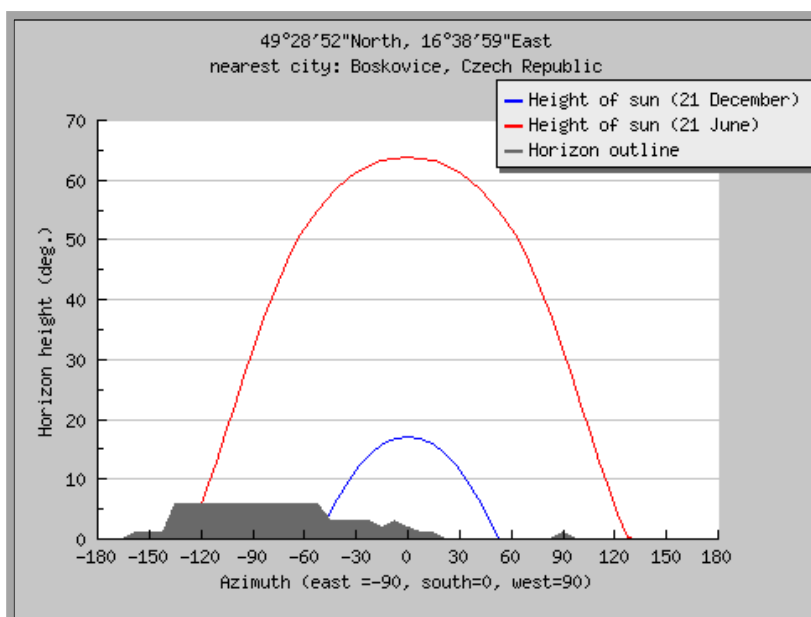
⁶ Wp – Watt-peak je jednotka špičkového výkonu fotovoltaické elektrárny. Jedná se o výkon fotovoltaické elektrárny při standardních testovacích podmínkách (STC = Standard Test Conditions), které jsou: energie dopadá na fotovoltaický panel kolmo a má hodnotu $E = 1\text{ kW/m}^2$, průzračnost atmosféry $A_m = 1,5$, teplota článků $T = 25\text{ °C}$.



Obr. 2.2 Modul Ditech

Také z důvodu maximálního možného využití potenciálu této technologie v ČR je elektrárna projektována v oblasti Boskovic na jižní Moravě, kde je jedna z nejvyšších hustot dopadajícího záření v ČR [10].

Systém je zamýšlen z důvodu orientace na maximální dodávky do elektrické sítě tak, aby bylo osazeno na daném území maximální možné množství modulů na úkor možnosti jejich funkce v případech, kdy se slunce nachází v zimních měsících nebo ranních hodinách nízko nad horizontem.



Obr. 2.3 Maximální a minimální výška slunce nad horizontem [18]

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

3

Cílem diplomové práce je návrh polohově stavitelné části konstrukce solárního trackeru pro 200 koncentračních FV panelů Ditech. Vzhledem k použité koncentrační technologii je požadována schopnost natáčení ve dvou osách. Konstrukce má být navržena s ohledem na maximální efektivitu využití prostoru a jednoduchou smontovatelnost bez nutnosti svařování ani jiných podstatných technologických operací na místě montáže. Dále musí být konstrukce přizpůsobena již navržené podpůrné části trackeru, která zajišťuje ukotvení v zemi. Konstrukce musí odolat větru o střední síle 110 km/h a to i v přímořských oblastech (to ovlivňuje výpočtové koeficienty zmíněné dále v textu).

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

V počátku konstrukčních prací je třeba ujasnit si postup řešení, možnosti realizace a především priority. To umožňuje v případě práce více lidí na jednom projektu vhodné rozdělení činností tak, aby byl postup prací časově co nejefektivnější. V případě pracovních skupin i jednotlivců to zabrání mrhání pracovního času na práci, která se v důsledku dalšího postupu ukáže jako zbytečná.

4.1 Návrh postupu prací konstrukce v DP

Vytvoření konceptu - Na základě požadavků zadavatelské firmy a informací nasbíraných v rešeršní části diplomové práce se rozhoduje o celkovém konceptu konstrukce. V této fázi by se také mělo jednoduchými simulacemi či náčrty ověřit funkčnost konceptu v předpokládaných pracovních podmínkách.

Určení zátěžných sil na konstrukci konceptu - V této fázi se určí zatížení od všech, nebo alespoň těch zásadních, vnějších vlivů. V případě solárního trackeru je dominantním zatížením síla větru. Po spočtení tohoto vlivu má teprve smysl se zabývat podrobněji konstrukcí.

Aplikace zatížení a konstrukce zásadních uzlů - V předposlední fázi probíhá konstrukce a dimenzování jednotlivých uzlů tak, aby vyhověly rozměrovým, funkčním a pevnostním požadavkům. Počítají se tedy jednotlivé prvky, určují materiály, korozní ochrana atd.

Tvorba výkresové dokumentace - Jako poslední přichází na řadu výkresová dokumentace hotové konstrukce. Zde se již dělají pouze změny drobného charakteru a opravy.

4.2 Prostředky využité pro konstrukci v DP

Autodesk SketchBook Pro, papír a tužka - Toto jsou nástroje především pro tvorbu konceptu a rozvržení jednotlivých uzlů. Umožňují upřesnění představy bez nutnosti znalosti pevných rozměrů. SketchBook je také dobrý pomocník při rychlé tvorbě náčrtů pro analytické výpočty a do prezentací.

Autodesk Inventor 2010 Pro - CAD (Computer Aided Design) program, umožňující rychlou tvorbu součástí, jejich spojování v celky, simulace a tvorbu výkresové dokumentace. Program je zvolen z důvodu dostupnosti na VUT a protože je s ním autor DP dobře obeznámen.

ANSYS - CAE (Computer Aided Engineering) program, který je vhodný pro náročnější simulace. V DP práci je využit pro ověření výsledků z Inventoru.

Mathcad 14, Mitcalc - Programy, využité pro ulehčení analytických výpočtů. Umožňují dynamickou změnu vstupních parametrů výpočtů s okamžitou aktualizací výsledku, na rozdíl třeba od analýz MKP. Program mitcalc v sobě navíc obsahuje

integrovanou celou řadu českých a evropských norem pro výpočty konstrukčních uzlů a velikosti a běžně používané materiály normalizovaných součástí.

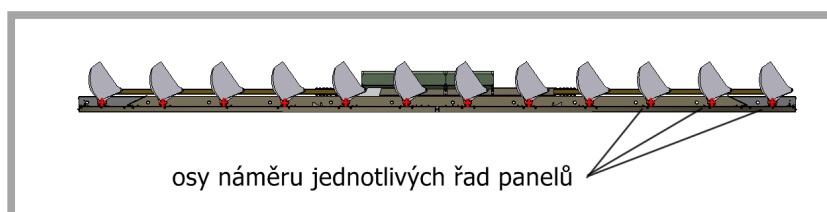
5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

5.1 Funkční požadavky na konstrukci

- Dvouosý tracking
- Maximální využití daného prostoru
- Orientace na maximální výtěžnost při dodávkách do elektrické sítě
- Rychlá stavba
- Sestavování probíhá za pomoci rozebíratelných spojů

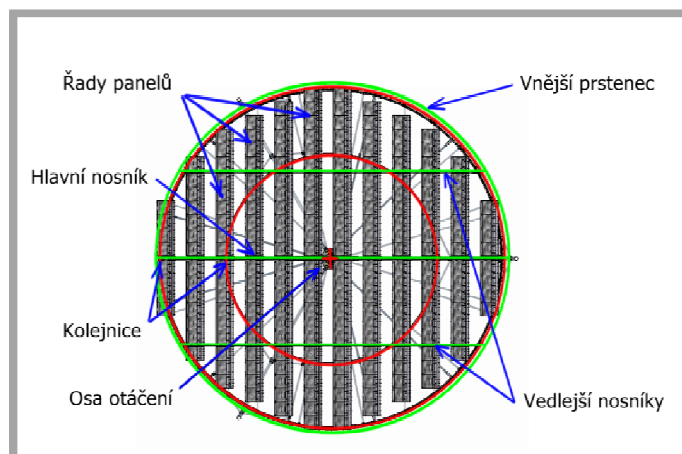
5.2 Koncepce trackeru

Aby došlo k maximálnímu využití prostoru, je třeba rozmístit co největší množství panelů na co nejmenší plochu. To v případě sloupových trackerů znemožňuje nutný pracovní prostor, který vyžadují pro svou činnost. Proto je zvolena nízkoprofilová kruhová koncepce s panely za sebou, kdy každá řada panelů má vlastní osu otáčení pro náměr (obr. 5.1). Firmou Ditech daný počet FV panelů k osazení na jednom trackeru (200ks) a jejich známé rozměry určují průměr trackeru okolo 8m.



Obr. 5.1 Umístění řad panelů za sebou

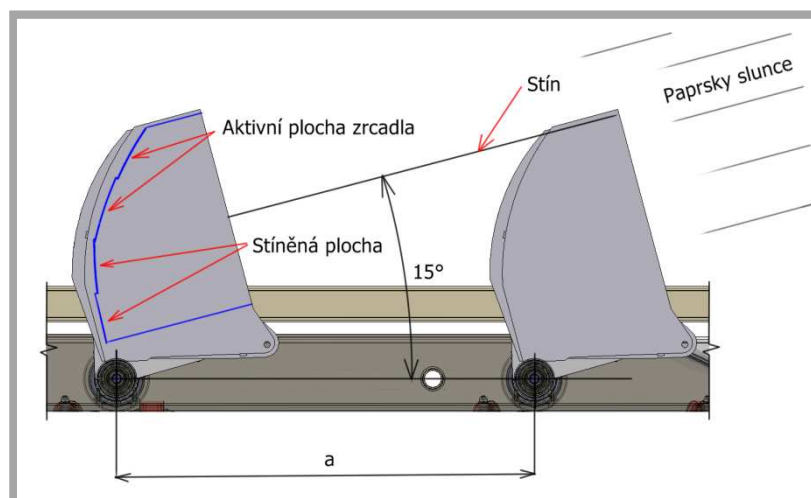
Řady panelů jsou umístěny na talíři, rotujícím kolem své osy, čímž je řízen odměr trackeru. Talíř je podpírán ve středu přes uložení ve dvojici ložisek a dále přes pojezdové rolny na dvou kolejnicích. Kolejnice jsou součástí nosné konstrukce. Jedna kolejnice se nachází na vnějším průměru, druhá zhruba v polovině. Nosné trubky pro panely jsou vázány v ložiscích na pěti místech – v hlavním nosníku, ve 2 vedlejších nosnících a ve vnějším prstenci na každé straně (obr. 5.2).



Obr. 5.2 Podpůrné prvky panelů

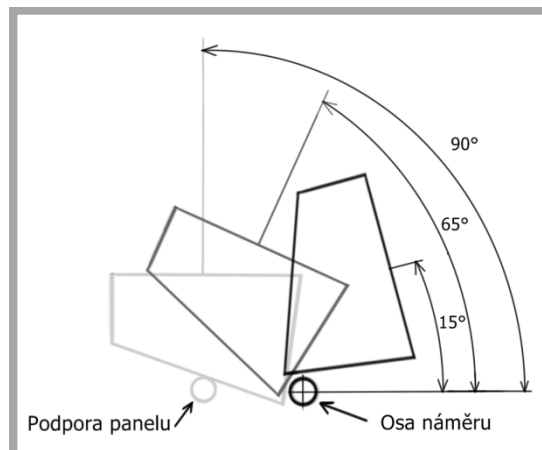
Účel trackeru je maximální energetický (a tím i finanční) zisk v průběhu roku. To umožňuje mít panely blíže u sebe. Jelikož v případě jejich stínění v časných ranních hodinách, případně v zimním období, jsou zisky vlivem průchodu slunečních paprsků atmosférou minimální, je tato část dne a roku nezajímavá. Výťažnost z plochy se tedy zvýší zmenšením rozestupů mezi panely.

Zadavatelskou firmou bylo určeno, aby panel začal pracovat při náměru 15° . Díky konstrukci zrcadla však nemusí být odkryt celý, ale pouze část (zadána polovina). Zrcadlo je rozděleno na čtvrtiny, z nichž každá ozařuje celý čip, rovnoměrnost osvitu (na kterou jsou tyto čipy citlivé) se tedy při zastínění části zrcadla sníží rovnoměrně. Z rozměru panelů a tohoto údaje lze tedy již snadno určit osovou vzdálenost jednotlivých řad na trackeru, jak lze vidět na obr. 5.3. Ideální osová vzdálenost je $a = 700 \text{ mm}$.



Obr. 5.3 Stínění panelů

Z obrázku 2.3 vyplývá, že využitelný náměr v našich zeměpisných šířkách činí $15^\circ - 65^\circ$. Tracker je však schopen dosáhnout $15^\circ - 90^\circ$. Důvodem je, že při extrémních větrech dojde ke sklopení do bezpečnostní polohy a panely dosednou na opory zabudované do talíře, čímž se odlehčí zatížení nosných trubek krutem a přenos síly do hnacího aktuátoru. Tyto opory dále mají montážní funkci, kdy zajistí, že všechny panely před dotáhnutím k nosným trubkám mají stejný náměr (90°).



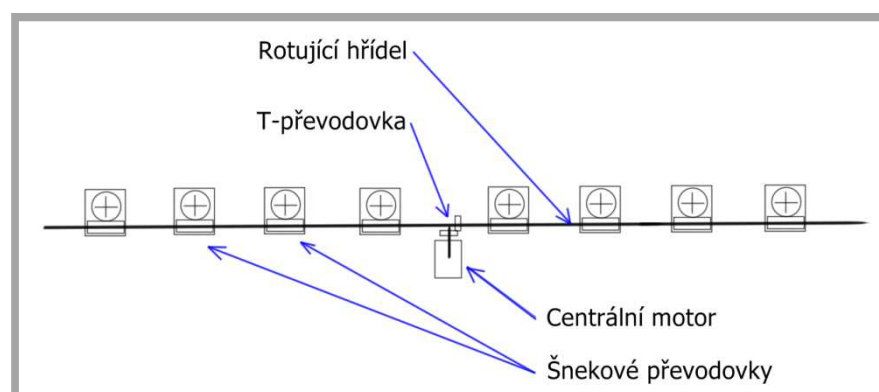
Obr. 5.4 Pracovní úhly panelu

Tento náměr také umožňuje umístění trackeru kdekoliv jižně od naší zeměpisné šířky, pokud budou splněny maximální přípustné povětrnostní podmínky.

5.2.1 Pohon náměru

Je žádoucí, aby náměr všech řad panelů byl řízen centrálně a to z důvodu synchronizace. V případě výpadku řízení jediné řady, by jinak díky zapojení panelů došlo k výpadku funkce celého trackeru. Další důvod je cena, protože pořizovací hodnoty pohonu jsou poměrně vysoké ve srovnání vůči převodovým prvkům nutným k centrálnímu řízení. Centrální řízení náměru lze v zásadě realizovat dvěma způsoby:

Rotující centrální hřídel – Běžný motor umístěný v ose rotace odměru žene přes T převodovku hřídel. Ta je napojena přes šnekové převodovky na každou nosnou trubku. Mezi výhody patří přesné uložení a vedení hnacího prvku, nízká cena hnací síly (motor je levnější než aktuátor) a samosvornost na každé jednotlivé nosné trubce. Nevýhodou však jsou nízké únosnosti velikostně odpovídajících šnekových převodovek běžně dostupných na trhu. Ty jsou stavěny spíše na přenos vyššího výkonu v otáčkách než na krouticí moment. V případě sestrojení vlastního převodového bloku se cena stává nerentabilní. Další nevýhodou by mohlo (na 4m dlouhém řídicím profilu na každé straně) být velký krut způsobený odporem převodovek pod zatížením, a tím jiné natočení hřídele na začátku a konci sestavy.

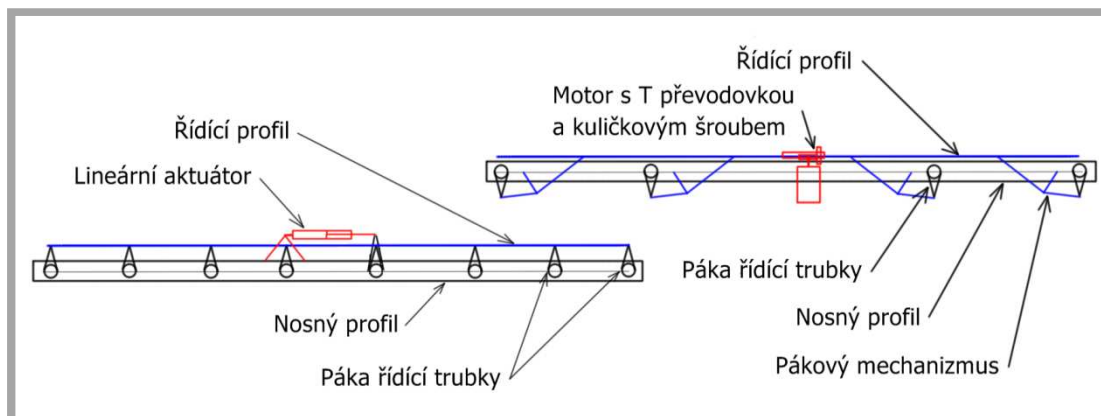


Obr. 5.5 Uspořádání s šnekovými převodovkami a rotujícím hřídelem

Posuvný řídicí profil – Každá nosná trubka je přes páku spojena s řídicím posuvným profilem. Jeho pohyb je zajištěn lineárním aktuátorem přes další páku. Mezi výhody se řadí jednoduchá konstrukce levná na výrobu. V případě nedostatečné tuhosti řídicího profilu, však může docházet k jeho vybočování a ohrožení funkce některých řad panelů (obr. 5.6).

