

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Návrh automatického nosiče antén

Adam Smetana

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Smetana** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **509452**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Teoretický základ strojínského inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh automatického nosiče antén

Název bakalářské práce anglicky:

Design of an Automatic Antenna Carrier

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Předmětem práce je návrh mechanické části prototypu zařízení, které bude umožňovat natočení dvou parabolických antén na téměř jakémkoliv místě na obloze s přesností $\pm 4^\circ$ v ose azimutu i elevace. Hmotnost každé antény je 3,6 kg, průměr pak 720 mm. Koncepce by měla zaručovat přenositelnost v jedné osobě (zařízení musí tedy podle § 29 NV č. 361/2007 Sb splňovat hmotnost do 30 kg, aby jej mohl muž na pracovišti často přenášet). Dále by sestavení zařízení po převozu nemělo trvat více než 5 minut a ochrana před vnikem vody by měla odpovídat stupni IP X2 dle ČSN EN 60529. Návrh nezahrnuje konstrukci stojanu. Osnova práce: Rešerše dané problematiky; návrh variant hlavních konstrukčních uzlů; výběr a rozpracování nejvhodnější varianty; Potřebné funkční a pevnostní výpočty; 3D model vybrané varianty. Rozsah grafické části: Sestavné výkresy, kusovníky a vybrané výrobní výkresy. Rozsah textové části: 40 - 60 stran.

Seznam doporučené literatury:

[1] LUDWIG, Roger a TAYLOR, Jim. Voyager Telecommunications. Online, Výzkumná práce. Pasadena, California: JPL, California Institute of Technology, 2002. Dostupné z: https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso4--Voyager_ed.pdf. [cit. 2023-12-28].
[2] BALANIS, Constantine. ANTENNA THEORY: ANALYSIS AND DESIGN. 3. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2005. ISBN 0-471-66782-X.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Krannich, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **21.07.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **24.09.2024**

Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v přiloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT v Praze O dodržování etických principů při přípravě vysoko-školských závěrečných prací v aktuálním znění.

Dále prohlašuji, že v případě použití při tvorbě obsahu bakalářské práce prostředků umělé inteligence jsem postupoval dle metodického pokynu ČVUT v Praze Rámcová pravidla používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc a NM studiu a zahrnul tyto prostředky do použitých informačních zdrojů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomášovi Krannichovi, Ph.D. za čas ochotně věnovaný konzultacím a radám, které byly stěžejní při vytváření této práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: Adam Smetana

Název práce: Návrh automatického nosiče antén

Rok vydání: 2024

Rozsah práce: 69 str., 38 obr., 5 tab.

Škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Pracoviště: Ústav výrobních strojů a zařízení

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.

Konzultant práce: -

Klíčová slova: Automatický nosič antén, krokový motor, parabolická anténa

Abstrakt: Bakalářská práce se zabývá návrhem konstrukce mechanické části zařízení, které bude umožňovat natočení dvou parabolických antén na téměř jakémkoliv místě na obloze. Návrh zahrnuje dimenzování a konstrukci pohonů, skříně zařízení a vestavbu potřebné elektroniky.

ANNOTATION SHEET BACHELOR'S THESIS

Thesis autor Adam Smetana

Thesis title: Design of an Automatic Antenna Carrier

Year of publication: 2024

Thesis extent: 69 p., 38 fig., 5 tab.

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: Department of Production Machines and Equipment

Thesis supervisor: Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.

Thesis consultant: -

Keywords: automatic antenna carrier, stepper motor, parabolic antenna

Abstract: This bachelor's thesis focuses on the design of the mechanical part of a device capable of positioning two parabolic antennas to almost any point in the sky. The design includes the construction of actuation mechanisms, machine frame, and the integration of electronics.

Obsah

Obsah.....	7
Seznam použitých veličin.....	9
1 Úvod	11
2 Dostupná zařízení pro automatické polohování antén.....	12
2.1 Crossbow AAT	12
2.2 Projekt OPEN.HD – Antenna tracker mechanics	14
2.3 Shrnutí dostupných zařízení pro automatické polohování antén	15
3 Komponenty automatických nosičů antén	16
3.1 Motory	16
3.1.1 Charakteristika krokových motorů	16
3.1.2 Výrobci krokových motorů	17
3.1.3 Microstepping	18
3.1.4 Chlazení motorů	19
3.2 Senzory automatických nosičů antén	20
3.2.1 Indukční proximní čidlo	21
3.2.2 Kapacitní proximní čidlo	21
3.3 Shrnutí komponent automatických nosičů antén	21
4 Vlastní řešení	22
4.1 Souhrn požadavků zadávající firmy, kinematika zařízení	22
4.2 Ověření možnosti použití dostupných zařízení pro řešení dané problematiky	23
4.2.1 Výpočet maximální nosnosti zařízení Crossbow AAT	23
4.2.2 Výpočet maximální nosnosti zařízení OPEN.HD tracker	23
4.3 Dimenzování pohonů pro vlastní řešení	25
4.3.1 Výběr motorů	27
4.4 Implementace sensoriky do vlastního řešení	30
4.4.1 Návrh snímání polohy os zařízení	30
4.4.2 Návrh snímání orientace zařízení vůči zemi	31
4.5 Řízení automatického nosiče antén – požadavky	32
4.6 Předběžný koncepční návrh zařízení	32
4.7 Návrh variant hlavních konstrukčních uzlů	34
4.7.1 Návrh variant pohonu elevace	34
4.7.2 Výběr nejvhodnější varianty pro pohon elevace	38

4.7.3	Návrh variant pohonu azimutu	38
4.7.4	Výběr nejvhodnější varianty pro pohon azimutu	42
4.7.5	Návrh variant skříně zařízení	42
4.7.6	Výběr nejvhodnější varianty pro skříň zařízení	48
4.8	Osa elevace a její zástavba	49
4.8.1	Hřídel elevace a její zástavba	49
4.8.2	Pevnostní kontrola hřídele elevace	51
4.8.3	Návrh upevnění antén na osu elevace	52
4.8.4	Pevnostní kontrola nosníku antén	53
4.9	Osa azimutu a její zástavba	54
4.9.1	Návrh hřídele azimutu	55
4.9.2	Pevnostní kontrola hřídele azimutu	56
4.9.3	Zástavba motoru azimutu, doraz	58
4.10	Zástavba elektroniky	59
4.11	Shrnutí vlastního řešení, výsledný návrh, cena	60
5	Stavba prototypu zařízení, návrhy pro zlepšení konstrukce.....	62
6	Závěr	64
	Seznam použité literatury.....	66
	Seznam tabulek.....	68
	Seznam použitého softwaru	68
	Seznam příloh	68
	Seznam obrázků.....	69

Seznam použitých veličin

Označení	Jednotka	Název veličiny/popis
a, p, j, e, k, z, u	[<i>mm</i>]	Délkové rozměry
D_1, d_1, \dots	[<i>mm</i>]	Průměry
F_v	[<i>N</i>]	Síla působící na parabolickou anténu od větru
FG_a	[<i>N</i>]	Síla od tíhy parabolické antény
FG_c	[<i>N</i>]	Síla od tíhy zařízení
Fr_{az}	[<i>N</i>]	Síla od napínání řemene azimutu
Fr_{elev}	[<i>N</i>]	Síla od napínání řemene elevace
$Fr_{elev-objvod}$	[<i>N</i>]	Obvodová síla v řemenu elevace
g	[$m \cdot s^{-2}$]	Gravitační zrychlení
i	[1]	Převodový poměr
I_{Az}	[$kg \cdot m^2$]	Moment setrvačnosti osy azimutu
I_{Elev}	[$kg \cdot m^2$]	Moment setrvačnosti osy elevace
k	[1]	Bezpečnost
L	[<i>mm</i>]	Vzdálenost vyložení antény vůči ose rotace
$m_{antény}$	[<i>kg</i>]	Hmotnost antény
$m_{max antény}$	[<i>kg</i>]	Maximální hmotnost antény
$M_{AZ-dynamický}$	[<i>Nmm</i>]	Moment na osu azimutu od dynamických sil
$M_{AZ-statický}$	[<i>Nmm</i>]	Moment na osu azimutu od statických sil
$M_{Elev-dynamický}$	[<i>Nmm</i>]	Moment na osu elevace od dynamických sil
$M_{Elev-statický}$	[<i>Nmm</i>]	Moment na osu elevace od statických sil
M_k	[<i>Nmm</i>]	Kroutící moment
M_{ka}	[<i>Nmm</i>]	Kroutící moment na nosník antén
$M_k pohon$	[<i>Nmm</i>]	Kroutící moment výstupu pohonu
$M_k pohon Az$	[<i>Nmm</i>]	Kroutící moment pohonu osy azimutu
$M_k pohon Elev$	[<i>Nmm</i>]	Kroutící moment pohonu osy elevace
$M_k tíhy antény$	[<i>Nmm</i>]	Kroutící moment od tíhy antény

M_{o-A}, \dots	[Nmm]	Ohybový moment v místě A, ...
n	[1]	Počet kroků na 1 otáčku
n_{motor}	[1]	Počet kroků na 1 otáčku motoru
$n_{výstup}$	[1]	Počet kroků na 1 otáčku výstupu
P	[1]	Počet mikrokroků na 1 plný krok
$R_{ax}, R_{by} \dots$	[N]	Reakce v bodě A do směru x, ...
W_k	[mm^3]	Modul průřezu v krutu
W_o	[mm^3]	Modul průřezu v ohybu
α	[1]	Koeficient (dle HMH/Tresca)
α_{Az}	[$rad \cdot s^{-2}$]	Úhlové zrychlení osy azimutu
α_{Elev}	[$rad \cdot s^{-2}$]	Úhlové zrychlení osy elevace
$\eta_{převodu}$	[1]	Účinnost převodu
ϑ	[$^\circ$]	Chyba od diskrétního polohování motorů
σ_D	[MPa]	Dovolené napětí
σ_{o-A}, \dots	[MPa]	Napětí od ohybu v místě A, ...
σ_{Red-A}, \dots	[MPa]	Redukované napětí v místě A, ...
τ_{k-A}, \dots	[MPa]	Smykové napětí od krutu v místě A
φ	[$^\circ$]	Úhel síly od napínání řemene elevace
φ_{kroku}	[$^\circ$]	Úhel kroku

1 Úvod

Práce se zabývá návrhem mechanické části prototypu automatického nosiče antén dle požadavků zadávající firmy. Zařízení má sloužit ke zkvalitnění přenosu dat mezi létajícími objekty a zemí, čehož je docíleno použitím směrových parabolických antén na straně pozemní stanice. Tento typ antény koncentruje vyzařovaný výkon ve formě rádiových vln do jednoho směru a pro správnou funkčnost přenosu dat je tedy stěžejní, aby parabolická anténa zesilovala signál právě ve směru druhého přijímače/vysílače. V případě stacionárních aplikací je směrová anténa nastavena jednou při montáži, ale dochází-li k vzájemnému pohybu mezi oběma stranami komunikace, je nutné použít právě zařízení jako automatický nosič antén, který v jakékoliv chvíli zaručí optimální polohování směrové antény.

Z tohoto důvodu je typicky nosič antén vybaven dvěma rotačními osami – azimutu a elevace, přičemž první z nich realizuje rotaci okolo svislé osy, druhá okolo osy horizontální. Rozsahy obou z os jsou pak zvoleny tak, aby bylo možné antény směřovat na jakékoliv místo na obloze a zorné pole neobsahovalo slepá místa.

Z principu fungování směrových antén je zjevné, že zásadním parametrem pro automatický nosič antén bude jeho úhlová přesnost polohování, jelikož má přímý vliv na kvalitu přenosu dat. Jedním z hlavních cílů práce tedy bude konstrukce přesných pohonů pro obě osy s dostatečným momentem pro rozpořbování celého mechanismu. [1]

Zařízení je koncipováno jako mobilní pro použití v terénu, tudíž je požadována snadná přenositelnost, rychlá montáž, a především nízká hmotnost. Konstrukce tedy bude muset být zhotovena z materiálů o vysokém poměru tuhosti ku hmotnosti a bude muset obsahovat prvky zajišťující snadnou demontáž pro převoz.

Jelikož se ze strany zadávající firmy počítá se zhotovením prototypu konstruovaného anténního nosiče, neméně důležitým kritériem při návrhu zařízení je cena, do které je nutné započítat nejen ceny nakupovaných produktů a vyráběných dílů, ale rovněž náklady na montáž. Je přitom nutné brát v potaz, že se jedná o jednorázovou výrobu prototypu, u které se například nabízí využití technologie 3D tisku u méně namáhaných komponent jako ideální prostředek pro snížení ceny a urychlení vývoje.

2 Dostupná zařízení pro automatické polohování antén

Stroje pro automatické natáčení směrových antén s vysokým ziskem využívá člověk již desítky let. Často je tato technologie uplatňována v letectví a kosmonautice, kde je třeba přenášet rádiové signály na vzdálenosti od stovek metrů až po miliardy kilometrů k nejvzdálenějším vesmírným sondám. Příkladem mohou být například vesmírné sondy Voyager 1 a Voyager 2, s nimiž je komunikováno pomocí systému antén DSN (Deep Space Network), přičemž některé z pozemních polohovatelných parabolických antén dosahují průměru až 70 m. [2]

Ačkoliv je koncept natáčení směrových antén dlouho známý a hojně využívaný, tato zařízení jsou často součástí uzavřených systémových řešení problematiky přenosu dat na velké vzdálenosti. To znamená, že jsou automatické nosiče antén často dodávány s integrovanou elektronikou pro přenos dat, jsou navrhovány pro specifický typ antény a mnohdy ani není možné samotný nosič pořídit bez zakoupení celého systému, jehož je součástí. Příkladem může být systém AT-2 pro přenos dat pro bezpilotní letouny od firmy Ukrspec Systems. Firma anténní sledovač prodává jako součást přenosového systému. [3]

Na trhu lze tedy najít pouze malé množství dostupných produktů, které se svými parametry rámcově přibližují požadovaným specifikacím. V této práci bude rozebráno zařízení Crossbow AAT od firmy MyFlyDream a dále open source projekt OPEN.HD.

2.1 Crossbow AAT

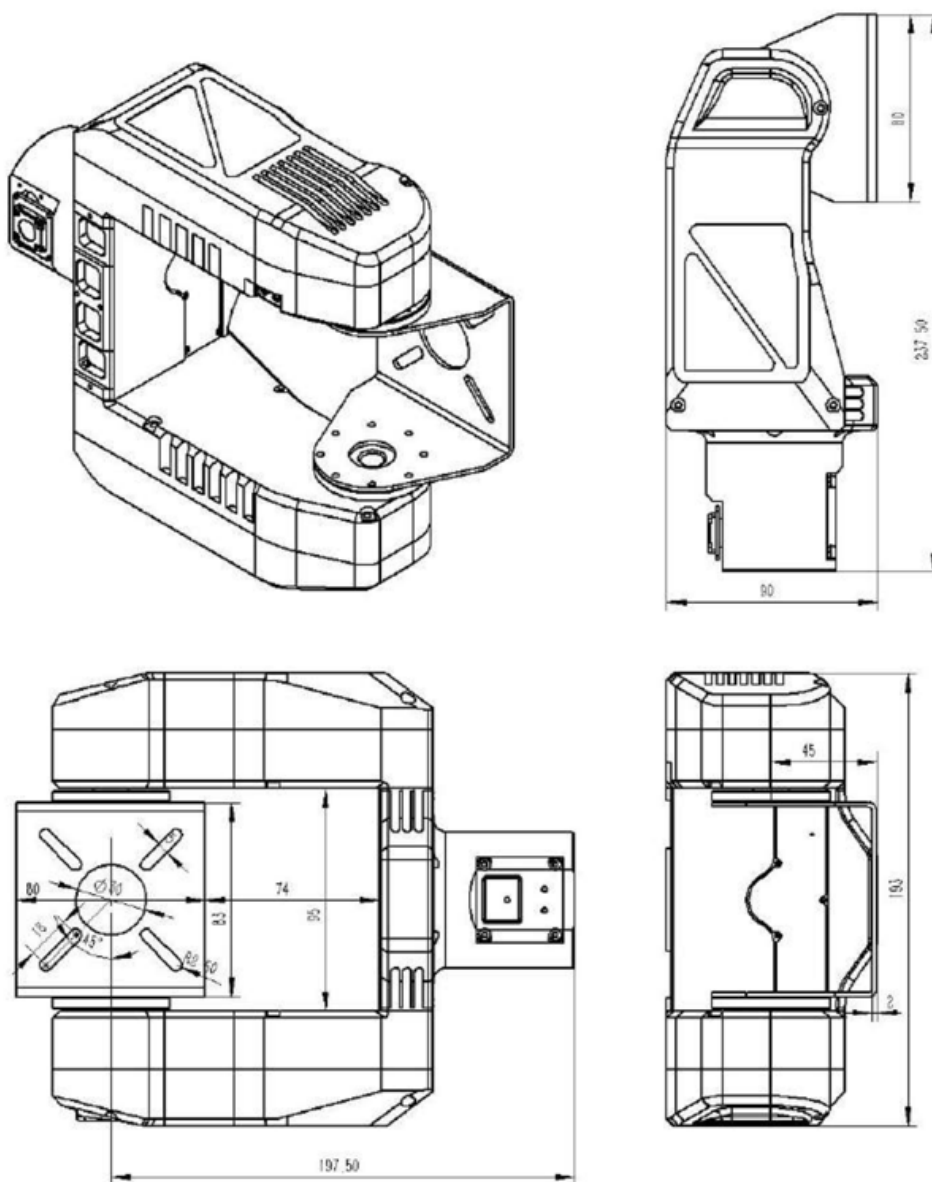
Jedná se o komerční řešení od výrobce MyFlyDream, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 1, výkresová dokumentace je pak zobrazena na obrázku 1.

Tabulka 1 Parametry Crossboow AAT [4]

Max rychlost azimut	300°/s
Max rychlost elevace	60°/s
Max úhel azimut	450°
Max úhel elevace	-15÷135°
Hmotnost samotného zařízení	2,6kg
Max kroutící moment elevace	1400Nmm

Co se konstrukce týče, zařízení je vybaveno dvěma osami – elevace a azimutu, jejichž pohony jsou realizovány krokovými motory. Skříň je tvořena obrobeným hliníkovým odlitkem, který kromě nosné, strukturální funkce slouží také jako chladič pro krokové motory. Upínací deska antény je uchycena mezi dvěma pilíři, čímž je zajištěn dostatečný prostor pro vodiče vedoucí z antény. Výhodou této koncepce je kompaktnost celého zařízení, ale významným nedostatkem je nemožnost snadného uchycení většího počtu antén. [4]

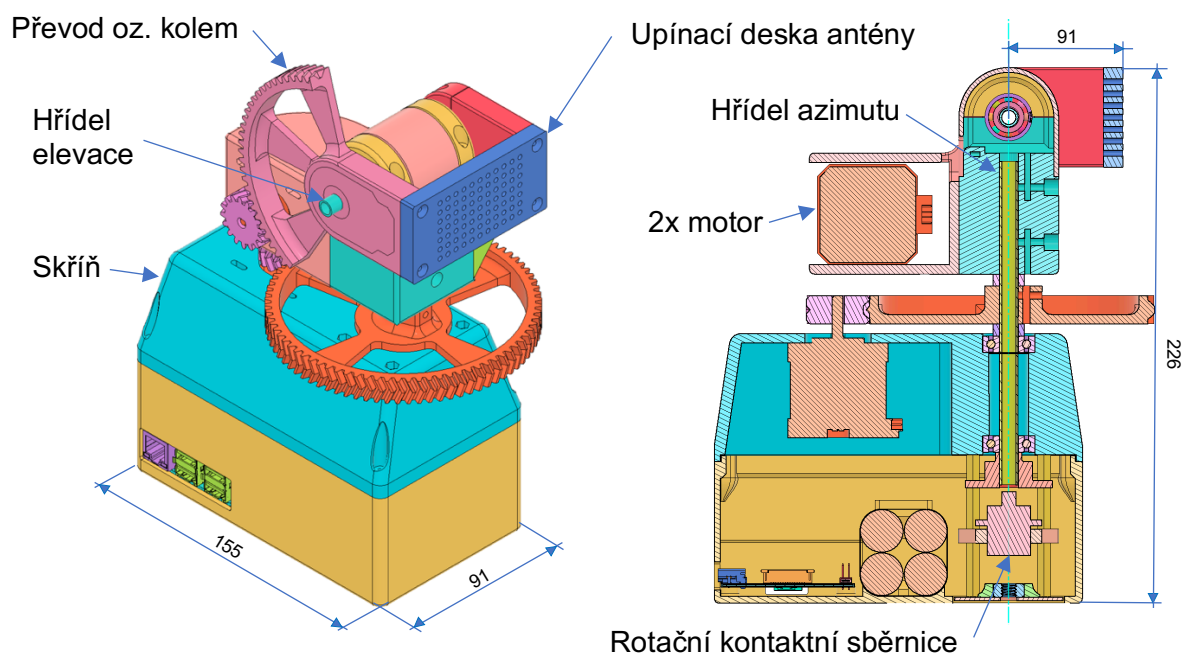
Strukturu pohonů nebo například použitá koncová čidla výrobce ve své dokumentaci nerozvádí.



Obrázek 1 Výkresová dokumentace zařízení Crossbow AAT [4]

2.2 Projekt OPEN.HD – Antenna tracker mechanics

OPEN.HD je open source projekt zabývající se přenosem dat z malých bezpilotních letounů. Jeho součástí je i návrh mechaniky automatického nosiče antén, jehož kompletní dokumentace je volně dostupná pod licencí GNU GPL v2.0. Autorem této části projektu je Miroslav Kolínský. [5] Konstrukčně je návrh složen ze snadno dostupných normalizovaných prvků a dílů 3D tištěných pomocí technologie FDM (Fused deposition modeling). Tato konstrukční filosofie zaručuje nízkou cenu kusové výroby produktu a nízké nároky na výrobní prostředky. Toto je dobře vidět například na realizaci pohonu osy elevace, která využívá 3D tištěného převodu pomocí ozubených kol se šípovými zuby, jejichž výroba je tradičními metodami velice nákladná. 3D model zařízení je zobrazen na obrázku 2.



Obrázek 2 OPEN.HD Nosič antén [5]

Pohony os azimutu i elevace jsou realizovány pomocí krokových motorů NEMA 17, standardizovaných institucí National Electrical Manufacturers Association (Národní asociace výrobců elektroniky) [6]. Typizace a nízká cena těchto motorů vedla k jejich častému použití i v jiných open source projektech, jako například projekt RepRap, jenž zaštiťuje řadu návrhů 3D tiskáren. [7]

Jedním z kritických problémů při návrhu anténního sledovače je přenos dat a napájení přes rotační osy zařízení. Projekt OPEN HD k řešení této problematiky využívá na ose azimutu

rotační kontaktní sběrnici, která realizuje nepřetržitý elektrický kontakt mezi stacionární skříní stroje a rotujícími elektrickými komponenty na osách, při možnosti neomezeného počtu otáček. Výhody přenosu dat a napájení přes toto zařízení spočívají ve faktu, že nedochází ke kroucení nebo jiným nepříznivým pohybům kabeláže, které snižují její životnost. Další výhodou z hlediska konstrukce je možnost neosazovat osu vybavenou tímto zařízením tvrdým mechanickým dorazem, který je u rotačního pohybu při použití kabelového spojení vždy nutný. Tato nutnost vychází z faktu, že při manipulaci s vypnutým zařízením by mohlo dojít k více otáčkám kolem dané osy v jednom směru, než na kolik bylo kabelové spojení navrženo, tudíž by mohlo dojít k poškození vodičů a destrukci zařízení. [8]

2.3 Shrnutí dostupných zařízení pro automatické polohování antén

Tato kapitola se zabývá konstrukční analýzou dvou zařízení – komerčně dostupného Crossbow AAT a open source projektu OPEN HD. I přes obdobnou funkcionalitu nabízejí obě varianty zcela odlišná konstrukční provedení, přičemž obě mohou sloužit jako podklad pro vlastní řešení.

