

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní



Andrej Bospjatych

**Průzkum možnosti ČVUT v návrhu a vývoji
vlastního studentského CubeSat**

Bakalářská práce

2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621..... Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Andrej Bospjatych

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LED – Letecká doprava

Název tématu (česky): **Průzkum možností ČVUT v Praze v návrhu a vývoji
vlastního studentského Cubesat**

Název tématu (anglicky): Capabilities of the CTU in Prague in design
and development of its own Cubesat

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Systémová analýza CubeSat
- Analýza vhodné strategie nákupu nebo vývoje komponent
- Průzkum pracovišť a osob na ČVUT v Praze
- Zpracování výsledků a celkové hodnocení




- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: James Wertz a Wiley Larson. Space Mission Analysis and Design. ISBN 18-818-8310-8
John Stark a Graham Swinerd. Spacecraft Systems Engineering. ISBN 978-111-9971-016

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Duša**
doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **20. května 2017**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **26. srpna 2019**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

L. S.


.....
Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy


.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.


.....
Andrej Bespjatych
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....20. května 2017

Čestné prohlášení

„Nemám závažný důvod proti užívání 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).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 28. 8. 2017

Podpis:.....

Poděkování

Zde bych rád vyjmenoval všechny, kterým chci poděkovat za **neustálou** podporu, užitečné informace, nebo i jen nasměrování na správnou cestu při mém malém kosmickém putování, bez čehož by tento vesmírný kousíček práce vznikl jen velmi těžko nebo by nevznikl vůbec. Největší díky patří mým rodičům, kteří nejen v závěrečných fázích studia, ale i v jeho průběhu mi vždy byli oporou a bez jejichž lásky by tenhle text ani nemusel vzniknout.

Druhé velké díky patří mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Dušovi, který vždy pohotově našel správnou cestu a dokázal užitečně poradit v **situacích, kdy** já jsem začínal tápat.

Poslední díky bude patřit celé skupině lidí, se kterými jsem více či méně přišel do styku při nabývání základních informací týkající se mé práce. Jsou to především z Fakulty dopravní pan doc. Ing. Jaromír Sodomka, CSc., z FEL pan Ing. J. Laifr, pan Ing. Ladislav Sieger, CSc., pan doc. Ing. M. Hromčík Ph.D., pan Prof. Ing. Jan Holub Ph.D., z FS pan doc. Ing. Zicha Josef, CSc, pan J. Tomíček Ph.D., paní Ing. Z. Tatičková, z UTEF pan DrSc. S. Pospíšil, z CSO pan M. Halousek, všichni zúčastnění semináře o malých družicích a také všichni ti, co si aspoň přečetli můj průvodní e-mail s prosbou o informace k mé práci a poradili na koho se obrátit.

Abstrakt

- Autor – Andrej Bospjatych
- Název bakalářské práce: Průzkum možnosti ČVUT v návrhu a vývoji vlastního studentského CubeSat
- Škola: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní
- Rok vydání: 2017
- Počet stran: 64
- Počet příloh: 2

Tato bakalářská práce si staví z cíle jednak seznámit čtenáře se základní problematikou spojenou se stavbou malých pikosatelitů (tzv. CubeSatů) a jednak poukázat na možnosti jeho vývoje na naší univerzitě, stejně tak jako nákup potřebných již hotových komponent.

Těžiště práce spočívá ve zjištění připravenosti potřebných klíčových pracovišť na naší univerzitě a působícího odborného personálu

Cílem je také zjistit kdo a kde by případně mohl provádět nebo alespoň zajistit výrobu součástí spolu s odhadem ceny pro porovnání komponenty s objednáním od specializované firmy ze zahraničí.

Klíčová slova:

Cubesat, pikosatelit, průzkum osob, vývoj komponent, projekty družic

Abstract

- Author – Andrej Běspjatych
- Title of the bachelor thesis: Capabilities of the CTU in Prague in design and development of its own CubeSat
- University: Czech Technical University in Prague, Faculty of transportation sciences
- Year of publishing: 2017
- Number of pages: 64
- Number of attachments: 2

On one hand the aim of this bachelor thesis is to acquaint the reader with the basic issues connected with the construction of small picosatellites (so called CubeSat) and on the other hand to point out the possibilities of its designing and manufacturing at our university, as well as the purchase off-the-shelf hardware.

The main focus of my work is to find out the readiness of the necessary key workplaces at our university and professional staff.

Also the goal is to find out who and where could perform or at least ensure the production of components with estimation of price for comparing with the previous theoretical orders from foreign specialized company.

Keywords:

Cubesat, picosatellite, people survey, component development, satellite projects

Obsah

1	Úvod	11
1.1	Idea a cíl práce.....	12
2	Systémová analýza CubeSat	14
2.1	Popis miniaturních satelitů	14
2.2	Pojetí mise.....	16
2.2.1	Cíl mise.....	17
2.2.2	Užitečné zatížení	17
2.2.3	Satelitní Platforma.....	19
2.2.4	Oběžná dráha.....	19
2.2.5	Pozemní stanice	19
2.2.6	Nosná raketa	20
2.3	Technické požadavky mise.....	21
2.3.1	Systém řízení polohy	22
2.3.2	Pohonný systém	23
2.3.3	Komunikační systém.....	23
2.3.4	Napájecí systém	23
2.3.5	Řízení a zpracování dat.....	24
2.3.6	Systém tepelné kontroly	25
2.3.7	Struktra a mechanismy.....	25
2.4	Zrození pikosatelitu.....	26
2.4.1	Prototyp	26
2.4.2	Provozní model	27
2.4.3	Provozní model	28
3	Analýza vhodné strategie nákupu nebo vývoje komponent	29
3.1	Stavíme družici, zn.: levně.....	29
3.2.1	Kostra CS.....	30
3.2.2	Systém elektrické energie EPS	32
3.2.3	Baterie pro CubeSat	33
3.2.4	Solární panely	34
3.2.5	Systém určování a řízení polohy	36
3.2.6	Palubní počítač	37
3.2.7	Komunikační systém	38
4	Česká republika již má co nabídnout	40
4.1	Minulost českých projektů.....	40
4.2	Současnost českých projektů	42
5	Průzkum osob a pracovišť na ČVUT	44

5.1	Made in ČVUT	44
5.1.1	Stavba kostry CS	46
5.1.2	Výroba jednotlivých elektrotechnických komponent	50
6	Zpracování výsledků průzkumu a celkové hodnocení.....	55
7	Závěr.....	58
8	Použitá literatura.....	59
9	Přílohy.....	61

Seznam zkratk

ADCS	Attitude Determination and Control System	System určení a řízení polohy
AIT	Assembly, Integration and Test	Environmentální zkoušky
AV		Akademie věd
CDS	CubeSat Design Specification	Specifikace pro návrh Cubesatu
CDR	Critical Design Review	Protokol testů
COMP	Computer	Počítač
CS	CubeSat	CubeSat
CSO	Czech Space Office	Česká kosmická kancelář
ČVUT		České vysoké učení technické
DAR	Deviation Waiver Request	požadavek na schválení odchylek
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud
DRAM	Dynamic Random Access Memory	Druh paměti
DTFM	Dual-tone Multi-frequency	Způsob kódování a přenosu informace
EPS	Electrical Power System	System elektrické energie
ESA	European Space Agency	Evropská kosmická agentura
FCC	Federal Communications Commission	Federální komise pro komunikace
FEL		Fakulta elektrotechnická
FIT		Fakulta informačních technologií
FS		Fakulta strojní
FSV		Fakulta stavební
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální družicový polohový systém
GPS	General Positioning System	Globální polohový systém
I2C	Inter-Integrated Circuit	Počítačová sběrnice
ICBM	Inter-Continental Ballistic Missile	Mezikontinentální balistická raketa

