

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE

ULOŽENÍ DEMONSTRÁTORU CUBESATU SE
SIMULACÍ VNĚJŠÍHO PROSTŘEDÍ

2024

**MICHAL
LUKŠ**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

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

Michal Lukš

Poděkování

Tímto bych chtěl především poděkovat svému vedoucímu práce Mgr. Jaroslavu Kousalovi Ph.D. za cenné rady během konzultací k této bakalářské práci a za jeho pevné nervy při vedení mé osoby. Taktéž můj dík patří mým přátelům a mé přítelkyni za notnou dávku motivace a trpělivosti.

Hlavní poděkování mé rodině, bez jejichž podpory by to nešlo.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na vytvoření koncepčního návrhu zařízení, které má demonstrátoru CubeSatu zajistit částečné napodobení podmínek během simulované mise. V první části je shrnuta historie a využití CubeSatů. Následně jsou představeny okolní vlivy působící na satelit, které současně určují požadavky na testovací zařízení satelitů. Poslední část je zaměřena na samotný koncepční návrh uložení, jeho základní rysy a požadavky.

Klíčová slova: CubeSat, simulátor, test stand

Abstract

This bachelor's thesis is focused on the creation of a conceptual design of a device that is intended to provide a CubeSat demonstrator with a partial imitation of the conditions during a simulated mission. The first part summarizes the history and use of CubeSats. The next part shows the environmental influences acting on the satellite are presented, which simultaneously determine the requirements for satellite test equipment. The last part is focused on the conceptual storage design itself, its basic features and requirements.

Key words: CubeSat, simulator, test stand

Obsah

Seznam obrázků	7
1. Úvod	8
2. Družice typu CubeSat	9
2.1 Stručná historie	9
2.2 České CubeSaty	10
2.2.1 VZLUSAT	10
2.2.2 Planetum 1	11
2.2.3 Pilsen Cube	11
2.3 Zahraniční mise	11
2.3.1 NanoSail-D2	11
2.3.2 COPPER	12
3. Vliv prostředí na satelit	13
3.1 Stabilizace	13
3.2 Osvit	13
3.3 Magnetické pole	14
4. Testovací lože	15
4.1 Požadavky na lože	15
4.2 Magnetické pole – Helmholtzova klec	15
4.2.1 Helmholtzova klec	15
4.2.1.1 Základní princip	16
4.2.1.2 Konstrukce Helmholtzovy klece	17
4.3 Vyvažování/ zajištění rotace kolem osy	18
4.3.1 Stabilizace na jehle	18
4.3.2 Torzní uložení	18
4.3.3 Uložení na vzduchovém ložisku	19
4.4 Simulátor slunečního záření	20
5. Realizace	22
5.1 Rotace kolem osy	22
5.1.1 Platforma připojená ke CubeSatu	22
5.1.2 Jehla	24

5.2 Simulace magnetického pole	25
5.3 Simulátor slunečního záření	26
5.3.1 Rám.....	26
5.3.2 Osvit.....	27
5.4 Podpěrná konstrukce stojanu	28
6. Následný vývoj.....	30
6.1 Vylepšení možnosti rotace kolem os.....	30
6.2 Vylepšení simulace magnetického pole	30
6.3 Vylepšení simulátoru slunečního záření.....	30
6.4 Vylepšení pozemního segmentu	31
7. Závěr	32
Citovaná literatura.....	33

Seznam obrázků

Obrázek 1 Nejčastěji používané jednotky CubeSatů [6]	9
Obrázek 2 VZLUSAT-2[4]	10
Obrázek 3 NanoSail-D2 [8]	11
Obrázek 4 COPPER [8]	12
Obrázek 5 Síla magnetického pole podél osy x "tlusté" Helmholtovy cívky [13]	16
Obrázek 6 Helmholtzova klec týmu z Princetonovy University [14]	17
Obrázek 7 Příklad stabilizace na jehle [15].....	18
Obrázek 8 Uložení na vzduchovém ložisku s možností rotace pouze kolem jedné osy [18] ...	19
Obrázek 9 Uložení v sousatvě vzduchových ložisek [18]	19
Obrázek 10 Pneumatický testovací systém Ing. Pelce [17].....	20
Obrázek 11 Simulátor slunečního záření týmu TigerSats z Princetonu [14]	21
Obrázek 12 LED jako zdroj záření dle návrhu Ing. Teichmana [19].....	21
Obrázek 13Detail na uložení patky.....	23
Obrázek 14 Celé sestaven platformy připojené ke CubeSatu.....	24
Obrázek 15 Detail na uložení CubeSatu společně s rameny pro cívky- konfigurace ramen pro izolaci v jedné ose.....	25
Obrázek 16 Detailnější pohled na návrh uložení.....	27
Obrázek 17 Uložení celé stabilizační části do trubky	28
Obrázek 18 Kompletní sestavní testovacího zařízení.....	29

1. Úvod

Již od samého počátku lidstva byli lidé fascinováni noční oblohou a s tím i spojeným dokumentováním dějů, které spatřili. Tak začaly vznikat první nákresy souhvězdí, následně pak i proběhly první pozorování měsíce pomocí teleskopů až po nedávné první snímky černé díry. Zájem lidstva o vesmír a vše s ním spojené neochabl a díky rozvoji technologií mohlo docházet i k rozvoji způsobů nejen pozorování noční oblohy, ale i k celkovému dobývání a prozkoumávání vesmíru.

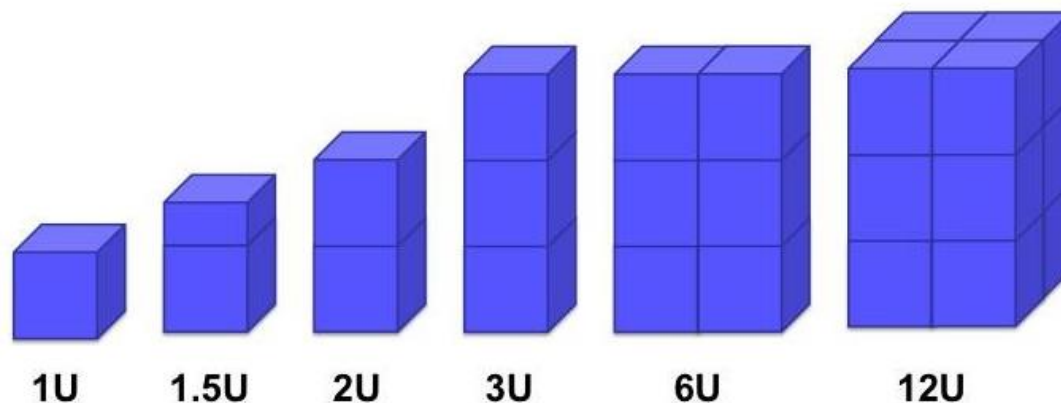
Jedním z těchto „nových“ způsobů dobývání vesmíru se staly satelity. Konkrétně prvním krokem v tomto trendu byl Sputnik vypuštěný v roce 1957. Následovaly celé série dalších satelitů, jak pro vědecké, tak i pro vojenské účely. Rozdílly byly i v oběžné dráze, na kterou byly vypuštěny a také v jejich zaměření a využití. Dalším významným milníkem byly mise Voyageru 1 a 2 a Pioneeru 10 a 11, jejichž cílem bylo opuštění sluneční soustavy a posílání dat z jejich cesty. Následoval Hubbleův vesmírný teleskop a spousta dalších.

Vznik a vysoký nárůst tohoto trendu měl za následek nárůst požadavků na schopnosti a zkušenosti nových pracovníků, inženýrů a konstruktérů. To dalo podnět ke vzniku nových specializovaných oborů, které by mohly přinést důležité znalosti a zkušenosti v tomto oboru. V rámci těchto požadavků a těchto oborů došlo ke vzniku malých testovacích satelitů, dnes známých jako CubeSaty.[1]

2. Družice typu CubeSat

Družice typu CubeSat jsou nejčastěji zařazovány do skupiny nanosatelitů, tedy satelitů o hmotnosti 1-10 kg. Jejich základní odlišností a zároveň i předností je jejich normalizovaný tvar a hmotnost. Základní CubeSat jednotka (značená jako 1U) je krychle o rozměrech 10x10x10 cm o hmotnosti přibližně 1kg (hmotnost není pevně stanovena a pohybuje se od 1kg až do 2kg).

V praxi je velice často využívána možnost spojování vícera jednotek CubeSatů a tím dochází k vytvoření větších celků. Tyto celky, stejně jako jednotka CubeSat, nesou svoje již všeobecně uznávané označení podle počtu jednotek (nejčastěji se využívají 1U, 1.5U, 2U, 3U, 6U a příležitostně až 12U). (Obrázek 1) [2][3]



Obrázek 1 Nejčastěji používané jednotky CubeSatů [6]

2.1 Stručná historie

Obecně se zrod tohoto typu družic datuje do roku 1999, kdy v rámci spolupráce prof. Jordi Puig-Suari z California Polytechnic State University v San Luis Obispo a prof. Bob Twiggs ze Stanford University's Space Systems Development Laboratory vznikl CubeSat jako levná učební pomůcka při studiu a možnost se lépe rozvíjet v rámci objevování vesmíru.