U open source projektu OPEN HD se nabízí převzetí výrobní technologie méně namáhaných dílů – 3D tisku pomocí technologie FDM, která je ideálním prostředkem pro prototypovou výrobu. Další podnět pro vlastní konstrukci toto zařízení přináší v oblasti pohonů, kde jsou využity dobře dostupné krokové motory v kombinaci s převodem pomocí ozubených kol.

Dokumentace zařízení Crossbow AAT bohužel takto detailní pohled na strukturu pohonů os nenabízí, tudíž hledání podnětů pro vlastní řešení je složitější, nicméně zajímavým konceptem je využití nosné konstrukce zařízení jako chladiče pro odvod tepla z motorů.

3 Komponenty automatických nosičů antén

Automatické nosiče antén jsou komplexní a poměrně úzce specializovaná zařízení a objemy jejich výroby a prodeje jsou tedy poměrně omezené. Nicméně principem fungování se nejedná o nic jiného než přesná polohovací zařízení, tudíž vykazují mnoho podobností a často používají stejné komponenty jako výrobní stroje. Z tohoto důvodu je na trhu dostupná celá řada často i standardizovaných dílů pro jejich konstrukci, kterým bude věnována tato kapitola.

3.1 Motory

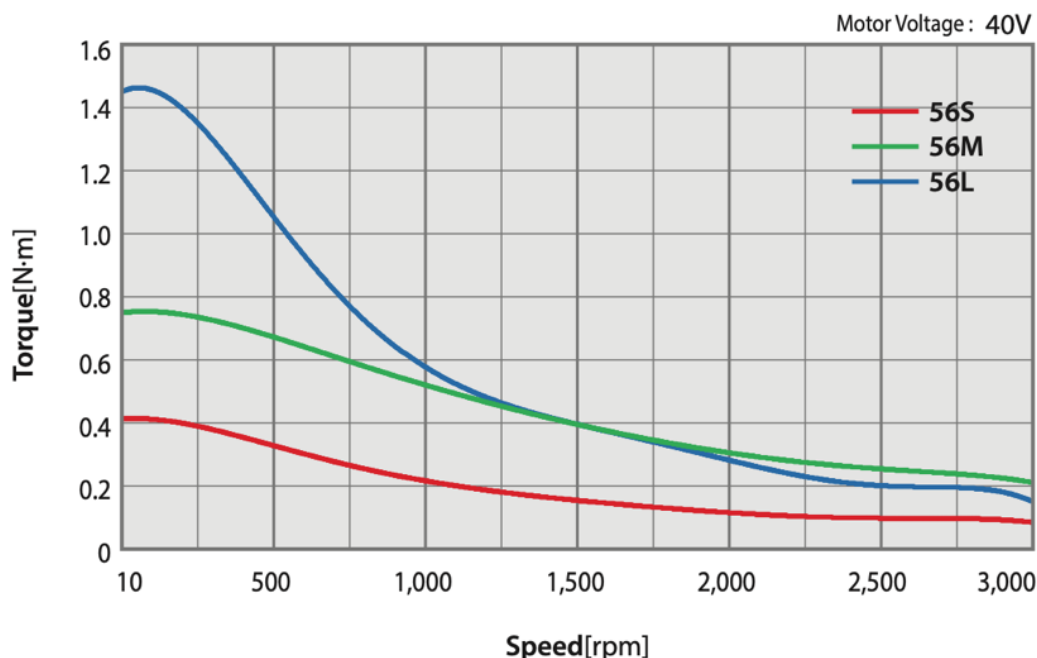
Vzhledem k nátuře pohybu automatických nosičů antén je zjevné, že po jejich motorech je požadována vysoká přesnost polohování, schopnost poskytnout žádaný kroutící moment při rotaci i ve stacionárním stavu, vysoká efektivita, a nakonec i nízká cena. Jak se potvrzuje i u zařízení zkoumaných v předchozí kapitole, těmto požadovaným atributům nejvíce vyhovují krokové motory.

3.1.1 Charakteristika krokových motorů

Krokový motor se synchronní stroj, jehož rotor realizuje rotační pohyb v diskretních krocích, přeskakování mezi stabilními polohami. Díky této vlastnosti je tento typ motoru schopen přesného polohování i bez použití zpětnovazebního řízení. Právě z důvodu poměrně snadného řízení, nízké ceny a bezúdržbové konstrukci (vyjma ložisek nedochází ke kontaktu statorové a rotorové části) je tento typ motoru často používán v automatizační technice nebo i domácích spotřebičích. [9]

U krokových motorů platí, že kroutící moment na hřídeli je obecně funkcí úhlové rychlosti otáčení. Vynesení této závislosti do grafu je získána otáčko-momentová charakteristika a její typický průběh pro krokový motor je možno vidět na grafu zobrazeném na obrázku 3 (v grafu jsou zobrazeny charakteristiky tří různých motorů ze stejné řady). Z charakteristiky je možné vyčíst, že krokový motor je schopen dodávat nejvyšší moment při nižších otáčkách, navyšováním úhlové rychlosti otáčení pak dochází k postupnému poklesu tohoto momentu. [9]

Ezi-STEP-MPB-56 series



Obrázek 3 Otáčko-momentová charakteristika krokového motoru [10]

3.1.2 Výrobci krokových motorů

Vzhledem k jednoduchosti konstrukce a hojnému využití se na trhu nachází celá řada výrobců krokových motorů. Od značek soustředících se industriální sektor, jako například Fastech, Raveo či Microcon, po výrobce často původem z Asie, kteří se soustředí na minimalizaci ceny produktu, ale například za cenu chybějících certifikací a méně kvalitní dokumentace.

Nicméně i vzhledem k poměrně rozsáhlé typizaci v této oblasti jsou rozdíly v konstrukci samotných krokových motorů u jednotlivých výrobců poměrně malé, hlavním faktorem oddělujícím jednotlivé pohonné systémy s tímto typem motoru od sebe je převážně jejich řízení, které je implementováno v driveru krokového motoru. To má zásadní vliv na plynulost chodu, hlučnost, ale i výkonové parametry, zároveň může být doplněno o zpětnou vazbu, jako například u produktové série Ezi Servo od společnosti Fastech. Implementace zpětné vazby zpřesňuje řízení a umožňuje například detekci anomálií a poruchových stavů. Další zásadní funkce, kterou obstarává driver krokového motoru je microstepping, kterému bude věnována následující kapitola.

3.1.3 Microstepping

Jedním z hlavních parametrů krokového motoru je veličina φ zvaná úhel kroku. Tento parametr udává, o kolik stupňů se pootočí hřídel motoru při realizaci jednoho plného kroku. Přeneseně lze pak vypočítat počet kroků na otáčku pomocí rovnice 3.1.

$$n = \frac{360^\circ}{\varphi_{kroku}} \quad (3.1)$$

V základní konfiguraci pracuje bipolární krokový motor s plným krokem. Pro zvýšení jeho rozlišení se využívá takzvaného microsteppingu, který spočívá v přesném řízení proudu protékajícího cívkami krokového motoru, čímž je možné rozdělit 1 krok na určitý počet menších mikrokroků. Parametr počet mikrokroků na plný krok udává, na kolik dílů je rozdělen jeden plný krok. Například při nastavení 4 mikrokroky na 1 krok se rozlišení motoru teoreticky zčtyřnásobí. Microstepping má rovněž pozitivní vliv na plynulost pohybu, vibrace a hluk motoru. [11]

Při použití této funkce je ale nutné brát v potaz, že zvýšené rozlišení krokového motoru nemusí být plně realizováno. Příčinou může být důvod, že při zvyšování počtu mikrokroků na plný krok se značně snižuje takzvaný inkrementální kroutící moment krokového motoru, což je veličina popisující kroutící moment na hřídeli při realizaci jednoho mikrokroku. Pokud je tedy moment nutný k realizaci pohybu vyšší než inkrementální moment, k žádnému natočení hřídele při jednom mikrokroku nedojde. Hřídel se začne pohybovat až ve chvíli, kdy se driver pokusí udělat více mikrokroků a výsledný moment od magnetického pole překoná moment nutný k otočení hřídele. Tento jev je někdy označován jako magnetická vůle. [12]

Veličina popisující maximální kroutící moment, než dojde k přeskočení motoru o jeden plný krok, se nazývá pull-out torque a využívá se k výpočtům maximální zatížitelnosti motoru. Microstepping může mít negativní vliv i na hodnotu tohoto parametru, ale její pokles se zvyšující se hodnotou počtu mikrokroků na plný krok není natolik razantní jako u hodnoty inkrementálního kroutícího momentu. Přesné hodnoty závisí na použitém driveru a oblasti otáček, kde jsou hodnoty měřeny. Pokles pull-out torque by pro běžné aplikace neměl ani u vysokých počtů mikrokroků na krok přesahovat 30 % oproti používání plného kroku.[13]

Je tedy patrné, že při výpočtu chyby polohování od diskrétního otáčení krokových motorů nelze při využití vyšších hodnot počtu mikrokroků na plný krok počítat s dosažením plného rozlišení. Jako konzervativní hodnotu pro výpočet lze zvolit například 2 mikrokroky na 1 krok, což je i hodnota, při které například prodejce CNCLAB provádí měření otáčko–momentové charakteristiky svých motorů. [14]

3.1.4 Chlazení motorů

Krokové motory a jejich drivery jsou elektronická zařízení a nevyhnutelně u nich při provozu dochází k tepelným ztrátám, a to i ve stavu, kdy nedochází k rotaci hřídele, ale motor je pouze uzamčený v dané pozici. [13] Odvod tohoto tepla z motoru je zásadní i vzhledem k tomu, že u krokových motorů je teplota jedním z hlavních limitujících faktorů proudu, který je možný do motoru dodávat. [15] Čím lepší je tedy chlazení motoru a driverů, tím vyšší proud do motorů je možné nastavit, a tedy tím vyšší je do jisté míry dosahovaný kroutící moment.

Metody chlazení motorů lze rozdělit na aktivní a pasivní. Při použití pasivní formy odvodu tepla ze zařízení je konstrukci nutné doplnit o dostatečně velký chladič pro výměnu tepla s okolním vzduchem. Příklad této formy chlazení je uveden v kapitole 2.1 na zařízení Crossbow AAT, kdy byl jako chladič použit hliníkový rám zařízení, což vede k úspoře prostoru a hmotnosti.

Příkladem benefitů při použití aktivního chlazení krokových motorů je open source projekt Orbiter a jeho modifikace s aktivním chlazením Turbiter. Tento projekt se zabývá konstrukcí lehkého extrudéru pro 3D tiskárny, jehož funkcí je přesný posun plastové struny (filamentu) do tavicí zóny. K tomu je využíván krokový motor NEMA 14 s cykloidní převodovkou s převodovým poměrem 7,5:1. Při konstrukci extruderu je snahou, aby měl krokový motor co nejvyšší kroutící moment při daných otáčkách a mohl tak spolehlivě protlačovat požadované množství materiálu. V dokumentaci projektu lze dohledat, že aktivním chlazením krokového motoru extruderu malým ventilátorem bylo možné výrazně navýšit proud do motoru, aniž by byla překročena jeho maximální povolená teplota, čímž bylo možné docílit v různých režimech provozu až o desítky procent vyšších kroutících momentů na hřídeli. [15]

Je tedy zřejmé, že chlazení krokového motoru má přeneseně výrazný vliv na mechanický výkon, který je motor schopný dodávat. Vzhledem k faktu, že nosiče antén jsou mobilní zařízení, které musí operovat i v nepříznivých podmínkách, je třeba chlazení motorů konstruovat tak, aby v terénu nemohlo dojít k přehřátí motorů (případně aby kvůli vysoké teplotě motorů nemusel být omezen proud do cívek motoru a nedošlo k poklesu výkonu).

3.2 Senzory automatických nosičů antén

Senzory v automatických nosičích antén slouží především pro určení polohy jednotlivých os zařízení. Jak bylo rozebráno v předchozí kapitole, tato zařízení mnohdy využívají pro pohon svých os krokové motory, které je téměř vždy nutné doplnit o koncová čidla. Tato nutnost vychází z principu ovládání toho typu motoru – do driveru se vysílá příkaz pro natočení hřídele do určitého směru o určitý počet kroků – jedná se tedy o relativní řízení, při kterém je pro absolutní polohování nutné znát určitou domovskou pozici na ose, od které je pak prováděno odměřování. Pro určení této domovské polohy lze použít kontaktní spínací čidlo nebo čidla bezkontaktní – indukční nebo kapacitní.

Typické provedení bezkontaktních čidel (jak indukčních, tak kapacitních) je uvedeno na obrázku 4, kdy samotný senzor je uložen v kovovém pouzdře opatřeném vnějším závitem, který umožňuje snadnou montáž a následnou seřiditelnost vybraného čidla.

Mezi výrobce těchto čidel, patří například firmy Sick, Omron nebo Balluff. Cena závisí na velikosti senzoru, snímací frekvenci či na certifikacích.



Obrázek 4 Provedení proximních čidel [16]

3.2.1 Indukční proximní čidlo

Tento typ čidla funguje na principu elektromagnetické indukce, kdy se uvnitř senzoru nachází cívka buzená oscilátorem, čímž v blízkosti senzoru vzniká měnící se magnetické pole. Pokud je vodivý předmět vložen do tohoto pole, dojde v něm k indukci elektrického proudu a tvorbě opačného magnetického pole oproti poli vzniklého v cívce. Pokud se tak stane, dojde k sepnutí elektroniky uvnitř senzoru a řídicí počítač dostává zprávu o změně stavu čidla. Tímto senzorem je tedy možné bezkontaktně a bez pohyblivých částí detekovat přítomnost vodivého objektu, přičemž běžná detekční vzdálenost se pohybuje v řádu milimetrů v závislosti na materiálu. Čidlo je často používáno v automatizační technice, vzhledem k jeho jednoduchosti a spolehlivosti. [17]

3.2.2 Kapacitní proximní čidlo

Kapacitní čidla pracují na principu měření změny kapacity kondenzátoru při vkládání objektů do jeho elektrického pole. Tato změna kapacity je způsobena vložením jak vodivého, tak nevodivého objektu do elektrického pole, čímž se zásadně liší od čidel indukčních. Nicméně vzhledem k faktu, že detekují přítomnost jakéhokoliv objektu, jsou oproti indukčním čidlům například více náchylné na přítomnost prachu či jiných nečistot. [17]

3.3 Shrnutí komponent automatických nosičů antén

Tato kapitola byla soustředěna na zkoumání komponent využívaných v automatických anténních nosičích. Nejprve se práce věnovala zkoumání krokových motorů a jejich vlastností, přičemž bylo nalezeno několik výrobců, kteří nabízejí produkty vhodné pro aplikaci polohování antén. Dále byly zkoumány senzory nosičů antén, přičemž práce byla soustředěna na různé typy proximních čidel, které jsou využívány v pohonech s krokovými motory pro určení domovské pozice dané osy.

Tyto informace mohou sloužit jako podklad pro vlastní konstrukci automatického anténního nosiče. Co se krokových motorů týče, pro vlastní řešení je nutné motor nejprve dimenzovat a poté vybrat konkrétní produkt například z katalogů zmíněných výrobců. Při výběru proximního koncového čidla je pak nejdůležitějším kritériem pro výběr materiál jeho spouště, který čidlo musí být schopné spolehlivě detekovat.

4 Vlastní řešení

Tato část práce se věnuje návrhu řešení problematiky předložené zadávající firmou. Prvním krokem k tomuto řešení je souhrnná definice všech požadavků na zařízení, čemuž je věnována následující podkapitola.

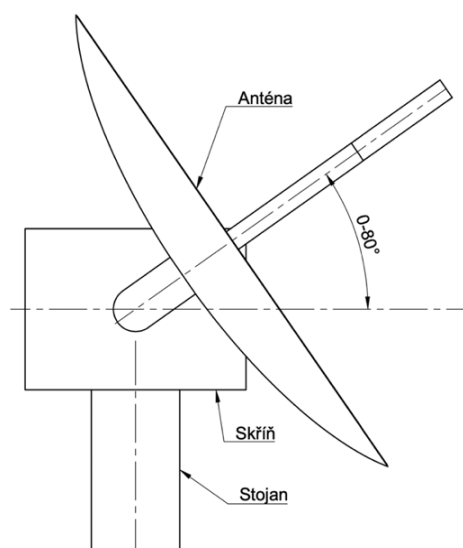
4.1 Souhrn požadavků zadávající firmy, kinematika zařízení

Jak již bylo rozebráno v zadání práce, zařízení má umožňovat natočení dvou parabolických antén, každé o průměru 720mm a hmotnosti 3,6kg, na téměř jakékoli místo na obloze. Podrobnější specifikace kinematických poměrů pro obě osy zařízení jsou uvedeny v tabulce 2 a na obrázku 5.

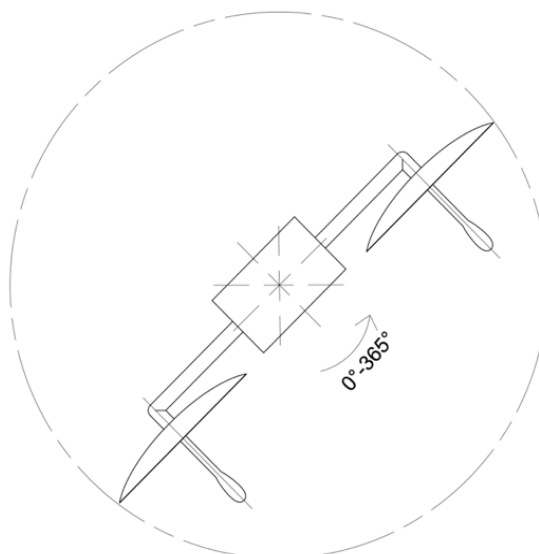
Tabulka 2 Požadovaná kinematika zařízení

Osa	Rozsah osy [°]	Max. rychlost [°/s]	Max. zrychlení [°/s ²]	Přesnost polohování [°]
Elevace	0-80	60	60	±4
Azimut	0-365	60	40	±4

ELEVACE
(BOKORYS)



AZIMUT
(PŮDORYS)



Obrázek 5 Schéma kinematiky nosiče antén

Dále je také požadována hmotnost zařízení do 30kg a odolnost vůči kapající vodě 15° od svislice. Koncepce by rovněž měla obsahovat prvky pro částečnou uživatelsky přívětivou demontáž zařízení pro převoz. Celková cena zařízení by neměla překročit 60 000 Kč.

4.2 Ověření možnosti použití dostupných zařízení pro řešení dané problematiky

Nejsnadnějším a potenciálně i neekonomičtějším řešením je využití již hotového produktu, nicméně, jak již bylo zjištěno v rešeršní části práce, na trhu se nachází pouze malé množství automatických anténních nosičů, které umožňují uživateli využití vlastních vysílacích komponent – antén a elektroniky k nim vázaným. Jako možné varianty rámcově odpovídající požadavkům zadávající firmy byla shledána dvě zařízení již zkoumaná v rešerši, a sice produkt Crossbow AAT a open source projekt OPEN.HD.

4.2.1 Výpočet maximální nosnosti zařízení Crossbow AAT

Z parametrů zařízení poskytnutých výrobcem a dostupné výkresové dokumentace byla v rovnicích 4.1-4.3 vypočtena maximální hmotnost břemene pomocí porovnání udávaného kroutícího momentu osy elevace s momentem, který na osu vyvodí tíha antény na rameni vyložení upevňovací desky L .

$$M_{k \text{ tíhy antény}} = M_{k \text{ pohon}} \quad (4.1)$$

$$L \cdot g \cdot m_{\max \text{ antény}} = M_{k \text{ pohon}} \quad (4.2)$$

$$m_{\max \text{ antény}} = \frac{M_{k \text{ pohon}}}{L \cdot g} = \frac{1400}{45 \cdot 9,81} = 3,17 \text{kg} \quad (4.3)$$

Z výpočtu je patrné, že aniž by došlo k započtení bezpečnosti nebo dynamických sil od urychlování antén, zařízení nesplňuje požadavky zadávající firmy na hmotnost břemene a není tedy použitelné pro danou aplikaci.

4.2.2 Výpočet maximální nosnosti zařízení OPEN.HD tracker

Dokumentace projektu OPEN.HD neudává maximální nosnost zařízení, ani kroutící moment na výstupu osy, tudíž pro ověření, zda zařízení vyhovuje zadaným specifikacím, je nutné tyto údaje dopočítat. Co se osy elevace týče, dokumentace specifikuje krokový motor NEMA 17 s délkou těla 40mm, pro výpočty byl tedy zvolen motor Ezi-STEP-MPB-42M

od společnosti FasTech. [10] Teoretická maximální hmotnost břemene, bez započítání dynamických účinků, byla pak vypočtena v rovnicích 4.4-4.6 porovnáním kroutícího momentu na výstupu osy elevace s momentem, který na osu vyvodí tíha antény na rameni vyložení upevňovací desky.

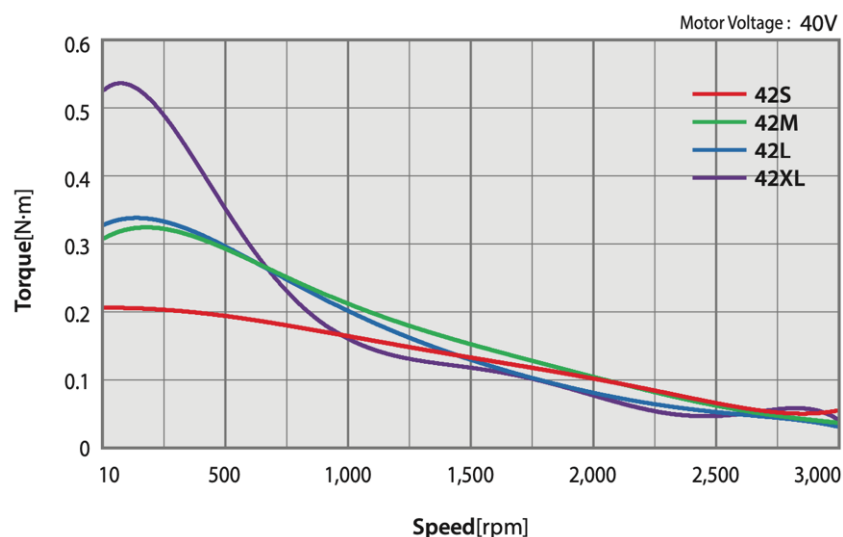
$$M_k \text{ tíhy antény} = M_k \text{ pohon} \quad (4.4)$$

$$L \cdot g \cdot m_{\max \text{ antény}} = M_k \text{ motor} \cdot i \cdot \eta_{\text{převodu}} \quad (4.5)$$

$$m_{\max \text{ antény}} = \frac{M_k \text{ motor} \cdot i \cdot \eta_{\text{převodu}}}{L \cdot g} = \frac{300 \cdot 5 \cdot 0,95}{45 \cdot 9,81} = 3,2 \text{ kg} \quad (4.6)$$

Přičemž u krokových motorů platí, že moment na hřídeli $M_k \text{ motor}$ je funkcí úhlové rychlosti otáčení. Předpokládaná otáčková pracovní oblast motoru pro aplikaci v tomto nosiči antén se pohybuje v intervalu od 0ot/min od 50ot/min. Z otáčko momentové charakteristiky motoru, uvedené na obrázku 6, lze pak odečíst, že v tomto intervalu otáček je motor schopen zaručeně dodávat moment minimálně 300Nmm.