KČN		Katedra číslicového návrhu
KEP		Katedra elektromagnetického pole
KF		Katedra fyziky
KTT		Katedra telekomunikační techniky
KM		Katedra měření
KP		Katedra počítačů
KŘT		Katedra řídicí techniky
LDFS		Laboratoř diagnostiky fotovoltaických systémů
LEO	Low Earth Orbit	Nízká oběžná dráha
MCU	Micro Control Unit	Jednočipový počítač
MRAM	Magnetoresistive random-access memory	Druh paměti
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
P-POD	Poly PicoSatellite Orbital Deployer	Unifikované vypouštěcí zařízení
RADIO		Katedra radioelektroniky
ROSCOSMOS	Rosijskij Kosmos	Ruská letecká a vesmírná agentura
SATRAM	Space Application of Timepix-based Radiation Monitor	Detektor radiačního pole
SDSC	Satish Dhawan Space Centre	Indická raketová základna
SRAM	Static Random Access Memory	Druh paměti
ÚPŘT		Ústav přístrojové a řídicí techniky
ÚST		Ústav strojírenské technologie
UCEEB		Univerzitní centrum energeticky efektivních budov
ÚTOPM		Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
VUT		Vysoké učení technické

1 Úvod

„Jestli je vesmír odpověď, co je potom otázka?“

Není to tak dávno, kdy tento výrok pronesl slavný americký fyzik Leon Max Lederman. Přitom otázky, týkající se vesmíru, provází lidstvo od nepaměti. Zcela jistě by se dalo říci od prvního pohledu člověka ke Slunci, na Měsíc, nebo na nádhernou noční oblohu, posypanou nesčetným počtem jasně a kouzelně svítících bodů a útvarů, často tvořící krásné obrazce, pod kterými si tento člověk začal představovat vše, co v tu dobu znal. Jako například dávní Polynésané, brázdící vody Tichého oceánu se bez jakýchkoliv navigačních přístrojů dokázali úspěšně orientovat pomocí hvězd. Co si asi takoví lidé před tisíci lety nejspíše mysleli, když tohle všechno viděli? Nezbývalo jim nic jiného, než přicházet s vlastními teoriemi a pevnou vírou v ně. Vzpomeňme si třeba na tisíce let staré petroglyfy nápadně připomínající úplné zatmění Slunce, nebo disk z Nebry – ohromující památku na astronomii doby bronzové a v neposlední řadě babylonskou tabulku se záznamem Halleyovy komety stovek let př. n. l. A co například prastarý megalitický komplex Stonehenge, mayská observatoř El Caracol, nebo obrovské pyramidy v Gize?

Vše to jsou jasné důkazy toho, že touha za poznáním prostoru nad hlavou je stará jako lidstvo samo. Postupem času se začali objevovat i takoví, kdo za poznáním šli pomocí systematického způsobu racionálního poznávání skutečnosti, což bychom dnes jinak nazvali vědou. Mnoho z nás zná, nebo alespoň někdy slyšelo jména jako Aristokles, Pythagoras, Platón a jiné. V předešlých několika desítek let a století výzkumníci z řad historiků a archeologů nalézali a studovali tyto neocenitelné odkazy našich předků, poukazující na dávné kultury a jejich myšlení spjaté s vesmírem.

Dnes, v naší postmoderní době, je na první pohled s úsměvem snadné a logické říci, že se od těchto dávných dob a lidí již velmi lišíme a víme toho, ať už s pomocí historie nebo současné vědy, mnohem více. Sbírali jsme kameny na Měsíci, studujeme dlouhodobý vliv beztlíže na člověka, zvířata a na rostliny, navrhujeme a stavíme nespočet různých přístrojů zaměřených na výzkum blízkého i vzdáleného vesmíru, díváme se do něho obrovskými přesnými teleskopy, snažíme se zachytit ty nejmenší částice přilétající k nám z nekonečných neznámých dálek ve snaze rozluštit jejich původ a vliv na nás, provádíme různorodé nepilotované i pilotované lety do kosmu se zajímavými cíli a úkoly a v neposlední řadě ve velmi blízké budoucnosti plánujeme

lety s lidskou posádkou na čtvrtou planetu Sluneční soustavy. Věda, technika, postupy řešení problémů a řízení naplánovaných lidstvem úkolů, vše nabralo a stále nabírá na tempu. Postupem času se tohle všechno bude rozvíjet ještě komplexněji. Avšak ať už v budoucnosti budeme jakkoliv vyspělí a dovední, stále nás ještě dlouho bude s našimi dávnými i nedávnými předky spojovat minimálně jedna otázka. Ta, kterou jsem citoval na začátku.

1.1 Idea a cíle práce

Zabývat se projektem Kosmické technologie na naší fakultě mě přivedl můj dlouhodobý zájem o dění a aktivity spjaté s výzkumem vesmíru. Fascinuje mě už jen pohled na čistou, ničím nerušenou noční oblohu a její mihotající se objekty. Nejspíše stejně tak, jako i toho, kdo se na ní díval tisíce let přede mnou

Při pohledu na název a na vytyčené cíle se někomu může práce zdát velmi netradiční nebo i trochu nejasná. S myšlenkou, nebo spíše konceptem miniaturních satelitů - CubeSatů, přišli v roce 2003 dva profesoři z amerických univerzit (Jordi Puig-Suari z California Polytechnic State University a Bob Twiggs ze Stanford University), kde prioritním cílem bylo dát možnost svým studentům navrhnout, vytvořit potřebné komponenty a poskládat je do jednoho celků se stanovenými parametry. Následně samozřejmě mělo přijít to hlavní – vypustit tenhle výtvar na oběžnou dráhu a otestovat jeho funkčnost. Tahle myšlenka se velmi rychle rozšířila po akademické půdě mnoha technických univerzit světa a nyní je tu šance i pro nás na Fakultě Dopravní a na ČVUT.

Mými klíčovými cíli je tedy zjistit, jaké máme a budeme na naší univerzitě mít možnosti postavit si svůj vlastní miniaturní satelit – tzv. pikosatelit – pro naše studentské účely a pro nové zajímavé zkušenosti na poli vesmírných miniaturních projektů. Jelikož ve světě a vesmíru vše velké vždy začíná tím nejmenším.

Nejdříve si však představíme některé potřebné náležitosti, které k takovému projektů patří. Analýza vesmírných projektů a Space Engineering jsou velmi rozsáhlé a nesmírně složité jak pro velké mise velkých hráčů jako ESA, ROSCOSMOS, NASA, tak i pro jejich zdobněliny mezi začínajícími nadšenci. V práci tedy nejprve rozeberu okolnosti týkající se mého projektu. Následná analýza možností postavit na univerzitě pikosatelit, popř. nakoupit již hotové komponenty pro stavbu, bude tvořit páteř mého snažení. Spolu s nastudováním potřebných komponent pikosatelitu se budu snažit o

řadu diskuzí a konzultací mezi vybranými a doporučenými lidmi z kruhu odborníků ČVUT na všechny záležitosti týkající se toho, aby se mohla tahle kosmická věcička, nebo aspoň její část vůbec vzniknout, což obnáší především zjištění připravenosti technického zázemí vybraných ústavů na ČVUT a odborného personálu pro zkonstruování jednotlivých komponent a jejich přibližnou cenu, případně v kombinaci s nákupem potřebných již hotových segmentů ze zahraničí od specializovaných firem. Po nasbírání potřebných informací přijdou, kromě názorného popisu a představení potřebných komponent, další významné kroky – rozboru konečných finančních nákladů na stavbu nebo nákup komponent, případně kombinace obojího, z čehož vyvodím potřebné závěry pro splnění cíle práce a pro případné další aktivity spjaté s tímto projektem.

2 Systémová analýza CubeSat

Nežli jsem se pustil do zmíněného průzkumu pracovišť a diskuzí s relevantními odborníky na danou problematiku, bylo potřeba se předtím sám v těchto věcech naučit „chodit“. Když tenhle osobní požadavek rozdělím na 3 základní substance, vyjde mi – co chci, jak se to dnes řeší a co vše to v konečném důsledku obnáší. Převedené do jazyka této práce potom přečteme – popis miniaturních satelitů, pojetí mise a technické požadavky mise. Začneme tedy tím prvním.