Tento projekt se následně rozvinul po celém světě, získal si oblibu nejen na akademické půdě, ale i v průmyslu a samotném dobývání vesmíru. V dnešní době se již jedná o plnohodnotné odvětví výzkumu a CubeSaty tvoří nedílnou součást široké škály výzkumných misí nejen napříč vesmírnými agenturami i školními projekty. Tato obliba vznikla především na základě jednoduchosti tohoto konceptu, jeho snadné možnosti spojování a navyšování jeho velikosti. [1][2][3][6]

2.2 České CubeSaty

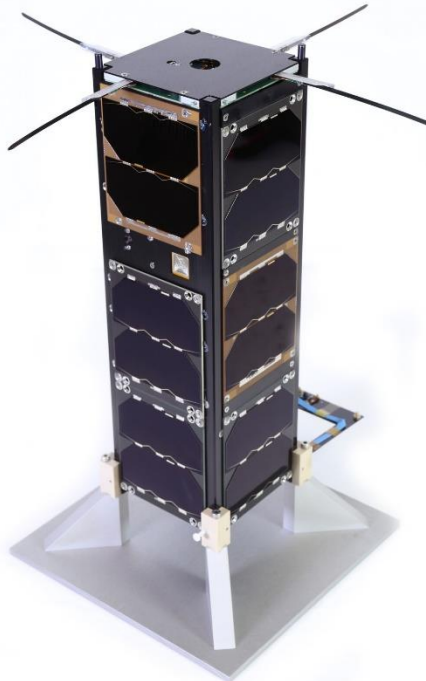
Jak ve světě, tak i u nás se těší CubeSaty značné popularitě. Nejen že v České republice funguje a vzniká mnoho firem, které buď vyrábějí příslušenství do CubeSatů nebo dokonce staví kompletní CubeSaty, ale nachází se zde i mnoho studentských týmů, nadšenců a dokonce i studijních oborů, které se zaměřují na satelity a konkrétně na tento typ. [2]

Právě jedním ze studentských týmů je CTU Space Research, který rozvíjí oblast své působnosti ze stavění raket na soutěže i o odbočku svého týmu se zaměřením na zkoumání vesmíru a tedy i na vývoj a stavbu malých satelitů.

2.2.1 VZLUSAT

Jedná se o asi nejznámější „sérii“ CubeSatů (VZLUSAT-1 a VZLUSAT-2) z České republiky. VZLUSAT-1 (Obrázek 2) byla do vesmíru dopravena na indickém nosiči PSLV-C38 v 2017. Stejně jako její následovník VZLUSAT-2 bylo úkolem obou těchto misí testování nových technologií pro další vývoj družic v České republice.

Celý tento projekt vznikl pod záštitou Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu (VZLÚ) ve spolupráci s českými firmami a univerzitami. Například jako pozemní stanice pro kontakt s družicí byla určena Západočeská univerzita v Plzni.[3][4]



Obrázek 2 VZLUSAT-2[4]

2.2.2 Planetum 1

Jedná se o družici o velikosti 1U, za kterou stojí lidé z pražského planetária a která byla vynesena na oběžnou dráhu v roce 2022 americkým nosičem Falcon 9.

Hlavním cílem této družice bylo popularizování a vzdělávání, což ovlivnilo i výběr přístrojů. Další zajímavostí je, že tato družice má i svého pasažéra a to konkrétně zmenšenou figurku oblíbené dětské postavičky Hurvínka. [5]

2.2.3 Pilsen Cube

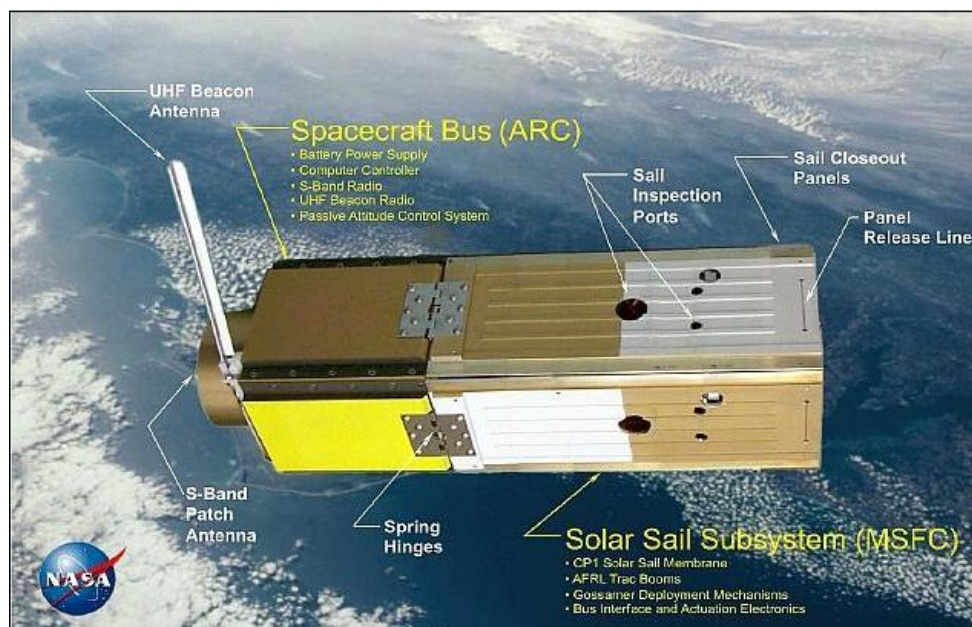
Další unikátní projekt, tentokrát ve spolupráci města Plzně a ZČU v Plzni. Tento projekt je koncipován do tří fází, během kterých studenti středních škol navrhují experimenty aplikovatelné na palubě družice. Experiment vítězného týmu bude následně ve spolupráci se ZČU vytvořen a zabudován do samotné družice. Ta bude opět o velikosti 1U. [3]

2.3 Zahraniční mise

Když již byly zmíněny projekty v rámci České republiky, tak je třeba zmínit aspoň pár příkladů i světových misí. Ty nám rozšiřují obzory co se týče možného využití CubeSatů.

2.3.1 NanoSail-D2

Jedná se o experimentální projekt NASA, jenž je složen z 3U CubeSatu. Jeho hlavním úkolem je roztažení solární plachty a následně jejího využití jako solární plachetnice. Test této technologie proběhl v pořádku a tato sonda kroužila kolem Země celých 8 měsíců před jejím shořením v atmosféře. (Obrázek 3)[8]



Obrázek 3 NanoSail-D2 [8]

2.3.2 COPPER

Jedná se o misi výzkumné laboratoře z univerzity v San Louis. Cílem této mise je experimentování s využitím komerčních mikrobolometru (citlivý přístroj pro měření slabého záření) k pořizování infračervených snímků zemské atmosféry a oceánů na nízké orbitě. (Obrázek 4) [8]



Obrázek 4 COPPER [8]

3. Vliv prostředí na satelit

Jako na každé těleso vypuštěné do kosmického prostoru, tak i na nanosatelity působí všechny vlivy tohoto nepříznivého prostředí. Odolnost proti veškerým těmto vlivům (např. extrémní teplota, vlivy magnetického pole, radiace, ...) je potřeba řádně otestovat. Co se týče radiace a teploty, tak odolnost proti těmto vlivům je možno zvýšit použitím vhodných a speciálních materiálů. Následně pak vlivy magnetického pole, způsob stabilizace či zdroje záření, zdali vydrží systémy fungovat podobu zastínění pouze na chodu z baterek nebo zdali je výkonnost solárních panelů dostatečná, je potřeba vyzkoušet i experimentálně na zemi. Což jsou právě ty parametry, které nás zajímají.

3.1 Stabilizace

Způsob stabilizace satelitu je jedním z velkých problémů při navrhování mise. Nejkritičtější okamžikem je stabilizace satelitu po jeho vypuštění, kdy mu bývá předána značná energie, aby došlo ke správnému a včasnému vypuštění.

Způsoby stabilizace se jako ostatně většina systémů liší dle velikosti samotného satelitu. Jedním z těchto způsobů je stabilizace pomocí rotace. Tento způsob spočívá v tom, že stabilizačním mechanismem jsou gyroskopické efekty od rotující hmoty satelitu. Pro případnou regulaci rychlosti rotace se používají brzdící trysky. Tohoto způsobu stabilizace bylo například využito u již zmíněných satelitů Pioneer 10 a 11.

Další způsob má návaznost na předchozí, jelikož zde trysky neslouží pouze k regulaci rotace, ale přímo k samotné stabilizaci. Značná nevýhoda tohoto způsobu však spočívá v nutnosti zásobníku paliva pro tyto trysky, což značně omezuje možnosti využití i například u menších satelitů.

Asi nejrozšířenějším způsobem stabilizace malých satelitů je stabilizace pomocí reakčních kol. Ty díky své značné tíze a rotaci stabilizují satelit postupným roztáčením či zpomalováním kol v daných osách pohybu. Nejedná se však pouze o záležitost malých satelitů, ale například i u satelitů mající za úkol sledování určitého území či určených k fotografování. Tyto satelity používají stabilizaci pomocí reakčních kol pro jemné korigování polohy a trysky k hrubé úpravě polohy. [1][2][8]

3.2 Osvětlení

Dalším významným aspektem při návrhu satelitu je určení míry osvětlené plochy satelitu během jeho provozu. Díky tomu je možno spočítat získaný příkon elektrické energie ze solárních panelů či jiných zdrojů elektrické energie. Míru využití těchto panelů a jejich účinnost a tedy i získaný výkon je třeba otestovat ještě před zahájením mise.

Velkou roli v této problematice hraje účel a cíl mise satelitu. Jiné požadavky jsou kladeny na satelity na meziplanetárních misích a jiné zase na satelity obíhající na jedné stále orbitě. Právě druhá varianta bývá často platná pro CubeSaty. Je tedy potřeba získat a zkontrolovat údaje, zdali vydrží satelit fungovat i v silně zastíněných částech své oběžné dráhy. [2][7]

3.3 Magnetické pole

Další významný vliv na satelit má magnetické pole. A to především co se týče jeho vlivu na palubní systémy satelitu. Avšak značná část satelitů využívá ke své orientaci právě magnetické pole. Proto je potřeba správnou funkčnost všech systému otestovat pro danou velikost magnetického pole na určité orbitě.