Ezi-STEP-MPB-42 series



Obrázek 6 OTÁČKO-MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA MOTORU EZI-STEP-MPB-42M (ZELENÁ) [10]

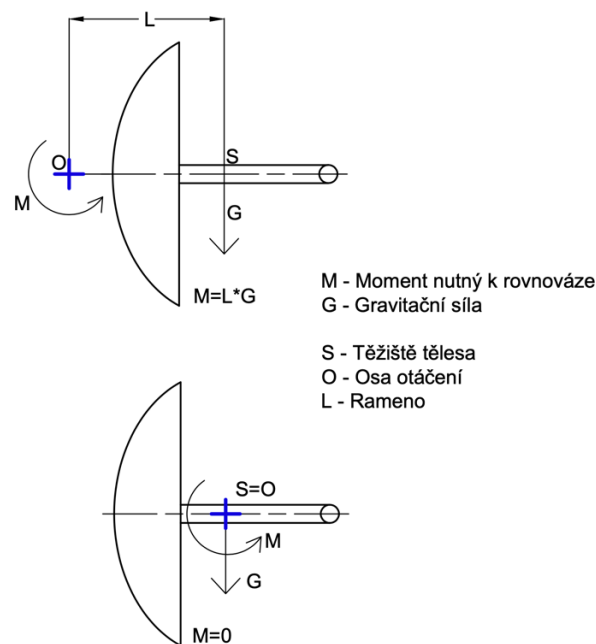
Z výše provedených výpočtů je patrné, že ani jedna z variant zkoumaných zařízení nesplňuje požadavek na minimální nosnost zařízení. Práce se tady dále bude věnovat návrhu vlastní konstrukce dle požadavků zadávající firmy.

4.3 Dimenzování pohonů pro vlastní řešení

Pohony a jejich základní prvek – motory tvoří nejdůležitější část automatického anténního nosiče antén. V rešeršní části práce byl jako nejvhodnější typ motoru pro tuto aplikaci shledán motor krokový, jeho dimenzování a výběru jsou věnovány následující dvě podkapitoly.

Pro dimenzování motoru je nejprve nutné určit kroutící moment působící na výstupu vybrané osy anténního nosiče. Tento moment lze rozdělit na tři složky.

- **moment od statických sil** – způsoben působením tíhy na pohyblivou část osy. Jak lze vidět na obrázku 7, tuto složku je možné efektivně vynulovat statickým vyvážením, kdy osa otáčení prochází těžištěm části vykonávající rotaci



Obrázek 7 Statické vyvážení antén

- **moment od dynamických sil** – zapříčiněn setrvačností osy. Je funkcí geometrie a úhlového zrychlení. Při daném zrychlení je tedy možné ho minimalizovat pouze snížením momentu setrvačnosti v dané ose.
- **moment od přídavného zatížení** – například následkem větru nebo jiného externího vlivu. Tuto složku je poměrně obtížné kvantifikovat, proto bude pro potřeby výpočtu momentu zahrnuta v koeficientu bezpečnosti $k = 2$

Na základě tohoto rozboru byl v rovnicích 4.7-4.9 vypočten návrhový kroutící moment pohonu osy azimutu.

$$M_{k \text{ pohon } Az} = (M_{Az\text{-statický}} + M_{Az\text{-dynamický}}) \cdot k \quad (4.7)$$

$$M_{k \text{ pohon } Az} = (L_{Az} \cdot m_{antény} \cdot g + I_{Az} \cdot \alpha_{Az}) \cdot k \quad (4.8)$$

$$M_{k \text{ pohon } Az} = (0 \cdot 7,2 \cdot 9,81 + 3,427 \cdot 0,7) \cdot 2 = 4,8 Nm = 4800 Nmm \quad (4.9)$$

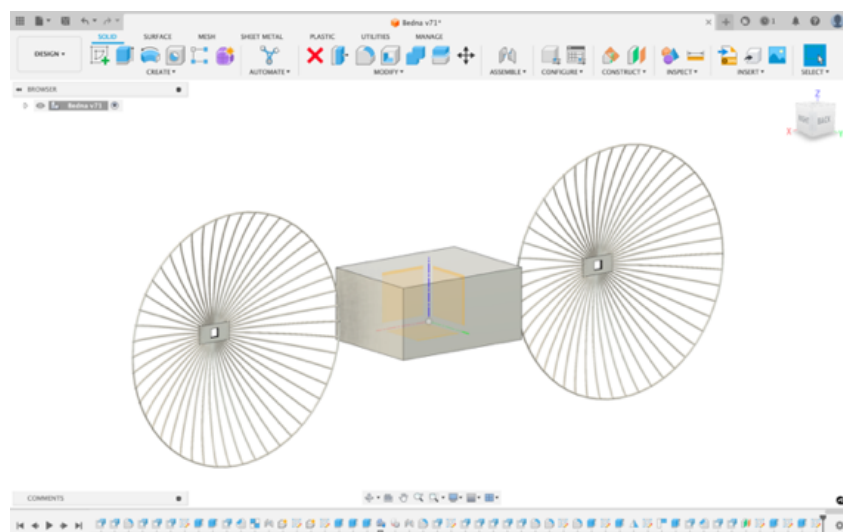
A dále lze obdobně určit i návrhový kroutící moment pohonu osy elevace – viz rovnice 4.10-4.12.

$$M_{k \text{ pohon } Elev} = (M_{Elev\text{-statický}} + M_{Elev\text{-dynamický}}) \cdot k \quad (4.10)$$

$$M_{k \text{ pohon } Elev} = (L_{Elev} \cdot m_{antény} \cdot g + I_{Elev} \cdot \alpha_{Elev}) \cdot k \quad (4.11)$$

$$M_{k \text{ pohon } Elev} = (0 \cdot 7,2 \cdot 9,81 + 0,24 \cdot 1,05) \cdot 2 = 0,5 Nm = 500 Nmm \quad (4.12)$$

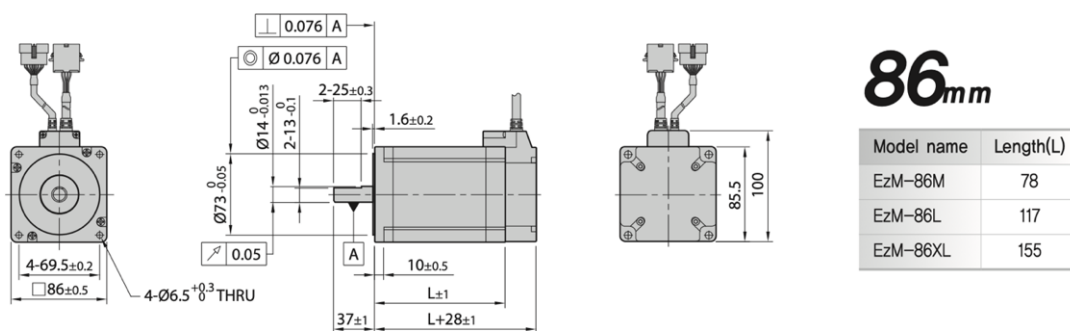
Ve výpočtech je předpokládáno, že konstrukce os je staticky vyvážená, tudíž složka statického momentu bude nulová. Moment setrvačnosti I byl pro obě osy vypočten CAD programem z návrhového 3D modelu, který obsahuje obě antény na jejich předpokládaných pozicích a dále předběžný nosič antén ve formě boxu o rozměrech 400x300x200mm a hmotnosti 20kg (schéma 3D modelu je znázorněno na obrázku č.8). Vždy byl počítán pouze moment setrvačnosti pohybujících se komponent. Úhlové zrychlení α vychází z požadavků zadávající firmy – viz kapitola 4.1.



Obrázek 8 Předběžný model pro výpočet momentu setrvačnosti

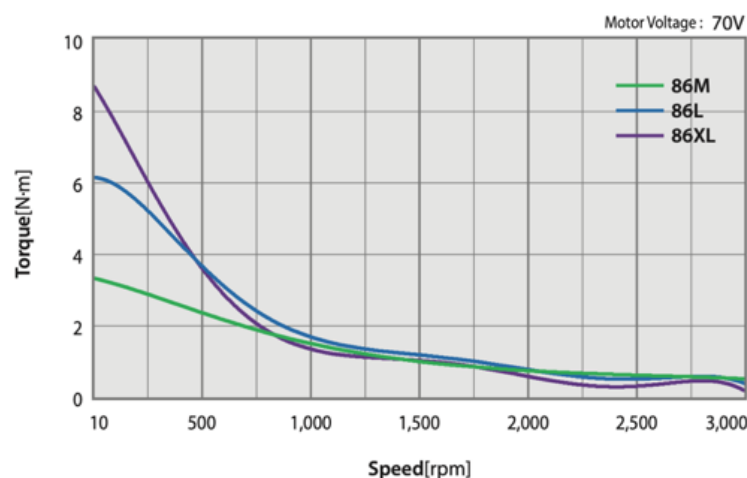
4.3.1 Výběr motorů

Z konstrukčních důvodů je jedním z aspektů, které je třeba minimalizovat, i celková hmotnost a rozměry pohonů. Jednou z možností dimenzování pohonů je volba většího motoru, který nevyžaduje vysoký převodový poměr pro dosažení potřebného kroutícího momentu. Benefitem této cesty je eliminace vůle převodů a využívání krokového motoru v oblasti nízkých otáček, což je, jak bylo zjištěno v rešerši, typicky oblast, kdy dosahuje nejvyššího kroutícího momentu. Pro osu azimutu by požadavkům přibližně vyhovoval například krokový motor Ezi Servo EzM-86XL, který je nejvýkonnější výrobcem dodávaný ve své kategorii (výkres motoru je uveden na obrázku 9). Z jeho otáčko-momentové charakteristiky, která je znázorněna na obrázku 10, lze odečíst, že při otáčkách 10ot/min, vyžadovaných na výstupu osy azimutu, dosahuje kroutícího momentu okolo 8,3Nm.



Obrázek 9 Výkres motoru EZM-86XL [18]

Ezi-SERVO-ST-86 series



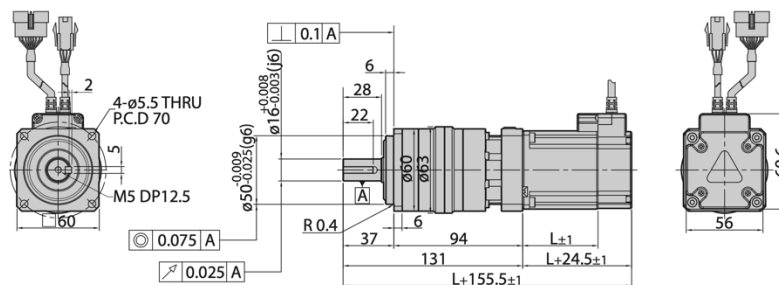
Obrázek 10 OTÁČKO-MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA MOTORU EZM-86XL (FIALOVÁ) [18]

Další z cest pro dimenzování pohonu je volba motoru menších rozměrů, který vyžaduje převodovku pro dosažení potřebného kroutícího momentu. Jako příklad byl zvolen motor Ezi Servo EzM-56S-4000-25, který je vybaven planetovou převodovkou 25:1 (výkres motoru je uveden na obrázku 11). Výrobce publikuje pouze otáčko-momentovou charakteristiku pro tento motor bez převodovky (viz obrázek 12), nicméně pro rychlost otáčení výstupu osy azimutu 10ot/min lze při daném převodovém poměru vypočítat rychlost otáčení hřídele motoru 250ot/min. Kroutící moment na této hřídeli motoru je poté odečten z otáčko-momentové charakteristiky – pro daný motor cca 0,4Nm. Kroutící moment na výstupu osy je následně vypočten pomocí vzorce v rovnicích 4.13-4.14.

$$M_{k\text{ pohon}} = M_{k\text{ motor}} \cdot i \cdot \eta_{\text{převodu}} \quad (4.13)$$

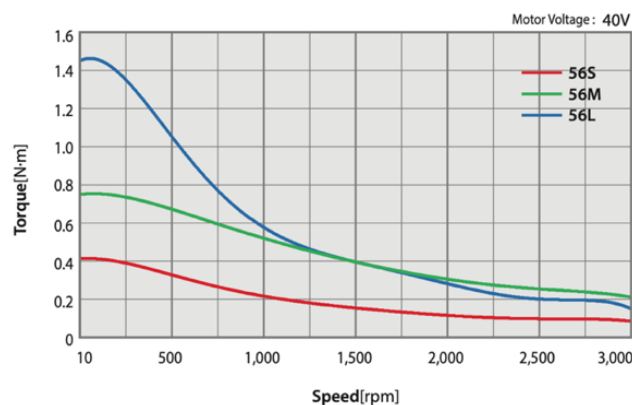
$$M_{k\text{ pohon}} = 0,4 \cdot 25 \cdot 0,75 = 7,5\text{Nm} = 7500\text{Nmm} \quad (4.14)$$

Unit Part Number	Motor	Stage	Reduction Gear Ratio	L Length [mm]
Ezi-SERVO-ST-56S-■-PN□	EzM-56S-■-PN□	Double Stage	15, 25, 40, 50	46
Ezi-SERVO-ST-56M-■-PN□	EzM-56M-■-PN□		15, 25, 40, 50	55
Ezi-SERVO-ST-56L-■-PN□	EzM-56L-■-PN□		15, 25, 40, 50	80



Obrázek 11 Výkres motoru EzM-56S-4000-25 [18]

Ezi-SERVO-ST-56 series



Obrázek 12 Otáčko – momentová charakteristika motoru EZM-56S-4000 (červená) [18]

Z výpočtu a výkresové dokumentace je zřejmé, že varianta převodovaného motoru EzM-56S-4000-25 nabízí při daných výstupních otáčkách oproti nepřevodovanému motoru EzM-86XL menší rozměry a nižší hmotnost při stejném kroutícím momentu. Jeví se tedy jako vhodnější varianta pro konstrukci mobilního zařízení, jako je nosič antén zkoumaný v této práci. Pro zjednodušení konstrukce a snížení počtu unikátních dílů v sestavě se zdá jako výhodné použít stejný motor pro obě osy zařízení, i přes fakt, že pro osu elevace je motor předimenzován.

Momentové a otáčkové předimenzování pohonů navíc nabízí jistou flexibilitu při konstrukci celého pohonného mechanismu osy. Pokud to bude konstrukčně výhodné, například při propojení výstupu převodovky motoru a hřídele s anténami, u obou os zařízení je možné motor dále mírně převodovat do rychla či do pomala. Konkrétně pro osu azimutu s motorem EzM-56S-4000-25 je možné, aby převodový poměr i mezi výstupem převodovky motoru a výstupem osy byl z intervalu $i \in (0,7; 1,5)$: 1. Pro osu elevace se stejným motorem je tento interval pro převodový poměr $i \in (0,5; 2)$: 1. Při těchto hodnotách převodového poměru bude motor schopný dodávat požadovaný kroutící moment při daných otáčkách. Teoreticky jsou tyto intervaly z hlediska výkonu motoru o něco širší, ale velké převodování do rychla či do pomala mezi výstupem osy a převodovkou motoru se nejeví jako praktické, proto byly intervaly mírně omezeny.

Co se dále chyby polohování na výstupu osy od diskrétního krokování motorů týče, lze ji při použití motoru EzM-56S-4000-25 bez dalšího zpřevodování vypočítat dle vzorce v rovnici 4.15.

$$\vartheta = \frac{1}{2} \cdot \frac{360^\circ}{n_{\text{výstup}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{360^\circ}{n_{\text{motor}} \cdot p \cdot i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{360^\circ}{180 \cdot 2 \cdot 25} = 0,02^\circ \quad (4.15)$$

Kde veličina p představuje nastavený počet mikrokroků na jeden krok v driveru krokového motoru. V tomto případě byla uvažována hodnota $p = 2$, jelikož, jak bylo zjištěno v rešeršní části práce, vyšší hodnoty se na zvýšení přesnosti nemusí projevit kvůli jevu zvanému magnetická vůle.

Z výpočtu je zřejmé, že při povolené odchylce $\pm 4^\circ$ na každé ose je možné tuto chybu prakticky zanedbat.

4.4 Implementace senzorky do vlastního řešení

Jak již bylo zmíněno v rešeršní části práce, hlavním úkolem senzorů v nosiči antén je poskytnutí řídicímu počítači informace o poloze jednotlivých os zařízení, nicméně pro vlastní řešení byla navíc senzorka snímání poloh os doplněna o čidla měřící natočení celého zařízení vůči zemi. Touto funkcionalitou sice zařízení zkoumaná v rešerši nedisponovala, ale její implementace v případě vlastního řešení by měla výrazně urychlit zprovoznění zařízení po převozu.

4.4.1 Návrh snímání polohy os zařízení

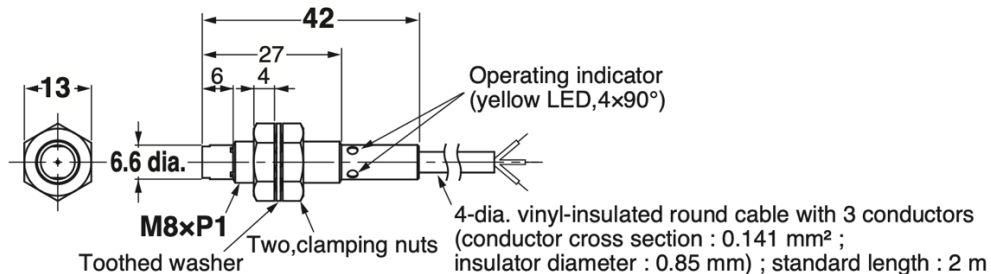
I přes nízké rychlosti pohybu disponuje zařízení konstruované v této práci nezanedbatelným výkonem a je zjevné, že při konstrukci bude třeba klást zvýšený důraz na bezpečnostní prvky. Zařízení zkoumaná v rešerši byla podstatně méně výkonná, tudíž řada bezpečnostních prvků, jako například detekce nárazu, mohla být při jejich konstrukci vynechána, tudíž v tomto případě je nelze využít jako podklad pro vlastní řešení.

Nejjednodušším způsobem implementace funkcionality detekce nárazů je použití krokového motoru se zpětnovazebním řízením. Pro účely této práce byl tedy zvolen systém krokových motorů Ezi-Servo od firmy FasTech se zpětnovazebním řízením realizovaným pomocí IRC (Incremental Rotary enCoder) senzoru.

Výhodou použití komerčního systému motoru se zpětnou vazbou je fakt, že samotné zpracování signálu z inkrementálního snímače a porovnávání jeho výstupu s požadovanou hodnotou natočení hřídele motoru je realizováno přímo v zakoupeném driveru motoru. Při detekci anomálie (přetížení motoru, nadproud atd.) driver pošle přes pin ALARM signál do nadřazeného řídicího počítače, který zastaví pohyb a dá zprávu uživateli. Driver rovněž využívá zpětné vazby pro řízení proudu do motoru dle jeho zátěže, což snižuje jeho zahřívání a spotřebu. [18]

Je ale nutné brát v potaz, že IRC snímač je čidlo relativní, tudíž není možné z výstupu snímače přímo určit polohu, ve které se osa nachází, lze pouze určit úhel, o který se osa od počátku měření pootočila. Z tohoto důvodu je i u těchto motorů se zpětnovazebním řízením nutno využít čidlo domovské pozice. V případě této práce se nejvíce nabízení

proximitní indukční čidla, především pak z konstrukčních důvodů, jelikož detekují pouze kovy. Konkrétně pak bylo zvoleno čidlo OMRON E2B-S08KN04-WP-C1 2M, zobrazené na obrázku 13.



Obrázek 13 Indukční čidlo Omron E2B-S08KN04-WP-C1 [19]

Důležitým aspektem je také umístění různých čidel v rámci převodové soustavy. Z logiky věci vyplývá, že čidla by bylo nejvýhodnější umístit na samotný výstup osy, jelikož na tomto místě je přímo získávána informace o vlastním natočení antén. Při umístění snímače například přímo na hřídel motoru není možné zpětnou vazbou kompenzovat nepřesnosti vznikající v převodech mezi anténami a motorem. [20] Na druhou stranu, co se zpětnovazebního IRC snímače týče, komerční řešení využívají odečítání na hřídeli motoru a nejsou koncipované na přenesení odečítání na výstup osy, tudíž by toto řešení bylo konstrukčně nepraktické. Princip umístění čidla co nejbližší výstupu osy se ale nabízí pro proximitní čidlo.

4.4.2 Návrh snímání orientace zařízení vůči zemi

Jelikož je nosič antén mobilní zařízení, není možné předpokládat, že bude vždy nainstalován přesně vodorovně vůči zemi. Z tohoto důvodu je pro správné natočení antén na dané místo na obloze třeba znát jak samotné relativní natočení os azimutu a elevace vůči nosiči antén, tak natočení nosiče vůči zemi.

Pro kompenzaci vodorovnosti nosiče vůči zemi může být použit kapacitní MEMS akcelerometr. Toto zařízení je schopné měřit celkové zrychlení ve třech navzájem kolmých osách, výstupní data jsou tedy tři složky vektoru celkového zrychlení. Výpočet náklonu sledovače je založen na faktu, že pokud těleso nezrychluje, vektor celkového zrychlení je roven vektoru gravitačního zrychlení, který směřuje přímo dolů. Ze znalosti uložení snímače

ve sledovači a výstupu akcelerometru lze poté dopočítat naklonění sledovače a provést jeho kompenzaci. [21] Samotnému algoritmu pro zpracování dat se tato práce nevěnuje.

4.5 Řízení automatického nosiče antén – požadavky

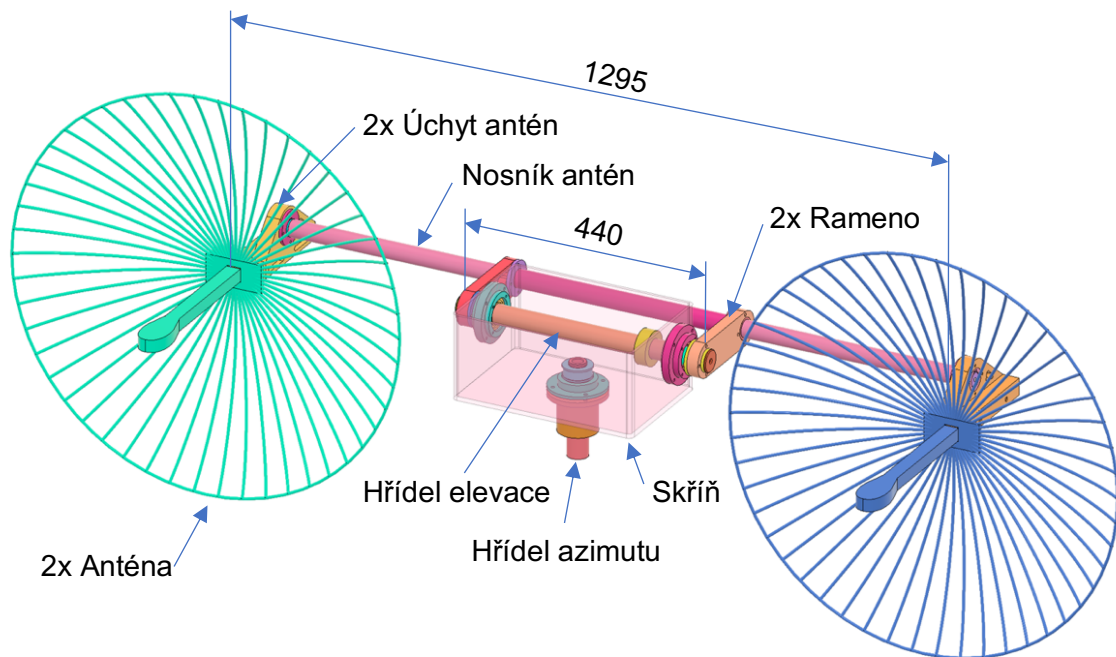
Ačkoliv je tato práce soustředěna na mechanickou stránku zařízení a návrh řízení tedy není jejím obsahem, je nutné specifikovat požadavky vzhledem k řídicímu systému, aby bylo zajištěno, že navržená řešení s ním budou kompatibilní.