2.1 Popis miniaturních satelitů

Termín CubeSat byl vytvořen pro označení piko-satelitů, které se řídí normami v dokumentu CubeSat Design Specification (CDS) vydaném California Polytechnic State University (Cal Poly). Tyhle normy dávají univerzitám a organizacím možnost vytvářet, testovat a provozovat cenově dostupné malé satelity v časovém rozpětí dvou až tří let. Předepisují například vnější rozměry, doporučené materiály, zdůrazňují omezení a popisují plány týkající se uvedení na trh. Projekty, týkající se CubeSatů, se v současnosti zabývá přes 100 univerzit a soukromých firem po celém světě s užitečným zatížením zaměřeném na vědecké, soukromé a vládní využití. [2] Jedinečnost každé mise a nulová tolerance pro selhání přinášejí výzvu v podobě systematického a disciplinovaného kosmického projektového managementu a systémového inženýrství. Řada kosmických agentur, korporací, institucí a sdružení vydalo množství ucelených pokynů a zásad, které jsou vodítkem pro správu projektového inženýrství a přístupům k inženýrským projektům, některé z nich speciálně pro vesmírné projekty. I přes malé rozměry jsou tyto aktivity stále časově a finančně relativně náročné, nevyjímaje nejdůležitějšího požadavků na „know-how“.

Velmi důležitou roli všech vznikajících satelitů hraje jejich váha, která má přímý dopad na cenu vyvedení satelitu na oběžnou dráhu, což z pohledu vesmírné mise je jeden z nejvýznamnějších nákladů. Logicky tedy jeden z prvních nabízejících se způsobů, jak dosáhnout její snížení, je jít cestou miniaturizace, navrhnout a vyrobit funkční a plnohodnotný stroj a celkové investované finance pro misi za použití lehkých a malých satelitů se tím pádem mohou razantně snížit. Jednou z nejnovějších aktivit ve směru miniaturizace je vývoj tzv. pikosatelitů, neboli také CubeSatů. Tento standard, jak jsem již zmiňoval dříve, byl vyvinut za spolupráce dvou amerických

univerzit, jejich maximální a zároveň podle mých zjištění nejčastěji navrhovaná hmotnost v přepravním stavu je okolo 1,33 kilogramu, nejmenší je 100 gramů. V téhle záležitosti je možné se dostat ještě více a to až na hodnoty 10 – 100 gramů, jednalo by se ale už o tzv. femto-satelit. Rozměry piko-satelitu mají taktéž své hranice a to délku 100 mm, hloubku 100 mm a výšku $113 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, to vše bez rozevřených solárních panelů. [2] Pro představu - není o nic větší než standartní rychlovarná konvice.

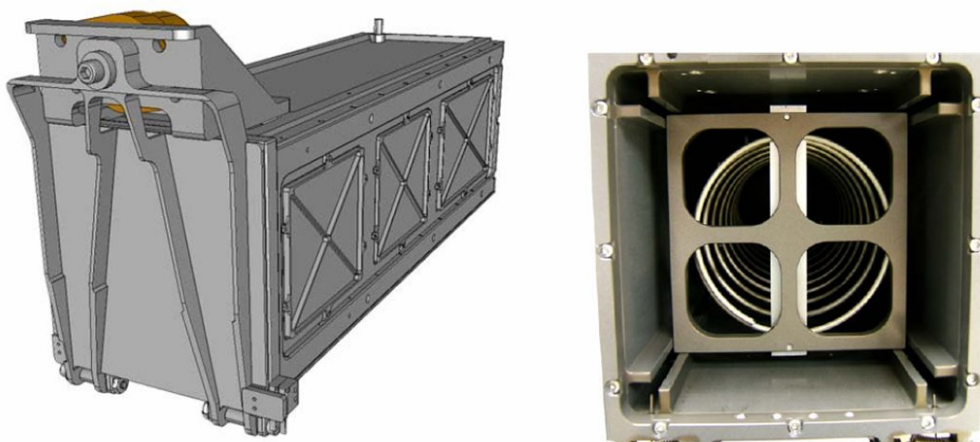
Přítom to neznamená, že by nutně muselo jít o produkt nižší kvality, než jsou klasické velké družice. Malé družice hrají důležitou roli při udržení dostatečně vysoké úrovně technické základny a ve výchově budoucí generace kvalifikovaných pracovníků. Technický pokrok nabízí možnosti, které stavbu malé družice nesrovnatelně usnadnily. Dnešní úroveň mikro a nanoelektroniky, mikromechanických systémů, slunečních baterií, GPS a internetu umožňuje už malé skupině navrhnout a postavit družice, které jsou výkonnější než ty velké před desítkami let. A tento trend bude v budoucnu pokračovat, kdy se pro využití malých družic otevřou dnes ještě netušené možnosti.



Obrázek 1: CubeSat při misi [1]

CubeSaty jsou po vynesení na oběžnou dráhu standardně rozmísťovány za pomoci unifikovaného mechanismu P-POD (Poly PicoSatelite Orbital Deployer), který byl prvně rovněž vyvinutý a postavený v Kalifornské Univerzitě. Je zpětně kompatibilní, tudíž každý pikosatelit vyvinutý podle konstrukční specifikace dokumentu CDS rev.9 a výše, nebude mít problémy s kompatibilitou. Základním požadavkem tedy je dosažení hladké interakce mezi ním a CubeSatem v něm obsaženém. [2]

Jedná se o obdélníkovou konstrukci z eloxovaného hliníku, se dveřmi, pružinovým mechanismem a malými kolejkami, po kterých CubeSat vyklouzne ven. P-POD je namontován na nosnou raketu a při dosažení požadované výšky a obdržení potřebného signálu z rakety vysadí CubeSat do kosmického prostoru. Tohle vypouštěcí zařízení vysadilo 90 procent všech miniaturních satelitů do roku 2006 a 100 procent všech vynesných od roku 2006 do současnosti. Mechanismus tedy slouží jako rozhraní mezi raketou a satelitem a dovoluje „zpracovat“ dva nebo i tři CubeSaty najednou (podle počtu se sestava označuje buď 1U, 2U, 3U), což umožňuje navýšit užitečný náklad, o kterém se ještě zmíním později v kapitole 2.2.



Obrázek 2: 3U pico-satellite deployer [2]

Nejspíše každý bude souhlasit s tvrzením, že v technice se už od dob parního stroje vše ubírá cestou miniaturizace. Vymyslet a vyrobit novou součástku určenou pro provoz ve vesmíru s menšími rozměry a s větší efektivní hodnotou – tohle bylo a bude i nadále tvořit páteř pro budoucnost pilotovaného i nepilotovaného cestování do kosmu. A kde jinde tuhle součástku levně vyzkoušet, než právě na takovéto miniaturní soustavě jakou se představuje CubeSat.

2.2 Pojetí mise

Standartní mise CubeSatu (CS), stejně jako při jakékoliv jiné satelitní misi, zahrnuje do svého kosmického poslání následující prvky:

Cíl mise, užitečné zatížení, platforma satelitu, oběžná dráha, pozemní stanice, nosná raketa.

Samo pojetí mise může s ohledem na systematiku a úkoly mise nabývat značného množství podob. Jejich rozsah musí být upraven tak, aby se mise mohla přizpůsobit omezením, která se mohou vyskytnout. V zásadě to bývá omezený rozpočet, omezený čas a nedostatek zkušeností na straně vývojářů. První kroky modelující misi CS tudíž vedou přes definování časového rámce, rozpočtu a jejího cíle.

2.2.1 Cíl mise

Cíl mise sebou představuje skutečný úkol a význam jednotlivých CS misí. Od všech vědeckých a technologických aplikací mini satelitů se očekává, že dojde k ověření celého satelitu nebo nově vyvinuté komponenty určené pro provoz ve vesmíru, což otevírá nové dimenze jejího použití v komerční sféře. Tato technologická demonstrace je deklarováným cílem většiny CS misí. Ne však u všech. Některé mohou sloužit například jen pro focení zemského povrchu při aktualizaci mapových podkladů, snahy se ubírají směrem například vybavit CS nástroji pro měření zbytků atmosféry v několika stovkách kilometrů, nebo měřit změny v magnetickém poli Země a tím předpovídat zemětřesení, také k robotickým misím všeho druhu, meziplanetárním letům, a jiné. [11]

Asi nejzajímavější oblasti použití pikosatelitů v budoucnosti je při zkoumání Sluneční soustavy, kde můžou podporovat úkoly velkých sond, vozítek jezdících po měsících a planetách nebo dokonce i úkoly povrchově vázaných systému (neboli základen) vybudovaných lidmi daleko od Země. Fantazii se meze nekladou a ve vesmíru to platí na „n-tou“.