Samotné magnetické pole kolem Země má základní charakteristiku magnetického dipólu. Hlavní příčinou magnetického pole je pohyb tekutého jádra planety. Samotná intenzita magnetického pole je ovlivněna rotací Země a tím je i způsobena deformace magnetických siločar.

Dalším specifikem „našeho“ magnetického pole je jeho stále se pohybující osa, která se liší přibližně o 11° od osy rotace planety. Tento fakt následně hraje roli při řešení lokálního odstínění magnetického pole.

Díky vlivu solárního větru dochází k různým dynamickým změnám v tomto poli a to konkrétně, kdy se mohou hodnoty magnetického pole dramaticky měnit a tím ovlivňovat veškerá elektrická zařízení. Těmto změnám se říká magnetické bouře. Tento jev je doprovázen dalším námi více známým jevem, a to polárními zářemi. [10]

4. Testovací lože

Testovací lože (test stand, test bench a mnoho dalších pojmenování) je nedílnou součástí návrhu a konstrukce samotných družic. Již z názvu je patrné, že slouží k otestování určitých parametrů družice a jejich jednotlivých systémů. Těmi nejhlavnějšími bývají zejména systémy stabilizace a orientace v prostoru.

Samozřejmě na samotné družici během vývoje a sestavování se provádějí různé testy kvality, odolnosti (např. na vibrace) a ty se provádějí na různých testovacích místech a mezi ně patří i toto testovací lože, kde se často dohromady testuje stabilita a orientace družice v prostoru a částečně i například funkčnost slunečních panelů a jejich efektivitu při tvorbě elektrické energie. [9][11]

4.1 Požadavky na lože

Různorodost misí a projektů má za následek, že doposud nevznikly unifikované testovací lože, které by vyhověly požadavkům všech projektů. Proto je tedy možno najít široké spektrum testovacích loží na základě ceny, velikosti, kvality a tak dále. Proto je velice důležité si na počátku vývoje stanovit určité parametry pro dané lože.

Samozřejmě univerzálním pravidlem pro jakýkoli takovýto návrh je její co nejnižší cena při zachování co možná nejvíce z jejích kvalit a funkcí.

4.2 Magnetické pole – Helmholtzova klec

Základní princip magnetického pole byl představen minulé části. Zde je hlavní si připomenout důležitost tohoto efektu pro naše pole působnosti. To vychází z předpokladu, že značná část družic a satelitů využívá ke své orientaci právě magnetického pole Země a tudíž je potřeba tyto jeho schopnosti otestovat ještě při pozemních zkouškách. Dále je potřeba vyzkoušet odolnost zbylých systémů satelitu na náhlé změny v magnetickém poli, které mohou během průběhu mise nastat.

Při testování na Zemi je velice důležité mít možnost minimálně kompenzovat vliv magnetického pole Země. Ideálním řešením je však možnost simulovat toto pole i jeho měnění na základě předpokládané polohy družice na její dráze kolem Země či kdekoli na její dráze během mise. Toho se dá dosáhnout různými způsoby. Nejčastěji se používají systémy cívek a tou nejvyužívanější je asi Helmholtzova klec. [11][12]

4.2.1 Helmholtzova klec

Toto zařízení slouží k vytvoření umělého magnetického pole kolem naší družice, a to nám umožňuje vyzkoušet magnetometrii a jiná další zařízení potřebná k orientaci družice.

Celý návrh Helmholtzovy klece vychází Biot-Sawartova zákona, který ve zkratce říká, že proud procházející cívkou je přímo úměrný magnetickému poli. Tudíž pokud vytvoříme uzavřenou smyčku z cívky, tak nám vznikne magnetické pole s největší intenzitou ve středu dané plochy.

4.2.1.1 Základní princip

Základní koncepce se skládá ze dvou cívek, které dohromady při průchodu proudem tvoří zdroj magnetického pole. Tyto dvě veličiny jsou spolu přímo úměrné. V obecném předpokladu jsou tyto dvě cívky shodné, nekonečně tenké a umístěny paralelně kolem stejné osy a to přesně na vzdálenost jejich poloměru. Při tomto uspořádání dosahuje magnetické pole maximální hodnoty přesně uprostřed. Pro představu se pro výpočet magnetického pole ve středu využívá tato rovnice:

$$H = \frac{8 \cdot N \cdot I}{r \cdot \sqrt{125}},$$

kde r je poloměr cívky, N je počet navinutí jednotlivé cívky a I je proud procházející cívkou.

Dále se vychází z předpokladu, že se účinky jednotlivých cívek mohou sčítat a tedy uprostřed mezi nimi vznikne okolí s maximální hodnotou magnetického pole.

Pro naše výpočty a návrh je však třeba počítat s „tlustými“ cívkami, tedy takovými, které mají skutečnou šířku. Celý princip výpočtu a průběhu velikosti hodnoty magnetického pole je analogický k předešlému příkladu, avšak v tomto případě se vzdálenost cívek od sebe bere ne od hrany nýbrž od osy symetrie jednotlivých cívek. Taktéž je již v tomto případě potřeba brát v úvahu i vzdálenosti mezi jednotlivými vlákny vinutí. Tyto všechny aspekty mají za následek, že se ten značně jednoduchý dříve zmíněný vzorec změní v podstatně zdouhavější a náročnější problém.

Pro představu je vložena rovnice (Obrázek 5) s rozepsanými jednotlivými prvky ze stránky, ze které bylo čerpáno:

$$H_{thick}(t, x) = \frac{I(t) \cdot N_{each}}{w \cdot (D - d)} \cdot \left[Q_{pp} \cdot \ln(K_{pp}) + Q_{np} \cdot \ln(K_{np}) + Q_{pn} \cdot \ln(K_{pn}) + Q_{nn} \cdot \ln(K_{nn}) \right]$$

where: $H_{thick}(t, x)$ - instantaneous values of [magnetic field strength](#) (A/m) at the time t (s) and position x (m), $I(t)$ - instantaneous values of current (A) at time t (s), N_{each} - number of turns in each half of the [solenoidal](#) coil (unitless), w - width of each half-coil (m), d - inner diameter of the coils (m), D - outer diameters of the coils (m), x - position (m) along the axis such that $x = 0$ is at the centre between the pair, "ln" - natural logarithm function, "n" - "negative" coefficient, "p" - "positive" coefficient, and:

$Q_{pp} = \frac{w}{2} + \left(x + \frac{d}{4}\right)$	$Q_{np} = \frac{w}{2} - \left(x + \frac{d}{4}\right)$	$Q_{pn} = \frac{w}{2} + \left(x - \frac{d}{4}\right)$	$Q_{nn} = \frac{w}{2} - \left(x - \frac{d}{4}\right)$
$K_{pp} = \frac{D + \sqrt{D^2 + 4 \cdot Q_{pp}^2}}{d + \sqrt{d^2 + 4 \cdot Q_{pp}^2}}$	$K_{np} = \frac{D + \sqrt{D^2 + 4 \cdot Q_{np}^2}}{d + \sqrt{d^2 + 4 \cdot Q_{np}^2}}$	$K_{pn} = \frac{D + \sqrt{D^2 + 4 \cdot Q_{pn}^2}}{d + \sqrt{d^2 + 4 \cdot Q_{pn}^2}}$	$K_{nn} = \frac{D + \sqrt{D^2 + 4 \cdot Q_{nn}^2}}{d + \sqrt{d^2 + 4 \cdot Q_{nn}^2}}$

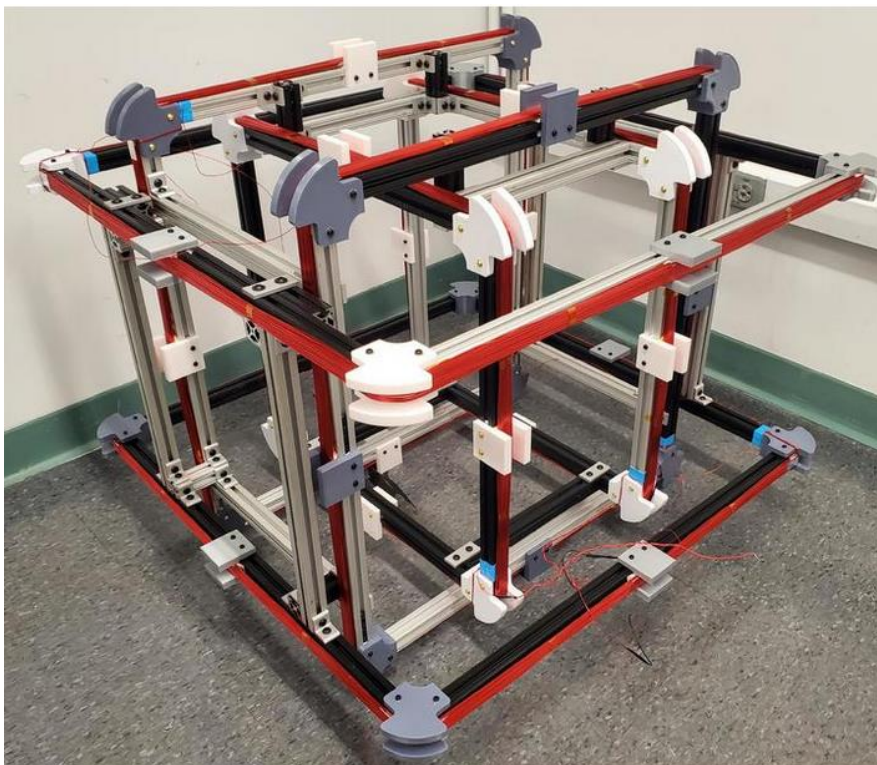
Obrázek 5 Síla magnetického pole podél osy x "tlusté" Helmholtovy cívky [13]