Další možností je řídicí profil hnáný přes T-převodovku a kuličkový šroub motorem umístěným v ose odměru. Profil je možné mít vedený pevně na rolnách, jelikož je jeho pohyb na rozdíl od předchozího typu přímočarý. Pro změnu tohoto pohybu na rotační je nutno využít složitější pákový mechanismus, jak lze vidět na obr. 5.6. Mechanismus je celkově komplikovanější a tím finančně náročnější.

Po zvážení všech výhod, nevýhod a provedení výpočtu účinku větru uvedeného níže, byl pro konstrukci v DP využit posuvný řídicí profil s lineárním aktuátorem.



Obr. 5.6 Uspořádání s posuvným profilem

5.2.2 Pohon odměru

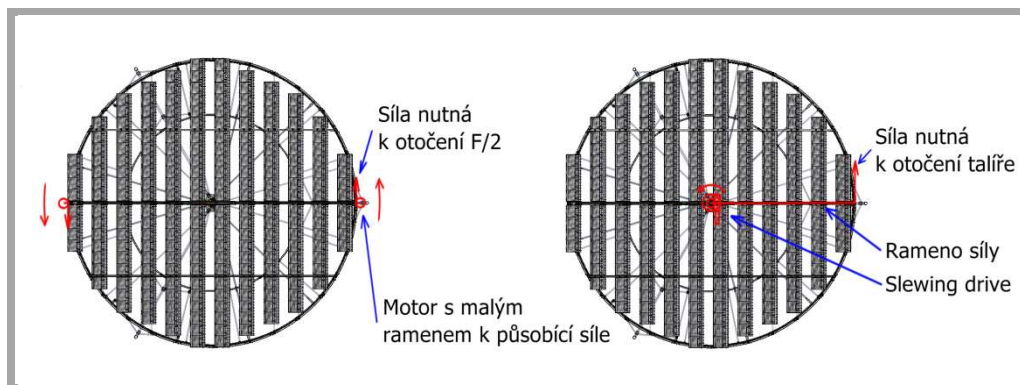
5.2.2

Odměr zajišťuje rotace celého talíře. V naší zeměpisné šířce je dostatečný odměr 260° (viz obr. 2.3), vzhledem k povaze pohybu na konstrukci však není důvod ho omezovat a je proto v plném rozsahu 360° . Vliv větru při návrhu mechanismu odměru je zanedbatelný. Vítr působí totiž na obě poloviny (od osy otáčení) stejně a rozdíly v odporu vznikají pouze na začátku a konci každé řady. Dimenzování pohonu odměru je více orientační než u náměru a je řešeno v konstrukční části DP. Pro realizaci bylo rozhodováno mezi dvěma možnostmi.

Slewing drive – Jedná se o technologii popsanou v řešeršní části DP. Je umístěn ve středu otáčení a pomocí výkonného motoru přes velkou šnekovou převodovku, jejíž oběžné kolo zároveň plní funkci axiálního ložiska, působí na talíř velkým momentem (obr. 5.7).

Kladka na vnějším obvodu – Druhá možnost je umístit malý motor s převodovkou s vysokým převodovým poměrem na vnější průměr. V tomto případě dochází celkově k nižšímu namáhání hlavního nosného profilu na ohyb do boku, protože většina odporu působícího proti motoru je soustředěna na vnějším průměru (uložen na pojezdových rolnách) a zdroj hnací síly je blízko bodu působení hlavní složky odporu. Střed talíře je uložen na ložisku. Malý motor je levnější a má menší zástavbové rozměry. Nevýhodou je nutnost řešení přitlačení hnací rolny ke kolejnici a složitější vedení kabelu napájení k pohonu (obr. 5.7).

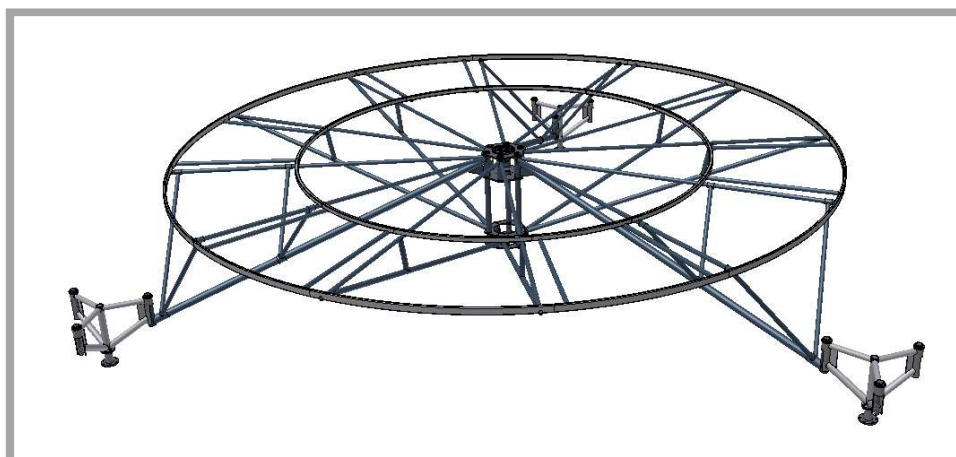
Po výpočtu nutného krouticího momentu k pohonu odměru jsem zvolil 2 kladky na vnějším obvodu umístěné v nosném profilu, a to především kvůli zástavbovým rozměrům slewing drive pohonu odpovídajících parametrů. Dvě kladky jsou zvoleny z důvodu menších rozměrů motoru a rovnoměrného rozložení hnací síly.



Obr. 5.7 Srovnání pohonů pro odměr

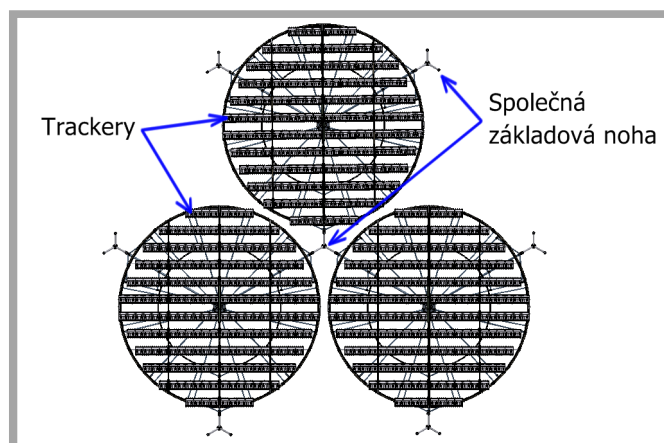
5.2.3 Stavba a výtěžnost

Firmou je požadováno, aby talíř trackeru pasoval na projektovanou nosnou konstrukci. Konstrukce je svařovaná z trubek a má hlavní tři nohy, na konci každé se nachází závitový úchyt. Tímto se připevní do základové nohy, kotvené v zemi. Základovou nohu sdílí každý tracker se dvěma dalšími, jak je vidět na obr. 5.9. To zajišťuje přesné rozmístění trackerů na zvoleném území a minimální vzdálenosti mezi nimi. Díky tomuto přesnému rozmístění se dosahuje maximální výtěžnosti z plochy. Chlazení FV čipů, v konceptu s bazénkem firmy Pyron solar (obr. 1.15) je nahrazeno umístěním čipů v olejové lázni v jednotlivých modulech. Konstrukce je opět řešena segmentově, což umožňuje snadnější dopravu na místo montáže a zinkování. Podrobnější obrázek konstrukce a jednotlivých segmentů je dostupný v obrázkových přílohách (OP1).



Obr. 5.8 Nosná konstrukce na základových nohách

Základové nohy nemají betonový základ, ale jsou osazeny v zemních vrutech, ty umožňují velmi rychlou stavbu, okamžité použití po zavrtání, přesné osazení i snadnou demontáž [31].



Obr. 5.9 Kotvení trackeru do společných noh

5.2.4 Korozivzdornost

5.2.4

Ochrana těch částí konstrukce, které jsou vystaveny venkovnímu prostředí, se dá zajistit různými způsoby. Vzhledem k tomu, že veškeré profily a součásti jsou ocelové, jsou uvažovány především různé formy zinkování.

Zinkové nátěrové hmoty umožňují přímou aplikaci pouze na vybrané plochy a je tedy možné vynechat funkční plochy. Nevýhodou je však potřeba nástřiku ve stříkací místnosti, kde je limitujícím faktorem prostor. Zinkové nátěry však často trpí nízkou životností. Moderní dvousložkové dlouhodobě stabilní nátěry vhodné i pro zvládání vysokých teplot (což v konstrukci solárního trackeru není potřeba) mají zase vysoké nároky na technologii nánosu (nutná specifická hodnota vzdušné vlhkosti, tryskání povrchu před aplikací).

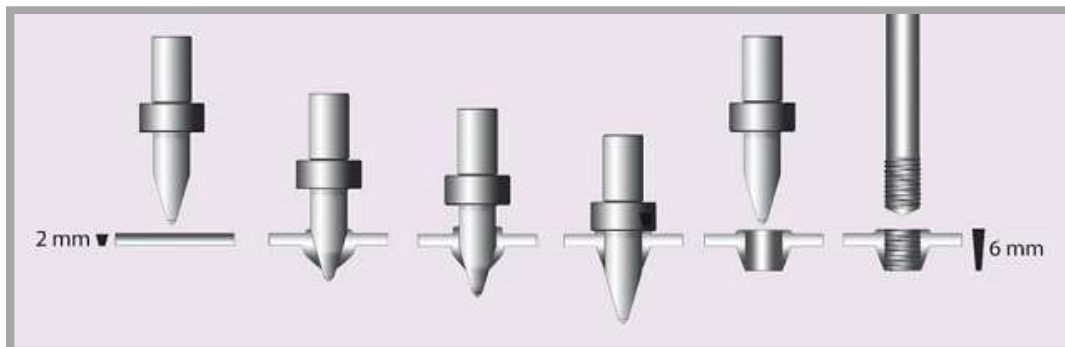
Žárové zinkování probíhá ponořením dílu do zinkové lázně. Tato technologie nabízí nejdéletrvající ochranu ze zde uvedených. Na funkční plochy dílů se nanese ochranná pasta a ty poté zůstávají bez vrstvy zinku. Tato metoda ochrany před korozi se jeví v případě solárního trackeru jako nejvhodnější především z důvodu dobré trvanlivosti.

Galvanické zinkování povrchu probíhá za studena elektrochemickou reakcí, je vhodnější pro menší díly. Má menší trvanlivost, než díly pozinkované žárově.

5.2.5 Závity v tenkostěnných profilech

5.2.5

Konstrukce obsahuje řadu závitů umístěných ve stěnách tloušťky 3-4mm. Budou proto provedeny technologií therm드릴 kdy při vniku do profilu je kov roztaven a protažen do nitra. Vzniká otvor s větší hloubkou, než je tloušťka stěny a závity zhotovené v těchto dírách jsou tedy lépe využitelné než závity v dírách vyvrtaných do stěny běžným způsobem. Technologie umožňuje vrtat i do trubek, na nichž vytvoří rovný límec a tedy vhodnou dosedací plochu. Ten se tvoří i při vrtání na rovině, jde však v případě potřeby snadno odstranit již v průběhu vrtání [34].



Obr. 5.10 Technologie thermadrill

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

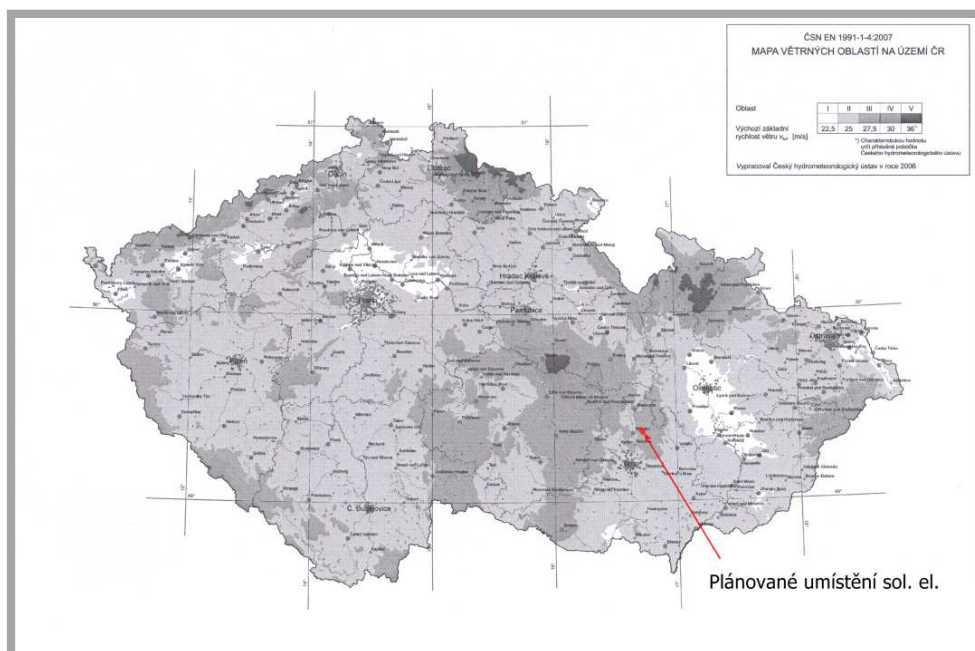
6

6.1 Určení zátěžných účinků

6.1

Konstrukce solárního trackeru je umístěna ve venkovních prostorech a je tedy vystavena povětrnostním účinkům. Účinky větru a jejich možné dopady na konstrukci při poryvech jsou jednoznačně z hlediska povahy konstrukce nejzávažnější. Pro výpočty zatížení větrem je použita norma ČSN EN 1991-1-4, vydaná v roce 2007.

Ta také jasně udává maximální rychlost větru, na kterou musí být konstrukce dimenzována v závislosti na geografické poloze. Za pomoci mapy z národní přílohy (obr. 6.1) bylo tedy stanoveno, že projekt spadá do povětrnostní oblasti III. Maximální základní rychlost větru (jinak také střední rychlost větru) je potom $v_{b0} = 30 \text{ ms}^{-1}$.



Obr. 6.1 Mapa větrných oblastí na území ČR

Pro podrobnější výklad normy jsem se obrátil na katedru ženijních technologií Univerzity Obrany v Brně, kde s touto normou mají zkušenosti. Mimo jiné mi bylo doporučeno, abych součásti při extrémním zatížení (které v reálu nastává krátkodobě a velmi zřídka) dimenzoval s bezpečnostním součinitelem $k_e = 1$ a při provozním zatížení se součinitelem $k_p = 1,4$.

6.1.1 Obecná rovnice pro výpočet účinku větru na řady panelů

6.1.1

Původní záměr byl pro výpočet účinků větru na konstrukci použít metodu konečných prvků. Úvodní zadání výpočtu je zde sice rychlejší než tvorba obecné analytické rovnice, ukázalo se však, že samotný výpočet trvá poměrně dlouho a při každé byť minimální změně zadání je nutné jej opakovat. Proto bylo přikročeno k výpočtu analytickou cestou, který je snadno modifikovatelný, a nové výsledky jsou

k dispozici okamžitě. V programu mathcad byla tedy vytvořena obecná rovnice, která slouží jako základ dalším výpočtům zabývajících se účinky větru.