- **Vstupy řídicího počítače**
 - Dva digitální vstupy je nutné vyhradit pro signální ALARM z driverů krokových motorů. Jak bylo uvedeno v kapitole 4.3.1, v driveru probíhá zpracování zpětné vazby natočení os (výstupu inkrementálního snímače), tudíž tento signál již není třeba zpracovávat v řídicím počítači. Pokud do řídicího počítače přijde zpráva o anomálii v pohybu jedné z os, je třeba aby okamžitě zastavil pohyb zařízení.
 - Další digitální vstupy je nutné vyhradit pro výstup z tříosého MEMS akcelerometru.
 - Čtyři digitální vstupy je nutné vyhradit pro limitní proximní čidla (dvě na každou z os).

- **Výstupy řídicího počítače**
 - Výstupy primárně slouží k řízení krokových motorů, je tedy nutné pro každý driver vyhradit 3 digitální výstupy pro piny driverů ENABLE (zamknutí či odemknutí motorů), STEP (dává pokyn pro vykonání kroku) a DIRECTION (určuje směr otáčení). [10]

4.6 Předběžný koncepční návrh zařízení

Na základně rešerše a znalosti zástavbových rozměrů motorů byla vytvořena koncepce mechanické části nosiče antén, jejíž podobu lze vidět na obrázku 14. Tento hrubý návrh slouží jako odrazový můstek definující okrajové podmínky pro jednotlivé konstrukční uzly a v následujících kapitolách bude postupně rozpracováván až do své finální podoby.



Obrázek 14 Předběžný koncepční návrh zařízení

Samotná sestava se skládá ze tří celků – osy elevace, na jejímž výstupu jsou uchyceny samotné antény, dále z osy azimutu, která otáčí celým zařízením a nakonec skříně, která nosně propojuje veškeré prvky zařízení.

Vzhledem ke hmotnosti antén bylo jedním z hlavních cílů návrhu dosažení statického vyvážení elevace, což je aspekt, kterým se navrhovaná koncepce zásadně liší od zařízení zkoumaných v rešerši. Konstrukčně bylo vyvážení docíleno umístěním parabol na separátní nosník antén, který je s poháněnou hřídelí elevace spojen pomocí dvou ramen. Tímto způsobem je dosaženo stavu, kdy osa otáčení elevace prochází těžištěm antén a není na ni tedy v žádné poloze vyvíjen klopný moment od jejich tíhy, což vede k minimalizaci zatížení motoru této osy.

Je tedy zjevné, že statické vyvážení elevace je příznivé z hlediska pohonů, ale jeho negativním aspektem je fakt, že z důvodu vyložení nosníku antén vůči hřídeli elevace vznikají v konstrukci přídavné kroutící a ohybové momenty. Tyto momenty pak nevyhnutelně způsobují namáhání a deformace součástí – obzvláště exponovaným dílcem je pak samotný nosník antén. Z důvodů minimalizace jeho ohybu a zkrutu, což jsou složky, které mají ve výsledku vliv i na přesnost polohování, byla jako základ jeho konstrukce zvolena jednodolitá

trubka ze slitiny hliníku, která poskytuje vysokou tuhost a pevnost při zachování nízké hmotnosti.

U osy azimutu není nutné se z hlediska pohonů zabývat statickým vyvážením, jelikož gravitační síly působí ve směru této osy. Nicméně při bližším zkoumání se i zde jeví jako výhodné, aby osa otáčení azimutu procházela těžištěm celé pohybuující se soustavy. Dojde tak k eliminaci ohybového momentu hřídele azimutu a při naklonění nosiče antén nebude natolik výrazná tendence k samovolné rotaci celého zařízení kolem této osy.

Při další analýze koncepčního návrhu byly identifikovány tři hlavní konstrukční uzly, které je v práci nadále nutné rozpracovat – pohon elevace, pohon azimutu a skříň zařízení. Přičemž pro každý z těchto uzlů se nabízí více variant řešení problematiky a vzhledem ke komplexnosti jejich konstrukce mnohdy nelze na první pohled odhalit tu nejvhodnější. Z toho důvodu bude navrženo několik variant pro každý z těchto hlavních uzlů, přičemž bude následně vybrána ta nejvhodnější.

4.7 Návrh variant hlavních konstrukčních uzlů

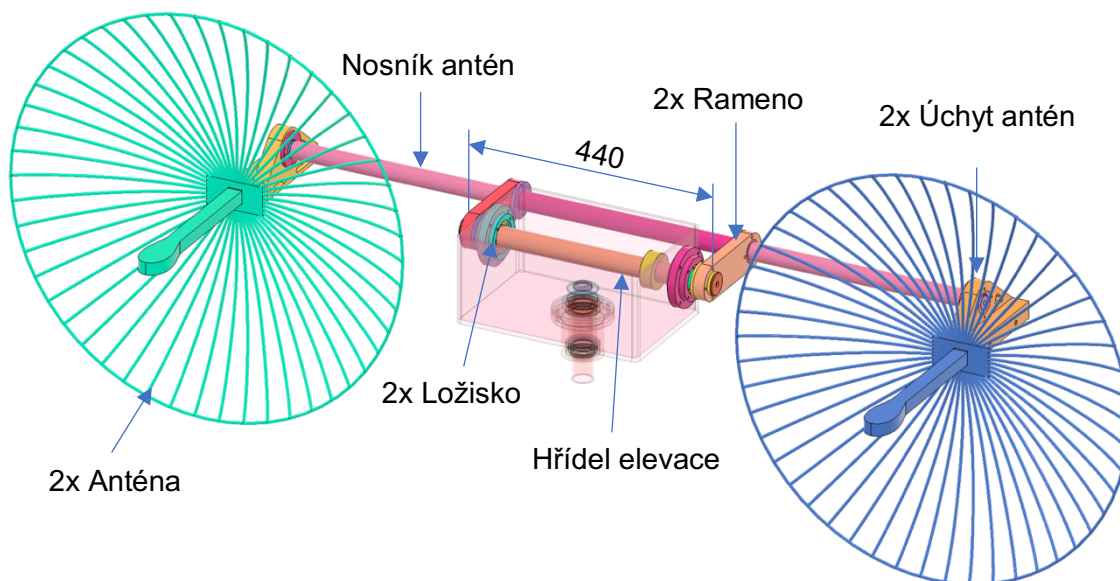
Nejprve se práce věnuje návrhu variant pro pohon osy elevace a azimutu, přičemž se jedná o uzly, které jsou na sobě navzájem relativně málo závislé a je tedy možné jejich konstrukci zpracovávat odděleně. Až poté jsou rozebrány varianty pro skříň zařízení, jelikož vstupní parametry této části návrhu jsou do značné míry závislé právě na podobě pohonů.

4.7.1 Návrh variant pohonu elevace

Před započítáním konstrukce pohonu elevace je nutné nejprve definovat vstupní veličiny týkající se tohoto uzlu. Parametry vycházející najevo z rešerše a požadavků zadávající firmy jsou souhrnně uvedeny tabulce č.3. Konstrukční okrajové podmínky vycházejí z předběžného koncepčního návrhu zařízení z předchozí kapitoly, jehož elevační část je zobrazena na obrázku 15.

Tabulka 3 Kinematika elevace

Osa	Motor	Rozsah osy [°]	Max. rychlost [°/s]	Max. zrychlení [°/s ²]	Převodový poměr [1]
Elevace	Fastech EzM-56S-4000-25	0-80	60	60	(0,5 ; 2) : 1

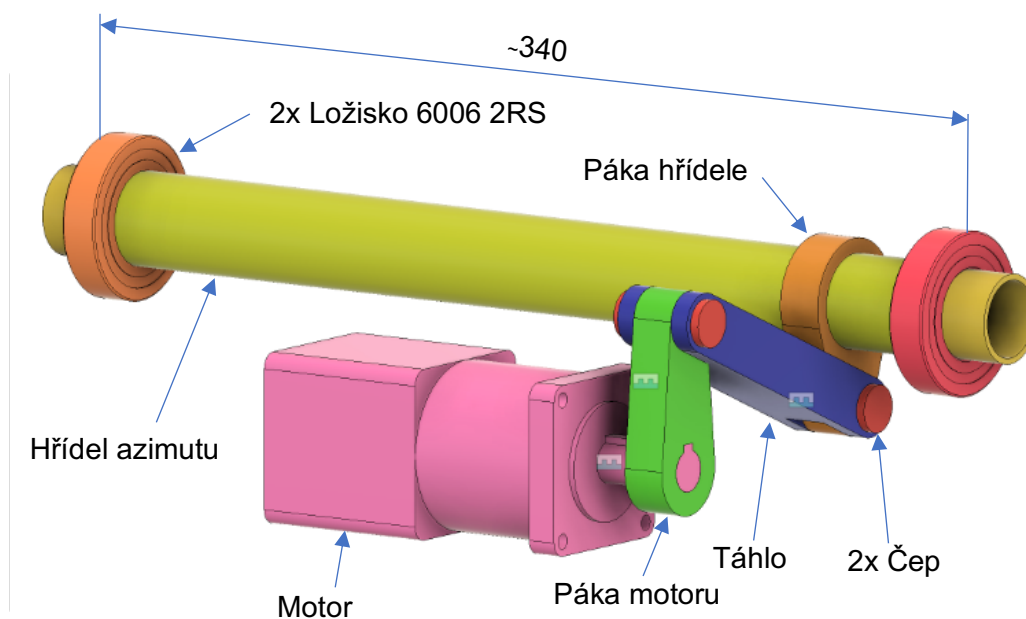


Obrázek 15 Předběžný koncepční návrh elevace

Samotné rozpracování návrhu pohonu elevace spočívá především v řešení problematiky přenosu kroutícího momentu z převodovky motoru na hřídel elevace, přičemž pro tento konstrukční uzel byly identifikovány tři varianty řešení.

- **Varianta č. 1 pro pohon elevace – táhlový mechanismus**

První variantou realizace kývavého pohybu osy elevace je mechanismus znázorněný na obrázku 16.



Obrázek 16 Pohon elevace – táhlový mechanismus

Převod kroutícího momentu z převodovky motoru na hřídel elevace je u této varianty realizován pomocí táhla, páky umístěné na výstupu převodovky motoru a páky upevněné na hřídeli elevace. Převodový poměr je funkcí poměru délek obou pák, ale je nutné brát v potaz, že mají-li obě páky rozdílnou délku (což je v tomto případě z konstrukčních důvodů nevhodnější varianta), je rovněž závislý na aktuální poloze mechanismu. Pro správnou funkčnost zařízení je tedy tento variabilní převodový poměr nutné kompenzovat v softwaru zařízení, což je ale nevyhnutelně spojené s určitou ztrátou přesnosti. Ta je způsobena jak geometrickými odchylkami skutečného mechanismu od výpočtového modelu vlivem výrobních tolerancí, tak například nepřesností v umístění koncového čidla osy, které určuje známou polohu osy.

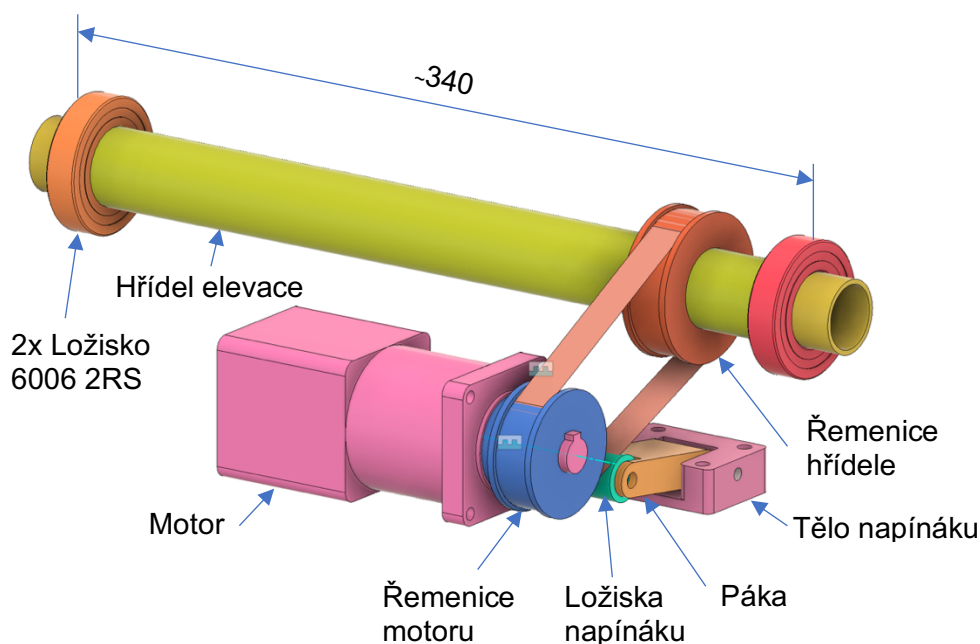
Za další významný zdroj nepřesnosti polohování převodu lze označit vůli v čepích mechanismu. Jako řešení této problematiky se nabízí uložení čepů do standardizovaných kluzných pouzder či valivých ložisek, čímž by rovněž bylo docíleno snížení pasivních odporů mechanismu a zajištění dlouhé životnosti stroje.

Výhodou použití pákového mechanismu pro tuto aplikaci je jeho vysoká tuhost, jelikož je možné jej zhotovit z materiálu o vysokém modulu pružnosti (dural, ocel). Nevýhodou je vysoká cena, jelikož většina komponent tohoto převodu není standardizována a vyžaduje tedy nákladnou vlastní výrobu.

- **Varianta č. 2 pro pohon elevace – ozubený řemen**

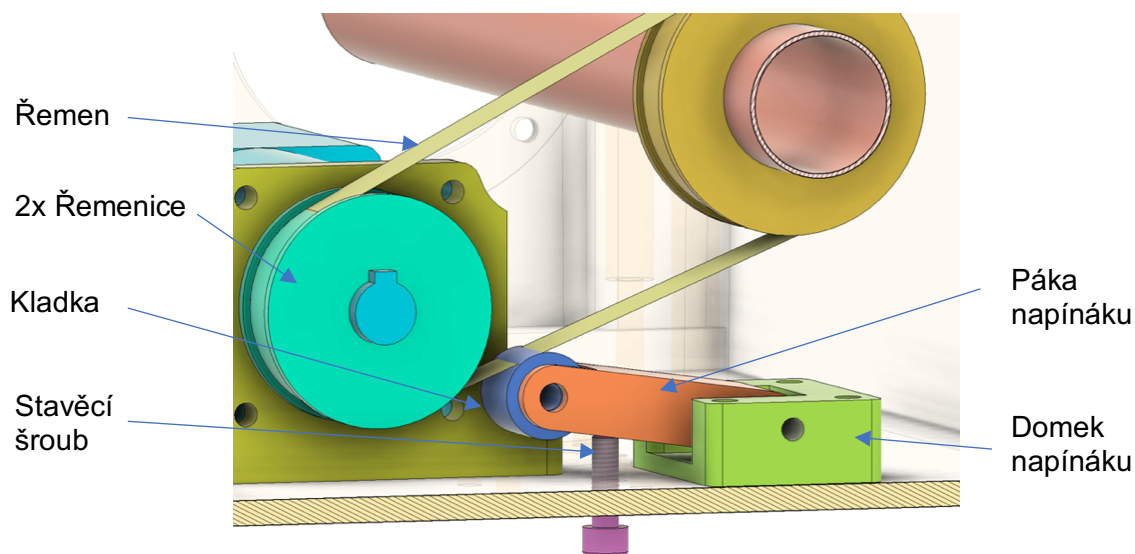
Druhou variantou přenosu výkonu z převodovky motoru na hřídel elevace je použití standardizovaných dílů – ozubeného řemenu a ozubených řemenic. Schéma konstrukce je uvedeno na obrázku 17. Převodový poměr mechanismu je daný podílem počtu zubů na obou řemenicích a na rozdíl od táhlového ústrojí z předchozí kapitoly nezávisí na aktuální poloze mechanismu.

Pro osu elevace byl za pomoci online programu Conti-professional od firmy Continental vybrán ozubený řemen Continental Synchronbelt z řady HTD M5 o šířce 15mm a délce 375mm (256 Kč) [22]. Na straně motoru byla zvolena řemenice 30-5M-15 (123 Kč) [23] od firmy Tyma a na straně hřídele s anténami řemenice 36-5M-15 (160 Kč) [24] od stejného výrobce.



Obrázek 17 pohon elevace – ozubený řemen

Pro zajištění správného fungování tohoto převodu je nutné zajistit dostatečné napnutí řemenu. Z montážních důvodů není vhodné instalovat motor přímo s předepnutým řemenem, proto byl návrh doplněn o napínací mechanismus, který umožňuje dopínání až po instalaci celého převodového ústrojí. Princip fungování napínáku je znázorněn na obrázku 18. Nastavovací šroub je zašroubován do závitu ve skříni zařízení a při utahování tlačí do páčky napínacího mechanismu, která následně vtláčuje kladku s ložiskem do řemenu a zvyšuje tak předepnutí.



Obrázek 18 Napínák elevace

Při použití řemenného převodu je ale nutné brát v potaz, že vyžadované předepnutí nevyhnutelně vyvolává síly, které jsou zachyceny na jedné straně v ložiskách převodovky motoru, na straně druhé v ložiskách hřídele osy elevace. Minimální nutná obvodová předepínací síla v řemenu pro převod maximálního kroutícího momentu dosažitelného na motoru byla s pomocí aplikace Conti-professional vypočtena jako 80N, maximální povolená hodnota předepnutí samotného řemenu pak 306N. Přičemž vzhledem k maximální zatížitelnosti převodovky motoru a ostatních komponent v řetězci byla pracovní hodnota obvodového předepnutí řemenu stanovena jako 100N.

Co se montáže týče, obvodovou sílu v řemenu je možné určit akustickou metodou, která spočívá v měření rezonanční frekvence volné části řemenu o známé délce. Pro zjištění této vlastní frekvence, tedy stačí vychýlit řemen z rovnovážné polohy a změřit na jaké frekvenci samovolně kmitá. K tomuto měření lze využít mobilní aplikaci ContiDrive od firmy Continental, která umožňuje graficky znázornit hlasitost různých částí akustického spektra, které zaznamenává mikrofon mobilního telefonu. Po zadání parametrů instalovaného řemenu a vypočteného předpětí do kalkulačky výrobce vychází najevo, že volná část řemenu (větev bez napínáku) by měla při vypočteném předepnutí 100N rezonovat na frekvenci 213Hz.

4.7.2 Výběr nejvhodnější varianty pro pohon elevace

Z dvou navržených variant pro pohon elevace se jako nejvhodnější jeví Varianta č.2 – ozubený řemen. Hlavní výhodou této varianty je fakt, že řemenice a řemeny jsou dobře dostupné kupované díly, čemuž odpovídá i jejich nízká cena, celkem 539 Kč. Zbytek komponent pak může být vyroben pomocí 3D tisku technologií FDM za téměř zanedbatelnou cenu. Dalším pozitivem z hlediska jednoduchosti řízení pohybu osy je konstantní převodový poměr, který u Varianty č. 1 – táhlového mechanismu, nastává pouze ve specifických konfiguracích mechanismu. Naopak jednou z nevýhod, na kterou se při konstrukci skříně a hřídele elevace bude nutné zaměřit, je přídavná síla od napínání ozubeného řemene.

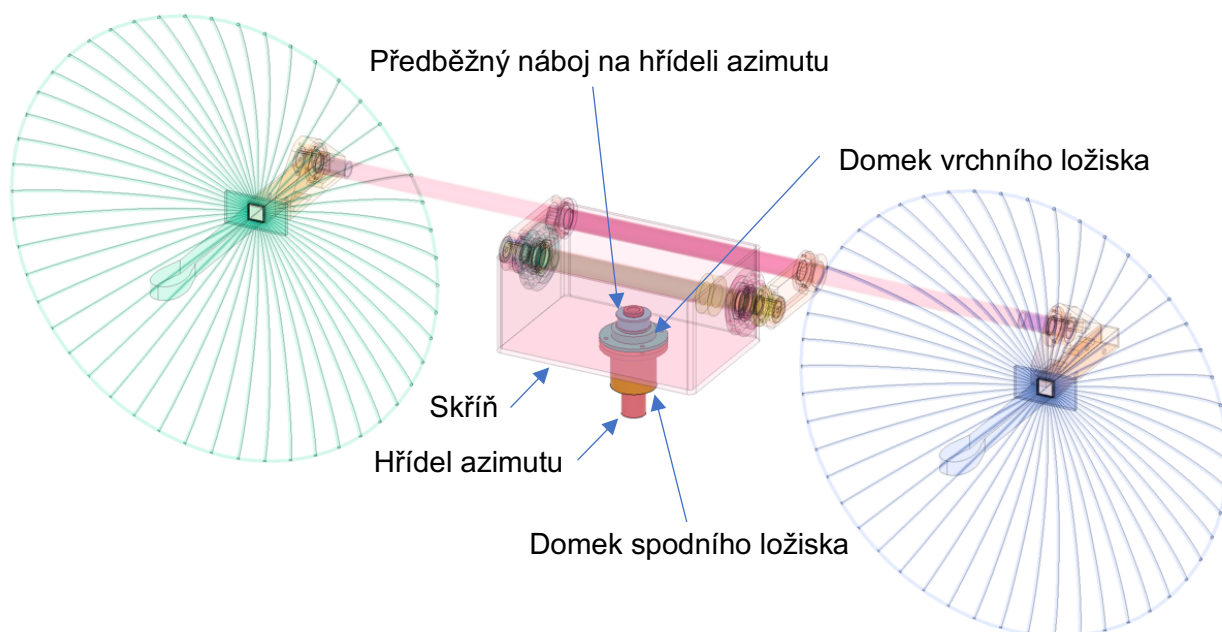
4.7.3 Návrh variant pohonu azimutu

Před návrhem variant pro pohon azimutu je obdobně jako u elevace nutné nejprve definovat vstupní parametry. Veličiny vycházející z rešerše a požadavků zadávající firmy jsou

tedy souhrnně uvedeny tabulce 4, konstrukční okrajové podmínky opět vycházejí z předběžného koncepčního návrhu, jehož azimutová část je zobrazena na obrázku 19.