Dalším typem Helmholtzových cívek jsou cívky čtvercového průřezu. Princip je podobný jako u „tlustých“ kruhových cívek. Jejich hlavní výhodou je větší dosažitelný prostor mezi cívkami. To má však za následek snížení síly magnetického pole o 5-10% oproti kruhovým cívkám. [12][13]

4.2.1.2 Konstrukce Helmholtzovy klece

Na základě dat z minulé podkapitoly je možné odvodit si možné způsoby návrhu Helmholtzovy klece. Výkonnostně by byly nejzajímavější „tlusté“ kruhové cívky, avšak pro účely testování není tak důležitý výkon, který jde kompenzovat jinými způsoby, ale především prostor, na který magnetické pole působí. Z tohoto důvodu se právě nejčastěji používají Helmholtzovy klece čtvercového tvaru (Obrázek 6). Samozřejmě byly pokusy a někde se dokonce stále využívají i jiné tvary (např. hexagonové), ale nejvíce se uplatňují právě ty čtvercového průřezu

Jako alternativní a jednodušší varianta by se mohla využít pouze jedné dvojice cívek a tím eliminovat magnetické pole aspoň kolem jedné osy případně při správné vzájemné poloze by nám umožnily přímo eliminovat vliv magnetického pole Země. Zbylé parametry bychom museli oproti využití kompletní Helmholtzovy klece započítávat do našich testů manuálně či je pouze následně při zpracování výsledků brát na zřeteli. Na druhou stranu by toto řešení mělo výhodu především ve mnohonásobně nižší ceně. [12][14]



Obrázek 6 Helmholtzova klec týmu z Princetony University [14]

4.3 Vyvažování/ zajištění rotace kolem osy

Abychom mohli správně otestovat systémy na stabilitu a orientaci, je nutné mít otočnou podstavu ideálně do takové míry, aby to umožnilo bezproblémový pohyb kolem všech tří os. Hlavním problémem této části je značná náročnost na vytvoření takového uložení, které by nám tento pohyb umožňovalo. Existuje mnoho způsobů, jak tohoto cíle dosáhnout.

4.3.1 Stabilizace na jehle

Uložení na jehle (Obrázek 7) patří mezi asi nejjednodušší způsob uložení pro zkoušení stabilizace. Tento způsob spočívá v tom, že je zkoušené těleso, v našem případě satelit, umístěn na patřičné platformě na hrot stabilizační tyčky, jehly a následně různými způsoby vyvážen.

Často je při tomto způsobu uložení využito několika ramen, na kterých je možné polohovat s různě těžkými závažími a tím dosáhnout vyvážení satelitu, který následně díky svým systémům stability si zajišťuje rotaci kolem osy a případné mírné naklonění.

Hlavní nevýhoda je v nutnosti před každým měřením znovu pracně vyvažovat satelit a tento proces se moc nedá zjednodušit. Naopak velká výhoda je v jednoduché konstrukci celého vyvažovacího zařízení a možnosti nejen rotace kolem jedné osy, ale i možnosti určitého naklonění kolem druhé osy. [15]



Obrázek 7 Příklad stabilizace na jehle [15]

4.3.2 Torzní uložení

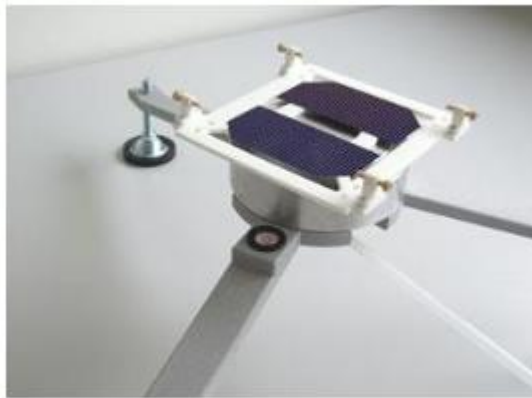
Další varianta uložení je torzní uložení. To spočívá v tom, že je satelit zavěšen mezi předepjatá lana, která drží satelit v jedné pozici a uložení lan či jiných torzních částí umožňuje satelitu rotovat kolem jedné osy.

Hlavní výhodou tohoto uložení je snadné vyvážení a následně i snadné uložení satelitu. Při použití tohoto uložení je možné zanedbat odchytky od těžiště satelitu. Velká nevýhoda však

spočívá v nutnosti větší konstrukce z důvodu samotného principu uložení a taky v nemožnosti rotace kolem více než jedné osy. Samozřejmě určitým způsobem uložení a konfigurace lan by šlo dosáhnout možnosti rotace kolem více os avšak za značné zvýšení komplikovanosti zařízení. [11][15]

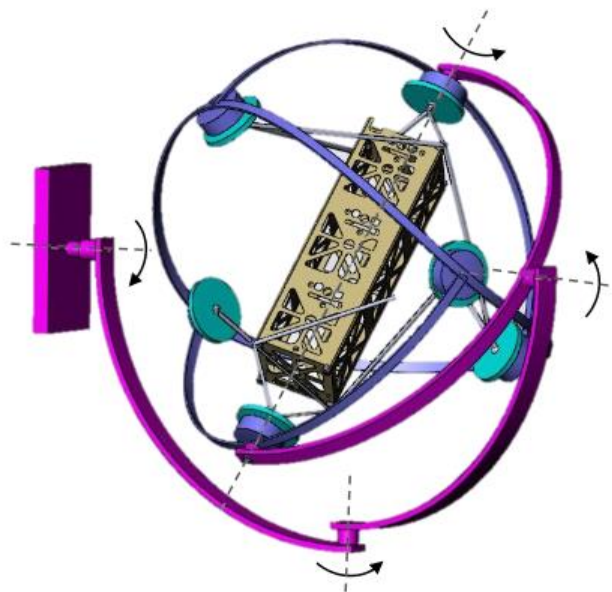
4.3.3 Uložení na vzduchovém ložisku

Nejlepším způsobem pro uložení a následné testování stabilizace je uložení na vzduchovém ložisku. To spočívá na tom principu, že je satelit položen na platformě která se může relativně volně pohybovat na vzduchové bublině vzniklé pod ní.



Obrázek 8 Uložení na vzduchovém ložisku s možností rotace pouze kolem jedné osy [18]

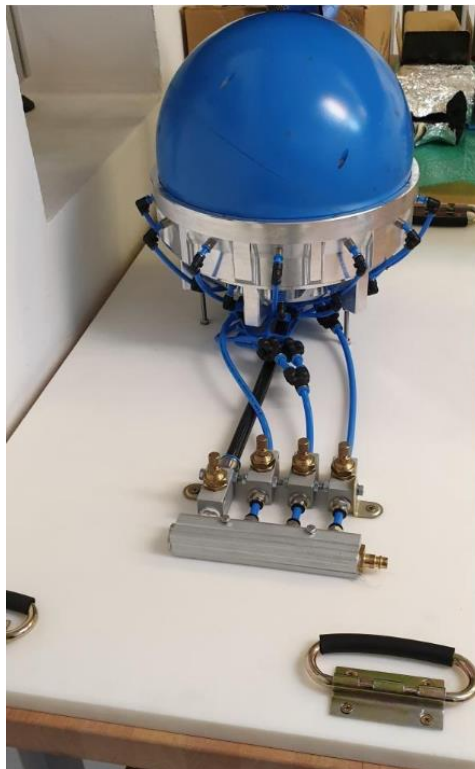
Existuje velké množství druhů uložení na vzduchovém ložisku, od jednoduchých, které umožňují rotace kolem jedné osy (Obrázek 8), až po ty které díky soustavě několika uložení umožňují rotaci kolem všech os nezávisle na směru a rychlosti. (Obrázek 9)



Obrázek 9 Uložení v soustavě vzduchových ložisek [18]

Dále je možné zkoušet pouze samostatné vyvážení satelitu a to v případě speciálních testovacích zařízení. Toto téma zpracoval ve své diplomové práci Ing. Pelc. (Obrázek 10) [17]

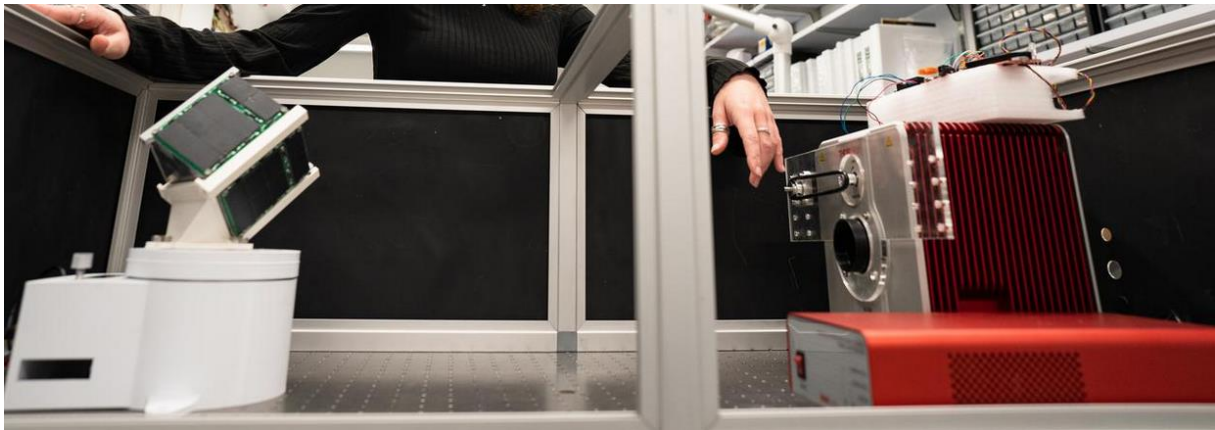
Výše byly zmíněny asi nejpoužívanější systémy na testování pohybů družice v pro nás podobných podmínkách a využitích. Samozřejmě se využívají i jiné, pokročilejší způsoby jako například víceúčelové simulátory volného pohybu či různé variace výše zmíněných typů. [11][12][15][16][17] [18]