Parametry rázu krajiny:

Základní dynamický tlak větru

$$q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_{b0}^2$$

Kde:

q_b Pa je základní dynamický tlak větru
 $\rho = 1,25 \text{ kg.m}^{-3}$ - měrná hmotnost vzduchu
 $v_{b0} = 30 \text{ m.s}^{-1}$ - základní střední rychlost větru

Intenzita turbulence ve výšce z

$$I_{vz} = \frac{k_I}{c_{0z} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

Kde:

I_{vz} je intenzita turbulence ve výšce z
 $k_I = 1$ - součinitel turbulence pro území ČR
 $c_{0z} = 1$ - součinitel orografie pro území ČR
 $z_0 = 0,003 \text{ m}$ - výška podle kategorie terénu – tabulková hodnota pro pobřežní oblasti
 $z = 1 \text{ m}$ - výška v místě účinku - tabulková hodnota

Součinitel (drsnosti) terénu

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_0}\right)^{0,07}$$

Kde:

k_r je součinitel pro plochý terén (ostatních případech se číselník a jmenovatel liší)

Součinitel drsnosti terénu ve výšce

$$c_{rz} = k_r \cdot \ln(z/z_0)$$

Kde:

c_{rz} je součinitel drsnosti terénu ve výšce vyjadřující změnu střední rychlosti větru v místě konstrukce způsobenou výškou nad úrovní terénu a drsností povrchu terénu návětrné strany

Střední rychlost větru ve výšce z

$$v_{mz} = c_{rz} \cdot c_{0z} \cdot v_{b0}$$

Kde:

v_{mz} m.s^{-1} je střední rychlost větru v závislosti na drsnosti terénu a orografii

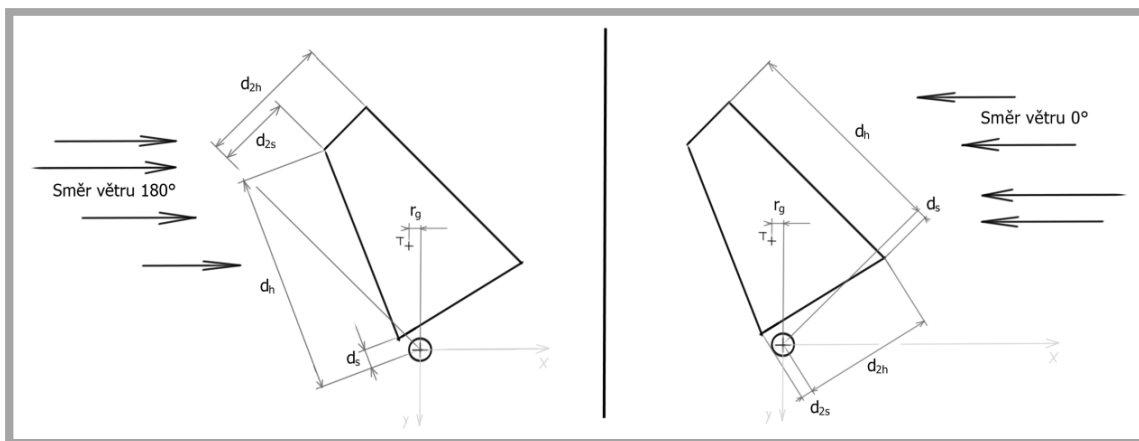
Maximální dynamický tlak

$$q_p = (1 + 7 \cdot I_{vz}) \cdot \rho \cdot v_{mz}^2 \cdot 0,5$$

Kde:

q_p Pa je maximální dynamický tlak zahrnující střední a krátkodobé fluktuace větru

Pro obecnou rovnici je použito zjednodušení geometrie panelu. Jeho kulaté stěny by výpočet značně zkomplikovaly a toto zjednodušení práci ve výsledcích posune na bezpečnou stranu, jelikož rovná plocha má větší odpor než zakřivená. Síla je uvažována pouze ve dvou směrech, přímo zepředu (0°) a přímo zezadu (180°), kde má největší vliv.



Obr. 6.2 Parametry výpočtu pro různé směry větru

Parametry sklopení panelů:

Součinitel vnějšího tlaku

$$c_{pe} = c_{pe1} + (c_{pe10} - c_{pe1}) \cdot \log(A)$$

Kde:

c_{pe}

je součinitel vnějšího tlaku na plochu 1 určující vliv sklopení – v případě shodné hodnoty pro c_{pe10} a c_{pe1} (v DP díky nízkému profilu téměř vždy) není na ploše závislý

c_{pe1}

- součinitel tlaku v 1m pro plochu 1 – tabulková hodnota závislá na sklonu plochy

c_{pe10}

- součinitel tlaku v 10m pro plochu 1 – tabulková hodnota závislá na sklonu plochy

A

- plocha 1 ovlivněná větrem

Součinitel vnějšího tlaku 2

$$c_{2pe} = c_{2pe1} + (c_{2pe10} - c_{2pe1}) \cdot \log(A_2)$$

Kde:

c_{2pe}

je součinitel vnějšího tlaku na plochu 2 určující vliv sklopení – v případě shodné hodnoty pro c_{2pe10} a c_{2pe1} (v DP díky nízkému profilu téměř vždy) není na ploše závislý

c_{2pe1}

- součinitel tlaku v 1m pro plochu 2 – tabulková hodnota závislá na sklonu plochy

c_{2pe10}

- součinitel tlaku v 10m pro plochu 2 – tabulková hodnota závislá na sklonu plochy

A_2

- plocha 2 ovlivněná větrem

Tlak větru na řadě bez krytí

$$w_{ep} = q_p \cdot C_{pe}$$

Kde:

w_{ep} Pa je tlak větru na plochu 1 v místech, kde panely nejsou v zákrytu za předchozí řadou

Tlak větru na řadách v zákrytu

$$w_{ec} = w_{ep} \cdot 0,6$$

Kde:

w_{ec} Pa je tlak větru na plochu 1 v místech, kde panely jsou v zákrytu za předchozí řadou

Tlak větru na řadě bez krytí 2

$$w_{2ep} = q_p \cdot C_{2pe}$$

Kde:

w_{2ep} Pa je tlak větru na plochu 2 v místech, kde panely nejsou v zákrytu za předchozí řadou

Tlak větru na řadách v zákrytu 2

$$w_{2ec} = w_{2ep} \cdot 0,6$$

Kde:

w_{2ec} Pa je tlak větru na plochu 2 v místech, kde panely jsou v zákrytu za předchozí řadou

Vzorce pro výpočet krouticího momentu na ose náměru jedné řady panelů vzniklého vlivem větru:

Délka úseku panelů bez krytí na řadě n

$$d_{pn} = d_m \cdot x_{pn}$$

Kde:

d_{pn} m je délka úseku panelů, které se nenachází ve větrném zákrytu panelů předchozí řady n-1

d_m 0,33m - délka jednoho segmentu panelu koncentrátoru

x_{pn} - počet segmentů panelů v řadě bez zákrytu od předchozí řady n-1

Délka úseku panelů s krytím na řadě n

$$d_{cn} = d_m \cdot x_{cn}$$

Kde:

d_{cn} m je délka úseku panelů, které se nachází ve větrném zákrytu panelů předchozí řady n-1

x_{cn} -počet segmentů panelů v řadě v zákrytu od předchozí řady n-1

Celkový počet panelů v řadě n

$$x_n = x_{pn} + x_{cn}$$

Kde:

x_n je celkový počet segmentů panelu v řadě n

Moment od gr. síly panelů řady n

$$M_{gn} = m_k \cdot x_n \cdot g \cdot r_n$$

Kde:

M_{gn}	N.m	je moment síly od tíhového zrychlení na panely v řadě n
m_k	kg	- hmotnost jednoho segmentu panelu koncentrátoru
g	9,81 m.s ⁻²	- gravitační zrychlení
r_g	m	- rameno působení gravitační síly k ose náměru

Moment od panelů bez krytí na plochu 1 v řadě n

$$M_{pn} = d_{pn} \cdot w_{ep} \cdot \int_{r_d}^{r_h} r \, dr$$

Kde:

M_{pn}	N.m	je moment od tlaku na plochu 1 u panelů mimo zákryt předchozí řady panelů n-1
r_h	m	- horní souřadnice plochy 1 v souř. systému panelu (obr 6.2.)
r_d	m	- dolní souřadnice plochy 1 v souř. systému panelu (obr 6.2.)

Moment od panelů v zákrytu na plochu 1 v řadě n

$$M_{cn} = d_{cn} \cdot w_{ec} \cdot \int_{r_d}^{r_h} r \, dr$$

Kde:

M_{cn}	N.m	je moment od tlaku na plochu 1 u panelů v zákrytu předchozí řady panelů n-1
----------	-----	---

Moment od panelů bez krytí na plochu 2 v řadě n

$$M_{2pn} = d_{pn} \cdot w_{2ep} \cdot \int_{r_{d2}}^{r_{h2}} r \, dr$$

Kde:

M_{2pn}	N.m	je moment od tlaku na plochu 2 u panelů mimo zákryt předchozí řady panelů n-1
r_{h2}	m	- horní souřadnice plochy 2 v souř. systému panelu (obr 6.2.)
r_{d2}	m	- dolní souřadnice plochy 2 v souř. systému panelu (obr 6.2.)

Moment od panelů v zákrytu na plochu 2 v řadě n

$$M_{2cn} = d_{pn} \cdot w_{2ec} \cdot \int_{r_{d2}}^{r_{h2}} r \, dr$$

Kde:

M_{2cn}	N.m	je moment od tlaku na plochu 2 u panelů v zákrytu předchozí řady panelů n-1
-----------	-----	---

Celkový moment

$$M_n = M_{pn} + M_{cn} + M_{2pn} + M_{2cn} + M_{gn}$$

Kde:

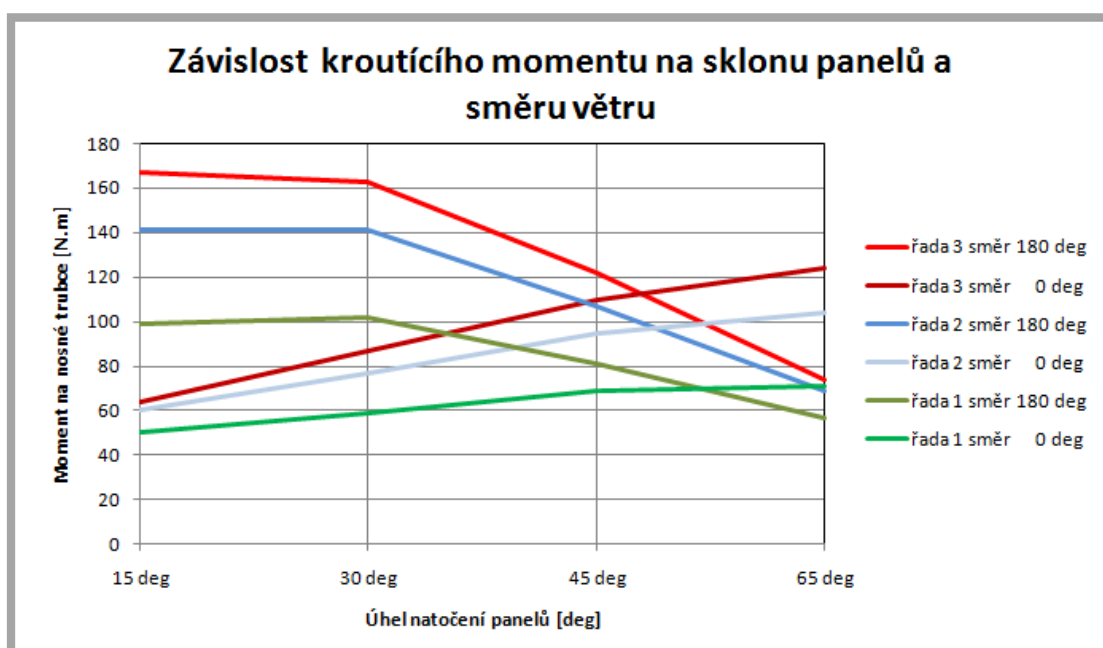
M_n	N.m	je suma momentů od panelů v zákrytu i mimo a momentu od gravitační síly. Jedná se o moment poloviny celé řady n trackeru, jelikož úloha je počítána jako symetrická
-------	-----	---

Posuvné síly v ose x a y jsou poté vypočítány a rozloženy do požadovaných směrů z tlaku na ploše.

Poslední blok výpočtu je pro každou řadu proveden zvlášť a celkové hodnoty jsou sumací dílčích výsledků. Index n zpravidla značí číslo řady, na které je výpočet prováděn. Výpočty jsou vedeny obecně tak, aby platily pro každou řadu, což má v některých výpočetních přílohách za následek mnoho hodnot rovnajících se 0.

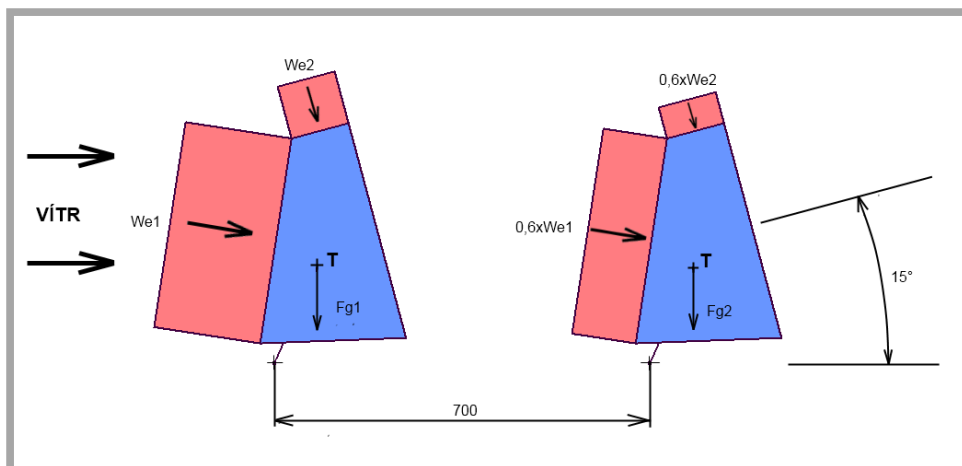
6.1.2 Určení nejnebezpečnějšího způsobu zatěžování

V předchozím obecném výpočtu lze vidět, že na velikost zatížení má vliv několik faktorů. Těmi jsou poloha těžiště vůči ose, směr větru a úhel sklonu panelů. Bylo proto provedeno několik výpočtů zatížení pod různými úhly pro tři zvolené řady, aby bylo možno určit trend změny zatížení konstrukce. Výsledky jsou zakresleny v následujícím grafu na obr. 6.3 zobrazujícím závislost krouticího momentu na natočení panelu a směru větru.



Obr. 6.3 Graf pro určení nejnebezpečnějšího směru větru

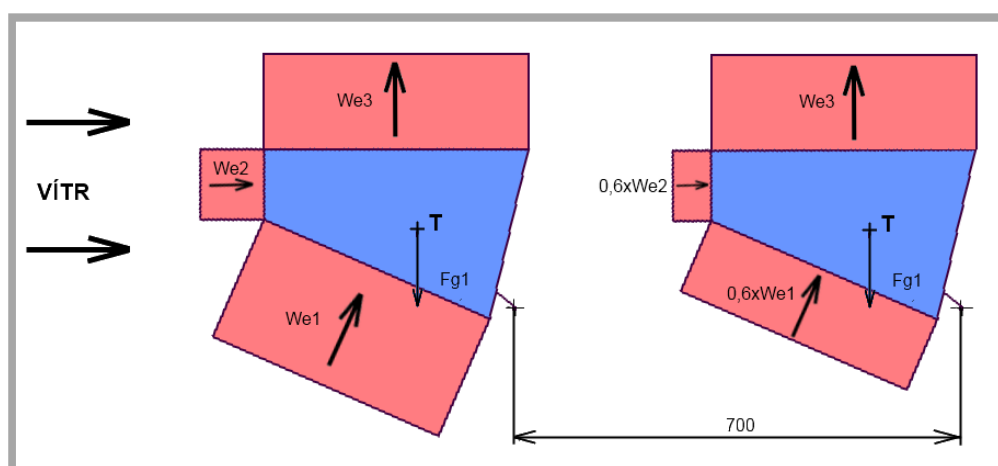
Z grafu lze vyčíst, že největší zatížení nastávají při směru větru 180° a ranní pracovní poloze, tedy natočení panelu na 15°. Výpočetní model je pak znázorněn na obr. 6.4. Z výsledků také vyplývá, že vhodným posunutím těžiště panelu vůči ose náměru bychom dosáhli snížení maximálních hodnot pro směr větru 180° a zvýšením pro směr 0°. To by vedlo k celkovému snížení namáhání a jeho symetrickému rozložení pro oba směry větru. Řešení panelů však není předmětem této DP.



Obr. 6.4 Zatížení větrem ze směru 180° při pracovní poloze

V dalším kroku proběhl výpočet zatížení v bezpečnostní poloze s panely sklopenými na 90°. Ten je proveden při směru větru 180°, kde je určeno maximální zatížení krouticím momentem na jednotlivých řadách (viz příloha VP1) a tedy i zatížení řídicího aktuátoru silou přes páku (při zatížení v tomto směru nejsou řady podepřeny bezpečnostní podporou panelu).

Dále je toto zatížení větrem využito k výpočtu sil majících zdvižný efekt na talíř a ověření možnosti nadzvednutí a „podfouknutí“ trackeru. Tato možnost je ve výpočtu (viz příloha VP2) potvrzena, a je k ní přihlédnuto v konstrukci pojezdového ústrojí. To je poté schopno zachytávat i síly opačné ke směru gravitace. Zde je směr 180° vlivem orientace jednotlivých ploch nebezpečnější. K sacímu efektu W_{e3} se připojuje ještě působení na spodní plochu W_{e1} (obr. 6.5).