Tabulka 4 Kinematika azimutu

Osa	Motor	Rozsah osy [°]	Max. rychlost [°/s]	Max. zrychlení [°/s ²]	Převodový poměr [1]
Azimut	Fastech EzM-56S-4000-25	0-365	60	40	(0,7 ; 1,5) : 1



Obrázek 19 Přeběžný koncepční návrh elevace

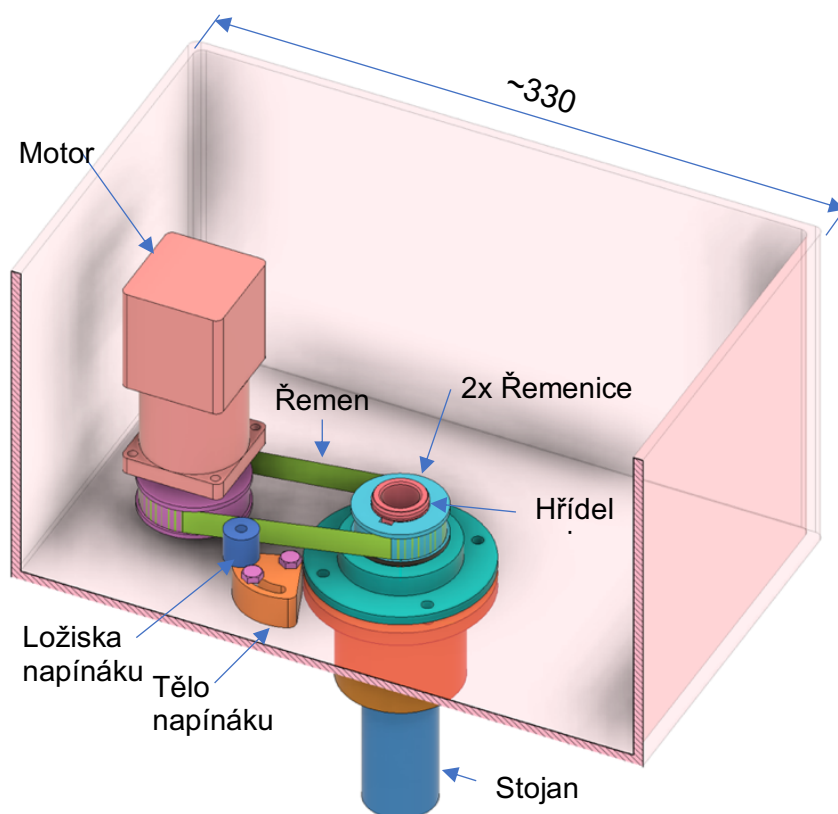
Při porovnání vstupních veličin pro azimut a elevaci je zřejmé, že obě osy sdílejí mnoho podobností, nicméně poměrně podstatným rozdílem je rozsah jejich rotačního pohybu. Oproti kývavému pohybu elevace vykonává azimut plně rotační pohyb o více než 360°, což například takřka vylučuje možnost využití pákového mechanismu pro přenos kroutícího momentu z převodovky motoru na hřídel. Zároveň je třeba, aby převodový poměr mezi výstupem převodovky motoru a výstupem osy azimutu byl menší než 1 (převod do rychla), aby bylo možné do převodového systému umístit doraz, který umožní rotaci o zmíněných více než 360°. I v případě tohoto uzlu hlavní problematika konstrukce pohonů spočívá v nalezení řešení pro přenos kroutícího momentu z převodovky motoru na hřídel azimutu, přičemž byly identifikovány dvě varianty.

- **Varianta č. 1 pro pohon azimutu – ozubený řemen**

Analogicky jako u osy elevace lze i u osy azimutu využít kombinace ozubeného řemenu a ozubené řemenice, schéma konstrukce je uvedeno na obrázku 20. V tomto případě byl vybrán ozubený řemen Continental Synchronbelt z řady HTD M5 o šířce 15mm a délce 385mm (252 Kč) [25]. Na straně motoru byla zvolena řemenice 36-5M-15 (160 Kč) [24] od firmy Tyma a na straně hřídele azimutu řemenice 30-5M-15 (123 Kč) [23], rovněž od firmy Tyma.

Hlavním rozdílem oproti použití řemenu na ose elevace je u osy azimutu konstrukce napínacího mechanismu, který zde funguje na principu excentricity. Napínání je prováděno pomocí klíče, kterým se otáčí šroub v ose otáčení napínáku, jenž je přes závit spojený s tělem napínáku. Na těle napínáku jsou excentricky mimo osu otáčení přichycena ložiska, která jsou otáčením klíče vtlačována do řemene. Po dosažení dostatečného napětí v řemenu je stažen aretační šroub a šroub v ose napínacího mechanismu, čímž dojde k ustavení polohy napínáku.

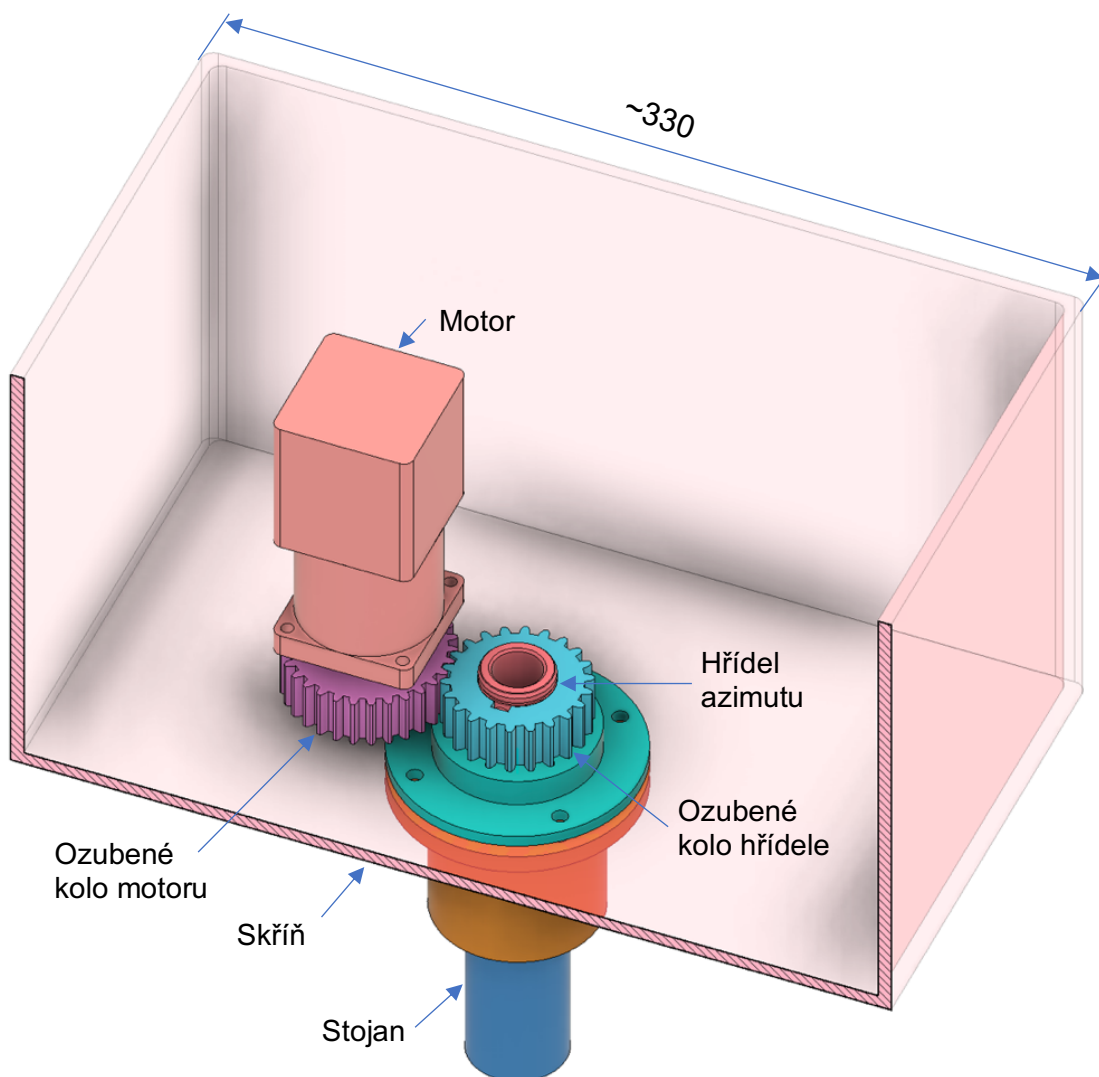
Míra obvodového předepnutí řemenu byla obdobně jako u osy elevace určena jako 100N, přičemž volná část řemenu (větev bez napínáku) by měla rezonovat na frekvenci 203Hz.



Obrázek 20 pro pohon azimutu – ozubený řemen

- **Varianta č. 2 pro pohon azimutu – ozubené soukolí**

Druhou variantou pro přenos kroutícího momentu z převodovky motoru na osu elevace je použití ozubených kol – schéma konstrukce je uvedeno na obrázku 21. Jedno z ozubených kol je umístěno na hřídeli azimutu, druhé na výstupu převodovky, přičemž převodový poměr je dán poměrem počtu zubů na obou kolech. Nevýhodou užití tohoto způsobu přenosu výkonu je vůle v mechanismu a dále vysoké náklady na výrobu ozubení. Konstrukční komplikace spočívá v omezené možnosti umístění motoru v rámci skříně zařízení, jelikož ozubená kola musí být v přímém styku. Naopak značnou výhodou použití tohoto mechanismu je jeho vysoká tuhost a trvanlivost.



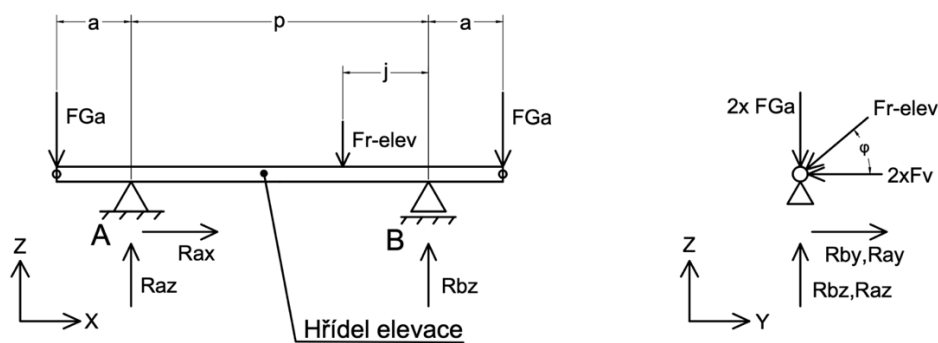
Obrázek 21 pro pohon azimutu – ozubené soukolí

4.7.4 Výběr nejvhodnější varianty pro pohon azimutu

Pro pohon azimutu byla ze dvou variant jako nejvhodnější vybrána Varianta č.1 – ozubený řemen. Výhody ale i úskalí, tohoto mechanismu již byly rozebrány v kapitole 4.7.2. Důležitým benefitem ozubeného řemenu, na rozdíl od Varianty č.2 – ozubené soukolí, je možnost umístit motor na téměř libovolné místo ve skříni, jelikož nemusí být náboje na hřídelích v přímém styku. Co se cenového porovnání obou variant týče, lze předpokládat, že náklady na variantu s ozubeným řemenem budou o něco nižší, především vzhledem k nákladné výrobě ozubených kol.

4.7.5 Návrh variant skříně zařízení

Hlavním účelem skříně zařízení je ochrana komponent před vnikem vody a cizích částic, zajištění chlazení elektrických prvků, a nakonec nosné propojení všech součástí anténního nosiče. S přihlédnutím k zmíněné strukturální funkci je před začátkem rozpracování návrhu nutno provést analýzu všech zatížení, která budou na soustavu působit, přičemž je třeba počítat s provozem v krajních podmínkách. Uvolnění os elevace a azimutu je znázorněno na obrázku 22 a 23, přičemž místa A,B,C,D představují uložení hřídelů do jednotlivých ložisek ve skříni a tedy reakce v těchto místech reprezentují silové zatížení skříně.



Obrázek 22 Silový rozbor elevace pro výpočet zatížení skříně

Rovnice rovnováhy hřídele elevace (4.16-4.22)

$$X \quad Rax = 0 \quad (4.16)$$

$$Y \quad Rby + Ray - Fr_{elev} \cdot \cos(\varphi) - 2Fv = 0 \quad (4.17)$$

$$Z \quad Raz - 2FGa + Rbz - Fr_{elev} \cdot \sin(\varphi) = 0 \quad (4.18)$$

$$M_{XZ-A} \quad Fr_{elev} \cdot \sin(\varphi) \cdot (p - j) - FGa \cdot a - Rbz \cdot p + FGa \cdot (p + a) = 0 \quad (4.20)$$

$$M_{XY-A} \quad Fv \cdot a - Fr_{elev} \cdot \cos(\varphi) \cdot (p - j) + Rby \cdot p - Fv \cdot (p + a) = 0 \quad (4.21)$$

$$M_{YZ-A} \quad 0 = 0 \quad (4.22)$$

Známé veličiny v rovnicích jsou

$$Fr_{elev} = 200N, Fv = 50N \text{ (stanoveno zadávající firmou)}, FGa = 36N, \varphi = 25^\circ,$$

$$p = 334mm, a = 41mm, j = 54mm$$

Přičemž síla od napínání řemene působící na hřídel byla vypočtena ze známé obvodové síly v řemenu dle vztahu 4.23-4.24.

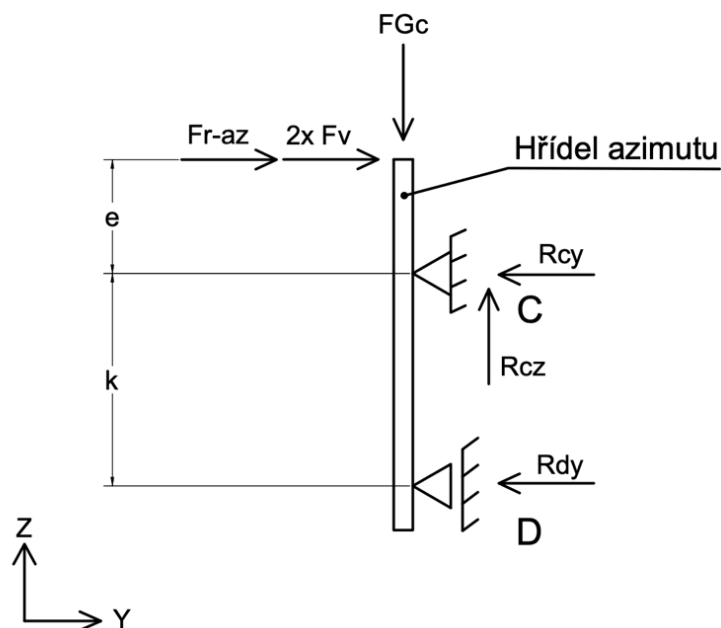
$$Fr_{elev} \approx 2 \cdot Fr_{elev-obvod} \quad (4.23)$$

$$Fr_{elev} \approx 2 \cdot 100 = 200N \quad (4.24)$$

A následným vyřešením soustavy 4 rovnovážných rovnic pro 4 neznámé pomocí programu Octave byly určeny velikosti jednotlivých reakcí:

$$Rby = 202N, Ray = 79N, Raz = 50N, Rbz = 107N$$

Obdobně lze postupovat i při silovém rozboru osy azimutu.



Obrázek 23 Silový rozbor azimutu pro výpočet zatížení skříně

Sestavení rovnovážných rovnic 4.25-4.27

$$Y \quad Fr_{az} + 2 \cdot Fv - Rcy - Rdy = 0 \quad (4.25)$$

$$Z \quad Rcz - FGc = 0 \quad (4.26)$$

$$M_{zy-c} \quad Rdy \cdot k + (Fr_{az} + 2 \cdot Fv) \cdot e = 0 \quad (4.27)$$

Znamé veličiny v rovnicích jsou

$Fr_{az} = 200N$ (viz. elevace), $Fv = 50N$ (stanoveno zadávající firmou), $FGc = 300N$,
 $e = 23mm$ (působíště síly větru umístěno do úrovně středu antén), $k = 73mm$

A následným opětovným vyřešením soustavy 3 rovnovážných rovnic pro 3 neznámé byly zjištěny velikosti reakcí.

$$Rcy = 394N, Rdy = -95N, Rcz = 300N$$

Ze zjištěných reakčních sil by bylo možné provést analýzu napjatosti pro každou variantu skříně a následně dimenzovat na bezpečnost, ale vzhledem ke složitému tvaru dílce a charakteru zatížení by se jednalo o komplexní úlohu vhodnou k numerickému výpočtu pomocí metody konečných prvků. Nicméně vzhledem k relativně malým zjištěným silám do skříně, a tedy předpokládaným malým napětím vůči mezím kluzu vybraných materiálů, se tímto tématem práce zabývat nebude. Dimenzování u každé ze tří dále rozebíraných variant skříně tedy vychází z konzultací v zadávající firmě, jejíž kolektiv má mnohaleté zkušenosti v oboru.

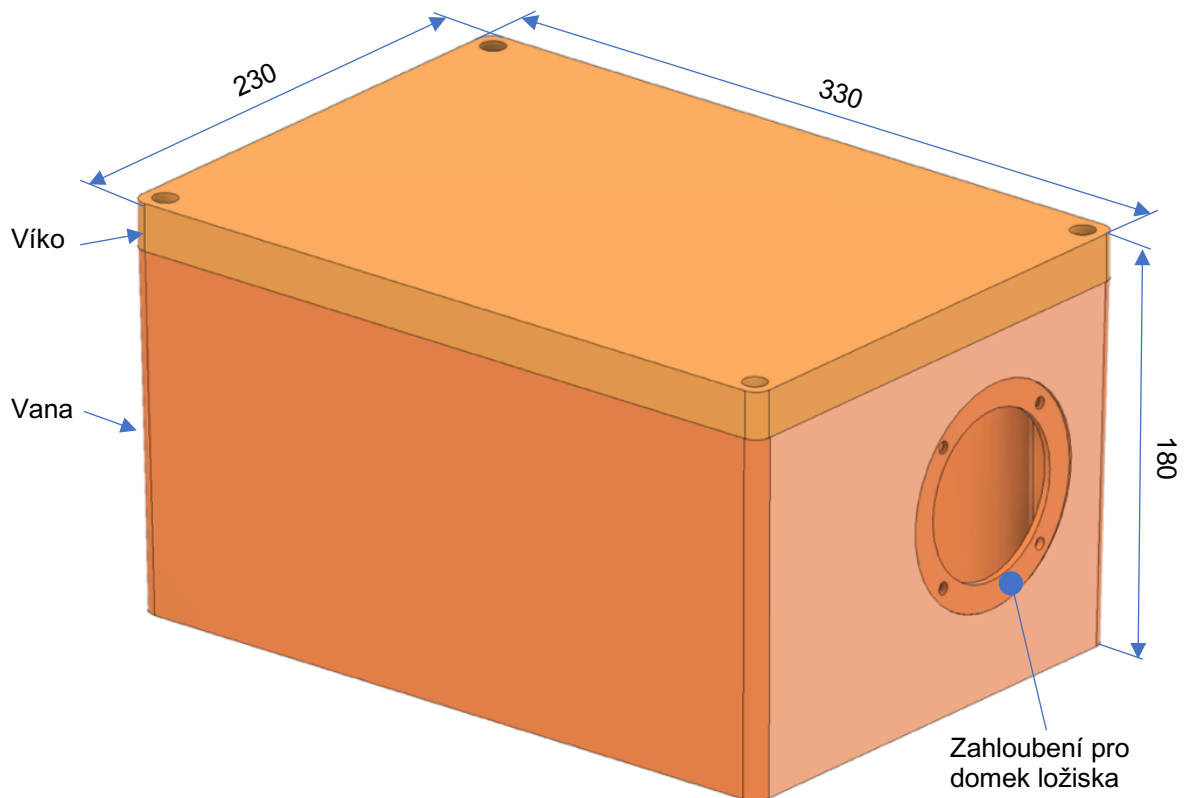
Pro usnadnění návrhu variant byly pro skříně stanoveny následující kritéria, které by měla splňovat: Maximální hmotnosti 8kg, Maximální cena 16 000 Kč, přibližné rozměry 230x330x180mm.

- **Varianta č. 1 pro skříně zařízení – Kupovaný hliníkový odlitek**

První variantou skříně zařízení je použití komerčně dostupného hliníkového odlitku od firmy Elteq, který je zobrazen na obrázku 26. Pro účely této práce byla vybrána řada boxů ZAG, konkrétně pak produkt ZAG 17, který nabízí tuhou jednodílnou konstrukci, do níž je možné

doobrobit libovolné potřebné úchyty, zapuštění či ventilační otvory. Hmotnost boxu je 5,5kg, cena pak 12 091 Kč.

Volba použití kupovaného odlitku jako polotovaru vychází ze snahy minimalizovat cenu a výrobní náročnost celého zařízení, nicméně přináší i jistá úskalí. Hlavním problémem je fakt, že stěny boxu jsou mírně zkoseny a se základnou nespírají přesně pravý úhel, tudíž ani protější stěny boxu k sobě nejsou rovnoběžné. Jedná se o technologický prvek, který usnadňuje odformování při výrobě, ale co se návrhu konstrukce nosiče týče, je například pro domek ložiska ve stěnách nutné obrobit zhloubení, aby byla zajištěna potřebná pravouhlost konstrukce.



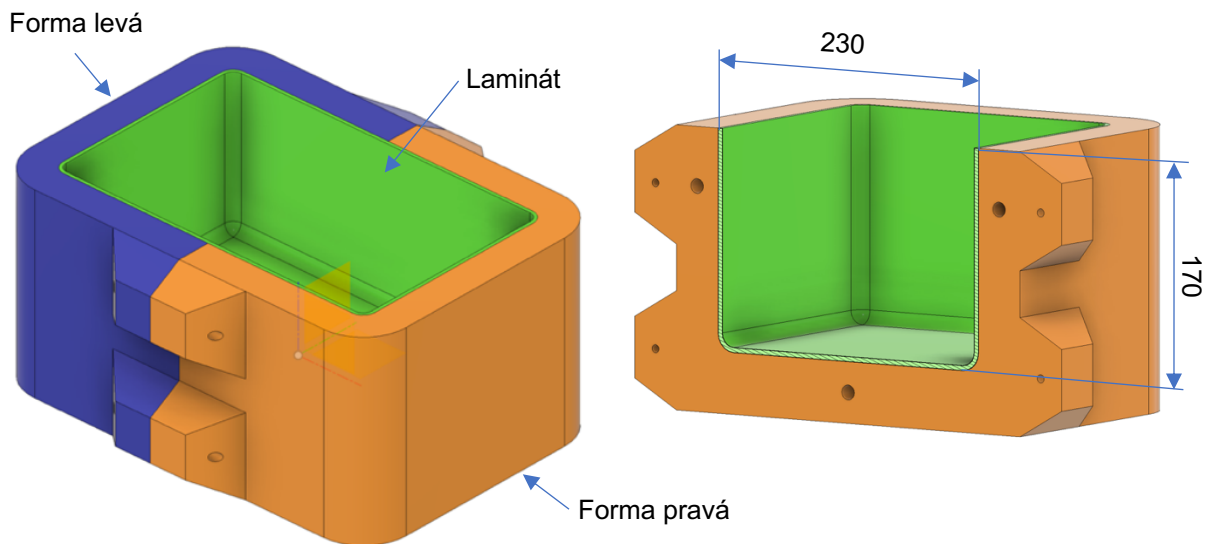
Obrázek 24 Odlitek skříně

- **Varianta č. 2 pro skříně zařízení skříně zařízení – Kompozitový laminát**

Další varianta pro návrh skříně anténního nosiče je založena na laminaci kompozitu do formy. Jak už sám název napovídá, kompozit je látka složená ze dvou a více složek, přičemž je snahou, aby výsledkem byl materiál kombinující pozitivní vlastnosti všech svých složek. Pro výrobu lehkých a tuhých konstrukcí se využívá skelných, uhlíkových, aramidových nebo

jiných vláken v kombinaci s epoxidovou či polyesterovou pryskyřicí. Vzhledem k cenovým požadavkům se pro skříň anténního sledovače jeví jako nejvhodnější použití skelné tkaniny s epoxidovou pryskyřicí, jelikož se jedná o cenově dostupnější z variant, která přesto nabízí excelentní mechanické vlastnosti.

Co se návrhu formy pro zmíněnou laminaci týká, je tvořena ze dvou půlek, které jsou spolu sešroubovány pomocí čtyř šroubů M6x60, přičemž správné a opakovatelné lícování obou půlek vůči sobě je zajištěno pomocí čepů a jim odpovídajícím pouzdrům na dělicí rovině. 3D model formy určený k 3D tisku pomocí technologie FDM je zobrazen na obrázku 24.