2.2.2 Užitečné zatížení

Užitečné zatížení (z anlg. „payload“) je přímo provázané s cílem vesmírné mise, jelikož jediná možná cesta jak ho dosáhnout vede přes úspěšné použití neseného payloadu. Ve většině případů ho tvoří určité nástroje a snímače, které generují údaje z průběhu satelitní mise. Velmi přísná omezení týkající se hmotnosti, objemu a napájení výrazně omezují výběr dostupných nástrojů. Proto byly CS ze začátku považovány vědeckými organizacemi jako alternativa a v současné době se více a více rozvíjí poptávka po miniaturizovaných nástrojích. Pokud se mise nese čistě v duchu technologické demonstrace, pak se za testovací komponentu dá považovat užitečné

zatížení, které ale může být komponentou určitého subsystému satelitu, subsystémem samotným anebo celým CubeSatem. Často není tak jednoduché rozlišit, co patří k platformě satelitu a co jen k užitečnému zatížení. [11]

To tedy může sestávat například z vědeckých přístrojů plnící nějaký primární cíl mise. Vědecké fantazii se meze nekladou, tím pádem to může být například magnetometr shromažďující údaje z oblasti studia kolísání magnetického pole naší planety, které je spojeno se zemětřeseními, dále například speciální přístroje pro doplňkovou komunikaci mezi satelitem a povrchem Země testující datové toky, nebo i mikrolaboratoř vybavenou speciálními senzory na sledování například lidské tkáně a přinášející poznatky o tom, jak lety do vesmíru působí na lidský organizmus a v neposlední řadě detektory na zachytávání částic ze slunečního větru - některé byly vyvinuty i na ČVUT v Ústavu experimentální fyziky a dokonce se od roku 2012 používají na Mezinárodní kosmické stanici v jednom hermetizovaném modulu, kde se jedná o tzv. miniaturizovanou kameru radiace, která pomocí pixelových detektorů Timepix vizualizuje směr energetických částic a mapuje distribuci radiace na oběžné dráze Země. Další byl připevněný k družici Proba-V vynesenu v květnu roku 2013 pro účely mapování zemského pokryvu. Tento detektor se nazývá SATRAM (Space Application of Timepix-based Radiation Monitor) a jeho hlavním úkolem je měření radiačního pole, kterému je družice v kosmickém prostoru vystavena. V případě použití na našem Cubesatu bychom ale museli jít cestou mnohem větší miniaturizace. Nutno však podotknout, že primárním cílem vyslaného mini satelitu může být i obyčejný nácvik různých, avšak kvůli absenci výkonného pohonu, jednoduchých pohybových a přemísťovacích úkonu doplněné o spojování několika obíhajících CubeSatů do jednoho celku a to vše s využitím zákonů orbitální mechaniky.



Obrázek 3: detektor SATRAM na družici PROBA-V [3]

2.2.3 Satelitní platforma

Jak jsem tedy poukázal, základ mise tvoří satelitem vyneseny užitečný náklad. Pro něj však na oběžné dráze požadujeme bezpečný provoz v podmínkách dramaticky se lišících od těch našich na Zemi. Úkolem satelitní platformy je potom umožnění správné mechanické integrace tohoto nákladu, zabezpečení datové komunikace s pozemní stanicí na Zemi nebo zařízením na jiné planetě nebo oběžné dráze, tepelně izolovat celou soustavu, přijímat příkazy pro změny pozice a další, čímž se budu zabývat v kapitole technických požadavků mise. [11]

2.2.4 Oběžná dráha

V současné době se jako nejvhodnější oběžná dráha pro provozování CubeSatů považuje jen v prostoru nízké oběžné dráhy Země (LEO), s výškou 300-800 kilometrů, což je převážně prostor termosféry a přechod mezi ní a exosférou - termopauza. Jedním z důvodů je ten, že příkon pro komunikační subsystém se pro spolehlivý přenos dat s výškou oběžné dráhy razantně zvyšuje, což je pro dnešní CS nežádoucí. Navíc jsou vyšší orbity náročnější na izolaci proti radiaci (s výškou ubývají poslední zbytky atmosféry), tepelné krytí a řízení spotřeby. A z finančního hlediska jednoznačně se vzrůstající oběžnou dráhou rostou i náklady na vynesení satelitu. Vhodnou oběžnou dráhu však určuje poslání mise. [11]

2.2.5 Pozemní stanice

Pozemní segment v sobě zahrnuje infrastrukturu a personál potřebný pro bezpečný provoz satelitu. Vybudování a provozování radioamatérské pozemní stanice je cenově dostupné jak pro soukromé osoby, tak i pro vysoké školy. Se stanicí se dá operovat a přitom provádět analýzu dat. Operace mise můžou být prováděné i více pozemními stanicemi, navíc připojenými k řídicímu středisku. [11]



Obrázek 4: Typický vzhled pozemní stanice nabízené komerčními společnostmi [4]

2.2.6 Nosná raketa

Pro úspěšné vynesení sestavy na oběžnou dráhu je zapotřebí vhodný a spolehlivý dopravní prostředek. V zásadě platí, že CS může být vynesena jakýmkoliv současným kosmickým prostředkem, pokud ovšem projde teplotními a vakuovými testy a dále vibračními testy pro daný typ nosiče. V současnosti však existuje jen velmi malé množství nosičů určených pro CubeSaty a to z toho důvodu, že subjekty vynášející svůj primární náklad (většinou komerční satelity větších rozměrů) musí přijmout CS jako náklad sekundární. Stejně tak i poskytovatel nosiče, kterému to často zkrátka nestojí za to riskovat celý start kvůli možným odchylkám po startu rakety. Naštěstí, s pomocí úsilí institucí z Kanady, USA, Ruska a Japonska, se na oběžnou dráhu dostanou ročně dva až tři CS. [11]

Například bývalé Ruské mezikontinentální balistické rakety (Intercontinental Ballistic Missile - ICBM) Dněpr a Rokot se velmi hodí a využívají pro starty tohoto typu. Ruská Federální kosmická agentura ROSKOSMOS v posledních několika letech projevila iniciativu o vytvoření nového nosiče právě pro malé satelity. Náklady na spuštění budou ale nejspíše velmi vysoké. Zatím nejjednodušší způsob vynesení CubeSatu na orbitu byl za pomoci raketoplánů, dokud jejich služba v červenci 2011 definitivně neskončila.

Z pohledu Evropana mě ale bude prioritně zajímat Evropská kosmická agentura – ESA. Program ESA CubeSat začal v roce 2007, kdy se agentura rozhodla zahrnout naučný užitečný náklad pro svůj úplně první let lehké nosné rakety Vega pro náklady do 2,1 tuny. Provozuje ji společnost Arianspace, která starty zajišťuje z kosmodromu Kourou ve Francouzské Guyaně. Je určena pro vynášení malých družic na LEO. První

start proběhl v roce 2012 právě zde, kdy raketa vynesla mimo devíti satelitů Italské kosmické agentury ještě sedm pikosatelitů evropských univerzit z Itálie, Francie, Rumunska, Maďarska, Polska a Španělska. Více než 250 studentů vysokých škol z těchto zemí se účastnili v jejich navrhování a budování, až se nakonec dostali ke startu a společně představili pestrou škálu navrhnutého designu a implementovaných miniaturních technologií. Za podpory odborníků ESA, akademických pracovníků z vysokých škol a různých národních vesmírných agentur se většině týmů podařilo překonat četné logistické a technické problémy a dodaly satelity před uzávěrkou termínu. Všechny studentské CubeSaty byly tímto nejnovějším evropským nosičem vynesené zcela zdarma.

„Zahájení vynášení CubeSatů na raketě Vega je klíčovým milníkem programu ESA Education CubeSats“, jak se později vyjádřil Roger Walker, vedoucí vzdělávacích projektů ESA. „Jedná se o významný úspěch pro mnoho mladých inženýrů z celé Evropy, kteří získali neocenitelné praktické zkušenosti z práce na misi satelitu od jeho koncepce až po jeho službu na oběžné dráze“, dodal

V únoru 2013 byl v rámci ESA spuštěn další studentský projekt pod názvem „Fly Your Satellite!“. Tímhle ESA nabídla Evropským Studentským týmům zabývajících se stavbou pikosatelitů navrhnout pro tenhle program jejich satelit. Tato iniciativa je však každoročně zaměřená pouze na testování vybraných vysokých škol s pokročilou fází vývoje svých strojů, tzn. týmy, které už sestavují Cubesaty v rámci vysokoškolských kurzů, se mohou přihlásit se svým projektem. Studenti následně dostanou možnost konzultací s předními odborníky během celého procesu stavění satelitů až po testování a využití prostor školícího centra ESA Redu v Belgii .