Obr. 6.5 Zatížení větrem ze směru 180° v bezpečnostní sklopené poloze

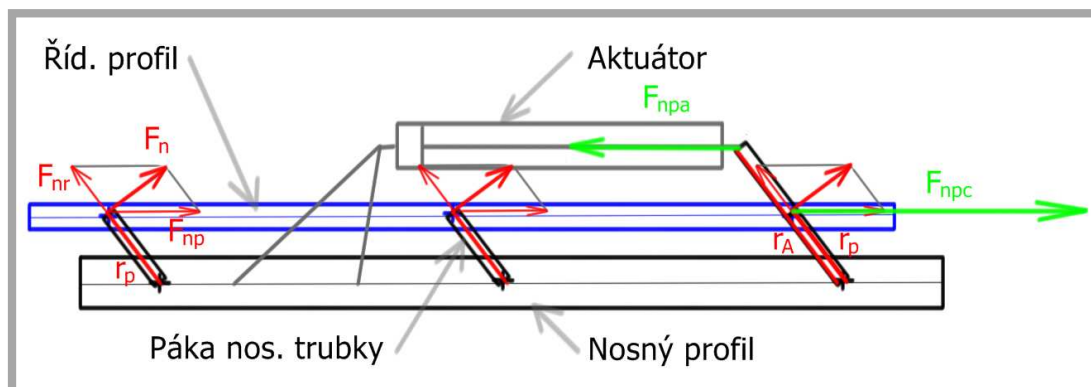
Výpočet při směru větru 0° z důvodu většího aerodynamického odporu v podélném směru byl proveden za účelem získání maximálních hodnot posuvných sil, které je nutné započítat při úpravě dimenzování zadané nosné konstrukce (viz příloha VP3).

6.2 Pohybová soustava

V této části jsou přiblíženy číselné výsledky výpočtu a jejich aplikace na pohybovou soustavu trackeru.

6.2.1 Pohon náměru

Extrémní hodnoty zatížení jsou tedy počítány pro bezpečnostní polohu, což je případ zatížení z obr. 6.5. Síly vznikající tímto působením větru a jejich rozklad do požadovaných směrů jsou schematicky znázorněny na obr. 6.6.



Obr. 6.6 Schematické rozložení sil na výřezu trackeru v bezpečnostní poloze

Každá jednotlivá nosná trubka panelů působí silou na řídicí profil. Tato síla je vyjádřena z momentu sil každé jednotlivé řady a vzniká zatížením plochy panelů větrem. Je dána takto:

$$F_n = M_{Rn} / r_p$$

Kde:

F_n	N	je síla od momentu řady n
r_p	m	- rameno páky
M_{Rn}	N.m	- moment sil od řady n

Síla F_n se dále rozkládá do dvou směrů (viz obr. 6.6) – podélně s řídicím profilem jako složky F_{np} a do osy páky nosné trubky jako F_{nr} . Tento rozklad byl proveden graficky v náčrtu v inventuru. Pohybu profilu zamezuje jeho ukotvení v páce aktuátoru a celková síla působící na něj v podélném směru jako důsledek zatížení větrem je pak dána jako:

$$F_{pc} = \sum_{n=1}^{12} F_{np}$$

Kde:

F_{pc}	N	je celková síla na řídicí profil v podélném směru
F_{np}	N	- síla na řídicí profil v podélném směru od řady n

Síly z rozkladu F_{nr} mají vliv vždy pouze na uložení dané řady panelů v nosném profilu a nepromítají se tedy do uložení řídicího profilu v páce aktuátoru. Aktuátor

položený při bezpečnostním natočení panelů rovnoběžně s řídicím profilem pak působí na páku silou:

$$F_A = F_{pc} \cdot \frac{r_p}{r_A}$$

Kde:

F_A N je síla, kterou aktuátor brání v pohybu řídicímu profilu
 r_A m - rameno páky aktuátoru

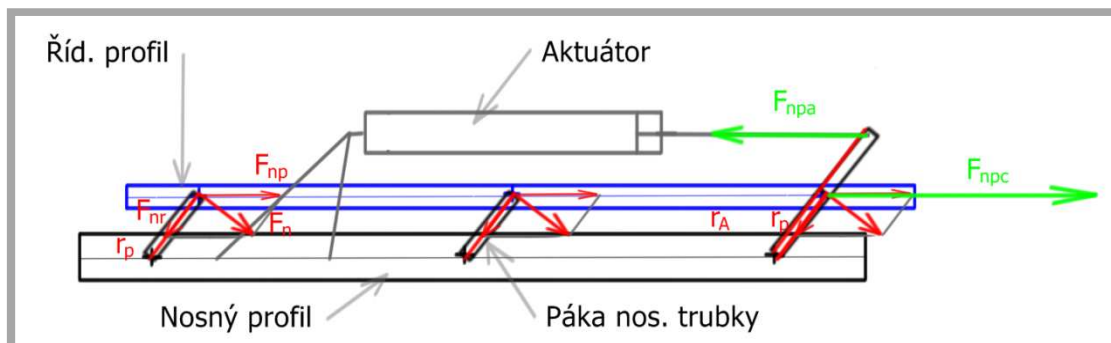
Momenty sil jednotlivých řad, síly a jejich rozklad jsou shrnuty v tab. 1.

Tab. 1 Výsledné hodnoty z výpočtu zatížení od větru pro jednotlivé řady

Č. řady	M_n [N.m]	F_n [N]	F_{np} [N]	F_{nr} [N]
1	228,0	1452,4	1830,6	1114,4
2	323,5	2060,3	2596,8	1580,9
3	380,8	2425,4	3057,0	1861,0
4	400,0	2547,7	3211,1	1954,9
5	438,1	2790,5	3517,1	2141,2
6	476,2	3033,2	3823,0	2327,4
7	504,6	3213,7	4050,5	2465,9
8	466,4	2971,0	3744,6	2279,6
9	428,3	2728,2	3438,6	2093,3
10	390,2	2485,5	3132,7	1907,1
11	314,0	2000,1	2520,9	1534,7
12	199,7	1271,8	1603,0	975,9
Σ	4549,8	28979,8	36526,1	22236,2

Poměr délek ramen na páce aktuátoru je tedy zvolen tak, aby síla, kterou musí být aktuátor schopen vyvinout, byla shodná s maximální působící silou a nabývá hodnoty $r_A/r_p = 2,69$. Konstrukce je pak osazena aktuátorem série DMA s kuličkovým šroubem a zdvihem 612mm, který zajišťuje udržení maximální statické síly $F_A = 13600$ N. Provozní zátěžná síla je $F_{AP} = 7000$ N. Je možná i montáž výkonnějšího aktuátoru s menším zdvihem a blíže k řídicímu profilu, zvýší se tím však nároky na materiál kotvicích prvků aktuátoru, jeho páku a především cena samotného aktuátoru (až ve stovkách procent). Cena jednoho aktuátoru řady DMA daných parametrů činí 16724 – 9563 Kč v závislosti na množství kusů [33].

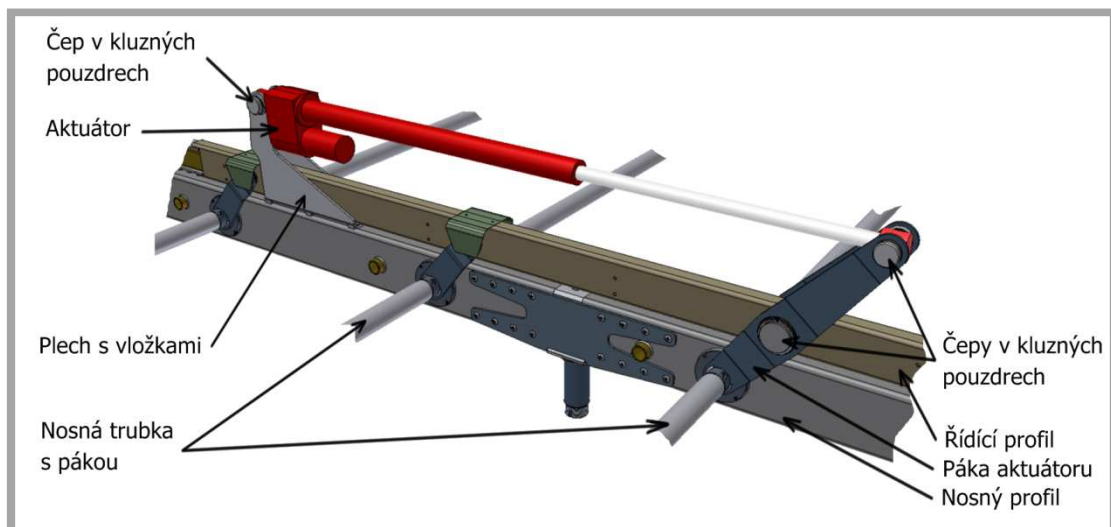
Pro určení maximální provozní rychlosti větru je využit obrácený výpočet. Způsob zatížení je zobrazen na obr. 6.4 a rozložení sil na obrázku obr. 6.7. Jedná se o druhou krajní polohu než v předchozím výpočtu a rozložení sil je tedy kromě otočení směru zatěžování v osách pák analogické.



Obr. 6.7 Působení sil na řídicí profil – nejnebezpečnější pracovní poloha

Do výpočtu provozního zatížení byla dosazována rychlost větru, dokud se výsledky celkového zatížení nerovnaly s výsledky extrémního zatížení na sklopené panely přepočítanými přes bezpečnostní koeficient 1,4. Ten byl určen při výše zmíněné konzultaci na Univerzitě Obrany. To zajistí, aby všechny součásti počítané na namáhání od větru a počítané v extrémním případě na bezpečnost 1, dosáhly při pracovním zatížení bezpečnostního koeficientu 1,4. Hodnota větru vyvolávajícího toto zatížení pak je $v_{b0x} = 20 \text{ m.s}^{-1}$ (viz příloha VP4).

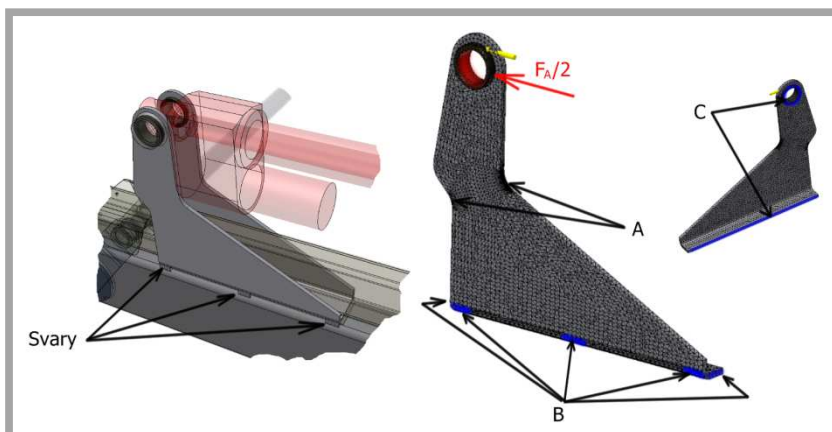
Uložení aktuátoru je realizováno vzadu za pomoci ohnutého plechu tloušťky 6 mm s navařenými vložkami, vpředu přes páku ramena realizovanou obdobně (obr. 6.8). Obě součásti jsou vysoce namáhány a tvarově nevhodné pro analytický výpočet. K jejich dimenzování byla tedy použita metoda konečných prvků. Pro simulaci je využit software Autodesk Inventor 2010, jelikož umožňuje rychle upravovat jednotlivé prvky v průběhu analýz a tím urychlit dosažení požadovaných parametrů. Poslední verze součásti je následně převedena do sofistikovanějšího programu Ansys a ověřena. V těchto jednoduchých případech se však výsledky liší v řádu jednotek procent.



Obr. 6.8 Uložení aktuátoru (pohled bez krycích plechů v maximálně vysunutě poloze)

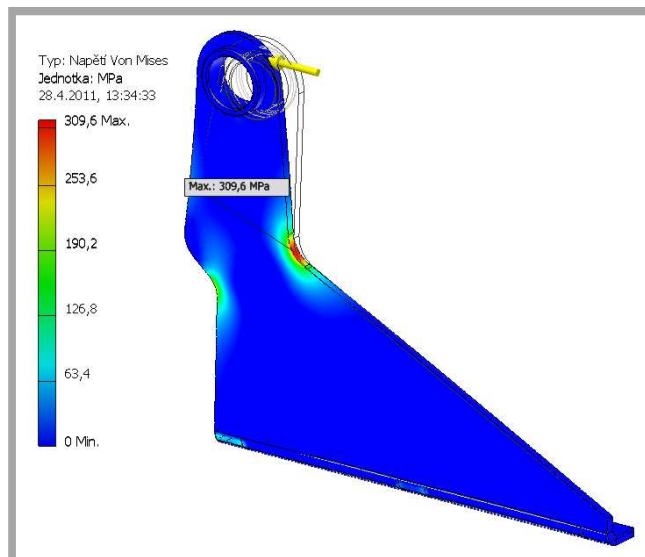
Prostor pro **zadní uložení** je omezen pákou a uložením čepu předcházející řady. Tvar plechu proto prošel řadou úprav, aby bylo dosaženo požadovaných výsledků. Plech je navařen na nosný profil na několika místech. Svary na boku mají podpůrný charakter pro zakřivenou plochu v ohybu plechu (obr. 6.9). Materiál plechu je ocel

1.0978 dle SEW 092, jejíž mez kluzu v tahu je $R_e=380$ MPa a minimální poloměr ohybu pro tloušťku 6mm se rovná tloušťce plechu [32]. Při MKP simulacích se vzhledem k povaze výpočtu pracuje v tomto případě s bezpečností 1,2, a tedy maximální dovolené redukované napětí nesmí přesáhnout hodnotu 317 MPa. V dané simulaci je použit poloviční model, jelikož se jedná o symetrickou součást i zatížení. Prvek je zvolen 20-ti uzlový SOLID. Síť je zjemněna v oblastech s očekávaným špičkovým napětím (oblasti A v obr.). Součást je zavazbena pomocí vazeb fixed support v oblastech B a displacement v oblastech C. Kotvící oko aktuátoru je pak zatíženo silou $F_A/2 = 6,8$ kN.



Obr. 6.9 Zadání MKP analýzy plechu aktuátoru

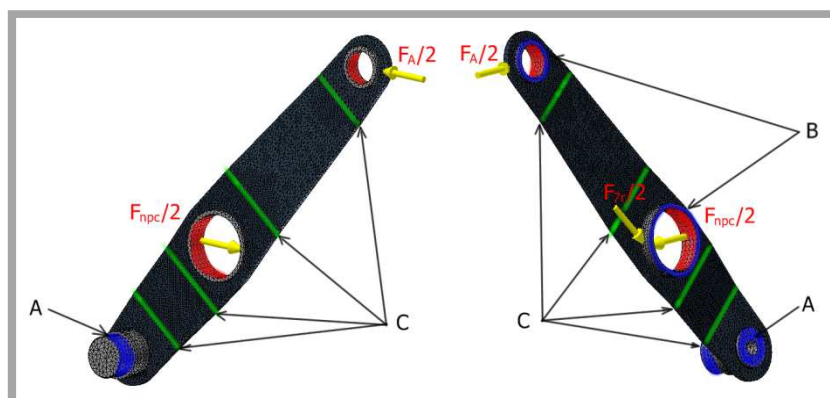
Výsledky jsou zobrazeny na obr. 6.10, maximální redukované napětí dosahuje hodnoty 309,6 MPa a součást tedy splňuje požadovaný parametr napětí, maximální hodnota posunutí je 0,43 mm, což nemá na tracker funkční vliv.



Obr. 6.10 Výsledky MKP analýzy plechu aktuátoru

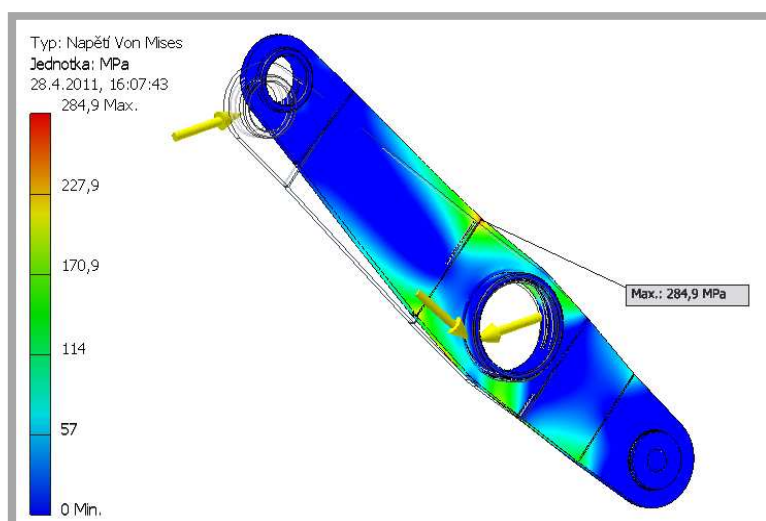
Páka aktuátoru je vystavena většímu namáhání než páky jednotlivých řad. Proto původně byla zamýšlena její výroba z odolnějšího materiálu dostupného pro plech tloušťky 6mm S500MC, avšak úpravami vycházejícími z průběžných výsledků MKP analýzy bylo dosaženo ideálního tvaru, kdy mohl být zachován původní levnější

materiál i tloušťka plechu jako u ostatních pák. Tím odpadá také zvláštní varianta hřídele s rovnobokým drážkováním na nosné trubce s pákou aktuátoru. Materiál páky, bezpečnostní koeficient a použitý prvek jsou zvoleny stejně jako v minulém případě, tedy 1.0978 dle SEW 092, 1,2 a 20-ti uzlový SOLID. Zadání úlohy do softwaru lze vidět na následujícím obr. 6.11. Na zjednodušenou koncovku nosné trubky jsou umístěny vazby fixed support (oblasti A). Na stranách navařených ok se nalézají vazby displacement (oblasti B), zabraňující nereálnému vybočení součásti. Zatěžující síly jsou chápány jako síly vyvolané působením kotevních čepů a jsou umístěny na vnitřní plochy kotevních ok. Síla na hlavním oku ve směru řídicího profilu má hodnotu $F_{npc}/2 = 18260 \text{ N}$ a síla v ose páky potom $F_{7r}/2 = 1233 \text{ N}$. Reakční síla aktuátoru je v horním oku zadána hodnotou $F_A/2 = 6800 \text{ N}$. Špičky napětí vznikají v místech ohybu plechu a proto je zde provedeno výrazné zjemnění sítě (oblasti C). Další špičky se nacházejí na hranách plechu v okolí hlavního čepu. Postupnými úpravami šířky páky, polohy a úhlů ohybu se dospělo k výslednému tvaru součásti vyhovujícímu požadavkům. Ten je zobrazen na obr. 6.11.