Obrázek 10 Pneumatický testovací systém Ing. Pelce [17]

4.4 Simulátor slunečního záření

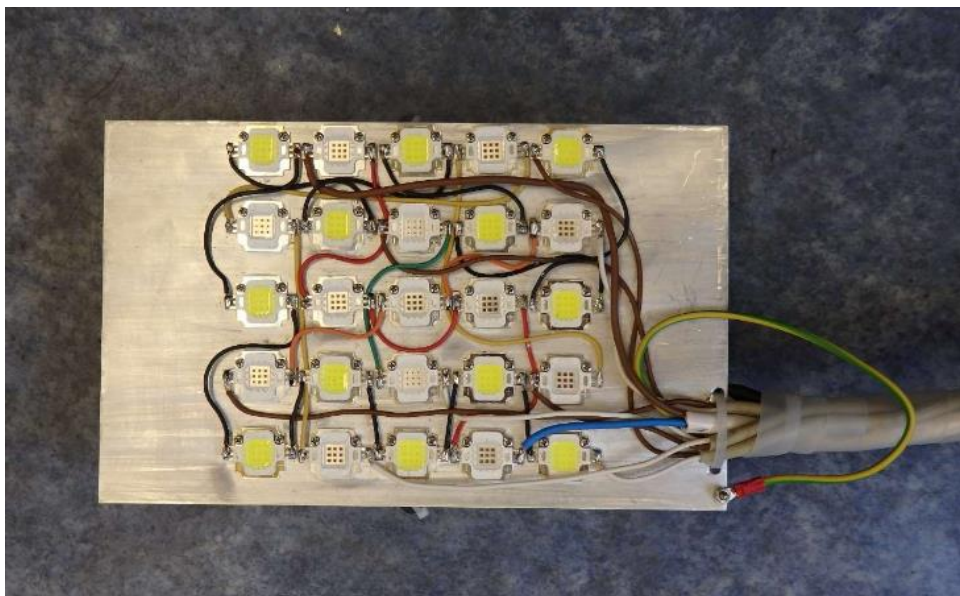
Poslední zásadní částí je simulátor slunečního záření. Toho lze dosáhnout několika způsoby. Jednu z těchto možností využívá tým z University v Princetonu a to konkrétně při testování svých satelitů používá speciálně navržené solární panely, které v kombinaci s jejich vysoko výkonnostní lampou dokáží dostatečně nasimulovat světelné záření. (Obrázek 11) [14]



Obrázek 11 Simulátor slunečního záření týmu TigerSats z Princetonu [14]

Dalším používanějším způsobem je využití silného zdroj světla, který je buď fixně umístěn někde na konstrukci celého testovacího zařízení nebo zabudováno do konstrukce umožňující změnu polohy kolem testovaného satelitu. Toto světlo nedosahuje úplné účinnosti a kvality slunečního záření, avšak pro testování zařízení a systému je toto dostačující.

Nejkomplexnějším způsobem simulace slunečního záření je speciální uspořádání LED o takových vlnových délkách a v takovém množství, že vzniklé výsledné záření má v skoro totožné vlastnosti jako sluneční záření. Právě návrh takového uspořádání provedl v rámci své diplomové práce Ing. Teichman. (Obrázek 12) [19]



Obrázek 12 LED jako zdroj záření dle návrhu Ing. Teichmana [19]

5. Realizace

Na základě získaných podnětů zmíněných v předešlých kapitolách, bylo možné se posunout v samotném koncepčním návrhu zařízení. Zde se promítly i požadavky od kolegů z CTU Space Research, kteří by následně chtěli tuto práci využít k postavení tohoto zařízení a společně s ním zahájit širší zaměření v oblasti malých satelitů.

Hlavním požadavkem byla co nejnižší cena, jednoduchost výroby a obsluhy, trasportovatelnost a především možnost jejího dalšího vývoje. Veškeré tyto požadavky se následně odrážejí ve zvolených technických řešeních.

Jedná se však o koncepční návrh, takže při samotné realizaci by bylo potřeba některé součásti podrobit testům před okamžitým zapojením do provozu.

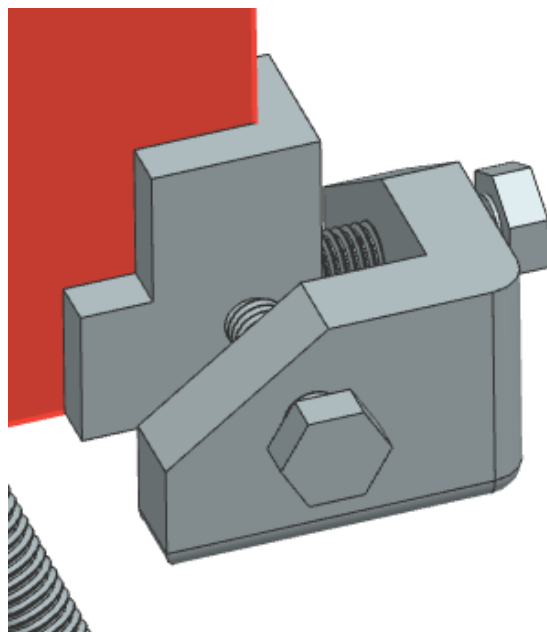
5.1 Rotace kolem osy

Při hledání ideálního způsobu zajištění rotace kolem osy se do velké míry promítly požadavky jednoduché výroby, nízké ceny a jednoduchého přemístování.

Na základě poznatků získaných v rámci rešeršní části volba padla na vyvažování na jehle, která díky své jednoduchosti a kompaktnosti splňuje veškeré požadavky kladené na celé testovací lože. Samotná realizace se skládá ze dvou hlavních částí. První je část přichycená k tělu CubeSatu a druhá část je samotná jehla.

5.1.1 Platforma připojená ke CubeSatu

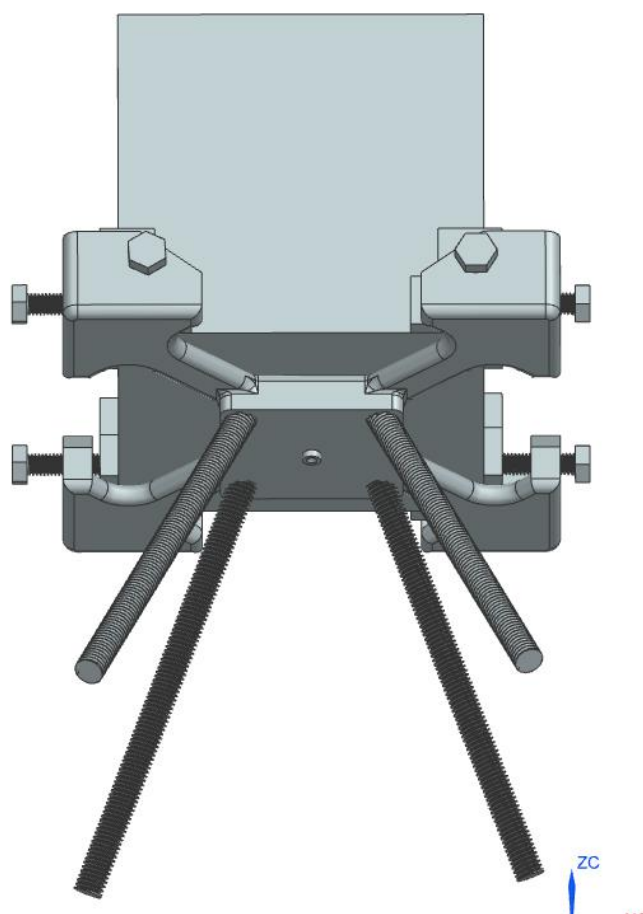
Část připojena ke CubeSatu je navržena tak, aby byla co nejlehčí a je počítáno s výrobou za využití 3D tisku. Dále byla při návrhu kladena snaha na co nejpřirozenější tvar, který by tvořil podporu satelitu a zároveň by neblokoval zbytečně velkou plochu. Na tuto platformu se položí samotný satelit a je zafixován v poloze pomocí patek umístěných ve spodních čtyřech rozích. Pohyb každé patky je regulován dvěma šrouby (Obrázek 13) (roli matice by zde tvořily samotné stěny platformy, ve kterých by byl závit), které umožňují mírnou korekci uložení satelitu. Tyto patky by byly taktéž vyrobeny za pomoci 3D tisku a jejich tvar by byl v rámci ideálního využití tvaru a hmotnosti ve tvaru přibližného L. Plochy kontaktu se satelitem by byly pokryty malou vrstvou pryže pro lepší vzájemné tření a především pro měkčí kontakt v dotykových plochách. Díky tomuto řešení je možné do jisté míry korigovat polohu těžiště satelitu, které se díky designu nemusí nacházet v samotném středu tělesa a naopak může být částečně vyoseno, vůči stabilizačnímu bodu vyvážení. A jelikož uvažujeme převážně rotaci kolem svislé osy, tak nám tento způsob uložení dostačuje.