Spolupráce a výměna know-how, kterou ESA podporuje mezi univerzitními týmy, studentům určitě pomáhá se lépe připravit na jejich budoucí kariéru. Budou těžit jak ze zvýšených schopností a motivace, tak z bohatých zkušeností získaných při tomto důležitém poslání a práci s vysoce kvalifikovanými odborníky.

2.3 Technické požadavky mise

Kromě standartních specifikací navázaných na vývoj CS se však každý vývojový tým rozhoduje sám, jak pojme konstrukci svého satelitu. Jinými slovy lze konstatovat, že CS sice zvenčí vypadají velmi podobně, uvnitř ale naopak nalezneme velmi odlišné

přístupy a aplikované odborné znalosti vývojářů. Podle zjištění jedna společná věc ale některé CS spojuje, a to použití již hotových komerčních elektronických řešení, tzv. commercial off-the-shelf, která ale se již nedají nijak upravovat nebo vylepšovat podle požadavků provozovatele. Je to z důvodu zachování co nejnižší ceny stroje, jelikož stavět z jednotlivých dílů certifikovaných pro práci ve vesmíru by bylo dražší. Výhodou je o něco menší hmotnost a menší spotřeba oproti jejím certifikovaným protějškům, nevýhodou je někdy po uvedení na trh jejich zastaralost. [11]

Zpravidla platí, že užitečné zatížení a cíle mise mají přímý vliv na konstrukci CS a jeho subsystemy, jejichž požadavky se odvíjí od těchto dvou kritérií. Nyní se podíváme na to, které základní subsystemy tvoří miniaturní satelity.

2.3.1 Systém řízení polohy

V současné době se používají jen velmi vzácně, CS většinou vlastní jen velmi jednoduchý polohovací systém nebo tímto systémem vybaven není. Důvod je prostý, a to že pro tak malá zařízení neexistují v podstatě žádné vhodné pohony a čidla, které známe z větších satelitů. Ty spotřebují pro provoz velké množství energie a právě zde je z pohledu miniaturizace v budoucnosti velký potenciál.

Nejjednodušší formou ovládnout a jednosměrně polohovat náš CS je za použití permanentních magnetů. Jejich účinek stabilizuje satelit tak, že zabraňuje jeho rotaci, avšak neumožňuje řízeného polohování podle potřeby. Menšího vylepšení se dosáhne při použití magnetických cívek a magnetometru. Nijak zvlášť velká přesnost se od tohoto řešení neočekává. Průkopníci však neusnuli na vavřínech a již teď existují snahy rozvíjet komponenty, jako jsou piko reakční kola spolu s miniaturními senzory. Již minimálně jeden prototyp takového subsystemu byl postaven na Technické univerzitě v Berlíně a následně byly vyzkoušeny v satelitech BeeSat-1 a BeeSat-2, který je na orbitě doteď od roku 2013. Cílem je dosáhnout takové přesnosti, která je dnes možná u tzv. nanosatelitů, což jsou miniaturizované satelity principiálně podobné pikosatelitu, avšak s hmotností v rozmezí 1 – 10 kg a s většími rozměry. Pokud toho bude dosaženo, tenhle precizní systém bude vyžadován snad u všech budoucích navrhovaných pikosatelitů. Složitost polohování CS kolem svých 3 os se nijak neliší od jeho větších bratrů, jen požadavky na spolehlivost budou nejspíše o něco menší kvůli zachování stále přijatelných cen. [11]

2.3.2 Pohonný systém

Co se týká pohonu, tak v současné době zde platí přibližně to samé, jako u polohování. Neexistují žádné. A stejně tak i vývoj se to snaží změnit, a to směrem k chemickým a elektrickým pohonům. Z chemických stojí za zmínku hnací jednotka se studeným inertním plynem nebo systém využívající horkou vodní páru. Oba systémy mohou produkovat na krátkou dobu nezanedbatelný tah. Elektrické naproti tomu využívají impulsní energii elektronů nebo iontů, která poskytuje nízkou, ale trvalou úroveň tahu. Další možnosti pohonu je dobře známý a zkušenostmi prověřený princip využívání gravitace velkých těles, od malých měsíců až po největší Jupiter (u Slunce by to satelit z důvodu velkých okolních teplot nestihl). Těhle princip využívají kosmické prostředky již od počátku vesmírných programů. Gravitace tělesa razantně zrychlí prolétající předmět a s pomocí správných propočtů orbitální mechaniky je možné satelit nebo vesmírnou loď navést na požadovaný kurz. [11]

2.3.3 Komunikační systém

Předpoklad správné komunikace je schopnost satelitu přijímat úkoly a odesílat dat zpět na pozemní stanici. Subsystémy mezi sebou interagují pomocí binárních dat a rádiové komunikační spojení využívá elektromagnetické vlny. Oproti výkonu při datovém přenosu CS používají stanice na Zemi pro nahrávání příkazů výkon mnohem vyšší, přitom množství dat přenesených na satelit je jen zlomek toho, co on přenáší zpět. Zde je zapotřebí mít co nejspolehlivější spojení na úkor vysoké přenosové rychlosti. Jedním z řešení je použití tzv. tónové volby (DTFM), která je určena pro přenos ovládacích signálů, kde se dá vyvinout rychlost do 10 znaků za sekundu, což odpovídá 5 Bytům za sekundu.

Snad všechny CS vysílají vlastní signál obsahující jeho volací značku a nejdůležitější informace o jeho stavu. Provádí se to v Morseově abecedě s využitím binárně modulačních technik přepínajících nosnou vlnu na zapnutou nebo vypnutou. Signál je také používán pro lepší sledování satelitu. [11]

2.3.4 Napájecí systém

Zatím jediným zdrojem energie, který může být použit na pikosatelitu je přeměna slunečního záření na elektrickou energii při využití fotovoltaického jevu

solárních panelů. Vzhledem k malým rozměrům CS a nutnosti namontovat panely s celkově malou plochou, musí být přeměna co nejefektivnější. Zde se nabízejí galium-arzenové solární články, jež nabízejí jedny z nejlepších vlastností, avšak při velké ceně a složité dostupnosti. Pokud je v plánu udržovat CS aktivním i v zemském stínu, což je žádoucí při některých elektronických aktivitách, potom musí být do systému zabudována baterie. Z důvodu vysoké hustoty energie činící 200 Wh/kg se v tomto případě používají moderní lithium-iontové akumulátory. Dosahuje se tím vysoké kapacity při malém objemu a hmotnosti společně s výhodou skoro žádného samovybití a výrobou v různých tvarech. Nevýhodou je životnost, která se při dlouhodobě udržovaném stoprocentním nabití docela rychle zkracuje.

Úkolem napájecího systému je tedy vytvořit a distribuovat energii. Úroveň energie, nebo přesněji úroveň napětí, jsou ze solárních článků nebo baterii na úroveň potřebnou pro napájení podsystémů transformovány za pomoci DC/DC měniče, což je stejnosměrný měnič s tranzistory, diody a dalšími součástkami pro spínání, změnu napětí, nebo galvanické oddělování obvodů, obecně pro převody mezi různými stejnosměrnými napájecími soustavami. Nejběžnější hodnota napětí pro napájení elektronických obvodů je 3,3 – 5 V. Vybrané obvody nebo celé podsystémy lze pomocí tranzistorů zapínat a vypínat, jako například resetování palubního počítače nebo převedení satelitu do režimu úspory energie. [11]

2.3.5 Řízení a zpracování dat

Palubní počítač je centrální jednotka sloužící ke zpracovávání číslicových procedur a dat produkujících satelitem. Počet palubních výpočetních jednotek v závislosti na množství a obtížnosti úkolů může být i několik. Všechny informace ale stále povedou přes hlavní počítač – mikro kontrolér – který v sobě zahrnuje zpravidla vše potřebné k tomu, aby mohl obsáhnout celou aplikaci, aniž by potřeboval další podpůrné obvody. Na výběr se nabízejí množství moderních MCU (Micro Control Unit), široce používány jsou mikro kontroléry HCS12 a Intel 8051, s jehož programováním pomocí Assembleru jsem se setkal již na střední škole. U MCU se dbá na to, aby měl všechna potřebná rozhraní a dostatek vstupních a výstupních pinů. Za příklad je vhodné uvést sběrnici I2C, jejíž systém je široce používán v zábavní elektronice, díky své jednoduchosti je vhodný rovněž i pro CubeSaty. Díky tomuto systému můžou MCU komunikovat s dalšími komponenty a ovládat je.