Obr. 6.11 Zadání MKP analýzy páky aktuátoru

Výsledky jsou vidět na obr. 6.12, maximální redukované napětí dosahuje hodnoty 284,9 MPa a součást tedy splňuje požadovaný parametr napětí, maximální hodnota posunutí je 1,47 mm, což nemá na tracker funkční vliv.



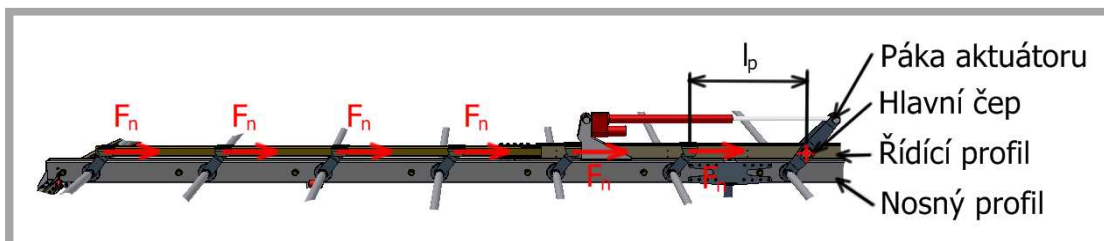
Obr. 6.12 Výsledky MKP analýzy páky aktuátoru

Čepy uložení aktuátoru jsou spočteny analyticky na smyk i odolnost proti otláčení v uložení čepu při zatížení F_n (viz příloha VP5). Hlavní čep poté pod maximálním zatížením daným součtem F_{npc} a F_7 je spočítán v příloze VP6 a čepy jednotlivý řad panelů jsou spočítány podle extrémního zatížení na řadě 6 (řada 7 je osazena hlavním čepem v páce aktuátoru) pro sílu $F_6 = 3033 \text{ N}$ (viz příloha VP7). Všechny čepy profilu a aktuátoru jsou cementovány a kaleny na 45 – 53 HRC.

Řídicí profil je rozdělen na tři části a to ze dvou důvodů. Prvním je příliš velká délka profilu v jednom kuse, a za druhé je nutné, aby byl profil ve střední části silnější, jelikož výška profilu je mimo jiné dána nutným prostorem k zabudování a zavaření náboje pro čep páky aktuátoru. Kontrola na vzpěr je provedena následujícím způsobem:

Určení zatěžující síly:

Vzpěr je počítán na jednom segmentu řídicího profilu a to mezi čepem šesté řady a hlavním čepem v páce aktuátoru, který zamezuje profilu v pohybu. Zde dochází k maximálnímu namáhání na řídicí profil. Je počítáno riziko vybočení profilu do boku (tedy ve směru, kde je profil užší).



Obr. 6.13 Zadání vzpěru

$$F_z = \sum_{n=1}^6 F_n = 18 \text{ kN}$$

Kde:

F_z	N	je celková zatěžující síla na vybranou část profilu
F_n	N	- celková síla v podélném směru profilu od řady n – hodnoty vzaty z tab. 1

Srovnávací kritická síla:

$$F_{krit} = \frac{\pi^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot J_p}{l_p^2} = 596,8 \text{ kN}$$

Kde:

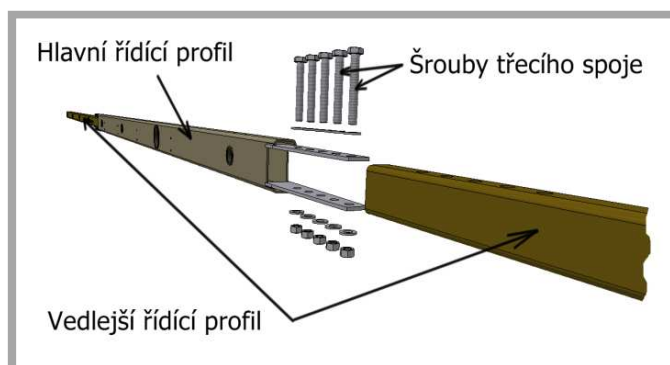
F_{krit}	N	je srovnávací kritická síla [35]
α	= 1	- součinitel vazeb pro dvě točná uložení
E	= 210 GPa	- modul pružnosti v tahu
J_p	= 14,17 cm ⁴	- kvadratický moment průřezu profilu
l_p	= 700 mm	- délka počítaného úseku

Bezpečnostní součinitel:

$$k_v = \frac{F_{krit}}{F_z} = 33,16$$

Bezpečnost vůči ztrátě vzpěrné stability je tedy dostatečná, profil má stěnu tloušťky 2mm a není proto možné využít vysoké hodnoty k_v k jeho dalšímu odlehčení.

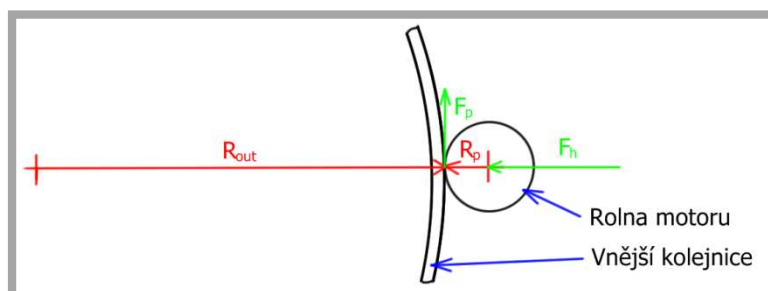
Jednotlivé části profilu jsou spojeny přes 5 šroubů třecím spojem (obr. 6.14) zvoleným z důvodu nevhodnosti použití osazených šroubů. Díry pro ně by se musely vrtat po složení a osazené šrouby nejsou příliš vhodné pro přenos smykových sil na tenkostěnných profilech. Nutná třecí síla je spočtena v příloze VP8 a nutný počet šroubů a jejich dimenzování se nachází v příloze VP9.



Obr. 6.14 Třecí spoj řídicího profilu

6.2.2 Pohon odměru

Spočítat nutný moment k otočení trackeru se ukázalo být neobvyklou úlohou. V DP práci se vychází z valivého odporu pojezdových rolen uchycených na talíři a valících se po kolejnici nosné konstrukce a rovnoměrného rozložení hmotnosti talíře a panelů na kolejnici a středové uložení. Odpor středového ložiskového uložení je však zanedbán z důvodu nízkých koeficientů valivého odporu pro ložisko a velmi malého ramena působení odporové síly. Dále jsou zanedbány setrvačné síly talíře, jelikož se počítá s velmi pomalým pohybem. Postup výpočtu je tedy následující:



Obr. 6.15 Síly na rolně motoru

Zatížení na vnější a vnitřní kolejnici:

$$F_{out} = F_{in} = \frac{m_r \cdot g}{3} = 4,9 \text{ kN}$$

Kde:

F_{out}	N	je gravitační síla rozložena na vnější kolejnici
F_{in}	N	- gravitační síla rozložena na vnitřní kolejnici
m_r	= 1500 kg	- celková hmotnost talíře a panelů
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- gravitační zrychlení

Třecí síla od rolen na vnější a vnitřní kolejnici:

$$F_{tin} = F_{tout} = \xi \cdot \frac{F_{in}}{R_m} = 88,3 \text{ N}$$

Kde:

F_{tin}	N	je třecí síla od rolen na vnitřní kolejnici
F_{tout}	N	- třecí síla od rolen na vnější kolejnici
ξ	= 0,4 5mm	- součinitel valivého odporu (ocel/ocel)
R_m	= 25 mm	- poloměr podpůrných rolen talíře

Celkový moment nutný k otočení talíře:

$$M_p = F_{tout} \cdot R_{out} + F_{tin} \cdot R_{in} = 574,6 \text{ N.m}$$

Kde:

M_p	N.m	je celkový moment
R_{out}	= 4 m	- poloměr vnější kolejnice
R_{in}	= 2,51 m	- poloměr vnitřní kolejnice

Nutná síla na vnějším obvodu:

$$F_p = \frac{M_p}{R_{out}} = 143,6 \text{ N}$$

Nutný moment motoru odměru:

$$M_o = F_p \cdot R_p = 3,95 \text{ N.m}$$

Kde:

M_o	N.m	je nutný moment vyvozený motorem odměru na kolejnici
R_p	= 27,5 mm	- poloměr rolny motoru s pryžovým běhounem

Přítlačná síla kladky motoru:

Aby bylo možné přenést sílu z motoru na kolejnici, je nutné vyvolat na kladku dostatečnou přítlačnou sílu směrem ke kolejnici, jinak by docházelo k volnému protáčení kladky bez dalšího efektu. Pro zmenšení nutné přítlačné síly je vhodné zvýšit koeficient tření mezi kolejnici a kladkou, čehož bylo dosaženo použitím pryžového běhounu na kladce motoru.

$$F_h = \frac{F_p \cdot R_p}{\xi_h} = 513 \text{ N}$$

Kde:

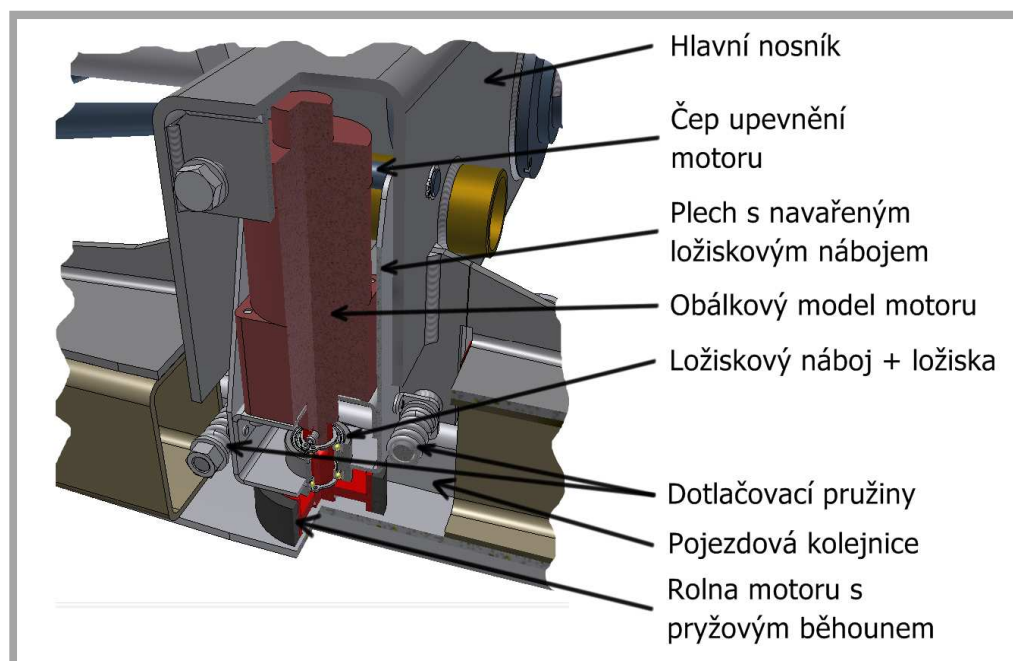
F_h	N	je minimální přítlačná síla na kladku aby došlo k přenesení nutného momentu
ξ_h	= 7,7 mm	- součinitel valivého odporu (ocel/pryž)

Původní koncept počítal s využitím podpůrných rolen s pryžovým běhounem a pouze kluzným uložením, případně celoplastový rolen. Odporové síly však byly řádově

vyšší díky vyšším součinitelům valivého tření a proto bylo přistoupeno na celokovové podpůrné rolly osazené ložisky.

Přítlačná síla je na hnací rolnu vyvinuta přes dvojici pružin, jak je vidět na obr. 6.16. Pružiny jsou formované za studena z nerezové oceli dle EN 10270-3 (1.4310). Vedeny jsou na trnech, které jsou pevnou součástí nosného profilu (výpočet pružin v příloze VP10). Na jedné straně jsou pružiny podepřeny podložkami a plechem motoru, na druhé straně jsou zajištěny přes podložky a matice s gumovou vložkou na koncích trnů.

Motor je pak zvolen stejnosměrný ze série PDS4360 se zabudovanou planetovou převodovkou a maximálním krouticím momentem 5,9 N.m a velmi kompaktními rozměry [33]. Ty umožňují mimo jiné zástavbu přímo do nosného profilu. Vzhledem k teoretické povaze výpočtu a s přihlédnutím k rovnoměrnosti namáhání konstrukce bylo přistoupeno k osazení dvojice motorů – na každý konec nosného profilu jeden. Aby pod tlakem dvojice pružin nedošlo ke zničení hřídele motoru, která není konstruována pro vysoká radiální zatížení, je rolna propojena s motorem přes náboj s dvojicí ložisek zachytávajících nebezpečné zatížení (obr. 6.16).



Obr. 6.16 Zneviditelněná čelní deska a $\frac{3}{4}$ řez

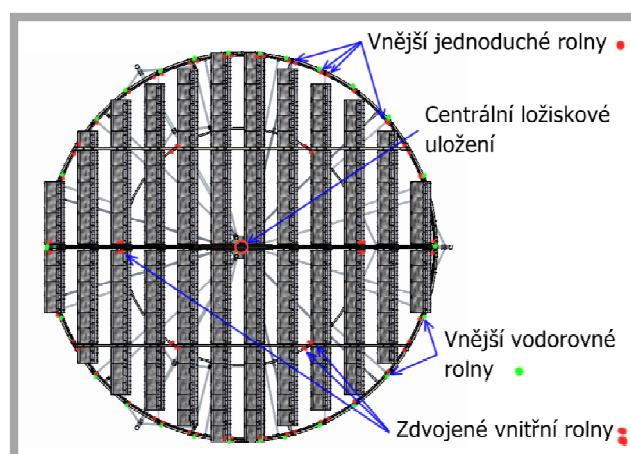
6.3 Pojezd

Pojezd zajišťuje hladkou změnu odměru a má podpůrnou funkci pro talíř trackeru. Zároveň zajišťuje polohu talíře na nosné konstrukci i v případě zdvižného účinku silného větru.

6.3.1 Rozmístění a popis roln

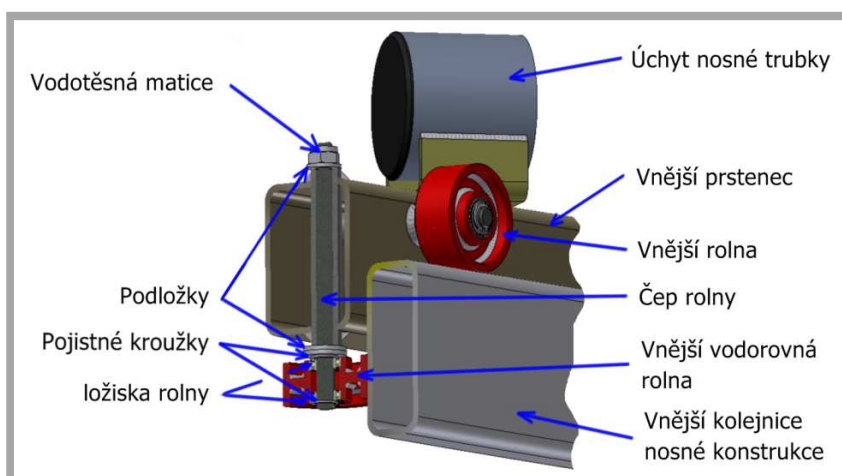
Rolny jsou ukotveny na vnějším poloměru do nosného prstence, ten je vyroben skružením obdélníkového profilu, stejně tak i kolejnice nosné konstrukce. Rolny jsou rozmístěny s ohledem na co nejlepší rozložení zatížení na nosnou kolejnici z nosných trubek panelů, na některých místech se tedy nacházejí ve dvojici. Druhá sada roln je

umístěna v polovině poloměru konstrukce a jezdí po vnitřní kolejnici. Tyto rolly jsou širší (ale stejné konstrukční koncepce jako vnější) a jezdí po širším skruženém profilu než je vnější. To je především z důvodu nemožnosti rozmístit rolly dostatečně rovnoměrně pro ideální rozložení zatížení tak, jako na vnějším průměru (na vnitřním průměru je možné rolly umístit pouze na hlavní a vedlejší nosné profily, naproti tomu na vnějším je možné je rozmístit libovolně po prstenci). Poslední sadou rolen jsou vodorovně umístěné na vnějším prstenci (obr. 6.17). Jejich úkol je jednak vymezovací při montáži vnějšího nosného prstence a také jsou využity k zachycení sil způsobených větrem a dalšími vlivy ve vodorovném směru. Rozmístěny jsou po jedné vždy u úchyty nosné trubky panelů.