Obrázek 25 Forma pro laminaci skříně

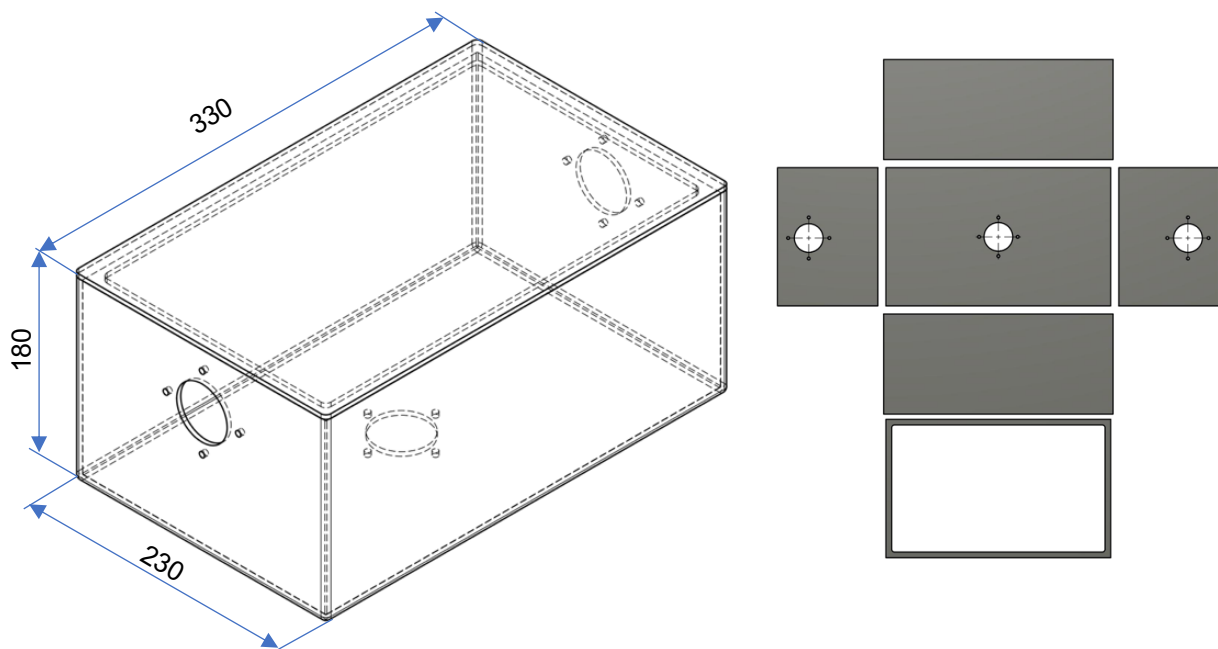
Samotný postup výroby skořepiny začíná aplikací separačního prostředku na formu, který zajišťuje, aby nedošlo k přílišné adhezi mezi produktem a formou. Dále pokračuje postupným nanášením vrstev skelné tkaniny a jejich prosycování epoxidovou pryskyřicí. Alternativou je použití předimpregnovných tkanin, které se ale využívají spíše u větších sérií a zpravidla je pro jejich vytvrzení potřeba vyšších než pokojových teplot. Po aplikaci předepsaného počtu vrstev je na prosycenou tkaninu umístěna laminovací děrovaná fólie a prodyšná textilie, která umožňuje rovnoměrné odsátí vzduchu ze všech částí formy. Následně je celá forma i s laminátem umístěna do vakuovacího igelitového pytle, ze kterého je postupně odsáván vzduch, přičemž narůstající podtlak rovnoměrně vtlačuje prosycenou tkaninu do formy a vytlačuje přebytečnou pryskyřici ze skelné tkaniny do sací textilie.

Pod vakuem je produkt nutno nechat předepsaný čas pro dostatečné vytvrzení pryskyřice, přičemž až poté bude možné přejít k odformování a ořezu skořepiny.

Co se obecně používání kompozitů na bázi skelného či uhlíkového vlákna ve strojních komponentech týče, je třeba brát na vědomí, že jejich příznivé mechanické vlastnosti vyplývající z využití dlouhých vysokopevnostních vláken, která jsou držena pohromadě pomocí matrice na bázi reaktoplastu o poměrně nízké pevnosti a tvrdosti vůči výztuži. Ve výsledku pak není vhodné tento typ kompozitu namáhat vysokým lokálním tlakem či přerušovat vlákna například vrtáním děr. Pro skříň anténního nosiče jsou tyto vlastnosti poměrně podstatné nedostatky, především pak z hlediska uchycování komponent, jelikož například není možné ve skříni vytvořit trvanlivý závit. Tato problematika je sice řešitelná například vlepáním kovového pouzdra se závitem, nicméně je nutné brát v potaz, že se jedná o další operaci do procesu již tak náročného na lidské zdroje.

- **Varianta č. 3 pro skříň zařízení – Hliníkový svařenec**

Poslední variantou pro skříň zařízení je konstrukce svařovaná z výpalků hliníkového plechu zobrazená na obrázku 25. Výhodou tohoto návrhu je takřka neomezená konstrukční flexibilita, která pramení z využití velmi verzibilní technologie řezání plechů pomocí LASERu.



Obrázek 26 Svařenec skříně

Hlavní problematika této metody výroby skříně anténního nosiče spočívá ve spojování těchto výpalků – svařování. Z technologického hlediska se jedná o proces, který do konstrukce vnáší velké množství lokalizovaného tepla, které nevyhnutelně způsobuje nerovnoměrnou deformaci dílců a v průběhu svařování tak v konstrukci vznikají vnitřní pnutí, která se ve výsledku projeví na přesnosti výroby. Při použití tenkých plechů může v krajním případě při nesprávném svařování lokalizované teplo způsobit i propal materiálu. Pro maximální kontrolu nad přídavným materiálem a teplem vnášeným do konstrukce se tedy jako nejvhodnější jeví svařování metodou TIG, popřípadě u větších sérií použití svařovacího robota, čímž by rovněž bylo docíleno snížení náročnosti metody na lidské zdroje.

4.7.6 Výběr nejvhodnější varianty pro skříň zařízení

Při výběru nejvhodnější varianty skříně zařízení je nutné především hledět na její hmotnost a cenu, konkrétně pak byly stanoveny maximální hodnoty 8kg a 16 000 Kč.

Náklady na výrobu a hmotnost lze snadno určit pro Variantu č. 1 – Kupovaný hliníkový odlitek, kdy cena odlitku u prodejce je 12 091 Kč. Doba obrábění na konvenční frézce je předpokládána 6 hodin, při sazbě 250Kč/hod je tedy celková cena 13 591 Kč. Hmotnost pak výrobce uvádí 5,5kg. Tato varianta tedy splňuje dané požadavky.

Určení finální hmotnosti a ceny u Varianty č. 2 – kompozitový laminát, je vzhledem ke charakteru výroby dílů pomocí laminace poměrně komplikované. Nicméně lze předpokládat, že cena výroby kompozitu bude s přihlédnutím k nárokům na lidské zdroje, o něco vyšší než u Varianty č.1- Kupovaný hliníkový odlitek. Do ceny výroby je rovněž nutné rozpočítat náklady na výrobu formy, což je při výrobě malého počtu kusů zásadní faktor. Naopak kompozit na bázi skelných vláken typicky nabízí lepší mechanické vlastnosti než odlévaný hliník, tudíž lze předpokládat, že hmotnost laminátového dílce by byla nižší.

Obdobně tomu bude při pohledu na variantu č. 3 – Hliníkový svařenec. Váhu svařované konstrukce lze předpokládat oproti Variantě č. 1 – Kupovaný hliníkový odlitek, o něco nižší, jelikož je možné tloušťky stěn dimenzovat přesně podle zatížení. Na druhou stranu svařování metodou TIG je nákladný proces a cena by oproti hliníkovému odlitku byla něco vyšší.

S přihlédnutím k faktu, že Varianta č. 1 – Kupovaný hliníkový odlitek, jasně splňuje předem určené nároky na cenu a hmotnost, byla tato varianta určena jako nejvhodnější. Zbylé

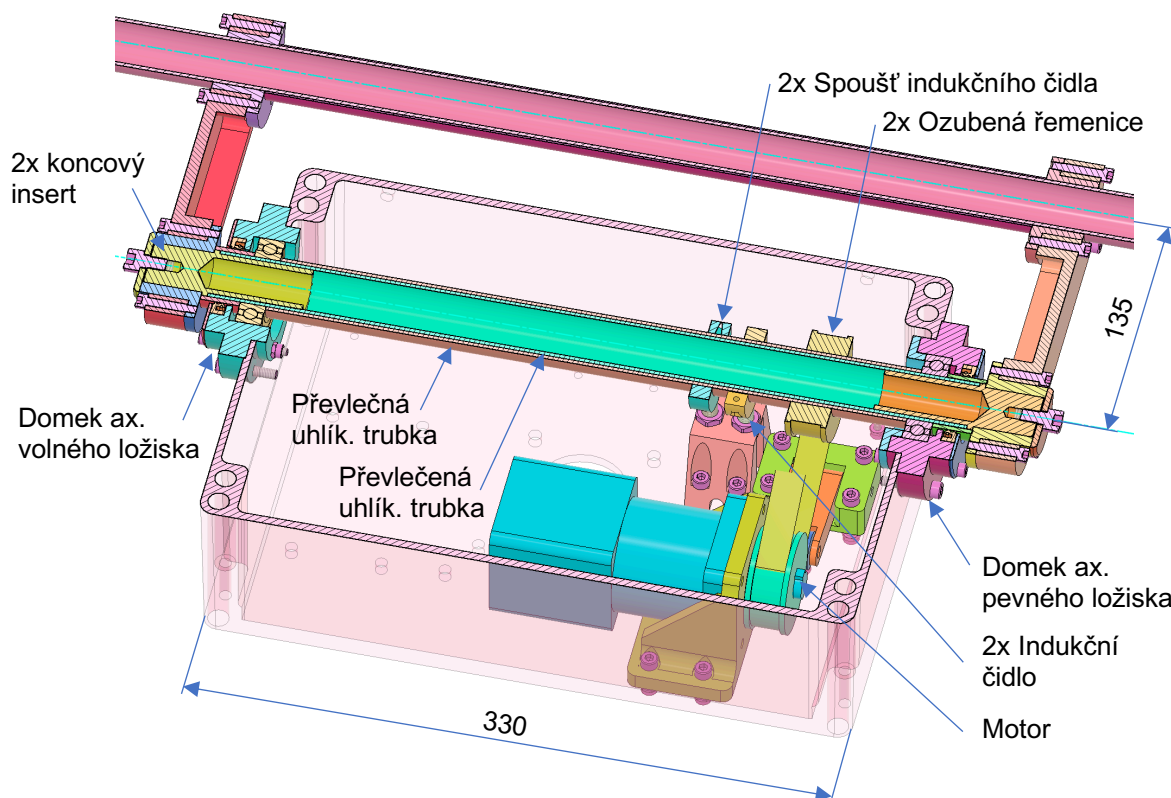
varianty sice nabízí možnost ušetření určité hmotnosti, ale jejich cena může potenciálně překročit stanovený limit.

4.8 Osa elevace a její zástavba

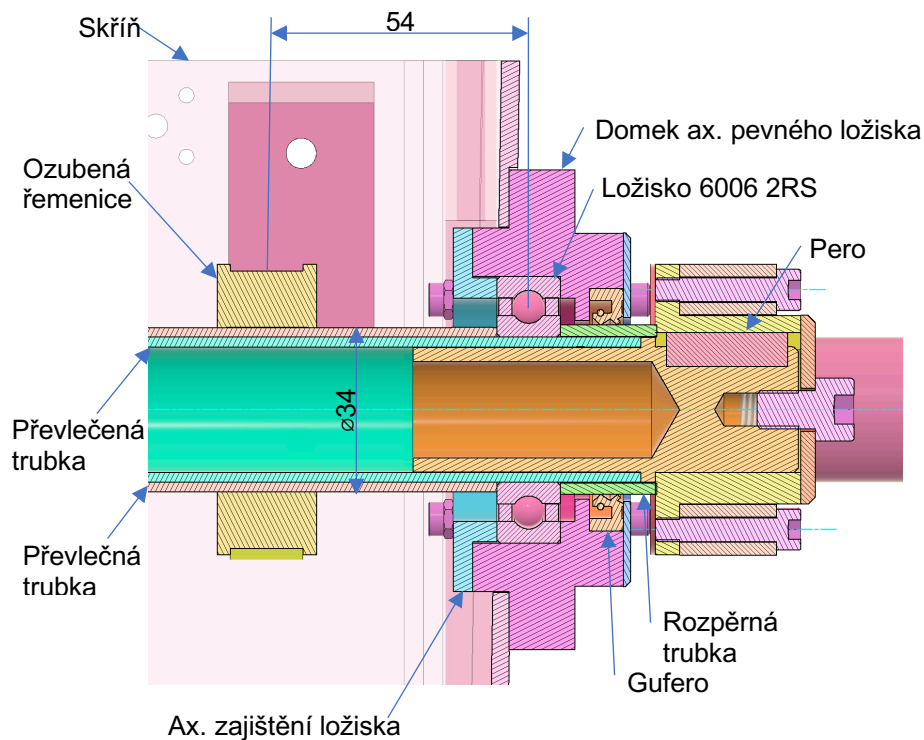
Po návrhu a výběru variant u hlavních konstrukčních uzlů je třeba se zabývat návrhem menších konstrukčních prvků, které jsou ale už spíše jednoduššího charakteru a není tedy nutné při jejich návrhu rozpracovávat více variant řešení a následně vybírat tu nejvhodnější. Jako první se práce věnuje podrobnému finálnímu rozpracování konstrukce elevace

4.8.1 Hřídel elevace a její zástavba

Za nejkompexnější díl tohoto uzlu lze považovat hřídel elevace a její uložení, obojí je možné vidět na obrázku 27 a 28.



Obrázek 27 Řez hřídelí elevace



Obrázek 28 Řez hřídelí elevace – detail

Vzhledem k nárokům na nízkou hmotnost zařízení byla konstrukce hřídele elevace založena na využití dvou trubek z kompozitu na bázi uhlíkového vlákna, jejichž převlečením přes sebe a zalepením vznikne velice tuhá hřídel s osazením pro ložiska, která má několikanásobně nižší hmotnost než její ekvivalent z oceli. Je ale nutné brát v potaz, že volba tohoto materiálu přináší i řadu úskalí a specifik. Například, jak již bylo uvedeno v kapitole věnující se návrhu varianty kompozitové skříňe, není vhodné tento typ kompozitu namáhat vysokým lokalizovaným tlakem, což je především problematické při řešení přenosu krouťícího momentu z hřídele na náboj nebo při axiálním zajišťování náboje. V rámci této práce byla tato problematika řešena vlepáním insertu z korozivzdorné oceli na oba konce uhlíkové hřídele, přičemž tento díl je opatřen drážkou pro pero, osazením a čelním závitem pro zajištění ramene pomocí šroubu a desky.

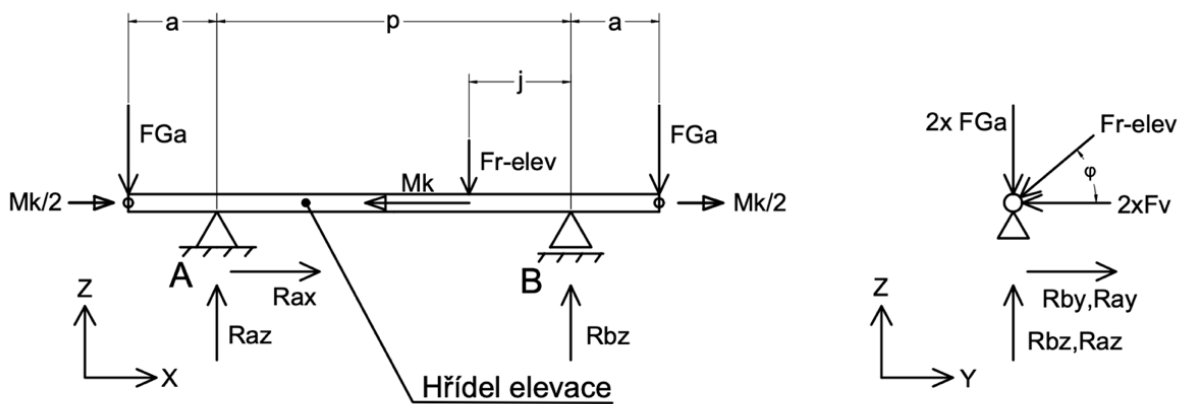
Obdobná problematika přenosu krouťícího momentu z hřídele elevace na náboj nastává v případě ozubené řemenice. Jako řešení bylo v tomto případě zvoleno slepení obou součástí, přičemž se z hlediska servisování je nevýhodou nerozebíratelnost spoje, ale vzhledem k relativně nízké ceně komponent se tato metoda jeví jako nejvhodnější.

Dalším prvkem na hřídeli je dvojice spouští indukčních čidel, které umožňují mechanické nastavení krajních poloh elevace pro řídicí počítač. Konstrukčně je spoušť navržena jako plastová 3D tištěná objímka stahovatelná šroubem M3, do které je zalepen ocelový kolík. Pokud dojde vlivem rotace osy k přiblížení kolíku indukčnímu čidlu uchycenému pod hřídelí, čidlo sepne a řídicí počítač dostává informaci dojetí osy do krajní polohy. Po nastavení krajních poloh je možné objímku pojistit na hřídeli malým množstvím lepidla, jelikož tuto operaci je nutné provádět pouze jednou při prvotní montáži zařízení.

Uložení hřídele do skříně je provedeno pomocí dvou kuličkových ložisek 6006 2RS1, přičemž jedno z ložisek je koncipováno jako axiálně pevné, druhé jako axiálně volné. Toto uspořádání bylo zvoleno kvůli případné kompenzaci teplotní roztažnosti hřídele a skříně.

4.8.2 Pevnostní kontrola hřídele elevace

Použitelnost navržené konstrukce hřídele elevace a jejího uložení je nutné ověřit pevnostním výpočtem. Schéma silového namáhání tohoto uzlu je rozebráno na obrázku 29.



Obrázek 29 Silový rozbor osy elevace pro výpočet namáhání hřídele

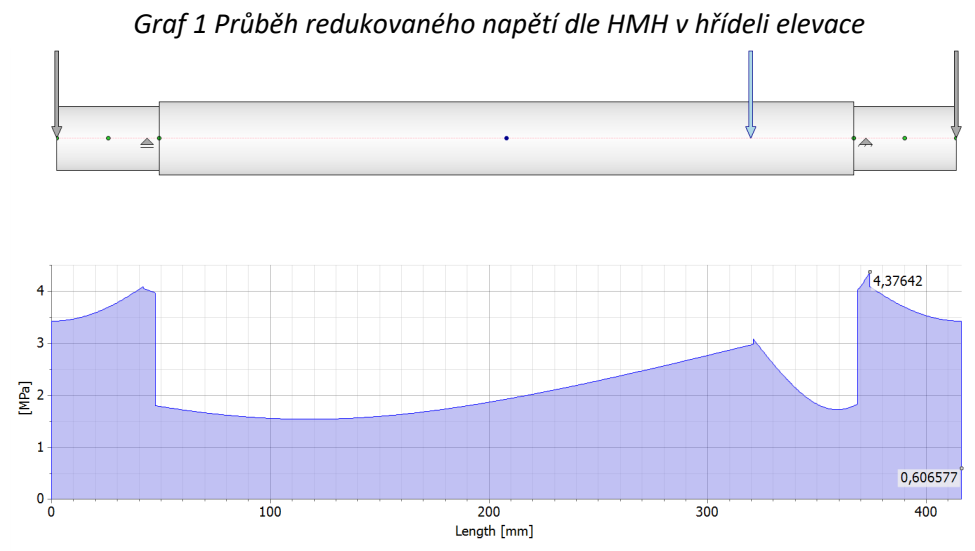
Známé veličiny v rovnicích jsou

$$F_{r_{elev}} = 200N, F_v = 50N \text{ (stanoveno zadávající firmou)}, FG_a = 36N, \varphi = 25^\circ,$$

$$p = 334mm, a = 41mm, j = 54mm, M_k = 9000Nmm$$

Je zřejmé, že hřídel elevace je namáhána kombinací ohybu a krutu, přičemž ohyb nastává jak v rovině XZ, tak XY. Kontrola hřídele byla provedena pomocí programu Autodesk Inventor 2024, do kterého byla zadána zjednodušená geometrie duté hřídele, parametry sil způsobujících ohyb v rovinách XZ a XY a momenty působící na hřídel. Je třeba zdůraznit,

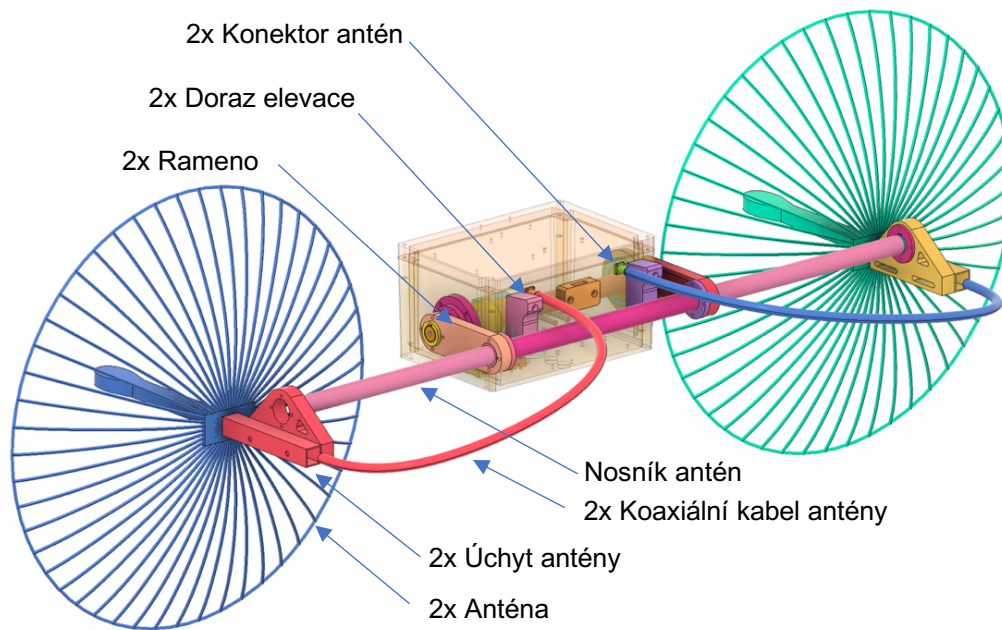
že zatížení hřídele bylo v programu specifikováno pomocí funkce „common load“, která v daném místě definuje jak kroutící moment, tak všechny složky prostorové síly. V diagramu je „common load“ zjednodušeně symbolizován šipkou ukazující působiště sil a momentů na hřídeli, pod touto šipkou je nutné si představit obecné silové působení.