Kromě přijímání a provádění příkazů z pozemní stanice musí palubní počítač umět číst a ukládat potřebné údaje. Ty dočasné se ukládají do statické paměti SRAM (bistabilní klopný obvod), která na rozdíl od DRAM k uchování nepotřebuje jejich periodickou obnovu, je však konstrukčně složitější, než paměťová buňka DRAM, proto má při stejné hustotě integrace menší kapacitu. Pro zapamatování jednoho bitu je zapotřebí v SRAM 6 tranzistorů oproti jednomu v DRAM. Další údaje potřebné v delším časovém horizontu anebo velké množství jednorázových dat jsou ukládány v elektricky programovatelné blokové paměti typu flash. Tento typ uchovává data i přes vypnuté napájení. Vznikají však otázky ohledně radiačního působení na tuto paměť ve stavu bez napájení. [11]

2.3.6 Systém tepelné kontroly

Při typické nízké oběžné dráze se CS nachází zhruba 60 minut v působení slunečního záření a přibližně 30 minut je zakrytý stínem Země. Ve stínu je satelit vystaven teplotám blízcím se absolutní nule (až okolo -270°C), kdežto Slunce na něj působí energii rovnající se jedné solární konstantě plus odražené světlo od zemské atmosféry a od Země samotné, tzv. albedo. Solární konstanta znamená tok sluneční energie kolmý na směr jeho paprsků procházející za 1 sekundu plochou 1 metrem čtverečním a činícím asi $1,37 \text{ KW/m}^2$. Dopředu se musí počítat s vnitřními teplotami CS v rozmezí -20 a $+80^{\circ}\text{C}$ při vystavení přímého osvětlení Sluncem.

Jelikož je většina průmyslových dílů postavena tak, aby tyto teploty neměly pro jejich provoz nijak zásadní vliv, pro některé části musí být přijata zvláštní opatření. Týkat se to bude určitých měřících zařízení nebo baterie, které nemohou pracovat při nízkých teplotách. Aby se zde zabránilo podchlazení prvku tak nestačí použít pasivní prvky jako barva, struktura povrchu, atd., ale přichází na řadu povinnost vybavit CS nějakým aktivním ohříváčem. V této sféře se nabízejí topné fólie, které bohužel spotřebují velké množství energie, a proto je vhodné velmi pečlivě naplánovat a optimálně nakonfigurovat CS tak, aby se doba vytápění mohla minimalizovat. [11]

2.3.7 Struktura a mechanismy

Jak již jsem zmínil, vnější struktura je definována ve speciální příručce pro návrh pikosatelitů. Kromě toho je zapotřebí splnit jeden speciální požadavek a to

navrhnout tzv. přístupový otvor, který se použije pro přístup k satelitu a odstranění kolíku „remove-before-flight“, po kterém je CS připraven k probuzení a zahájení své činnosti. Kolík se odstraňuje po zaintegrování CS do P-PODu. Jinou možností je vypustit satelit s vybitými bateriemi a nabít je neprodleně po vynesení na LEO. Skutečná výzva spočívá ale v konstrukci jeho mechanismu. Podmínky pro vnější rozměry nepřipouštějí žádné velké připevněné části. Mezi stěnami CS a P-POD je pouze 6 mm volného prostoru. Anténa a solární panely se tomuhle omezení musí přizpůsobit. Totéž platí i pro všechny vnitřní díly. Nestačí je pouze zmenšit a vtěsnat do útvaru ve tvaru krychle. Struktura CS by se měla rozdělit na úrovně a na některé z nich může být celé jedno pole sestávat z nezávislých na sobě elektronických systémů a při tom všem je nutné správně provést případnou kabeláž. Uvedl jsem také, že se CS dají pospojovat do dvojitých a trojitých segmentů. Tenhle krok výrazně přispívá k získání velmi vzácného prostoru pro komponenty a zvyšuje energetickou kapacitu. [11]

2.4 Zrození pikosatelitu

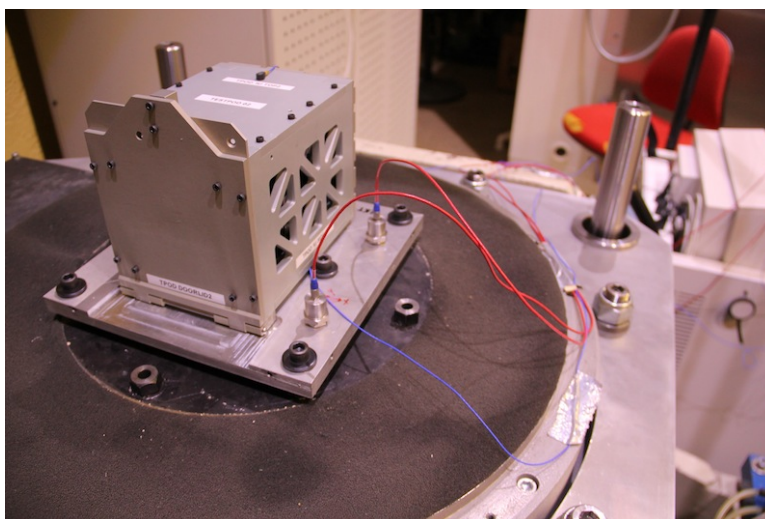
Nežli se CS dostane do finální podoby, prochází celou řadou testovacích procedur, jejichž přesnost a přísnost graduji z jedné fáze projektu na další. CS se postupně stává nejdříve prototypem, provozním modelem a konečně letovým modelem. Tyhle 3 stavy však můžou obsahovat i svoje sub stavy a to zpravidla kvůli nedostatku zkušenosti vývojového týmu.

2.4.1 Prototyp

První kroky vedoucí k ověření všech klíčových funkcí vedou přes stavbu prototypu. Jako každý satelit i tenhle musí projít pečlivou kontrolou a důkladným testováním před tím, než je vypuštěn do vesmíru, aby odolal náročným podmínkám mimo zemskou atmosféru. Ověřují se funkce jak jednotlivých dílu, tak jejich vzájemná spolupráce a to vše v podmínkách simulující práci v kosmickém prostoru a tahle práce je odpovědnosti jen a jen uživatele Cubesatu. Pro příklad nejdříve uvedu aplikovanou baterii, která není certifikována pro činnost v kosmickém prostoru a musí být důkladně otestována. V tomto případě se baterie dlouhodobě vystaví umělému vakuu a při tom se na ní provádí nespočet cyklů nabití a vybití. Když je následně CS zkonstruován (všechny subsystemy a elektronické součásti implementovány do jeho kostry),

podstupuje satelit dalo by se říct až extrémním environmentálním zkouškám, tzv. Assembly, Integration and Test (AIT).