Obr. 6.17 Rozmístění rolen

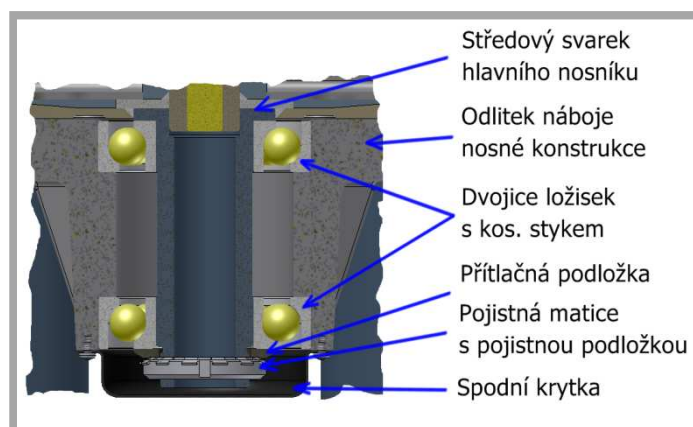
Rolny jsou řešeny jako ocelový svarek, v náboji jsou zalisována dvě kuličková ložiska. Jehličková ložiska obvykle užívaná pro tyto aplikace byla nevhodná, jelikož jejich potenciál malých rozměrů by nebyl vzhledem k průměru rolly 50 mm využit a rolly jsou namáhány také axiálně, což je dáno jejich pohybem po kružnici. Každá rolka má svůj čep, na kterém je pojištěna dvojicí hřídelových kroužků. Čep je na konci vybaven závitem a po prostrčení navařeným nábojem v nosném prstenci je pojištěn maticí s gumovou vložkou. Ta zabrání zatékání vody a jistí dotažení čepu rolly. Montáž rolen na vnitřní kolejnici je řešena podobně.



Obr. 6.18 Řešení rolen na vnějším poloměru

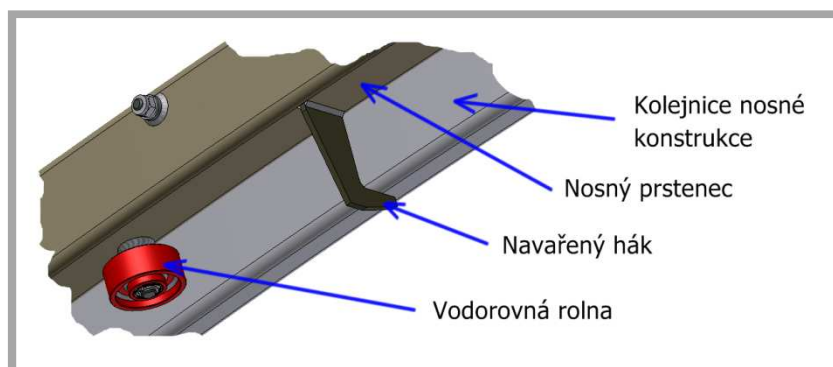
6.3.2 Ochrana proti nadzvednutí

Z výpočtu v příloze VP2 vyplývá, že vítr je v nejnepríznivějším případě schopen na talíř trackeru vyvinout zdvižnou sílu až 22,7 kN. To při odečtení přepokládané hmotnosti talíře $m_t = 1500$ kg dává asi 8 kN síly, kterou je nutno zachytit. Aby tedy nedošlo k oddělení od nosné konstrukce, je talíř vázán ve středovém uložení a háčky na obvodové kolejnici. Středové uložení je tvořeno dvěma kuličkovými ložisky s kosoúhlým stykem. Ta jsou uložena proti sobě v náboji nosné konstrukce a zajištěna pojistnou maticí a podložkou. Ložiska jsou velikostně naddimenzována a to především z důvodu požadovaného bezúdržbového provozu. Ložiska s kosoúhlým stykem je možné objednat s pevným mazivem, výběr jejich velikostí je však omezen. Rozhodnutí ve prospěch dvojice těchto ložisek namísto axiálního obousměrného ložiska padlo také na základě skutečnosti, že uzel bude muset zachytávat i vysoká radiální zatížení. Kombinace obousměrného axiálního ložiska s dvojicí radiálních by byla zbytečně složitá.



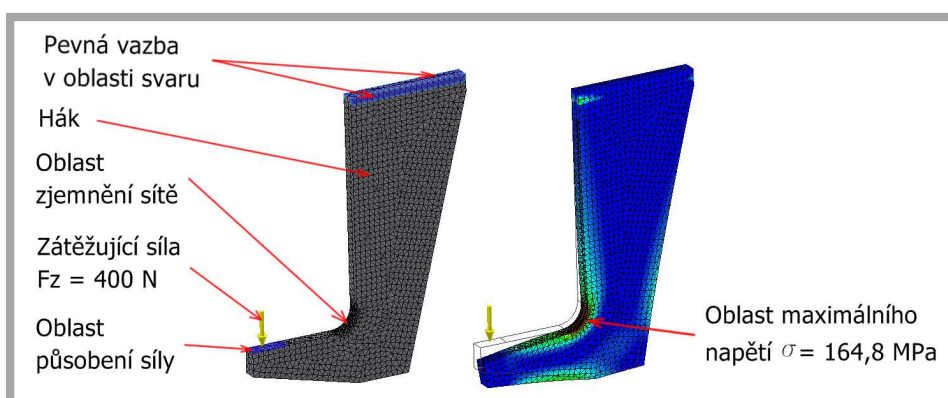
Obr. 6.19 Středové uložení

Samotné středové uložení již zajišťuje, že nedojde k oddělení talíře od nosné konstrukce. Nežádoucí je však i volný výškový pohyb obvodu talíře vedoucí k plastickým deformacím v uloženích a dalšímu poškození. Především z úsporných důvodů bylo rozhodnuto neosazovat nosný prstenec dalšími kladkami ze spodní strany kolejnice, jelikož drtivou většinu času provozu trackeru by byly nevyužity. Namísto nich je na prstenci přivařeno 20 ocelových háků v pravidelných úhlových rozestupech. Jejich vůle od kolejnice je 3mm, aby nedocházelo k náhodnému kontaktu vlivem nepřesností ve výrobě, ale zároveň bylo možné plnění jejich funkce.



Obr. 6.20 Umístění háku na nosném prstenci

Háky jsou dimenzovány tak, aby byly samostatně schopny zachytit zdvihovou sílu větru a rozmístěny dostatečně hustě pro rovnoměrné přenesení zatížení na nosnou kolejnici s bezpečností 2. Pro pevnostní kontrolu byla použita metoda konečných prvků. Součást je vyrobena z plechu tloušťky 3mm a oceli 1.0978 dle SEW 092. Mez kluzu je tedy $R_e = 380 \text{ MPa}$. Hák je zatížen silou $F = 400 \text{ N}$ (obr. 6.21) z přílohy VP2 na konci tak, aby to co nejlépe odpovídalo reálným podmínkám. Síť je složena z 20-ti uzlových prvků SOLID a v oblasti s očekávaným kritickým bodem je zjemněna. Na součásti došlo k několika menším změnám tak, aby bezpečnost vyjádřena jako podíl výsledného redukovaného napětí a meze kluzu v tahu byla >2 . Konečný tvar je znázorněn na obr. 6.21 a bezpečnost pro tuto geometrii činí 2,3.

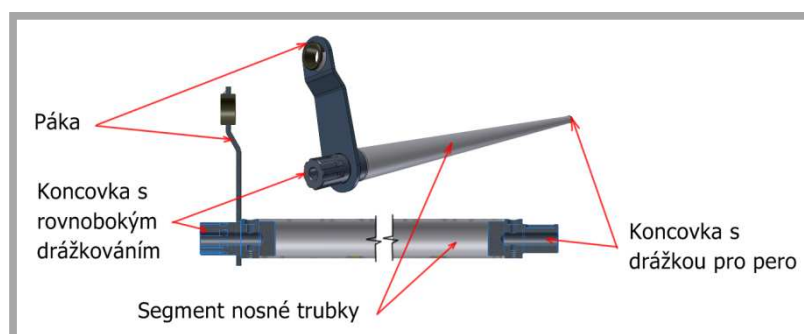


Obr. 6.21 MKP háku

6.4 Nosné trubky panelů

6.4

Panely jsou projektovány pro ukotvení na trubkách o průměru 48mm. Na trubky jsou montovány třecím spojem přes objímky. Trubky jsou rozděleny na segmenty kvůli montáži. Každý segment je tvořen svarkem zahrnujícím trubku dané délky, 2 koncovky určitého typu sloužící ke spojení s dalším segmentem a v případě segmentů na vnitřní straně u hlavního nosníku k nim je přivařena také páka pro spojení s řídicím profilem. Svary jsou umístěny dostatečně daleko od funkčních ploch drážkovaného hřídele, které není třeba je obrábět po svaření.



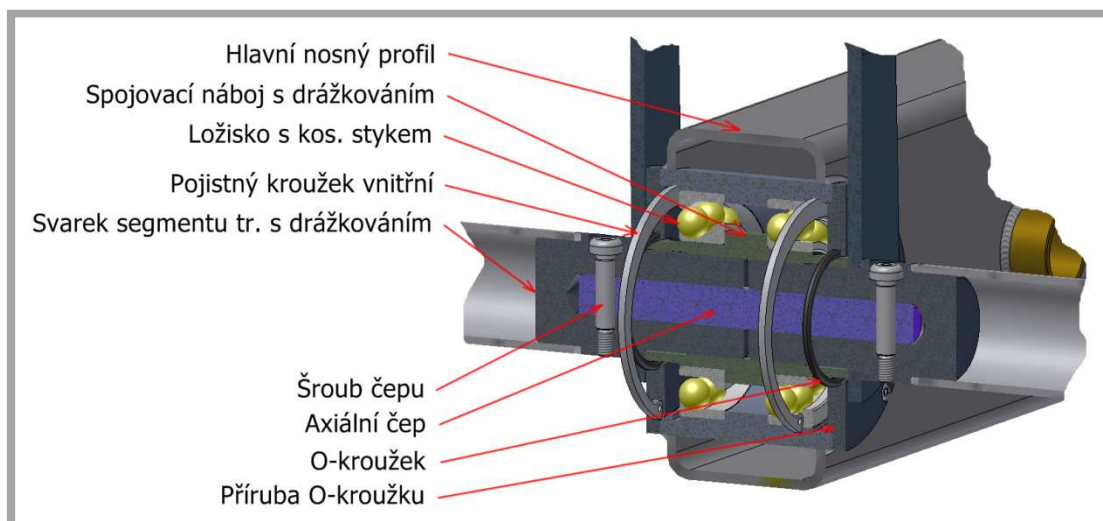
Obr. 6.22 Segment trubky s pákou

6.4.1 Jednotlivá uložení

Uložení trubek v nosných prvcích je realizováno přes bezúdržbová kuličková ložiska. Jejich velikost je dána minimálním průměrem díry a jsou tedy pevnostně naddimenzována. To je dáno také charakterem pohybu ložisek, která se zpravidla

otáčejí o 50° denně tam a zpět. Uložení trubky je realizováno jako předepnuté. V hlavním nosníku a v nosném prstenci na vnějším obvodu se trubka opírá o kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem. To napomáhá celkové tuhosti konstrukce a tlakem na kolejnici přeneseným přes vodorovné rolly ustavení nosného prstence vůči kolejnici.

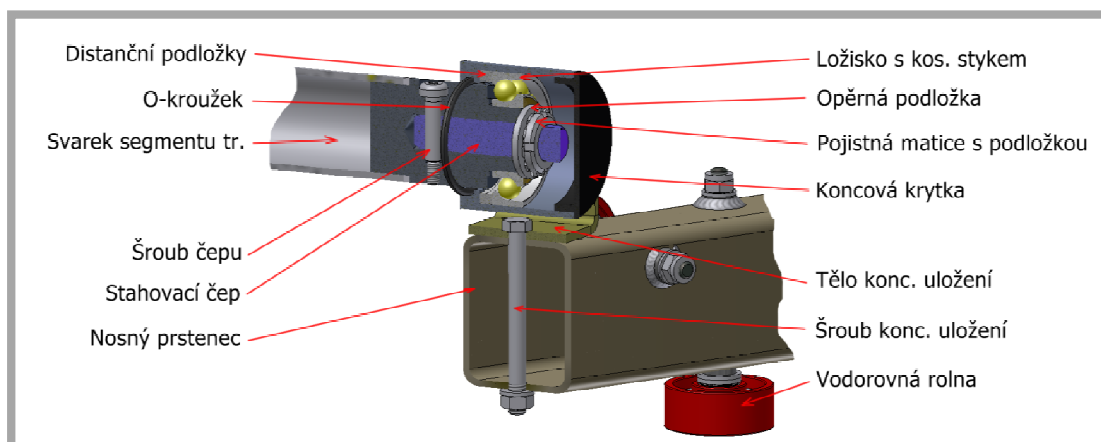
Uložení v hlavním nosném profilu je jako jediné rozměrově výrazně omezeno do šířky díky pákám navařeným na segmentech nosných trubek. Vzájemná vzdálenost jejich vnějších stěn by neměla překročit 116mm. Z tohoto důvodu nelze pro přenos nutného krouticího momentu použít pera, která by vyžadovala neakceptovatelnou délku. Spoj pro přenos krouticího momentu je v nosném profilu vyžadován, aby docházelo k rovnoměrnému přenosu síly na řídicí profil pákami z obou stran, což zabrání jeho vyhybání do boku. Spojovací náboj a hřídelové koncovky segmentů jsou tedy vybaveny rovnobokým drážkováním navrhnutým v příloze VP11 [35]. Drážkování má dostatek prostoru, aby nemuselo být kalené. Přenos tažných axiálních sil je realizován přes axiální čep pojištěný na každé straně jedním osazeným šroubem. Původně bylo počítáno s excentrickým dotahovacím prvkem vždy na jedné straně uložení, nicméně spojení osazeným šroubem na obou stranách nakonec bylo shledáno dostatečným a je jednodušší na výrobu. Ložiska obsahují pevné mazivo a jsou tedy bezúdržbová. Přístupu vlhkosti do vnitřních prostor je zamezeno těsnícím O-kroužkem. Ten je zpravidla využit pro těsnění axiálního pohybu hřídele, avšak vzhledem k nízké intenzitě pohybu bylo po konzultaci jeho využití zhodnoceno jako možné. Běžné gufero pro rotující hřídele má nevyhovující zástavbové rozměry.



Obr. 6.23 Uložení nosné trubky – hlavní nosník

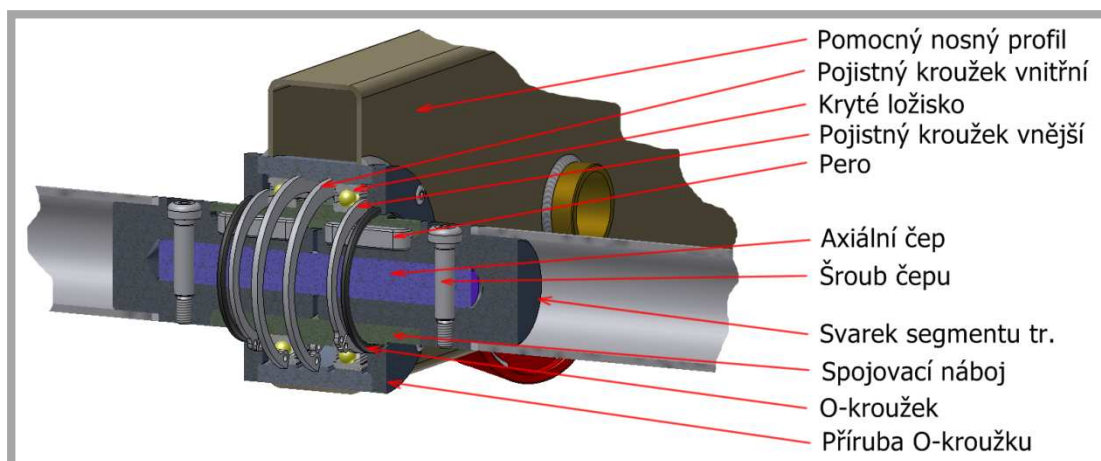
Uložení v nosném prstenci je navrženo s velkou tolerancí uložení nosné trubky v její ose. Z důvodu možnosti vzniku délkových nepřesností při výrobě segmentu trubek, z nichž některé dosahují délky až 1900mm. Dále je nutné zajistit dotlačení vodorovné rolly ke kolejnici nosné konstrukce. Vůle je stavitelná distančními podložkami pod ložiskem a může dosahovat až ± 15 mm. Zatěsnění na straně trubky je provedeno O-kroužkem a ložisko je kuličkové s kosoúhlým stykem a pevným mazivem (jak bylo zmíněno výše). Tělo koncového uložení je tvořeno svarkem a k nosnému prstenci připevněno osazeným šroubem. Po dokončení vymezení vůle se

strana bez průchozího hřídele zazátkuje kupovanou plastovou záslepkou ZKP-18, která zamezí přístupu vody do prostoru uložení.