Obrázek 13 Detail na uložení patky

Další nezbytnou funkcí a součástí této platformy jsou závitové tyče chycené do spodní části platformy. Na tyto tyče by se následně uložilo závaží a díky posouvání po jednotlivých tyčích by došlo ke stabilizaci platformy. Byly zvoleny právě čtyři tyče, protože právě toto množství umožňuje nejsnadnější vyvažování v prostoru. Jejich délka a případně i jejich sklon od roviny by bylo třeba případně ještě dopravit na základě tíhy zkoušených CubeSatů. Avšak při tomto návrhu se vycházelo z již podobně řešených konceptů, které právě tuto konfiguraci často využívají ve vyvažování svých soustav a mechanismů.

Společně s těmito závitovými tyčemi se na spodní straně platformy nachází otvor pro uložení protikusu k jehle (Obrázek 14). V některých případech je využita pouze výduť v samotném těle podstavy, avšak v tomto návrhu bylo počítáno spíše s kovovým protikusem s výduť, která by byla do hladka vyleštěna, aby bylo zaručeno co nejmenší tření. Tento protikus by mohl být opatřen závitem a taktéž by mohl být do platformy našroubován, či by mohl být do podstavy následně vlepen.



Obrázek 14 Celé sestaven platformy připojené ke CubeSatu

5.1.2 Jehla

Výroba jehly by mohla být velice jednoduchá – jakožto samotná jehla byla v tomto návrhu zvolena pouze rovná kovová kulatina, které by byl zhotoven patřičný hrot a na jejím druhém konci by byl vyřezán závit, kterým by byla jehla přichycena k pevné platformě stojanu. Hrot by musel být dále co nejlépe vyleštěn, aby při provozu bylo ve spojení s protikusem dosaženo co nejmenšího tření.

Druhá varianta je podstatně méně bytelná. Jedná se využití tenkostěnné trubky na jejíž konec by byl navařen, připájen či přilepen hrot. Následný princip by byl stejný. Tuto variantu jsem však zavrhl z důvodu její značné křehkosti oproti první variantě.

Zmíněná platforma stojanu tvoří jednak přípojně místo jehly, ale především tvoří i prostředek k celkové realizaci standu, jelikož na její platformu je připojena i konstrukce k simulování magnetického pole. Přesto byla snaha udělat tuto konstrukci co možná nejkompaktnější a nejjednodušší. Platforma by byla opět vytisknuta a následně nasazena na podpěrnou konstrukci stojanu. Ten však bude rozebrán později.

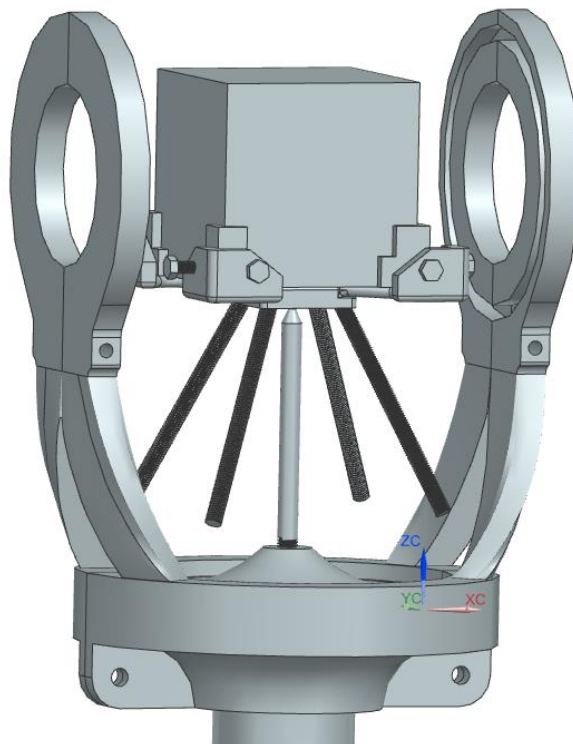
5.2 Simulace magnetického pole

Jak již bylo zmíněno, tak nejideálnější způsob simulování magnetického pole je za pomoci Helmholtzovy klece. Ta však díky své náročnosti a velikosti nesplňuje zadané požadavky, takže bylo třeba uchýlit se k jiným řešením.

Po zjištění variant a konzultacích se došlo k závěru, že vhodným řešením bude použití menších cívek. To sice nebude mít za výsledek úplné odstínění vlivu magnetického pole na testovaný satelit, ale i tak bude možná jeho určitá korekce.

V rámci zachování co možná největší účinnosti cívek ale zároveň k zachování co možná největší nezakryté plochy kolem testovaného CubeSatu byla zvolena varianta dvou tří cívek. Jedna cívka je uložena v drážce pevné platformy stojanu. Kabely od napájení by byly přivedeny ze spodu a protaženy trubkou stojanu, což by značně zvýšilo kompatibilitu a eliminovalo by to nutnost mít zdroj napájení přímo na platformě. Další dvě cívky by byly umístěny v ramenech a byly by ve výšce CubeSatu.

Tyto ramena (Obrázek 15) by měla ze spodu vodící podporu která by seděla do spodní části a díky ní by bylo možné tyto ramena vůči sobě polohovat. Spodní část je tvořena dvěma miskami, které se nasadí na spodní platformu a k sobě se přišroubují. Vznikne tak nadstavená platforma ve které je již zmíněná drážka v kterých jsou nasazena ramena s cívkami. Opět by napájecí kabely byly svedeny dolů a vyvedeny mimo stand.



Obrázek 15 Detail na uložení CubeSatu společně s rameny pro cívky- konfigurace ramen pro izolaci v jedné ose

Tato konfigurace, díky možnosti natočení ramen, nám umožňuje vytvořit magnetické pole kolem satelitu s co nejmenším pokrytím plochy satelitu a současně i s co nejkompaktnějším designem. Jelikož nám působí jedna cívka zesponu a další dvě vzájemně

natočíme kolmo na sebe, tak nám vznikne pokrytí po všech třech osách. Oproti Helmholtzovo kleci nám sice nevznikne pole relativně homogenní nýbrž unášivé. Tato skutečnost nás však pro naše současné záměry a požadavky nikterak neomezuje. Případně opět díky možnosti vzájemného polohování ramen můžeme nastavit obě ramena přímo proti sobě a tím vytvořit jednoosé homogenní pole. Možné varianty by se volily dle požadavků jednotlivých testů a zařízení.

Vlastní velikost cívek je třeba dopočítat dle následných specifických požadavků pro míru velikosti magnetického pole, které si budeme přát vytvořit. Základní výpočty je možné provést na základě rovnic zmíněných v části zabývající se Helmholtzovými klecemi.

Samotná ramena jsou navržena jako součást skládající se ze dvou symetrických polovin, které by byly k sobě navzájem přišroubovány či přilepeny (varianta s přišroubováním by však byla ideálně třeba vyřešit za pomoci plastových šroubů, poněvadž by kovové šrouby ovlivnit tvořené magnetické pole případně by bylo třeba vyzkoušet míru ovlivnění). Díky tomuto je velice snadná jejich výroba za pomoci 3D tisku. Případná změna by neměla značný vliv na samotný návrh ramen – došlo by pouze k předimenzování poloměru kruhové části a její hloubky na základě požadovaných parametrů cívek.

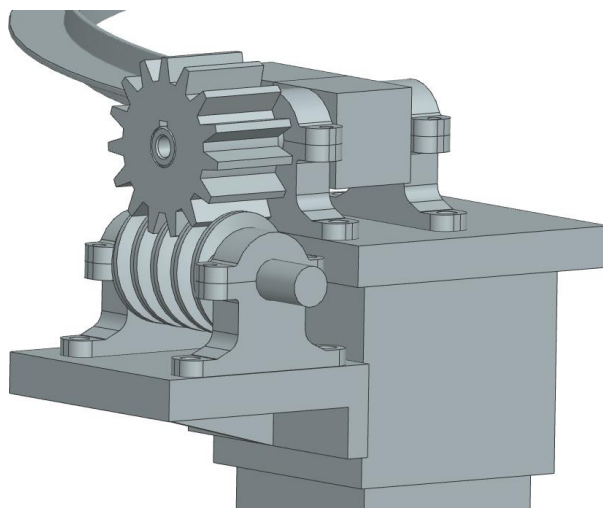
5.3 Simulátor slunečního záření

Zde se dostáváme k prostorově nejnáročnějšímu článku tohoto zařízení. Samotný simulátor slunečního záření se v našem případě skládá v zásadě ze dvou částí. Těmi je samotné světlo, případně simulátor osvětlení, a tou druhou je rám, po kterém se osvětlení pohybuje.

5.3.1 Rám

Hlavním aspektem návrhu rámu byla myšlenka co nejjednoduššího způsobu, jak dosáhnout osvětlení satelitu po co možná největší možné ploše. Tak vznikl nápad na rám uložený na dvou stabilních podporách, mezi kterými je rotačně upnut ohnutý profil, který slouží jako vodící člen pro světlo. V tomto našem případě je za profil volen hliníkový T profil, který má jeden z nevhodnějších poměrů hmotnosti na využitelnou plochu. Tento profil je následně ohnut do tvaru půl kruhu. Jeho konce jsou šrouby připojeny do přípravků, jenž jsou přes drážkování spojeny s hřídelem. Na oba hřídele jsou nasazeny ložiska a následně je tato sestava vložena do ložiskových domků.

Ty jsou přišroubovány k podpěrným (Obrázek 16) platformám připevněným na dřevěných hranolech. Hranoly jsou připevněny pomocí kovového přípravku k trojúhelníkovým platformám, jenž tvoří stabilizační plochy konstrukce rámu. K samotným trojúhelníkovým platformám jsou ještě připevněny stavěcí nohy, které nám umožňují případné dovyrovnání na nerovném terénu.