Fázi AIT zpravidla považujeme za nejkritičtější fázi vývoje CS. Jednotlivé díly musí být testovány v předstihu, abychom zajistili vysokou pravděpodobnost správného fungování i ve složené sestavě a to se týká i použitého software, u kterého se můžeme dostat například do nekonečných smyček prováděného úkolu komponenty, což je nežádoucí. Míse se simuluje se všemi příslušnými okolnostmi, jako je odesílání příkazů a příjem dat. Cílem a snahou je tedy odhalit a opravit jakékoliv případné chyby, jelikož všechno, co bylo navrženo a testováno jednotlivě, nemusí podávat stejně dobré výsledky v plně integrovaném systému. Nezapomínejme, že je velmi důležité ověřit nejen schopnost „přežít“ komponent ve specifických kosmických podmínkách, ale i také schopnost správného plnění úkolů pro jaké tyhle komponenty byly navrženy. Do AIT tedy spadá test integrace, test na odolnost při vibracích a tepelně-vakuový test. [11]



Obrázek 5: Norský pikosatelit HiNCube při vibračních testech [5]

2.4.2 Provozní model

Po úspěšném provedení a uzavření všech testů s prototypem se vývoj dostává do fáze tzv. provozního modelu. Výsledky se prodiskutovávají, přezkoumávají a srovnávají s dříve sestaveným protokolem Critical Design Review (CDR). CDR se provádí pro každou konfigurační hardwarovou položku (stejně tak pro software) před jejím zhotovením, aby se zajistilo splnění požadavků při nasazení do činnosti. Jakékoliv možnosti změny designu, konstrukčních prvků a rozhraní jsou v této fázi

zmrazeny a provádí se jen, je-li to nezbytně nutné pro další pokrok. Provozní model je zapotřebí už mít navržený tak, aby co nejvěrněji odpovídal funkcím budoucího letového modelu (flight model). Týká se to přesněji mechanických a elektrických parametrů. [11]

2.4.3 Letový model

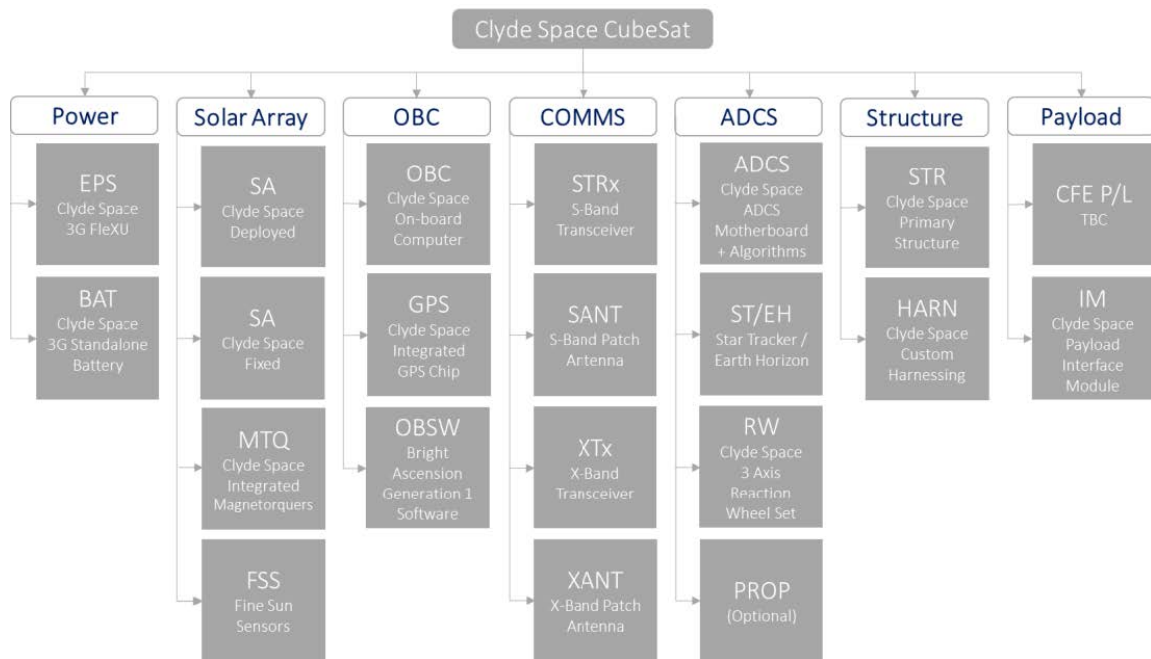
U letového modelu se není třeba nijak moc rozepisovat. V ideálních případech se z provozního modelu stává letový, většinou se ale najdou nějaké odchylky od našich požadavků. Děje se to v průběhu kvalifikačních zkoušek AIT kde hledáme právě tyto odchylky a rozdíly a snažíme se opravit drobné problémy. Letový model je připraven k integraci na nosnou raketu, přesněji do P-POD. [11]

3 Analýza vhodné strategie nákupu nebo vývoje komponent

V této části bakalářské práce se již dostáváme k záležitostem vedoucím k vytvoření fyzického pikosatelitu. Zde se z počátku budu opírat o množství veřejných informací poskytovaných přímo vybraným oficiálním výrobcem a dodavatelem z účelem zjištění potřebných nákladů na získání potřebných komponent jinak než zaúkolováním lidí na naší univerzitě. Na internetu byly nalezeny desítky oficiálních zdrojů napříč celým světem zabývající se více či méně prodejem vlastních dílů jak certifikovaných pro provoz v kosmických podmínkách tak i bez certifikace. Sortiment na stavbu kompletního CS však nabízí jen hrstka z nich a proto se zaměřím právě na tyto zdroje, aby nedošlo k promíchávání komponent od různých společností což by pravděpodobně mohlo přivést ke značné neintegritě a nesprávné funkčnosti celku. Analýze vývoje komponent u nás na univerzitě se budu věnovat v kapitole následující, kde také popíšu postup výběru pracovišť a osob a získaných informací od nich.

3.1. Stavíme družici, zn.: levně

Pro případný nákup potřebných komponent po řadě srovnávání (náklady, zkušenosti, nabízený sortiment) vybral společnost ClydeSpace sídlící ve Skotsku. Založená roku 2005 a pojmenována podle řeky protékající městem Glasgow je na poli „kosmických krámů“ velmi ceněným světovým dodavatelem malých a velmi malých certifikovaných součástek nebo části pro práci ve vesmíru. Společnost má zkušenosti s více než 50 kosmickými programy, kde podporovala nebo podporuje koncepční návrhy, vývoj, integraci a testy všelijakých technických řešení určených pro vynesení na naší oběžnou dráhu. Podílí se samozřejmě i na analýzy dat z orbitálních operací. Zákazníci ClydeSpace patří k mezinárodním univerzitám, obchodním a průmyslovým společnostem, vládním organizacím. Asi 80 procent prodávaného sortimentu však jde mimo Evropskou unii včetně Spojeného království. Následující stránky kapitoly budou patřit praktické ukázce toho, co v sobě zahrnuje takový typický nákup kosmických součástek z pohodlí a tepla domova a jeho cenu. Při psaní této části práce došlo i na emailovou komunikaci mezi mnou a vedoucím týmu pro rozvoj podnikání firmy Peterem JW Andersonem a prodejním inženýrem Jane McLeodem. Několik jejích rad mi pomohlo ještě lépe se zorientovat v problematice nákupu komponent.



Obrázek 6: Typická architektura systému CS [6]

3.1.1 Kostra CS

První co nás bude zajímat je kostra – tedy duralová krabice do které se musí všechno vlézt, spolu s obalem kostry, kde se jedná o šest čtvercových duralových stěn připevněných na bocích kostry plnicí účel jak esteticky (satelity s odhalenými vnitřnostmi nikde nelétají), tak především ochranný, jelikož jednou z vlastností duralu (slitiny hliníku, mědi, hořčíku, zinku, atd.) je nezanedbatelná radiační ochrana v důsledku jeho molekulární stavby. Zásadní požadavky na mechanickou část kostry našeho Cubesatu velikosti 1U jsou:

- hmotnost, vnější konfigurace a rozměry by měly odpovídat specifikacím vnějších parametrů CS publikovaných v příručce CDS (Cubesat Design Specification) a které přikládám do přílohy.
- externí komponenty použité na CS se nesmí dotýkat vnitřního okolního povrchu vypouštěcího zařízení P-POD kromě vypouštěcích kolejnic, kterých se CS po zaintegrování dotýká
- šířka kolejnic CS musí být minimálně 8,5 mm, jejich zdrsnění nesmí být větší než 1,6 μm , jejich okraje musí být zaobleny s poloměrem nejméně 1 mm