Ze simulace, jejíž výstupem je graf 1, je zjevné, že maximum redukovaného napětí o velikosti 4,4MPa se nachází pod ložiskem blíže umístěným k řemenici. Komplikaci při posouzení pevnosti součásti přináší fakt, že vlastnosti kompozitu na bázi uhlíkových vláken nejsou izotropické. Nicméně součásti z něj vyrobené, i při neideální orientaci vláken, typicky dosahují pevnosti v tahu v řádech vyšších desítek či stovek MPa, tudíž je zjevné, že při provozu porušení hřídele elevace nehrozí. [26]

4.8.3 Návrh upevnění antén na osu elevace

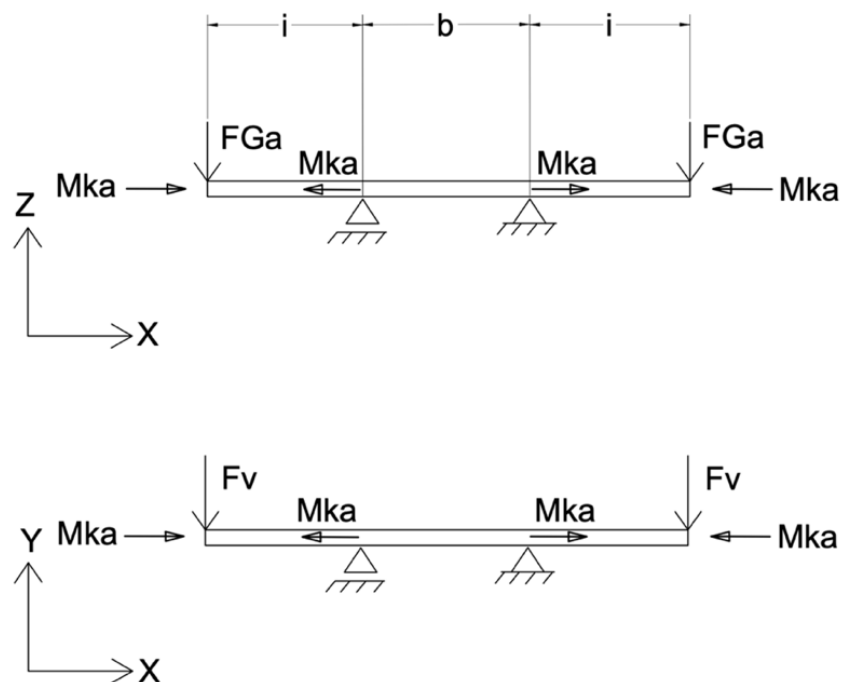
Rozpracování konstrukce součástí elevace nacházejících se mimo skříň zařízení je zobrazeno na obrázku 30. V této části je pak obzvláště důležité, aby nedocházelo k příliš rychlému opotřebení koaxiálních kabelů antén vlivem pohybu elevace, přičemž ale musí návrh umožňovat rychlé odpojení antén pro převoz zařízení. Z těchto důvodů byly konektory koaxiálních kabelů upevněny na zadní stranu skříňe, a tedy zapojené kabely tvoří mezi anténou a skříňí půlkruh o velkém průměru, což zajišťuje minimalizaci jejich opotřebení. Jako další prvek ochrany koaxiálních kabelů antén slouží dorazy elevace, které mechanicky brání nárazu nosníku antén do jejich konektorů.



Obrázek 30 Vnější část elevace

4.8.4 Pevnostní kontrola nosníku antén

Nosník antén je součást namáhaná ohybem a krutem. Schéma jeho zatěžování je zobrazeno na obrázku 31, samotný výpočet byl opět proveden pomocí programu Autodesk Inventor 2024, výsledkem simulace je graf 2.



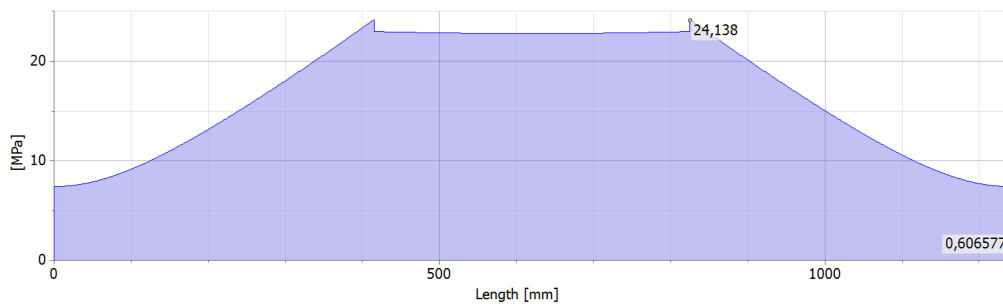
Obrázek 31 Silové namáhání nosníku antén

Příčemž známé veličiny jsou

$d = 26\text{mm}, D = 30\text{mm}, Mka = 9900\text{Nmm}$ (stítký + dynamický), $Fv = 50\text{N}$,

$\sigma_D = 60\text{Mpa}$ (EN AW 6060), $i = 415\text{mm}, b = 410\text{mm}, FGa = 360\text{N}$

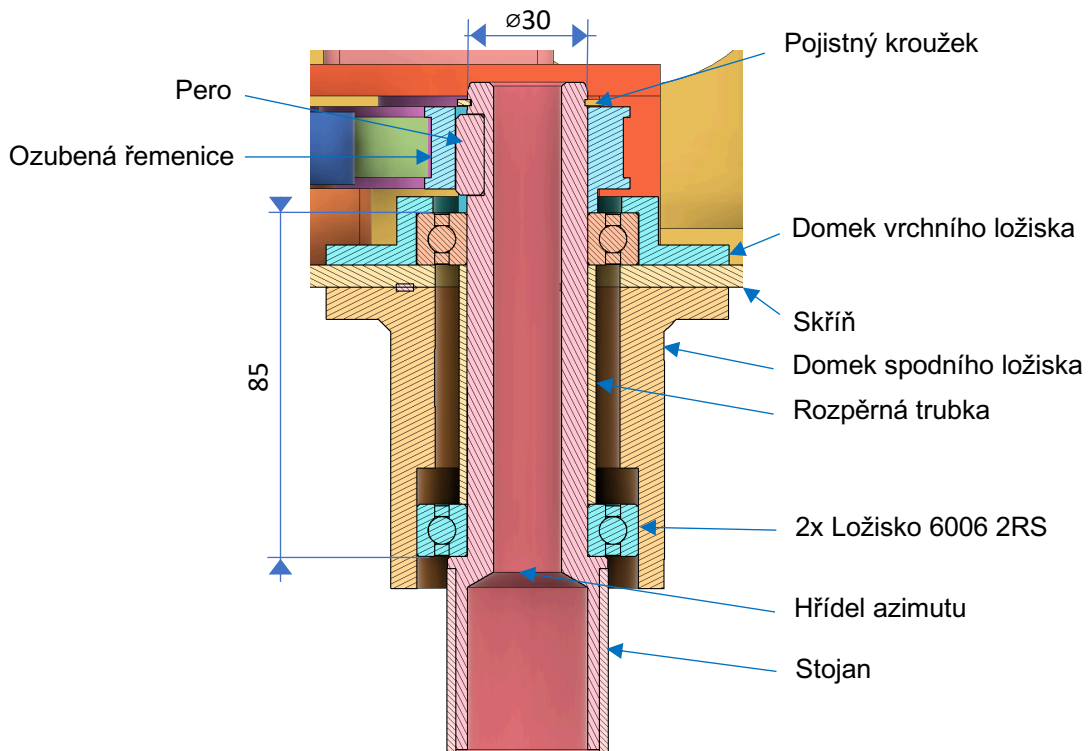
Graf 2 Průběh redukovaného napětí dle HMM v nosníku antén



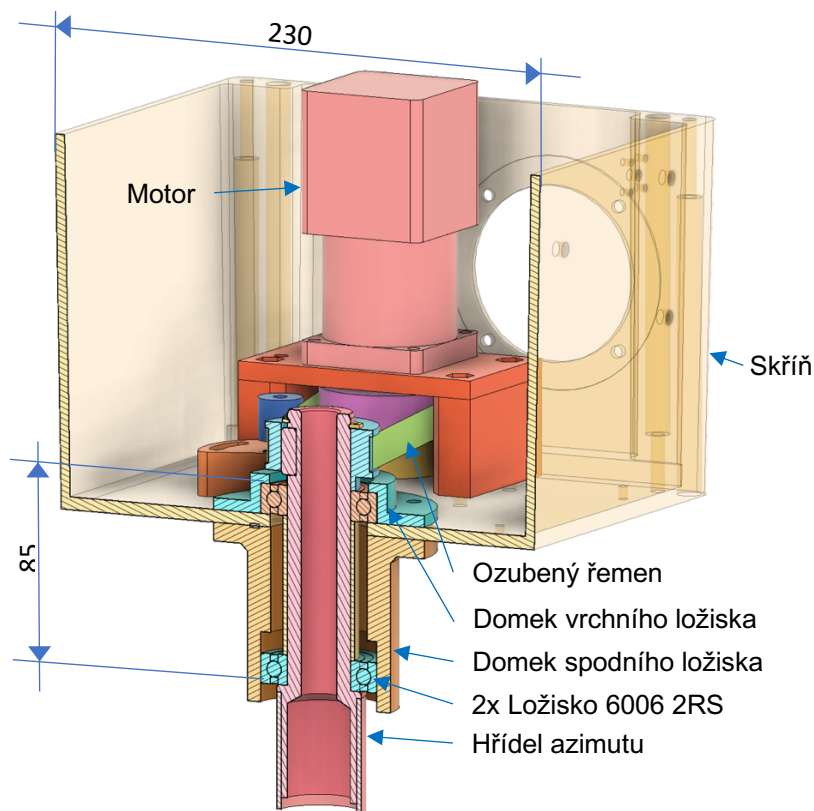
Z průběhu napětí lze vidět, že v žádné části nosníku není překročeno povolené napětí.

4.9 Osa azimutu a její zástavba

Obdobně jako v předchozí kapitole je nutné najít konstrukční řešení i pro osu azimutu a její zástavbu. Návrh počítá s konstrukcí znázorněnou na obrázcích 32 a 33.



Obrázek 32 Řez osou azimutu – detail



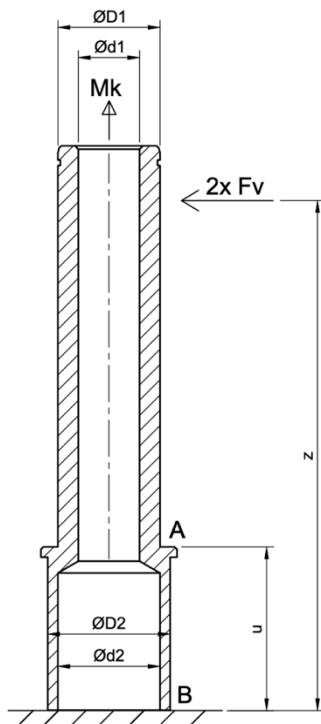
Obrázek 33 Řez osou azimutu

4.9.1 Návrh hřídele azimutu

Jak bylo zjištěno v rešeršní části práce, zásadním prvkem návrhu osy azimutu je řešení přenosu elektrického napájení a dat ze stacionární na rotující část zařízení. U zařízení zkoumaných v rešerši byla tato problematika řešena pomocí rotační kontaktní sběrnice, ale vzhledem k požadovaným specifikacím na tento díl by se u anténního nosiče konstruovaného v této práci muselo jednat o zakázkově vyráběný díl s velmi vysokou cenou, tudíž nebyla tato varianta shledána vhodnou. Namísto toho byla osa azimutu konstruována s dutou hřídelí, kterou je možné protáhnout vodiče speciálně uzpůsobené pro pohyblivé aplikace.

Přenos kroutícího momentu z ozubené řemenice na zmíněnou hřídel azimutu je opět realizován pomocí těsného pera, přičemž pro minimalizaci rozměrů a možnost provlečení vodičů skrz dutou hřídel je využito axiální zajištění náboje pomocí pojistného kroužku. Pro uložení hřídele do skříně jsou opět využity dvě kuličková ložiska 6006 2RS1, přičemž horní ložisko je axiálně pevné, spodní axiálně volné.

4.9.2 Pevnostní kontrola hřídele azimutu



Obrázek 34 Hřídel azimutu

Co se hřídele azimutu týče, je zjevné, že je namáhána jednak kroutícím momentem od motoru, dále ohybovým napětím od síly větru, a nakonec ohybovým napětím od napínání řemenu. Vzhledem k faktu, že působiště síly od napínání řemenu se nachází pouhých 17 mm od ložiska, o které se hřídel opírá, lze předpokládat minimální vliv na výsledné redukované napětí a tato složka byla pro zjednodušení ve výpočtu zanedbána, nicméně její dopad bude třeba kompenzovat vyšším koeficientem bezpečnosti. Tlakové napětí od tíhy celého zařízení je přenášeno přes rozpěrnou trubku, není třeba jej tedy započítávat do výpočtu hřídele. Na obrázku 34 lze vidět schéma namáhání hřídele azimutu jako vetknutého nosníku. Působiště síly větru Fv je předpokládáno v úrovni středů antén.

Znamé veličiny jsou:

$$d1 = 18 \text{ mm}, D1 = 30 \text{ mm}, D2 = 36 \text{ mm}, d2 = 30 \text{ mm}, Mk = 9000 \text{ Nmm}, Fv = 50 \text{ N},$$

$$u = 50 \text{ mm}, Mk = 9000 \text{ Nmm}, Fv = 50 \text{ N}, u = 50 \text{ mm}, z = 150 \text{ mm},$$

$$\sigma_D = 90 \text{ Mpa (ČSN 17 240)}$$

Vzhledem k faktu, že je kroutící moment v celé součásti konstantní, lze maximální redukované napětí předpokládat pouze v průřezu A nebo B

Namáhání v průřezu A je vypočteno v rovnicích 4.28-4.34

$$M_{o-A} = 2 \cdot Fv \cdot (z - u) = 2 \cdot 50 \cdot (150 - 50) = 10000 \text{ Nmm} \quad (4.28)$$

$$\sigma_{o-A} = \frac{M_{o-A}}{W_{o-A}} = \frac{M_{o-A}}{\frac{\pi \cdot D_1^3}{32} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_1}{D_1}\right)^4\right)} \quad (4.29)$$

$$\sigma_{o-A} = \frac{10000}{\frac{\pi \cdot 30^3}{32} \cdot \left(1 - \left(\frac{18}{30}\right)^4\right)} = 4,33 \text{ MPa} \quad (4.30)$$

$$\tau_{k-A} = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi \cdot D_1^3}{16} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_1}{D_1}\right)^4\right)} \quad (4.31)$$

$$\tau_{k-A} = \frac{9000}{\frac{\pi \cdot 30^3}{16} \cdot \left(1 - \left(\frac{18}{30}\right)^4\right)} = 1,95 \text{ MPa} \quad (4.32)$$

$$\sigma_{Red-A} = \sqrt{(\sigma_{o-A})^2 + (\alpha \cdot \tau_{k-A})^2} \quad (4.33)$$

$$\sigma_{Red-A} = \sqrt{(4,33)^2 + (\sqrt{3} \cdot 1,95)^2} = 5,5 \text{ MPa} < \sigma_D \quad (4.34)$$

Namáhání v průřezu B je vypočteno v rovnicích 4.35-4.41

$$M_{o-B} = 2 \cdot Fv \cdot z = 2 \cdot 50 \cdot 150 = 15000 \text{ Nmm} \quad (4.35)$$

$$\sigma_{o-B} = \frac{M_{o-A}}{W_{o-A}} = \frac{M_{o-A}}{\frac{\pi \cdot D_1^3}{32} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_1}{D_1}\right)^4\right)} \quad (4.36)$$

$$\sigma_{o-B} = \frac{15000}{\frac{\pi \cdot 36^3}{32} \cdot \left(1 - \left(\frac{30}{36}\right)^4\right)} = 6,32 \text{ MPa} \quad (4.37)$$

$$\tau_{k-B} = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi \cdot D_1^3}{16} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_1}{D_1}\right)^4\right)} \quad (4.38)$$

$$\tau_{k-B} = \frac{9000}{\frac{\pi \cdot 36^3}{16} \cdot \left(1 - \left(\frac{30}{36}\right)^4\right)} = 1,9 \text{ MPa} \quad (4.39)$$

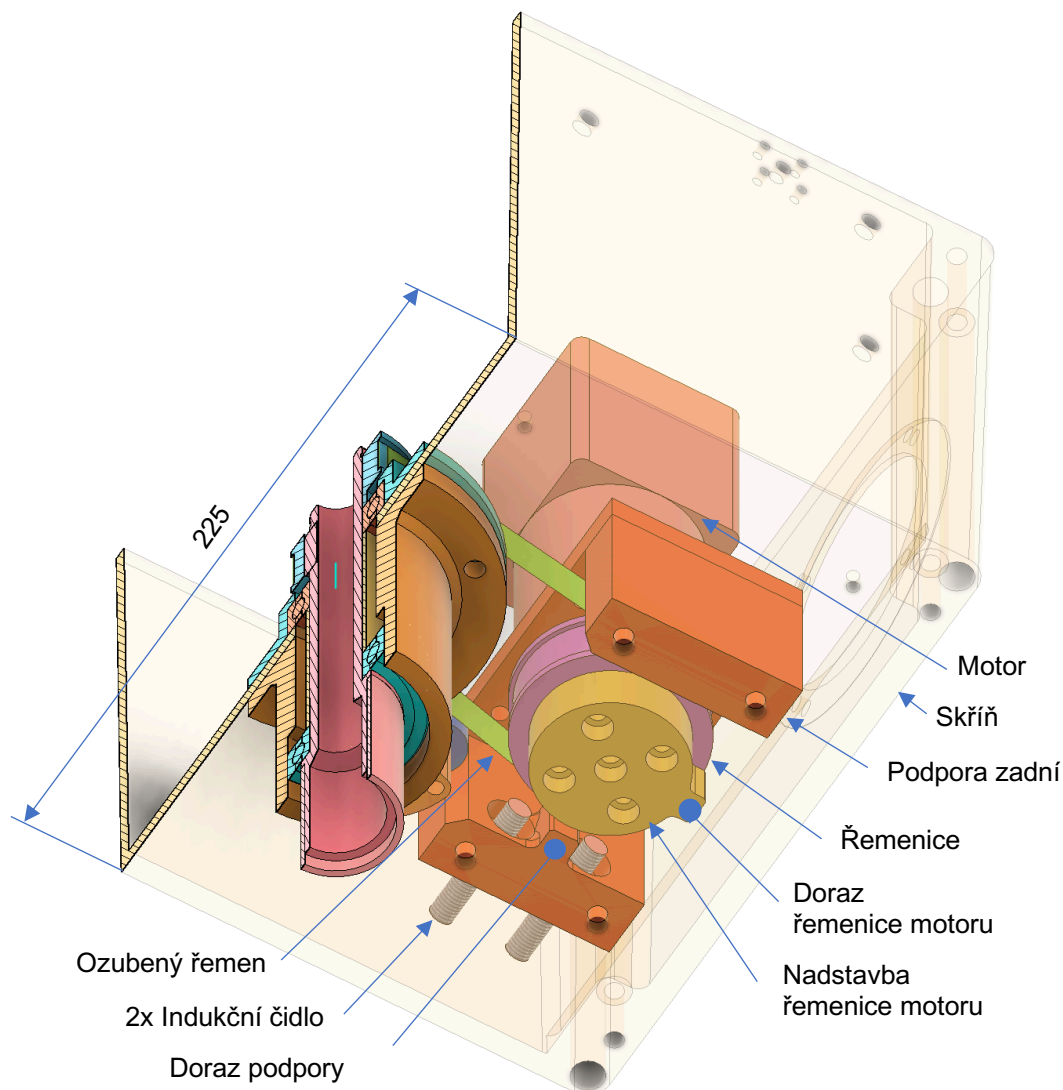
$$\sigma_{Red-B} = \sqrt{(\sigma_{o-A})^2 + (\alpha \cdot \tau_{k-A})^2} \quad (4.40)$$

$$\sigma_{Red-B} = \sqrt{(6,32)^2 + (\sqrt{3} \cdot 1,9)^2} = 7,1 \text{ MPa} < \sigma_D \quad (4.41)$$

Lze vidět, že redukované napětí v žádné části nepřekračuje maximální povolené.

4.9.3 Zástavba motoru azimutu, doraz

Pohled detailněji zobrazující komponenty azimutu uvnitř skříně je uveden na obrázku 35. Motor azimutu je čelně uchycen na roznášecí duralovou mezidesku, která je následně přes dvě 3D tištěné podpory přišroubována do skříně zařízení. Toto uspořádání umožňuje orientovat výstupní hřídel motoru azimutu směrem ke dnu skříně a je tak zajištěno, že řemenice na výstupu motoru i na hřídeli azimutu jsou ve stejné rovině a zároveň celý převodový mechanismus zabírá uvnitř skříně minimální rozměry.



Obrázek 35 Doraz osy azimutu

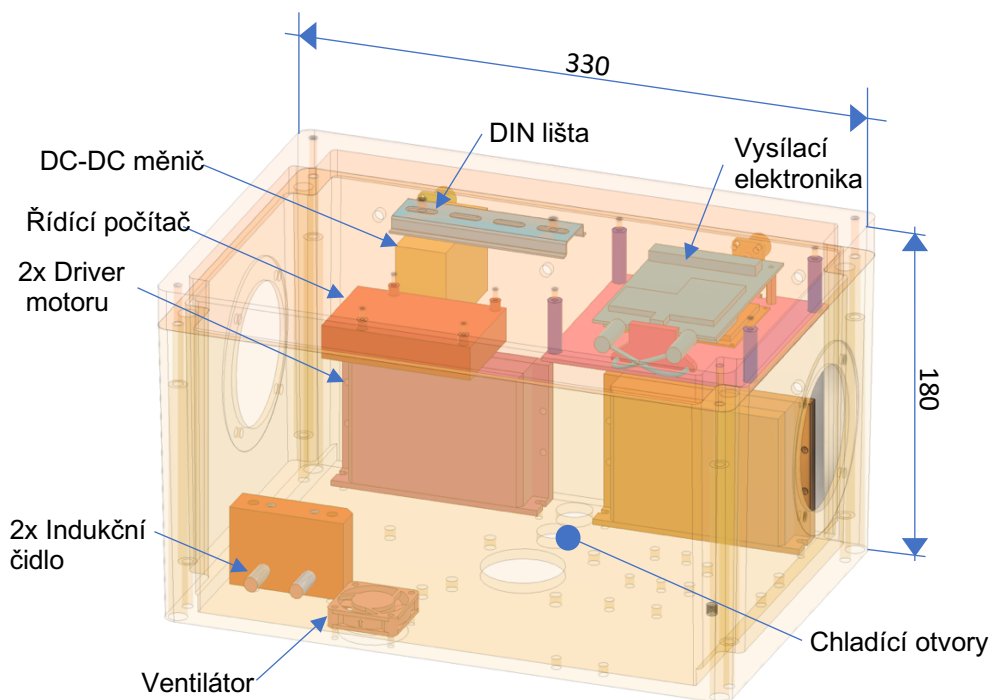
Jedna ze zmíněných podpor desky motoru je doplněna o výstupek, který společně s obdobným výstupkem nacházejícím se na řemenici motoru, slouží jako doraz pro osu azimutu. Umístění dorazu do této části převodového mechanismu umožní rotaci osy azimutu

o více než 360°, jelikož převodový poměr řemenného převodu azimutu je menší než jedna (do rychla). Samotný výstupek na řemenici slouží též jako spoušť pro dvě indukční čidla, která jsou upevněna na jedné z podpor. Pokud dojde k přiblížení výstupku na řemenici motoru k jednomu z čidel, dojde k bezkontaktnímu sepnutí daného čidla a řídicí systém dostává informaci o krajní poloze osy.

4.10 Zástavba elektroniky

Hlavní problematiku při zástavbě elektroniky představuje rozmístění a bezpečné uchycení všech komponent ve skříni, chlazení celého zařízení, a nakonec uspořádání potřebných propojovacích vodičů.

Schéma rozpoložení všech elektrických komponent zařízení je uvedeno na obrázku 36. Hlavním cílem návrhu bylo, vzhledem k požadavkům na snadnou servisovatelnost zařízení, maximální zpřístupnění všech důležitých elektronických uzlů. Vzhledem k této filosofii je velká část elektrických komponent uchycena na víku zařízení, přičemž kabelová spojení mezi komponenty na víku a ve zbytku zařízení jsou vybavena konektory, aby byla zajištěna možnost snadného odejmutí celého víka i s elektronikou.