Obr. 6.24 Uložení nosné trubky – nosný prstenec

Uložení v pomocném nosném profilu má především podpůrnou úlohu v radiálním směru nosné trubky. Je realizováno opět přes dvě kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. V tomto uzlu není limitována délka náboje a přenášený krouticí moment je také ve srovnání s uložením v hlavním nosníku menší. Je zde přenášen krouticí moment pouze krajního segmentu panelů. Proto je možné spoj uskutečnit přes těsná pera bez kalených drážek, která jsou výrobně levnější než rovnoboké drážkování. Výpočet per se nalézá v příloze VP11b [35]. Zatěsnění proti vlhkosti a pojištění segmentů trubky v axiálním směru je realizováno obdobně jako u uložení v hlavním profilu.



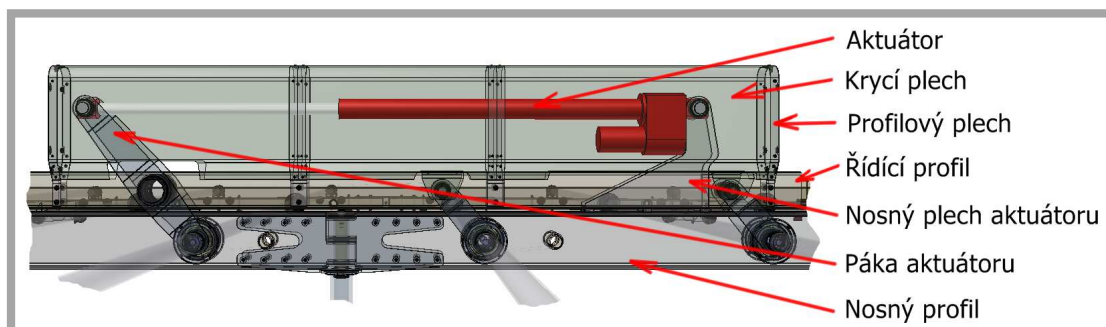
Obr. 6.25 Uložení nosné trubky - pomocný profil

6.5 Ochrana proti korozi

6.5.1 Ochrana aktuátoru a elektrického příslušenství

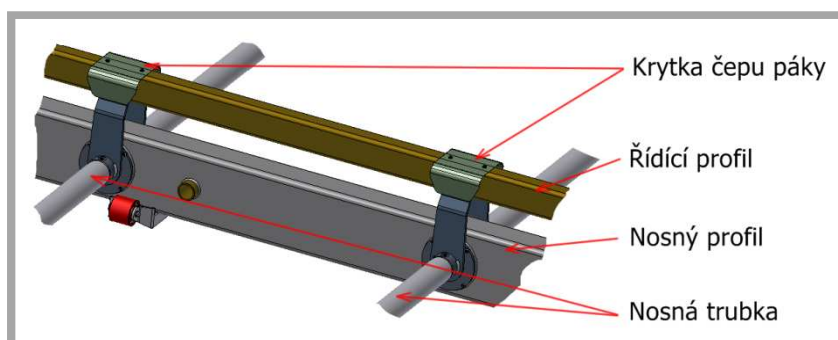
Díly vystavené vnějším vlivům, které není možné chránit pozinkováním je nutné před deštěm chránit zakrytováním. Jedná se především o zakoupené pohonné jednotky – motory odměru a lineární aktuátor náměru.

Motory řídicí odměr jsou umístěny uvnitř hlavního nosníku (viz obr. 6.16) a není proto třeba jim věnovat zvýšenou pozornost. Aktuátor je však v pozici nad nosníkem vystaven všem vnějším vlivům. Díky omezení prostoru montovanými FV panely nebylo možné zakrytovat hlavní nosník s řídicím profilem a aktuátorem jako celek a proto byl zvolen jednoduchý plechový kryt pouze pro aktuátor připevněný na řídicí profil přes tvarované plechové pásky tloušťky 2mm. Ty jsou k řídicímu profilu připevněny šrouby, stejně tak je realizováno připevnění krycího plechu ke spojovacím páskům.



Obr. 6.26 Kryt aktuátoru

Zakrytování se dostalo také čepům pákového mechanismu jednotlivých trubek, jejich uložení je sice v plastových kluzných pouzdrech, avšak přímé vystavení těchto pouzder s čepý dešti je nežádoucí.



Obr. 6.27 Krytky čepu páky

6.5.2 Ochrana konstrukce

6.5.2

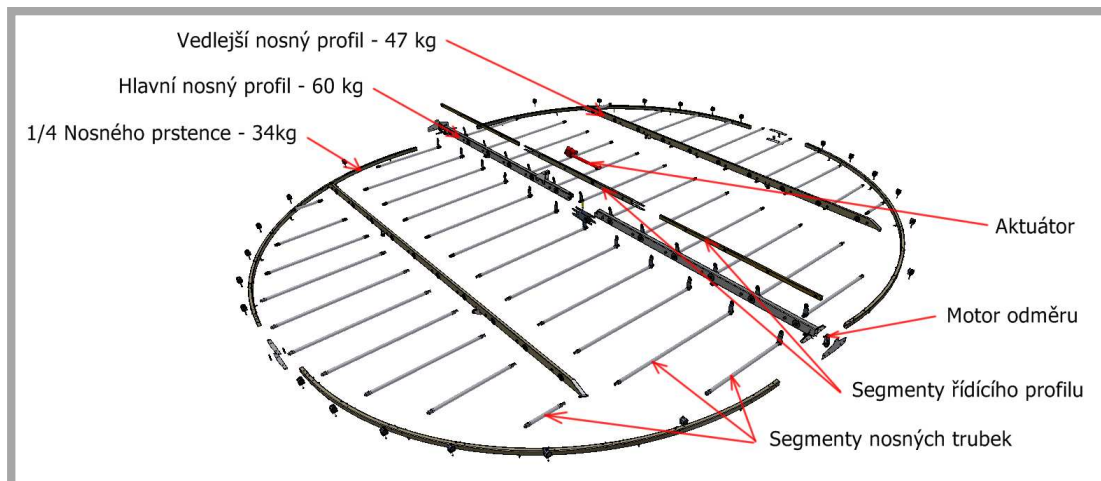
Všechny ocelové profily a svarky jsou ošetřeny žárovým zinkováním (viz kapitola 5.2.4). Dalšími opatřeními pro zvýšení životnosti je použití pozinkovaných šroubů. Na místech kde jsou pak odkryté matice, tak tyto jsou vybaveny gumovou vložkou předcházející zatékání do závitu. Ložiskové uzly jsou zakryty krytkami a hřídele utěsněny O-kroužky.

6.6 Smontovatelnost

6.6

Konstrukce trackeru klade důraz na jednoduchou smontovatelnost v několika lidech za použití pouze rozebíratelných spojů a pokud možno bez těžké techniky. Jednotlivé komponenty jsou proto až na pár výjimek rozděleny tak, aby byla umožněna snadná manipulace v 1-2 pracovnících. Na následujícím obrázku. 6.28 lze vidět hlavní

jednotlivé montážní segmenty s uvedenými váhami nejtěžších. Segmenty s neuvedenou vahou mají hmotnost do 15 kg. Segmenty nosného prstence je možné konstrukčně rozdělit na 3 díly (v případě nemožnosti dodávky dostatečně dlouhého profilu nebo špatné manipulace s ním) a vedlejší nosný profil na dva díly.



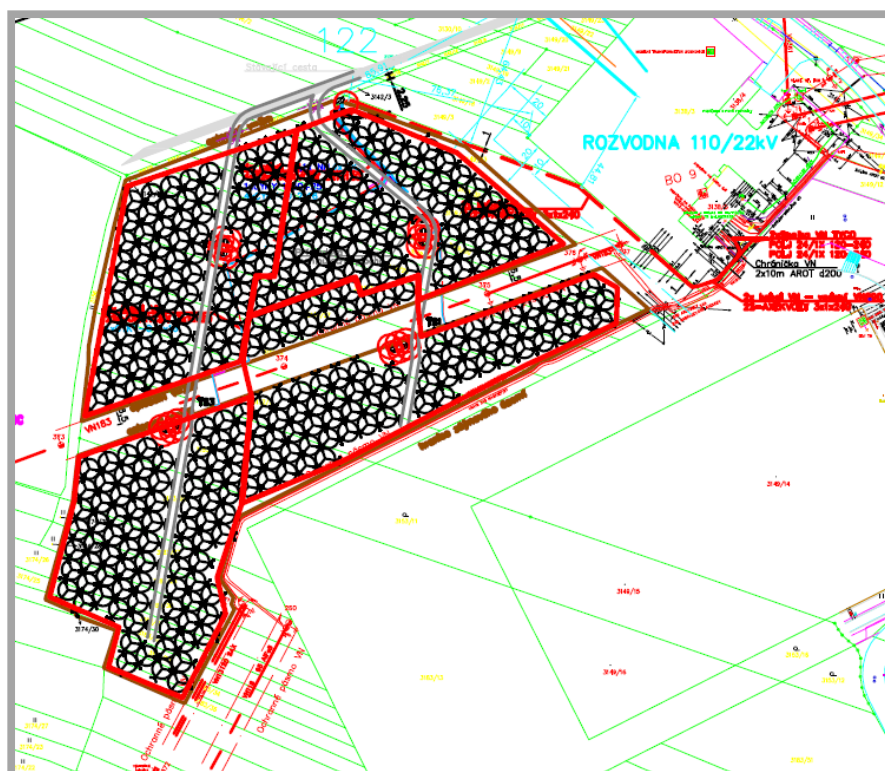
Obr. 6.28 Rozstřel základních segmentů sestavy

Tyto segmenty mají být složeny přímo na sestavené nosné konstrukci. Jako poslední přichází na řadu montáž jednotlivých panelů, z nichž nejtěžší má hmotnost 36 kg. Podrobnější obrázek navrhnutého talíře se nachází v přílohách (OP2) a jednotlivé celky trackeru taktéž (OP3).

7 ZÁVĚR

V diplomové práci byla zkonstruována pohyblivá část solárního trackeru, která je kompatibilní se zadanou nosnou konstrukcí. Je schopná sledování slunce ve dvou osách a celá konstrukce i její pohybové členy jsou dimenzovány tak, aby snesly odpovídající zatížení vyvolané větrem. Jeden tracker je schopný nést až 208 koncentračních modulů Ditech, čímž překonal zadání o 8 kusů a to přispívá k ještě lepšímu využití pracovního prostoru. Rozměry trackeru jsou patrné na obrázkové příloze OP4 a celkové pohledy na jeden tracker a uskupení tří trackerů se nalézají v přílohách OP5 a OP6. Talířová část je rozdělena do menších segmentů, které ulehčují zinkování a také manipulaci na místě kompletace. Všechny segmenty jsou spojovány rozebíratelnými spoji a při montáži není nutné využívat těžkou techniku pro manipulaci se segmenty.

Stavba elektrárny byla zamýšlena u Boskovic a územní plán (obr. 7.1) počítal s osazením 321 trackerů na ploše 9096 m². Jeden tracker osazený 208mi články v panelech Ditech má špičkový výkon 8652,8 Wp a celá elektrárna potom 2737 kWp. Pro srovnání elektrárna na stejné ploše sestavená z běžných FV panelů např. zavedené firmy Suntech by měla výkon pouze 420 kWp [37]. U trackeru je však nutno počítat s energetickými náklady na pohyb při sledování slunce a chlazení, takže výnos v porovnání s pevnou instalací Suntech nebude reálně 6,5x vyšší.



Obr. 7.1 Územní plán stavby FV solární elektrárny boskovic

7.1 Ekonomický rozbor řešení

Následující zkrácený ekonomický rozbor (tab. 2) přibližuje náklady na pořízení jednoho talíře trackeru bez spodní nosné konstrukce vyvíjené zvlášť. Je vyčíslena

cena jednak pro výrobu samostatného (prototypového) kusu a dále cena zahrnující množstevní slevy při výrobě 321 talířů pro elektrárnu Boskovice. Rozbor nezahrnuje náklady na práci, ale pouze ceny polotovarů a zinkování (vše bez DPH). Podrobné rozpisy cen se nalézají v tabulkových přílohách TP1-5.

Tab. 2 Ekonomický rozbor

ZJEDNODUŠENÝ PŘEHLED CEN	Cena na 1 samostatný talíř [Kč]	Cena na 1 talíř při celkovém množství 321 ks [Kč]	Cena 321 kusů [Kč]
Hutní polotovary			
Profily (viz TP1)	11113	9714	3118277
Trubky (viz TP2)	25632	22161	7113730
Tyče (viz TP3)	4569	1695	544333
Plechy (viz TP4)	1937	1695	544333
Normalizované k. (viz TP5)	88097	56109	18011054
Zinkování	9640	9640	3094440
CELKEM	140 989	121 481	35 910 766

Z rozboru vyplývá, že jednou z hlavních složek ceny talířové části je velké množství ložisek (viz TP5). Bylo by proto vhodné provést revizi nutnosti jejich použití a pokusit se zredukovat jejich množství na minimum.

Například ložiska 61800-2Z-HLC jsou použita pouze v pojezdových rolnách. Snížení počtu rolen a změna jejich rozmístění, případně nákup rolen obdobných parametrů od další firmy, by mohly snížit celkovou cenu jednoho talíře nezanedbatelnou měrou.

Ostatní valivá ložiska v uložení nosných trubek, použitá především z důvodu menších délkových rozměrů v daných průměrech než kluzné ekvivalenty, by s příslušnými konstrukčními úpravami bylo pravděpodobně také možné nahradit kluznými pouzdry. Zde je však výrazný rozdíl v ceně diskutabilní vzhledem k nákladům na kluzná pouzdra větších průměrů.

Při výpočtech a konstrukci se ukázalo, že by také došlo k velmi výraznému snížení zatížení většiny prvků konstrukce v případě uchycení panelů tak, aby osa rotace náměru byla umístěna v těžišti panelů, případně v jiném, z hlediska působení maximálního větru, vhodném místě. Toho by šlo dosáhnout i bez přímého zásahu do konstrukce panelů nevybavených pro tento způsob uchycení jejich umístěním do „kolébky“. Panely by v ní byly uchyceny způsobem, na který jsou projektovány, a kolébka by v talíři byla již uchycena nejvhodnějším způsobem u těžiště. Výhodnějším řešením by však samozřejmě bylo zasáhnout do konstrukce firemních panelů. Tímto opatřením by se také velice ulevilo zatížení aktuátoru a umožnilo by to pořídit mnohem méně výkonný a menší typ s odpovídající cenou. Při zachování všech rozměrů konstrukce by to však znamenalo snížení počtu segmentů panelů o 24 na každém talíři, což je příliš velká ztráta na výkonu elektrárny a tedy i výdělku. Proto by bylo vhodné přepracovat při této změně i celou konstrukci, včetně spodní nosné části.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Wikipedie* [online]. 2011 [cit. 2011-03-12]. Fotovoltaický článek. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8Dl%C3%A1nek>.
- [2] *Mentallandscape* [online]. 2007 [cit. 2011-03-12]. Sputnik-3. Dostupné z WWW: <http://www.mentallandscape.com/S_Sputnik3.htm>.
- [3] *ASB-Portal* [online]. 11.11.2010 [cit. 2011-03-12]. Fotovoltaické články. Dostupné z WWW: <<http://www.asb-portal.cz/tzb/energie/fotovoltaicke-clanky-historie-a-soucasne-trendy-vyvoje-2262.html>>.
- [4] *IT serve* [online]. 2010 [cit. 2011-03-13]. Základy fotovoltaiky. Dostupné z WWW:
<http://www.itserve.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=27&Itemid=48>.
- [5] *ELSOP solar energy* [online]. 2011 [cit. 2011-03-13]. Fotovoltaika. Dostupné z WWW: <<http://www.elsop.cz/inpage/technologie/>>.
- [6] *Aldebaran Bulletin* [online]. 2007 [cit. 2011-03-13]. Organické polymery jako zdroj energie. Dostupné z WWW:
<http://www.aldebaran.cz/bulletin/2007_30_org.php>.
- [7] *Wikipedia* [online]. 2011 [cit. 2011-03-13]. Solar power. Dostupné z WWW:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power>.
- [8] *JX Crystals* [online]. 2010 [cit. 2011-03-13]. ThermoPhotoVoltaics. Dostupné z WWW: <<http://www.jxcrystals.com/ThermoPV.htm>>.
- [9] *Alternativ Energy* [online]. 26.4.2010 [cit. 2011-03-12]. PV Cell Prototype Generates Electricity from IR and UV Light . Dostupné z WWW:
<<http://www.alternative-energy-news.info/pv-cell-prototype-generates-electricity-from-ir-and-uv-light/>>.
- [10] LIMBERK, Ondřej. *CEZ* [online]. 2010 [cit. 2011-03-14]. SOLÁRNÍ ENERGETIKA V ČESKÉ REPUBLICE. Dostupné z WWW:
<<http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/10-limberk.pdf>>.
- [11] CONIBEER, Gavin; GREEN, Martin; CORKISH, Richard. Silicon nanostructures for third generation photovoltaic solar cells . *Thin Solid Films* [online]. 2006, 511-512, [cit. 2011-05-16]. Dostupný z WWW:
<<http://www.sciencedirect.com>>.