Obrázek 16 Detailnější pohled na návrh uložení

Z jedné strany rámu je hřídel prodloužena a spojena k ozubenému kolu, které ve spojení se šnekovým kolem tvoří ozubené soukolí. Hlavní výhodou tohoto převodu je jeho samosvornost, což je pro naše využití velice výhodné a užitečné, jelikož není nutné řešit brzdění či aretaci při pohybu s rámem. V první fázi vývoje se počítá s ručním pohonem, tedy ručním polohováním. To jest zamýšleno pomocí otáčení klikou připojenou na šnekové kolo. Tedy díky rotačně uloženým koncům profilu a jejich značnému prostoru mezi plochou platformy a následným otáčením klikou můžeme polohovat ramena v rozsahu o několik stupňů více než 180°. Celá tato platforma by se nalézala o něco níže oproti pevné platformě stabilizátoru, aby byla možnost osvitů celé plochy satelitu.

U většiny výše zmíněných součástí je počítáno s výrobou za pomoci 3D tisku a jejich následným zoptimalizováním pro efektivnější využití a také dle potřeby skutečných materiálů a polotovarů (např. jiný profil než T) použitých při následné realizaci. Dále by bylo potřeba přesněji specifikovat šnekové soukolí, jelikož je sice možné využít mnohem menších kovových soukolí, která ze zkušenosti vydrží i značné síly (např. napínání strun kontrabas), ale jejich malý průměr by značně zhoršoval ruční stavění polohy ramene. Naopak 3D tištěná soukolí dokáží přenést stejné zatížení při značně vyšším průměru, ale jejich výrobní cena je podstatně levnější a variabilita je mnohem pestřejší. Naopak problém by mohl nastat při výrobě hřídelů, které by ale šly vyztužit případným přidáním zpevňovacího profilu či přinejhorším vyrobít za pomoci konvenčních obráběcích metod.

5.3.2 Osvit

V návrhu konstrukce tute součásti hrají největší roli naše požadavky. Ty pro naše účely byly stanoveny na pouze směrové osvětlení o nezanedbatelném výkonu, které bude jen zlomkově simulovat přivedený sluneční výkon, ale bude především co nejvíce simulovat míru osvětlené plochy satelitu. Na tomto základě bylo zvoleno osvětlení pomocí LED panelu, který díky své větší ploše dokáže oproti bodovému světlu osvětlit větší plochu, což je i blíže ke skutečnosti při osvětlení satelitu Sluncem. Další nesporná výhoda širšího pole osvětlení je i v tom, že v našem případě nebude mít vždy zdroj světla možnost osvětlit kompletní plochu CubeSatu a to například kvůli ramenům s cívkami. Tuto by pro bodové světlo znamenalo, že by v těchto místech bylo „stínové místo“, tedy místo bez jakéhokoli dopadu světla. Naproti tomu širší LED

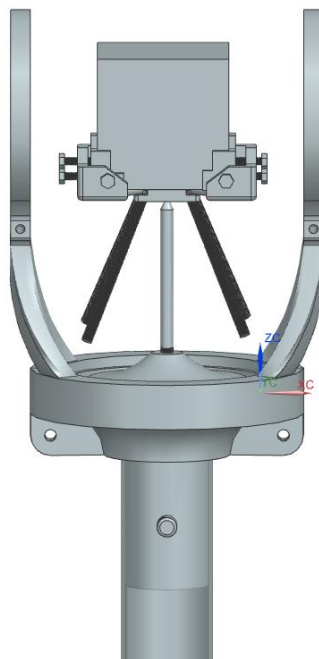
panel umožňuje osvit větší plochy, takže i když by byla část blokována ramenem, tak je ale zbytek plochy osvětlen a tedy zastíněné místo není tak velké a nehraje tak velkou roli při našem testování.

Samotné uložení tohoto panelu je plánováno na pojízdnou platformu, která byla v této fázi ručně posouvána po profilu a následně by byla na požadovaném místě zabrzděná (například externími čelistmi přichycena k profilu). Platforma by byla tvořena čtyřmi koly které by jezdily po vnitřní straně T profilu. Kola této platformy by měla asi v ideálním případě kulový tvar a to z důvodu umožnění stálého pohybu při jakémkoli natočení rámu. Zdroj nebyl (minimálně v této fázi) návrhu součástí pojízdné platformy, nýbrž by byl napájecí kabel vyveden ke zdroji na zemi. Následným přidáním drážky či menšího podpůrného ramene by bylo možno eliminovat nechtěné „plandání“ kabelu kolem měřeného satelitu.

Díky takovémuto jednoduchému řešení osvitu můžeme simulovat sluneční záření v libovolné části horní polokoule a zároveň i značnou relativní plochu dolní polokoule. Tedy v kombinaci s níže položenými podporami ramen je možno dosáhnout osvitu ve výsledku skoro celého testovaného satelitu.

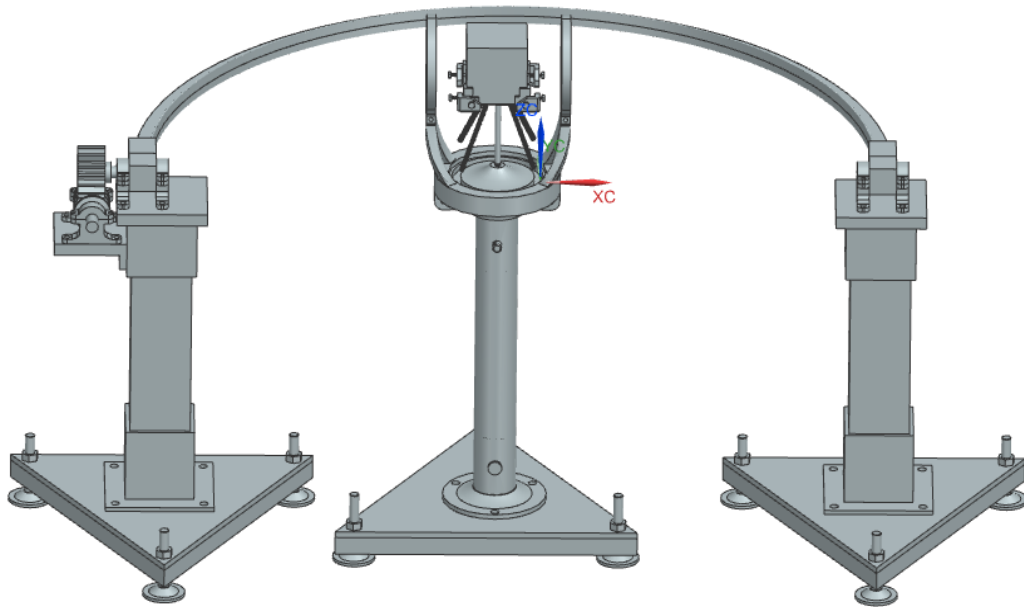
5.4 Podpěrná konstrukce stojanu

V této části se jen krátce zaměříme na celkovou podpornou konstrukci pod stabilizační platformou. Jak již bylo zmíněno v části o stabilizaci a o simulaci magnetického pole, tak její části jsou připevněny k platformě, jenž je spojena s pevnou částí (Obrázek 17). Základnu této platformy tvoří válcová část, která je vsunuta do tenkostěnné trubky a v ní je pojištěna proti pohybu čepem na druhé straně pojištěným proti vypadnutí závlačkou. Tato trubka je na druhém konci nasazena na opět tištěnou část a taktéž pojištěna proti pohybu pomocí čepu a závlačky.



Obrázek 17 Uložení celé stabilizační části do trubky

Spodní část je přišroubována obdobně, jako dřevěný hranol z rámu pro světlo, k dřevěné trojúhelníkové podstavě přehrazené dřevěnou deskou tvořící plochu k přišroubování. Trojúhelníková základna je zvolena záměrně kvůli její nejlepší stabilitě. Dále pak je základna opatřena stavěcíma nohama (taktéž pro možnost kompenzace nerovného podloží). Velikost platformy je záměrně větší, aby byla zajištěna co největší stabilita (Obrázek 18).



Obrázek 18 Kompletní sestavní testovacího zařízení

6. Následný vývoj

Při návrhu tohoto uskupení bylo záhodno rovnou uvažovat i nad možným vývojem jednotlivých částí zařízení. Jelikož v případě zájmu o zlepšení tohoto zařízení a posunutí ho z úrovně pro základní zkoušení systémů na úroveň skutečného testování zkonstruovaných satelitů byla potřeba vylepšení či změna některých částí test standu. Avšak některá tato vylepšení popírají samotné požadavky stanovené před zahájením této práce, tak se s nimi nemohlo dříve uvažovat.

6.1 Vylepšení možnosti rotace kolem os

Zde by byla možnost vylepšení pouze za předpokladu, zdali by bylo opuštěno od požadavku na transportovatelnost a jednoduchost provozu. Jelikož například přechod ze stabilizace na jehle na stabilizaci pomocí vzduchových ložisek by umožnilo testovat schopnost stabilizace CubeSatu defacto ve všech osách a ve všech možných případech natočení. Avšak to by mělo za následek stále připojení ke zdroji stlačeného vzduchu, což je s našimi současnými požadavky neslučitelné.

Případně pokud by se zůstalo u stabilizaci na jehle, tak by byl možný prostor pro vylepšení u způsobu stabilizace, kdy by se teoreticky dalo elektronicky pomocí senzorů automaticky řídit vyvážení satelitu a nebylo by nutné zdlouhavé ruční stabilizování před každým měřením.