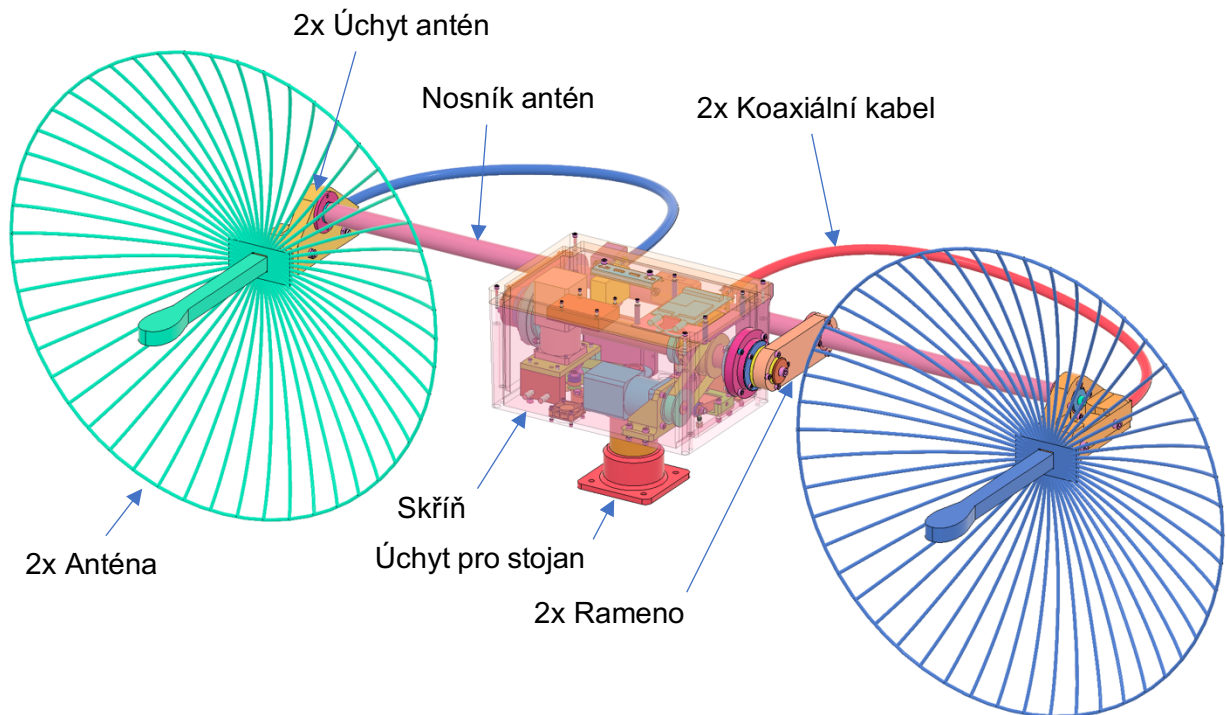
Obrázek 36 Zástavba elektroniky

Rovněž, pro usnadnění servisovatelnosti a možnosti případného budoucího rozšíření elektroniky bez nutnosti zasahovat do konstrukce skříně, je víko nosiče osazeno standardizovanou DIN lištou (označení dle normy ČSN EN 60715), která umožňuje snadné upnutí celé řady elektrických komponent.

Na základě zkoumání vlivu chlazení na výkonové charakteristiky krokových motorů v rešeršní části práce byl návrh anténního nosiče doplněn o aktivní chlazení formou malého ventilátoru, který ze skříně vytlačuje ohřátý vzduch a vlivem mírného podtlaku je tak chladícími otvory na protější části skříně nasáván studený venkovní vzduch. Vzhledem k požadavku na odolnost nosiče antén vůči kapající vodě jsou vstupní i výstupní chladící otvory situovány na spodní straně skříně, tudíž při nehrozí vnik vody do krytu zařízení.

4.11 Shrnutí vlastního řešení, výsledný návrh, cena

Spojením všech dílčích konstrukčních uzlů vzniká finální návrh automatického nosiče antén zobrazený na obrázku 37. Dle 3D modelu byla zpracována výkresová dokumentace a byly připraveny programy pro 3D tisk vybraných součástí. Výsledná vypočítaná hmotnost zařízení i s anténami pak vyšla 25kg.



Obrázek 37 Výsledný návrh automatického nosiče antén

Uchytení zařízení na stojan, jehož konstrukce není součástí této práce, je prováděno pomocí 4 šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem DIN 912 M8x25.

Cenový rozbor návrhu je uveden v tabulce 5. Lze vidět, že byla dodržena předem stanovená maximální cena 60 000 Kč. Dále je zřejmé, že velká část nákladů na zařízení je vynaložena na nákup skříně, obrábění dílců, ale především pak pořízení krokových motorů. Pro případnou minimalizaci ceny je nutné se soustředit právě na tyto oblasti.

Tabulka 5 Cena automatického nosiče antén

Položka	Množství	Cena za jednotku [kč]	Cena celkem [kč]	Poznámka
Skříň	1ks	13591	13591	Zahrnuto obrábění
3D tisk, materiál	2kg	1399	2798	Prusament PETG-CF
3D tisk, náklady na chod stroje	52hod	5	260	
Krokový motor FASTECH + driver	2ks	10532	21064	
Spojovací materiál	1set	530	530	
Ložisko 6006 2RS	4ks	61	244	
Gufero 35x50x7	2ks	79	158	
Pojistný kroužek DIN 471 - 30 mm	1ks	2	2	
Konektor antény	2ks	203	406	
Indukční čidlo Omron E2B-S08KN04-WP-C1 2M	4ks	838	3352	
CFRP trubky pro hřídel elevace	1set	1205	1205	
Spotřební materiál (lepidlo, ...)	1set	100	100	
Vodiče	1set	200	200	
Montáž	20hod	250	5000	
Řemenice 30-5M-15	2ks	450	900	Včetně obrábění
Řemenice 36-5M-15	2ks	480	960	Včetně obrábění
Ozubený řemen HTD 5M-375-15	1ks	256	256	
Ozubený řemen HTD 5M-385-15	1ks	259	259	
Ostatní obráběné díly	1set	5302	5302	Včetně materiálu
CELKEM	-	-	56587	-

5 Stavba prototypu zařízení, návrhy pro zlepšení konstrukce

Výsledkem této práce je i kompletace funkčního prototypu zařízení, jenž je vyfocen na obrázku 38. Cílem této testovací verze bylo ověření celkové funkčnosti stroje při minimalizaci ceny výroby, tudíž byla většina nákladných obráběných dílů, včetně skříně, nahrazena 3D tištěnými alternativami vyrobenými technologií FDM. Rovněž byly použity levnější krokové motory bez zpětnovazebních řízení. I přes výrazně nižší tuhost a přesnost plastových 3D tištěných komponent oproti kovovým obrobkům se na prototypu podařilo ověřit funkčnost všech systémů. Při nastavení požadovaných úhlových rychlostí a zrychlení byla dosažena přesnost samotného polohování $\pm 1^\circ$ pro osu elevace a $\pm 2^\circ$ pro osu azimutu, byly tedy splněny požadavky zadávající firmy. U finální verze s tuhou kovovou skříní a industriálními krokovými motory se zpětnou vazbou se dá očekávat další zpřesnění polohování.



Obrázek 38 Prototyp automatického nosiče antén

S přihlédnutím k funkčnosti prototypu a zásadní pokles ceny výroby oproti konvenčním metodám se 3D tisk valné většiny mechanických komponent nosiče antén jeví jako vhodný postup výroby, nicméně při zvážení trvanlivosti, odolnosti a dalších faktorů byla tato technologie u návrhu finální verze využita jen u méně namáhaných dílců.

Co se podnětů pro zlepšení konstrukce získaných při stavbě prototypu týče, pro usnadnění montáže a seřízení koncových spínacích čidel by bylo vhodné příští verzi zařízení vybavit indukčními čidly s větší maximální snímací vzdáleností. V současné verzi je nutno při montáži nastavit mezi čidlem a jeho spouští poměrně malou vzdálenost, což je časově náročný proces, který komplikuje a prodražuje montáž.

Dalším možným zlepšením by bylo doplnit zařízení o dílec, který by umožňoval přesunout sání chladicího ventilátoru do horní části skříně, kde se konvekcí akumuluje ohřátý vzduch, při zanechání výdechu na spodní straně zařízení. Tím by bylo zkvalitněno chlazení elektroniky a potenciálně by bylo možné nastavit mírně vyšší proudy do motorů a tím pádem dosáhnout i o něco vyšších rychlostí a zrychlení při polohování antén.

6 Závěr

Bakalářská práce se zabývala návrhem mechanické části zařízení, které umožňuje natočit dvě parabolické antény na libovolné místo na obloze za cílem zkvalitnění přenosu dat z létajících objektů na velké vzdálenosti. Parametry antén, kinematiku pohybu a další vstupní požadavky specifikovala zadávající firma.

Rešeršní část práce byla nejprve věnována dohledání v současnosti již dostupných řešení dané problematiky, přičemž bylo zkoumáno jedno komerčně dostupné zařízení a jeden open-source projekt. Dále pak byly prozkoumány komponenty typicky využívané v anténních nosičích – krokové motory a dále různé druhy proximních čidel pro indikaci domovské pozice os.

Řešení samotné problematiky bylo zahájeno prověřením, zda některý ze zkoumaných produktů vyhovuje požadavkům zadávající firmy, nicméně výpočtem bylo zjištěno, že žádné zařízení nedosahuje dostatečné nosnosti.

Zbytek práce se tedy věnoval vlastní konstrukci dle požadavků zadávající firmy, přičemž byly nejprve dimenzovány motory a následně byly určeny nároky na elektroniku a senzorku. Informace získané v rešerši a zástavbové rozměry motorů pak poskytly základ pro konstrukci předběžného koncepčního návrhu zařízení, který sloužil jako odrazový můstek definující rozmístění základních komponent. Zbytek práce byl pak věnován rozpracování této koncepce.

Pro konstrukci hlavních uzlů byl zvolen postup návrhu několika variant a následný výběr té nejvhodnější. Nejprve se práce věnovala návrhu variant pro pohony elevace a azimutu, přičemž v obou případech byl zvolen ozubený řemen pro přenos kroutícího momentu mezi převodovkou motoru a hlavní hřídelí dané osy. Nakonec byly vytvořeny i tři varianty pro skříň, přičemž konceptu zařízení nejlépe vyhovoval doobrobený komerčně dostupný odlitek ze slitiny hliníku.

Po návrhu variant hlavních konstrukčních uzlů zbývalo dokončit konstrukci menších, jednodušších prvků anténního nosiče, jako například zástavbu azimutu, elevace a elektroniky do skříně zařízení.

Spojením všech dílčích uzlů do jedné sestavy vznikl finální výsledný CAD návrh, na jehož základě byla vytvořena výrobní dokumentace.

Během celého konstrukčního návrhu automatického nosiče antén bylo nutné brát v potaz poměrně přísné požadavky na hmotnost a přenositelnost zařízení, což diktovalo použití materiálů s vysokým poměrem pevnosti ku hmotnosti, jako například kompozitů na bázi uhlíkového vlákna či hliníkových slitin. Rovněž byla snaha minimalizovat velikost skříně zařízení, tudíž bylo třeba důsledně dbát i na zástavbové rozměry všech komponent v ní uložených.

Výsledkem práce je tedy zmíněný 3D model zařízení, výkresová dokumentace, ale i funkční prototyp zařízení, na kterém byla ověřena funkčnost všech systémů.

Seznam použité literatury

- [1] BALANIS, Constantine. *ANTENNA THEORY: ANALYSIS AND DESIGN*. 3. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2005. ISBN 0-471-66782-X.
- [2] LUDWIG, Roger a TAYLOR, Jim. *Voyager Telecommunications*. Online, Výzkumná práce. Pasadena, California: JPL, California Institute of Technology, 2002.
Dostupné z: https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso4--Voyager_ed.pdf.
[cit. 2023-12-28].
- [3] UKRSPEC SYSTEMS. *Ukrspec systems AT*. Online. Ukrspecsystems.com. 2021.
Dostupné z: <https://ukrspecsystems.com/uascomponents/tracking-antenna-system-uav>.
[cit. 2023-12-28].
- [4] *Corssbow ATT manual*. Online. In: MYFLYDREAM. Myflydream.com. 2019.
Dostupné z: https://myflydream.com/u_file/Crossbow_en.pdf. [cit. 2023-12-28].
- [5] *Antenna tracker mechanics* [@Miroslav Kolínský]. Online. 2020.
Dostupné z: github.com, <https://github.com/kolins-cz/antenna-tracker-mechanics>.
[cit. 2024-07-18].
- [6] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. *NEMA ICS-16-2001, Motion/Position Control Motors, Controls and Feedback Devices*. Rossyl, Virginia, USA, 2004.
- [7] JONES, Rhys; HAUFE, Patrick; SELLS, Edward; IRAVANI, Pejman; OLLIVER, Vik et al. RepRap – the replicating rapid prototyper. Online. *Robotica*. 2011, roč. 29, č. 1, s. 183-185. ISSN 0263-5747.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/S026357471000069X>. [cit. 2023-12-30].
- [8] BGB. *What is a Slip Ring*. Online. BGB. Bgbinnovation.com. 2022.
Dostupné z: <https://www.bgbinnovation.com/knowledge/news-and-articles/what-is-a-slip-ring>. [cit. 2023-12-28].
- [9] ATHANI, V.V. *Stepper motors: fundamentals, applications and design*. 2. New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers, 1997. ISBN 81-224-1006-5.
- [10] *EZI STEP: miscrostepping system*. Online. In: FASTECH CO., LTD. Fastech-motions.com. 2007, Aug 28, 2020.
Dostupné z: https://www.raveo.cz/productmanager/wp-content/uploads/2023/02/fastech_ezi-step_st_catalog_2020_en_v20-07.pdf.
[cit. 2023-12-29].
- [11] *Application Report - High Resolution Microstepping Driver*. Online. In: TEXAS INSTRUMENTS. Ti.com. 07_2010n. l., 09_2021.
Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slva416a/slva416a.pdf?ts=1703408926378>.
[cit. 2023-12-28].
- [12] *Stepper Motor Technical Note: Microstepping Myths and Realities*. Online. In: FAULHABER. Faulhaber.com. 05_2020n. l., s. 3-4.
Dostupné z: https://www.faulhaber.com/fileadmin/user_upload/Support/dff_200276_whitepaper_microstepping_8cb.pdf. [cit. 2023-12-28].
- [13] *Microstepping for High-Performance Motion Control*. Online. *EE Times Europe Magazine*. 2020, roč. 2020, č. 4, s. 35-37. ISSN 0192-1541.
Dostupné z: <https://www.eetimes.eu/ee-times-europe-magazine-march-2020/>.
[cit. 2023-12-28].

- [14] CNCLAB. Nema 17 Krokový Motor 2A 2.2V. In: *CNCLAB.cz*. 2023. Dostupné také z: <https://cnclab.cz/produkt/nema-17-krokovy-motor-2a-2-2v/>.
- [15] *Turbiter*. Online. LŐRINCZ, Róbert. Orbiter Projects. 2023. Dostupné z: <https://www.orbiterprojects.com/turbiter/>. [cit. 2023-12-29].
- [16] TME CZECH REPUBLIC, S.R.O. *SICK IM12-02BPS-ZW1SICK*. Online. TME.eu. C 2010-2024. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/im12-02bps-zw1/indukcni-cidla-valcova-dc/sick/>. [cit. 2024-06-11].
- [17] *SENSORS HANDBOOK*. 2. New York: The McGraw-Hill Companies, c1999-2010. ISBN 978-0-07-160571-7.
- [18] *Ezi Servo manual: Closed Loop Stepping System*. Online. In: FASTECH CO., LTD. Fastechnotions.com. 2007, Aug 28, 2020. Dostupné z: https://www.raveo.cz/productmanager/wp-content/uploads/2023/02/fastech_ezi-servo_st_catalog_2020_en_v20-08.pdf. [cit. 2023-12-29].
- [19] TME CZECH REPUBLIC, S.R.O. *OMRON E2B-S08KN04-WP-C1 2M*. Online. TME.eu. C 2010-2024. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/details/e2bs08kn04wpc12m/indukcni-cidla-valcova-dc/omron/e2b-s08kn04-wp-c1-2m/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw65-zBhBkEiwAjrqRMFqor-B7CYgs9X6GjX23eQ5y0JiAcPQRuU5Aeuu5VdWLnjcpUcTqRhoCh5EQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds. [cit. 2024-06-11].
- [20] HOFREITER, Milan. *Základy automatického řízení*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06380-4.
- [21] BEEMER, Ryan D.; BISCONTIN, Giovanna; MURALI, Madhuri a AUBENY, Charles P. Use of a MEMS accelerometer to measure orientation in a geotechnical centrifuge. Online. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*. 2018, roč. 18, č. 5, s. 253-265. ISSN 1346-213X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1680/jphmg.16.00077>. [cit. 2023-12-29].
- [22] TYMA CZ S.R.O. *Ozubený řemen HTD 5M-375-15*. Online. TYMA CZ S.R.O. Tyma.cz. 2004. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/produkty/htd-5m-375-15-conti-synchrobelt/>. [cit. 2024-03-06].
- [23] TYMA CZ S.R.O. *30-5M-15 (Type 6F, Steel)*. Online. TYMA CZ S.R.O. Tyma.cz. 2004. Dostupné z: <https://www.tyma.eu/products/30-5m-15-type-6f-steel/>. [cit. 2024-03-06].
- [24] TYMA CZ S.R.O. *36-5M-15 (Type 6F, Steel)*. Online. TYMA CZ S.R.O. Tyma.cz. 2004. Dostupné z: <https://www.tyma.eu/products/36-5m-15-type-6f-steel/>. [cit. 2024-03-06].
- [25] TYMA CZ S.R.O. *Ozubený řemen HTD 5M-385-15*. Online. TYMA CZ S.R.O. Tyma.cz. 2004. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/produkty/htd-5m-385-15-conti-synchrobelt/>. [cit. 2024-03-06].
- [26] LIU, J A; DONG, Z Q; ZHU, X Y; SUN, W B a HUANG, Z Q. Flexural properties of lightweight carbon fiber/epoxy resin composite sandwiches with different fiber directions. Online. *Materials Research Express*. 2022, roč. 9, č. 2, s. 4-6. ISSN 2053-1591. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac4dc5>. [cit. 2024-06-11].

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry Crossboow AAT [4]	12
Tabulka 2 Požadovaná kinematika zařízení	22
Tabulka 3 Kinematika elevace.....	34
Tabulka 4 Kinematika azimutu.....	39
Tabulka 5 Cena automatického nosiče antén	61

Seznam použitého softwaru

Autodesk Fusion
Autodesk Inventor 2024
Autodesk Autocad
Microsoft Word
Octave

Seznam příloh

Textové přílohy

Příloha 1 – Ochrana zařízení proti vniku vody

Výkresová dokumentace

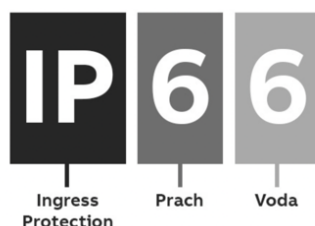
V-2024-009-01-001-004 - Koncový insert
V-2024-009-01-001-008 - Pouzdro s drážkou pro pero
2024-009-01-S – Automatický nosič antén
2024-009-01-K – Automatický nosič antén

Seznam obrázků

Obrázek 1 Výkresová dokumentace zařízení Crossbow AAT [4]	13
Obrázek 2 OPEN.HD Nosič antén [5].....	14
Obrázek 3 Otáčko-momentová charakteristika krokového motoru [10].....	17
Obrázek 4 Provedení proximních čidel [16].....	20
Obrázek 5 Schéma kinematiky nosiče antén	22
Obrázek 6 OTÁČKO-MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA MOTORU EZI-STEP-MPB-42M (ZELENÁ) [10] .	24
Obrázek 7 Statické vyvážení antén	25
Obrázek 8 Předběžný model pro výpočet momentu setrvačnosti.....	26
Obrázek 9 Výkres motoru EZM-86XL [18].....	27
Obrázek 10 OTÁČKO–MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA MOTORU EZM-86XL (FIALOVÁ) [18].....	27
Obrázek 11 Výkres motoru EzM-56S-4000-25 [18]	28
Obrázek 12 Otáčko – momentová charakteristika motoru EZM-56S-4000 (červená) [18]	28
Obrázek 13 Indukční čidlo Omron E2B-S08KN04-WP-C1 [19]	31
Obrázek 14 Předběžný koncepční návrh zařízení	33
Obrázek 15 Předběžný koncepční návrh elevace	35
Obrázek 16 Pohon elevace – táhlový mechanismus.....	35
Obrázek 17 pohon elevace – ozubený řemen	37
Obrázek 18 Napínák elevace.....	37
Obrázek 19 Předběžný koncepční návrh elevace	39
Obrázek 20 pro pohon azimutu – ozubený řemen	40
Obrázek 21 pro pohon azimutu – ozubené soukolí	41
Obrázek 22 Silový rozbor elevace pro výpočet zatížení skříně	42
Obrázek 23 Silový rozbor azimutu pro výpočet zatížení skříně	43
Obrázek 24 Odlitek skříně.....	45
Obrázek 25 Forma pro laminaci skříně	46
Obrázek 26 Svařenec skříně.....	47
Obrázek 27 Řez hřídelí elevace	49
Obrázek 28 Řez hřídelí elevace – detail	50
Obrázek 29 Silový rozbor osy elevace pro výpočet namáhání hřídele.....	51
Obrázek 30 Vnější část elevace.....	53
Obrázek 31 Silové namáhání nosníku antén.....	53
Obrázek 32 Řez osou azimutu – detail.....	54
Obrázek 33 Řez osou azimutu.....	55
Obrázek 34 Hřídel azimutu	56
Obrázek 35 Doraz osy azimutu	58
Obrázek 36 Zástavba elektroniky.....	59
Obrázek 37 Výsledný návrh automatického nosiče antén.....	60
Obrázek 38 Prototyp automatického nosiče antén	62

Příloha 1 - Ochrana zařízení proti vniknutí vody

V požadavcích na zařízení je specifikována ochrana proti vniknutí vody na úrovni IP X2 dle ČSN EN 60529. Norma definuje takzvaný „stupeň krytí IP“, který hodnotí stupeň ochrany zařízení.



Obrázek 1 Označení IP krytí [1]

První z číslic IP kódu představuje stupeň ochrany před dotykem a vnikem cizích předmětů do zařízení. Druhá z číslic určuje stupeň ochrany před vniknutím vody. Dále mohou následovat až dvě písmena dále doplňující informace o krytí zařízení. Je-li číslice nahrazena písmenem X, daný stupeň ochrany není specifikován. [2]

V normě lze dohledat, že požadované krytí IP X2 představuje ochranu vůči vodě kapající při sklonu do 15°. Je třeba brát v potaz, že deklaraci určitého stupně ochrany je možné provést pouze na základě otestování zařízení v certifikované laboratoři, což je nevyhnutelně spojeno se značnými finančními náklady. [2] Proto se s odvoláním na zadávající firmu s nezávislým otestováním stupně krytí v době psaní této práce nepočítá. Nicméně v rámci konstrukčního řešení byly implementovány prvky bránící vniknutí vody do zařízení. Mezi tyto prvky patří gufera na ose elevace, těsnění na víku skříně či utěsnění šroubových spojů.

Rovněž v rámci zajištění dlouhé životnosti produktu je nutné zaručit, že nebude docházet ke korozi prvků konstrukce, které budou při běžném používání přicházet do kontaktu s vodou, toho bylo docíleno volbou vhodných materiálů a povrchových úprav.

Seznam použité literatury přílohy 1

- [1] DRAHOŇOVSKÝ, Tomáš. *Krytí IP: stupně ochrany elektrických zařízení proti prachu a vodě*. Online. ABB GROUP. AAB.com. 2022. Dostupné z: <https://nizke-napeti.cz.abb.com/blog-kryti-ip-stupne-ochrany-elektricky-zarizeni-proti-19963>. [cit. 2024-06-30].
- [2] EVROPSKÁ KOMISE PRO NORMALIZACI V ELEKTROTECHNICE. ČSN EN 60529, ČSN EN 60529 (330330) *Stupně ochrany krytem (krytí - IP kód)*. 2. 1993.