- [12] SOLARENVI [online]. 2011 [cit. 2011-03-14]. Systémy připojené na síť (grid-on, grid-connected). Dostupné z WWW: <<http://www.solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/grid-on/>>.
- [13] TRAXLE TM [online]. 1994, 2011 [cit. 2011-03-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.solar-trackers.com>>.
- [14] BANKIER, Colin; GALE, Steve. *Energy Bulletin* [online]. 16.7.2006 [cit. 2011-03-13]. Energy Payback of Roof Mounted Photovoltaic Cells. Dostupné z WWW: <<http://www.energybulletin.net/node/17219>>.
- [15] Enerquest [online]. 2004, 2011 [cit. 2011-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://enerquest.ca/products>>.
- [16] *Energetický regulační úřad* [online]. 2009, 2011-03-13 [cit. 2011-03-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.eru.cz/>>.
- [17] *Spectrolab : A BOEING COMPANY* [online]. 2009, 2011-02-02 [cit. 2011-03-13]. CPV Point Focus Solar Cells. Dostupné z WWW: <<http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/CPV/C3MJ%20CDO%20Products%2020100810.pdf>>.
- [18] JRC : EUROPEAN COMMISSION [online]. 2002 [cit. 2011-03-14]. PV potential estimation utility. Dostupné z WWW: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php>>.
- [19] VŠCHT [online]. 14.4.2010 [cit. 2011-03-15]. Teplo ze Slunce, Solárně-termická výroba elektřiny. Dostupné z WWW: <http://eso.vscht.cz/cache_data/41/www.vscht.cz/ktt/studium/predmety/aze/10_AZE.pdf>.
- [20] FERNÁNDEZ-GARCIA, A., et al. Parabolic-trough solar collectors and their applications . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2010, 14, [cit. 2011-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
- [21] B. STINE, William; GEYER, Michael. *Power From The Sun* [online]. 2001 [cit. 2011-03-13]. Concentrating Collectors. Dostupné z WWW: <<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter09/chapter09.html#9.2>>.
- [22] *Enterprise IT* [online]. 2007 [cit. 2011-03-14]. Planet Green. Dostupné z WWW: <<http://blog.enterpriseitplanet.com/green/blog/>>.
- [23] WALLACE, John. *OptoIQ* [online]. 2007 [cit. 2011-05-16]. PHOTOVOLTAICS: Microconcentrators boost efficiency of concentrator solar cells. Dostupné z WWW: <<http://www.optoiq.com/index/photonic-technologies-applications/lfw-display/lfw-article-display.articles.laser-focus-world.volume-43.issue-11.world-news.photovoltaiacs-microconcentrators-boost-efficiency-of-concentrator-solar-cells.html>>.

- [24] B.MAUER, Paul; D.TURECHEK, Gene. *FreePatentsOnline* [online]. 1979 [cit. 2011-03-14]. Fluorescent Solar Energy Concentrator. Dostupné z WWW: <<http://www.freepatentsonline.com/4149902.pdf>>.
- [25] *Wikipedia* [online]. 2010, 2011-4-30 [cit. 2011-05-16]. Solar tracker. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_tracker>.
- [26] *Zomeworks Corporation* [online]. 2010-4-1 [cit. 2011-03-15]. F-series track rack. Dostupné z WWW: <<http://www.wholesalesolar.com/pdf.folder/mount%20pdf%20folder/ZomeworksF-064-090-120instructions.pdf>>.
- [27] *Alpine Solar Electric* [online]. 2009 [cit. 2011-03-14]. Dostupné z WWW: <<http://alpinesolarelectric.com/Gallery.php>>.
- [28] *SolFocus* [online]. 2011 [cit. 2011-3-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.solfocus.com/en/index.php>>.
- [29] *Pyron Solar : the next standart in solar power* [online]. 2004, 2011 [cit. 2011-03-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.pyronsolar.com/>>.
- [30] *Deger Energie : Solar tracking Systems* [online]. 2004, 2011 [cit. 2011-03-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.degerenergie.de/>>.
- [31] *Krinner : Zemni vruty* [online]. 2010 [cit. 2011-03-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.zemnivruty.cz/>>.
- [32] *Salzgitter Flachstahl* [online]. 2003, 2011 [cit. 2011-03-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.salzgitter-flachstahl.de/en/>>.
- [33] GROSS, Jiří. *Transmotec* [online]. 2008 [cit. 2011-04-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.transmotec.cz/>>.
- [34] *Thermdrill : Tepelné tváření otvorů* [online]. 2006, 2011 [cit. 2011-04-12]. Jak to funguje. Dostupné z WWW: <<http://www.thermdrill.cz/>>.
- [35] E. SHIGLEY, Joseph ; R. MISCHKE, Charles; G. BUDYNAS, Richard. *Konstruování strojních součástí*. BRNO : VUTIUUM, 2010. 1186 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [36] *CHEDO : HELIOS group* [online]. 2010 [cit. 2011-03-21]. Nátěrové hmoty na kovy. Dostupné z WWW: <<http://www.chedo.cz/kat/Nove--typy--ekologicky--setrnejsich--antikoroznich--naterovych--hmot-437/?PHPSESSID=f6c7ddab9436718a6328b55871f10b31>>.
- [37] *Solární panely* [online]. 2008 [cit. 2011-05-12]. Suntech. Dostupné z WWW: <<http://solarni-panely.cz/e-shop/fotovoltaicke-elektrarny/fotovoltaicka-solarni-elektrarna-5-0-kwp-suntech>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN

A	$[m^2]$	plocha 1 ovlivněná větrem
A_2	$[m^2]$	plocha 2 ovlivněná větrem
C		koncentrační poměr panelu
C_{0z}		součinitel orografie pro území ČR
C_{2pe}		součinitel vnějšího tlaku na plochu 2
C_{2pe1}		součinitel tlaku v 1m pro plochu 2
C_{2pe10}		součinitel tlaku v 10m pro plochu 2
C_{pe}		součinitel vnějšího tlaku na plochu 1
C_{pe1}		součinitel tlaku v 1m pro plochu 1
C_{pe10}		součinitel tlaku v 10m pro plochu 1
C_{rz}		součinitel drsnosti terénu ve výšce
d_{pn}	$[m]$	délka úseku panelů, které se nachází ve větrném zákrytu
E	$[Pa]$	modul pružnosti v tahu
F_A	$[N]$	síla, kterou aktuátor brání v pohybu řídicímu profilu
F_h	$[N]$	minimální přitlačná síla na kladku aby došlo k přenesení nutného momentu
F_{in}	$[N]$	gravitační síla rozložena na vnitřní kolejnici
F_{krit}	$[N]$	srovnávací kritická síla
F_n	$[N]$	síla od momentu řady n
F_{np}	$[N]$	síla na řídicí profil v podélném směru od řady n
F_{out}	$[N]$	gravitační síla rozložena na vnější kolejnici
F_p	$[N]$	Nutná síla na vnějším obvodu
F_{pc}	$[N]$	celková síla na řídicí profil v podélném směru
F_{tin}	$[N]$	třecí síla od rolen na vnitřní kolejnici
F_{tout}	$[N]$	třecí síla od rolen na vnější kolejnici
F_z	$[N]$	celková zatěžující síla na vybranou část profilu
g	$[m.s^{-2}]$	gravitační zrychlení
J_p	$[cm^4]$	kvadratický moment průřezu profilu
k_e		bezpečnostní součinitel pro extrémní případ
k_I		součinitel turbulence pro území ČR
k_p		bezpečnostní součinitel pro provoz
k_r		součinitel pro plochý terén
k_v		Bezpečnostní koeficient proti ztrátě vzpěrné stability

l_p	[m]	délka počítaného úseku
l_{vz}		intenzita turbulence ve výšce z
M_{2cn}	[N.m]	moment od tlaku na plochu 2 u panelů v zákrytu
M_{2pn}	[N.m]	moment od tlaku na plochu 2 u panelů mimo zákryt
M_{cn}	[N.m]	je moment od tlaku na plochu 1 u panelů v zákrytu
M_{gn}	[N.m]	moment síly od tíhového zrychlení na panely v řadě n
m_k	[kg]	hmotnost jednoho segmentu panelu koncentrátoru
M_n	[N.m]	suma momentů od panelů v zákrytu i mimo a momentu od gravitační síly
M_o	[N.m]	nutný moment vyvozený motorem odměru na kolejnici
M_p	[N.m]	celkový moment pro otočení talíře
M_{pn}	[N.m]	moment od tlaku na plochu 1 u panelů mimo zákryt
m_r	[kg]	celková hmotnost talíře a panelů
M_{Rn}	[N.m]	moment sil od řady n
q_b	[Pa]	základní dynamický tlak větru
q_p	[Pa]	maximální dynamický tlak zahrnující střední a krátkodobé fluktuace větru
r_A	[m]	rameno páky aktuátoru
r_d	[m]	dolní souřadnice plochy 1
r_{d2}	[m]	dolní souřadnice plochy 2
R_e	[Pa]	mez kluzu
r_g	[m]	rameno působení gravitační síly k ose náměru
r_h	[m]	horní souřadnice plochy 1
r_{h2}	[m]	horní souřadnice plochy 2
R_{in}	[m]	poloměr vnitřní kolejnice
R_m	[m]	poloměr podpůrných roln talíře
R_{out}	[m]	poloměr vnější kolejnice
R_p	[m]	poloměr rolny motoru s pryžovým běhounem
r_p	[m]	rameno páky
v_{b0}	[m.s ⁻¹]	základní střední rychlost větru
v_{mz}	[m.s ⁻¹]	je střední rychlost větru v závislosti na drsnosti terénu a orografii

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

- Obr. 1.1** Sputnik 3 [2]
Obr. 1.2 Schéma FV čipu na bázi křemíkového polovodiče [3]
Obr. 1.3 Polymerový panel [6]
Obr. 1.4 Postup výroby IR panelu ve firmě JX crystals (zleva doprava) [8]
Obr. 1.5 Dosažitelný výnos v závislosti na poloze vůči poloze ideální [12]
Obr. 1.6 Jednoosý solární tracker s koncentračními zrcadly firmy Traxler [13]
Obr. 1.7 Dvouosý solární tracker se schodovitým
Odstupňováním jednotlivých řad panelů [15]
Obr. 1.8 Koncentrátor s prostým rovinným (vlevo)
a Fresnelovým zrcadlem (vpravo) [13,22]
Obr. 1.9 Solární věž
Obr. 1.10 Parabolický koncentrátor jednoosý (vlevo) a dvouosý (vpravo) [23]
Obr. 1.11 Tvar CPC koncentrátoru
Obr. 1.12 Talířový koncentrátor se stylingovým motorem (vlevo)
a panel s FV články (vpravo)
Obr. 1.13 Fresnelova čočka s usměrňovačem
Obr. 1.14 Sloupový tracker s moduly složenými
z FV čipů s talířovými koncentrátory [28]
Obr. 1.15 Řešení firmy Pyron Solar, konstrukce
bez modulů (nahore) a uspořádání modulů v řadách (dole)
Obr. 1.16 Schopnost inteligentního řízení trackeru
Obr. 1.17 Pasivní sledovací systém, nádrže
na pracovní médium viditelné po stranách [27]
Obr. 1.18 Jednoosá (vlevo) a dvouosá (vpravo) šneková převodovka
Obr. 2.1 Koncentrační FV čipy firmy Spectrolab (Boeing)
Obr. 2.2 Modul Ditech
Obr. 2.3 Maximální a minimální výška slunce nad horizontem [18]
Obr. 5.1 Umístění řad panelů za sebou
Obr. 5.2 Podpůrné prvky panelů
Obr. 5.3 Stínění panelů
Obr. 5.4 Pracovní úhly panelu
Obr. 5.5 Uspořádání s šnekovými převodovkami a rotujícím hřídelem
Obr. 5.6 Uspořádání s posuvným profilem
Obr. 5.7 Srovnání pohonů pro odměr
Obr. 5.8 Nosná konstrukce na základových nohách
Obr. 5.9 Kotvení trackeru do společných noh
Obr. 5.10 Technologie thermdrill
Obr. 6.1 Mapa větrných oblastí na území ČR
Obr. 6.2 Parametry výpočtu pro různé směry větru
Obr. 6.3 Graf pro určení nejnebezpečnějšího směru větru
Obr. 6.4 Zatížení větrem ze směru 180° při pracovní poloze
Obr. 6.5 Zatížení větrem ze směru 180° v bezpečnostní sklopené poloze
Obr. 6.6 Schematické rozložení sil na výřezu trackeru v bezpečnostní poloze
Obr. 6.7 Působení sil na řídicí profil – nejnebezpečnější pracovní poloha
Obr. 6.8 Uložení aktuátoru
Obr. 6.9 Zadáání MKP analýzy plechu aktuátoru

Obr. 6.10	Výsledky MKP analýzy plechu aktuátoru
Obr. 6.11	Zadání MKP analýzy páky aktuátoru
Obr. 6.12	Výsledky MKP analýzy páky aktuátoru
Obr. 6.13	Zadání vzpěru
Obr. 6.14	Třecí spoj řídicího profilu
Obr. 6.15	Síly na rolně motoru
Obr. 6.16	Zneviditelněná čelní deska a $\frac{3}{4}$ řez
Obr. 6.17	Rozmístění rolen
Obr. 6.18	Řešení rolen na vnějším poloměru
Obr. 6.19	Středové uložení
Obr. 6.20	Umístění háku na nosném prstenci
Obr. 6.21	MKP háku
Obr. 6.22	Segment trubky s pákou
Obr. 6.23	Uložení nosné trubky – hlavní nosník
Obr. 6.24	Uložení nosné trubky – nosný prstenec
Obr. 6.25	Uložení nosné trubky - pomocný profil
Obr. 6.26	Kryt aktuátoru
Obr. 6.27	Krytky čepu páky
Obr. 6.28	Rozstřel základních segmentů sestavy
Obr. 7.1	Územní plán stavby FV solární elektrárny Boskovice

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Výsledné hodnoty z výpočtu zatížení od větru pro jednotlivé řady
Tab. 2	Ekonomický rozbor

SEZNAM PŘÍLOH

Tabulkové přílohy TB:

- TB1** Ceny uzavřených profilů
- TB2** Ceny trubek
- TB3** Ceny tyčí
- TB4** Ceny plechů
- TB5** Ceny normalizovaných komponentů

Obrázkové přílohy OP:

- OP1** Segmenty nosné konstrukce
- OP2** Talíř FV panelů
- OP3** Hlavní celky trackeru
- OP4** Základní rozměry trackeru
- OP5** Sestava trackeru iso pohled
- OP6** Tři trackerů iso pohled

Výpočtové přílohy VP:

- VP1** Vítr 30mps 180 deg bezp. pol. zatížení M
- VP2** Vítr 30mps 180 deg bezp. pol. zatížení Y
- VP3** Vítr 30mps 0 deg bezp. pol. zatížení X
- VP4** Vítr 20mps 180 deg 15 deg pol. zatížení M a Reakce
- VP5** Čepy aktuátoru
- VP6** Čep hlavní paky aktuátoru
- VP7** Čepy pak nosných trubek
- VP8** Nutné předepnutí šroubu třecího spoje
- VP9** Kontrola šroubů třecího spoje
- VP10** Výpočet pružiny
- VP11** Rovnoboké drážky uzlu 1
- VP11a** Vítr 25mps 180 deg 15 deg pol. ŘADA 6 M
- VP11b** Kontrola pera uzlu 3

Pozn.: Výpočtové přílohy jsou z důvodu své povahy a velkého stránkového rozsahu dostupné pouze v elektronické podobě na přiloženém CD nosiči.

Výkresové přílohy VDP:

- 00-00-A0 1-2** Talíř FV panelů
- 00-00-A0 2-2** Talíř FV panelů
- 00-00-A0-K 1-7** Talíř FV panelů - kusovník
- 00-00-A0-K 2-7** Talíř FV panelů - kusovník
- 00-00-A0-K 3-7** Talíř FV panelů - kusovník
- 00-00-A0-K 4-7** Talíř FV panelů - kusovník

00-00-A0-K 5-7	Talíř FV panelů - kusovník
00-00-A0-K 6-7	Talíř FV panelů - kusovník
00-00-A0-K 7-7	Talíř FV panelů - kusovník
00-01-A4 1-2	Tlačná pružina
00-01-A4 2-2	Tlačná pružina - tabulka
00-03-A3	Spoj. plech nosník - prstenec 1
00-19-A3	Příruba těsnicí 1
00-21-A4	Axiální čep 3
00-23-A3	Náboj hlavního profilu
00-27-A4	cep paky
04-00-A3	Sestava motoru odměru
04-00-A3-K	Sestava motoru odměru - kusovník
10-00-A2	Svarek nosné trubky 6
10-01-A2	Hřídel drážkovaný
10-03-A3	Hřídel pro pero
15-00-A1	Svarek profil nosný 1
15-01-A4	Náboj nosného profilu
15-04-A3	Plech kola hl. profilu
15-06-A3	Profil hlavní 2
22-00-A3	Svarek plechu motoru
22-01-A2	Plech motoru hlavní
Pozn.:	Výkresová dokumentace není kompletní, obsahuje pouze výkres celkové sestavy, podsestavy některých svarků a vybrané komponenty.