6.2 Vylepšení simulace magnetického pole

Zde by mohlo dojít k největší změně a vylepšení, které by se však i značně a skoro asi ze všech vylepšení nejvíce prodražilo. Toto vylepšení by stejně jako vylepšení možnosti rotace kolem os vyžadovalo opuštění požadavku na transportovatelnost zařízení. Vylepšení by bylo dosaženo navržením a vytvořením úplné Helmholtzovy klece, což by nám umožnilo úplné a mnohem přesnější měření námi testovaných systémů a celkové simulování mise satelitu.

6.3 Vylepšení simulátoru slunečního záření

Zde by vylepšení mohlo proběhnout dokonce ve dvou oblastech. Jednak vylepšením samotného zdroje záření a jednak vylepšením prvků řízení, natáčení a posouvání.

Vylepšení zdroje záření by se týkalo ve smyslu nahrazení obyčejného LED panelu panelem obdobným tomu z návrh Ing. Teichmana, tedy takového, který svým zářením plně simuluje sluneční svit i co se týče spektra vyzařovaného světla. To by taktéž umožnilo přesnější měření funkčnosti solárních panelů, jejich účinnosti apod. V tomto případě by však už i bylo záhodno požadovat při pohybování se v blízkosti simulátoru brýle s dostatečnou ochranou proti výraznému svitu. Případně mezi krokem v tomto vylepšení by mohlo být jen nahrazení

současně uvažovaného LED panelu takovým, který by mohl předávat relativně srovnatelný výkon jako předává sluneční záření.

Na druhou stranu vylepšení řízení, natáčení a posuvu by znamenalo nahrazení ručního natáčení ramene a ručního posouvání zdroje záření za elektricky poháněné. Toho by šlo docílit připojením elektromotoru na šnekový převod a tím elektricky ovládat natáčení ramene a pak vložit elektrický pohon i do pojízdné platformy simulátoru záření. Následně by tento vzájemný pohyb šel softwarově provázat a došlo by tak k vytvoření komplexního způsobu simulace záření schopného kontinuálně simulovat osvětlení satelitu během celé mise či požadovaných úseků.

6.4 Vylepšení pozemního segmentu

Hlavní složkou potřebnou k bid' jen základním testům je potřeba navržení komplexní obslužné stanice, která by měla možnost kontrolovat jednotlivé části sestavy, a to především možnost ovládat jednotlivá napájení součástí, regulaci toku proudu v cívkách, posuv zdroje světla, atd. Další funkcí této stanice by byla možnost získávat data z měření, která by byla schopna dále předávat na zpracování. Tuto vše by znamenalo současně vytvořit i jednodušší aplikaci, která by zvládla veškerá data ovládat a umožňovala by jednoduché zpracovávání dat a hlavně by především umožňovala dálkově nastavovat naše počáteční požadavky na průběh simulace a následně i jejich možnost úpravy během samotného simulování.

Tato část je však sama o sobě dosti komplexním a sofistikovaným problémem, že její řešení je možné zahájit až po dovyřešení jednotlivých částí a představ, co bychom chtěli, v jaké míře bychom si to představovali a jak moc prostředků, času a prostor na to máme.

7. Závěr

Předmětem této bakalářské práce bylo vytvoření koncepčního návrhu zařízení, které má za úkol edukačnímu demonstrátoru CubeSatu zajistit částečnou nápodobu podmínek během simulované mise. CubeSat je jedním z nejvýznamnějších představitelů nanosatelitů. Původně tento druh satelitů sloužil pouze k edukativním účelům, ale časem získal díky své jednoduchosti, variabilitě a kompaktnosti oblibu nejen jako edukační pomůcka, ale i jako samostatný a plnohodnotný druh satelit. Jejich využití je čím dál tím širší a s jejich možností unifikovaného spojování a unifikovaných velikostí se ještě stále jejich uplatnění rozšiřuje. Jejich původní záměr však zůstal stále aktuální a mnoho studentských týmů, zabývajících se vesmírem, si tento druh satelitů oblíbil a staví si své vlastní. V duchu této myšlenky vzniká i tato práce, kdy by měla být využita minimálně jako inspirace při větším rozběhu odvětví pro satelity studentského týmu CTU Space Research.

V první části této práce byla přiblížena historie tohoto druhu satelitů, jejich aplikace a byly zmíněny i asi nejvýznamnější projekty s CubeSaty v České republice. Následovalo stručné představení vlivů působících na satelit, které se překlenulo k požadavkům na testování satelitů. Zde byly popsány jednotlivé způsoby testování jednotlivých systémů a taktéž problematiky spojené se samotnými návrhy test standů. Na závěr bylo ze získaných dat z rešeršní části představen koncepční návrh řešení test standu. Ten by po dořešení některých specifik mohl být na základě poznatků z tohoto koncepčního návrhu postaven a využíván k základnímu demonstrování systému CubeSatu.

V poslední části byly navrhnutы způsoby a možnosti dalšího vývoje a vylepšení test standu. To by nám umožnilo rozsáhlejší testování námi vytvořených satelitů, či dokonce možnost úplné simulace mise satelitu.

Citovaná literatura

- [1] Malcolm Macdonald, Viorel Badescu. *The International Handbook of Space Technology*. místo neznámé : Springer, 2014. ISBN 978-3-642-41101-4.
- [2]. NASA. CubeSat - CubeSat information. *CubeSat*. [Online] Říjen 2017. <https://www.cubesat.org/cubesatinfo>.
- [3] KoPlacement. Co je CubeSat? *KoPlac*. [Online] 13. Únor 2018. <https://koplac.cz/co-je-cubesat/>.
- [4] VZLU. VZLUSAT-2. *VZLUSAT-2*. [Online] <https://www.vzlusat2.cz/#aktuality>.
- [5] Neuveden. Planetum. *Družice Planetum-1*. [Online] 2018. <https://www.planetum.cz/druzice-planetum1/>.
- [6] NASA. What are SmallSats and CubeSats? *NASA*. [Online] 23. Srpen 2023. <https://www.nasa.gov/what-are-smallsats-and-cubesats/>.
- [7] NASA. CubeSat - CubeSat information. *CubeSat*. [Online] Říjen 2017. <https://www.cubesat.org/cubesatinfo>.
- [8] eoPortal. *eoPortal*. [Online] Červenec 2022. <https://www.eoportal.org/>.
- [9] Cal Poly – San Luis Obispo, CA. CubeSat. *CubeSat*. [Online] <https://www.cubesat.org/cubesatinfo>.
- [10] Křížek, Marek. Magnetické pole Země. *Přírodovědecká Fakulta University Karlovy*. [Online] <https://www.natur.cuni.cz/geografie/fyzgeo/krizekma/ke-stazeni/magneticke-pole-zeme/>.
- [11] Simone Chesi, Octavio Perez and Marcello Romano. *Journal Of Small Satellites. A Dynamic, Hardware-in-the-Loop, Three-Axis Simulator of Spacecraft Attitude Maneuvering with Nanosatellite Dimensions*. [Online] 2015. <https://www.jossonline.com/wp-content/uploads/2015/06/Final-A-Dynamic-Hardware-in-the-Loop-Three-Axis-Simulator-of-Spacecraft-Attitude-Maneuvering-with-Nanosatellite-Dimensions.pdf>.
- [12] Stevens, Jacob. CubeSAT ADCS Validation and Testing Apparatus. *Western Michigan University - ScholarWorks*. [Online] 12. Červen 2016. https://scholarworks.wmich.edu/honors_theses/2777/.
- [13] Zurek, Stan. Helmholtz coil. *Encyclopedia Magnetica*. [Online] https://e-magnetica.pl/doku.php/helmholtz_coil?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR08ryVTDbAmJFRo1IvELvLffHg9PXh5axzQTPsPeZKvMQ1EKBJTdpVYe68_aem_AZaDqn06EdedQKyZkr4e62Kv3gL37i-5khB5u0LY8XHpKpfXsCPCY7QWAIEnwu89Jo8mWFTVa8VpH0XgUecJDBMG.
- [14] TigerSats. TigerSats. *Princeton University*. [Online] <https://tigersats.princeton.edu/simulation/testbeds/solar-charging-testbed?fbclid=IwAR3IJVx0micDN6G0UiCyXlglMLvP8Aa5QuLaysVSQIiiiLxXS1M2z6ij--IU>.

- [15] Úrsula Martínez, Luis Bravo, Dan Gligor, ATTITUDE CONTROL RESEARCH WITH EDUCATIONAL NANOSATELLITES, ResearchGate [Online] Duben 2022.
https://www.researchgate.net/publication/362256332_Attitude_control_research_with_educational_nanosatellites
- [16] Galliath, Robaire. Design of a CubeSat Testbed. *Worcester Polytechnic*. [Online] 2020.
https://digital.wpi.edu/concern/student_works/c247dv58j?locale=en.
- [17] Ing. Pelc, Karel. Zařízení pro testování ADCS. *DSPACE CVUT*. [Online] Květen 2021.
<https://dspace.cvut.cz/handle/10467/96314>.
- [18] Irina Gavrilovich, Sébastien Kurt, Marc Gouttefarde, François Pierrot. ResearchGate. *Test Bench For Nanosatellite Attitude Determination And Control System Ground Tests*. [Online] Květen 2012.
https://www.researchgate.net/publication/308078454_Test_Bench_For_Nanosatellite_Attitude_Determination_And_Control_System_Ground_Tests.
- [19] Ing. Teichman, Jiří. Simulátor slunečního záření. *DSPACE CVUT*. [Online] Září 2017.
<https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73078>.