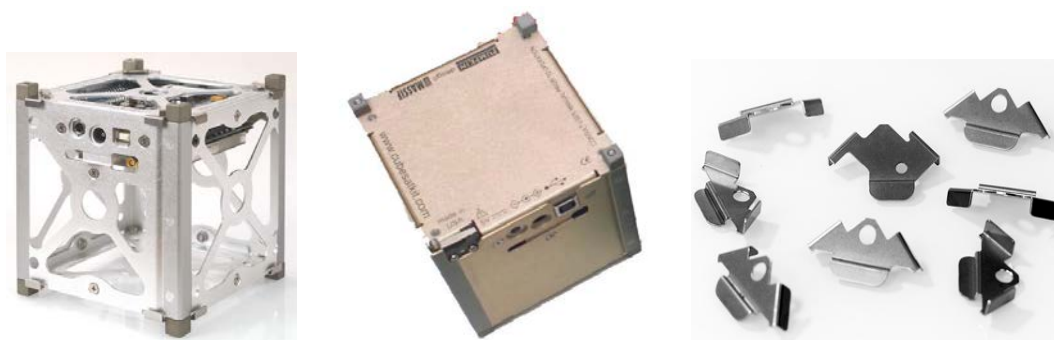
- váha 1U CS nesmí přesáhnout 1,33 kg, jeho těžiště se musí nacházet v oblasti max. 2cm od jeho geometrického středu
- pro výrobu kostry CS a jeho kolejnic musí být použity slitiny hliníku 7075 nebo 6061. Pro použití jiných materiálů se musí vyplnit tzv. Deviation Waiver Request – DAR, což je požadavek na schválení odchylek při výrobě a jejich konzultace s Ústavem leteckého inženýrství Kalifornské univerzity.
- kolejnice CS musí být z tvrdě eloxovaného hliníku (odolnost vůči korozi a opotřebení kluzných částí)
- P-POD nesmí žádným způsobem zabraňovat vypuštění CS

Tyhle a další požadavky samozřejmě u své nabízené kostry CS splňuje vybraný výrobce a dodavatel ClydeSpace. Pokud máme úplně ucelit vnější mechanickou část CS, tak sem zahrneme i set speciálních osmi svorek sloužících k budoucímu připevnění solárních panelů k našemu CS. Speciální kolík „remove before-flight“, po jehož vysunutí se začnou z baterii napájet systémy CS, nezahrnu a budeme uvažovat nabití baterii až na oběžné dráze. Jeho cena by jinak byla 50 dolarů. Kostra může být na ČVUT realizována (viz kap. 5.1.1)

Cena u téhle kostry je stanovena na **925 dolarů**

Cena šesti stěn pro kostru CS je stanovena na taktěž na **925 dolarů**

Cena osmi svorek pro připevnění solárních panelů je stanovena na **425 dolarů**



Obrázek 7: kostra a zevnějšek krytého CS spolu se sadou svorek [7]

Další zásadní bezpečnostní požadavky se týkají vnitřku CS, tj. jeho elektrických a elektronických komponent:

- při startu nesmí být aktivní žádná elektronika vč. hodin, aby se zamezilo jakémukoliv radiofrekvenčnímu rušení s nosnou raketou nebo primárním

užitečným zatížením. CS musí být plně deaktivován nebo vynesena s vybitými bateriemi

- jako možnost dočasné deaktivace CS je zapotřebí na 2 protilehlé konce jeho kolejnic zabudovat jednoduchý mechanismus tzv. deployment switch, který je sepnutý a odstříhne CS od proudu z baterií při jeho integraci do P-PODu, po vypuštění CS tento mechanismus sepne a CS a proud postoupí z baterie do všech subsystémů
- v případě kolíku remove-before-flight, musí po jeho zasunutí do CS odstříhnout dodávku energie od baterie do zbytku CS, také nesmí vyčnívat více než 6,5 mm od okraje postranních kolejnic a taktéž musí dojít k jeho odstranění před vložením CS do P-PODu
- podle předpisu FCC (Federální komise pro komunikace) musí CS umět vypnout veškeré svoje vysílače po obdržení příkazu k jejich vypnutí
- všechny rozevírací součásti CS jako anténa nebo solární panely se rozevřou minimálně 30 minut po vypuštění CS do volného prostoru. Stejná doba se týká i zahájení činností všech rádiovysílačů s výkonem větším než 1 mW.
- provozovatelé CS musí získat potřebné licence a povolení pro používání frekvencí svých strojů
- doba setrvání na oběžné dráze nesmí překročit 25 let po skončení cíle satelitu, provozovatel obdrží od příslušného úřadu dokumentaci s doporučeným plánem pro tuto dobu setrvání v rámci regulace množství kosmického odpadu na oběžné dráze

3.1.2 Systém elektrické energie - EPS

EPS (electrical power systém) zajišťuje výrobu a ukládání elektrické energie.

Také zvládne dodávky dílčím subsystémům. Ten nabízený naší vybrané společnosti a určený pro 1U CS nese následující vlastnosti:

- separátní rozdělení řízení příjmu elektrické energie ze solárních článků
- široká škála v možnostech výstupního napětí, sběrnice poskytující 2,5V, 3,3V, 5,5V, 12V a případné další hodnoty můžou být dostupné na vyžádání

- komunikuje s více typy solárních panelů, např. s jedním rozevřeným a druhým připevněným na stěnu CS
- kompatibilní s Lithium Intovými a Lithium Polymerovými bateriemi
- ochrana sběrnice proti nadměrnému proudu a baterie proti podpětí
- je kompatibilní s USB sběrnici pro testování na Zemi
- použití pro CS a nanosatelity s výkony do 50 W
- pro funkce telemetrie a ovládání řízení el. energie je vyhrazen mikrokontrolér I2C, do kanálu telemetrie je zahrnuto sledování proudů, napětí a teplot komponenty, EPS umí zastavením a obnovením napájení resetovat každou sběrnici k ní připojenou
- pro transformaci napětí ze solárních panelů na hodnotu potřebnou pro napájené komponenty je zde využito DC-DC měničů (stejnoseměrný měnič s tranzistory a dalšími součástkami)

Cena téhle životně důležité komponenty přijde pro případného zákazníka na **3650 dolarů**. EPS může být na ČVUT realizován (viz kap. 5.1.2)



Obrázek 8 : 1U cubesat EPS [7]

3.1.3 Baterie pro cubesat

Pokud provozovatel pikosatelitu nechce, aby jeho stroj každou hodinu a půl periodicky nestřídal svoji činnost a nečinnost v důsledku vycházení a zacházení do stínu Země (což je pro misi standartního CS plnicí neustálé úkoly nepřijatelné), tak do něho zabuduje baterii. Parametry té naše jsou:

- Li-Pol, hustota energie 150 Wh/kg

- vhodná pro pracovní zátěž ve vakuu
- integrovaný ohřívač s termostatem udržuje teplotu baterie nad 0 °C
- integrovaná nadproudová ochrana
- sledování teploty, výstupního napětí a proudů pomocí integrovaného digitálního rozhraní
- standartní výstupní napětí 8,2V a 32,8V, na požádání je možné napětí změnit
- další snížení špatných radiačních vlivů díky hliníkovému krytu baterie
- kapacitu lze zvýšit paralelním zapojením více kusů, pro 1U cubesat z důvodu nedostatku místa ne moc ideální
- zaručená životnost je stanovena na 5000 cyklů nabití a vybití (minimálně rok provozu při plném nabíjení a vybití s každým oběhem, dá se očekávat ale až 35000 cyklů v závislosti na vytiženosti baterie.

Cena baterie v případě nákupu bude činit **1800 dolarů**. Baterie může být na ČVUT realizována (viz kap. 5.1.2).



Obrázek 9: 1U cubesat baterie [7]

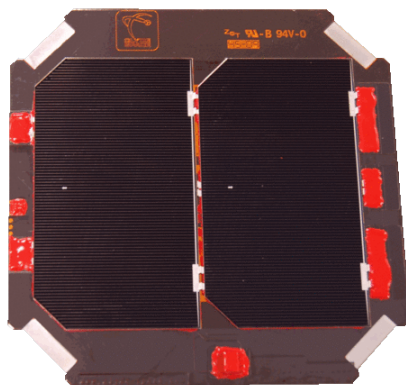
3.1.4 Solární panely

Mít neustále přísun energie v místech kde není absolutně nic, natož nějaké známky energie, je na první pohled asi velmi bláhový požadavek. Nebo spíše byl, než Francouzem A. C. Becquerelem v roce 1839 objevil fotovoltaický jev, který se v kosmonautice používá skoro od jejího samého počátku. První funkční článek byl vyroben ale po dalších 45 letech a tak jak ho známe dnes spatřil světlo Slunka

v polovině minulého století. Energie slunečního svít ve vakuu a ve vzdálenosti od Slunce 1 astronomické jednotky (vzdálenost Země a Slunce) činí úctyhodných 1,37 KW/m². Bohužel účinnost dnešních solárních článků nedosahuje nijak závratných hodnot. Podíváme se na jeden nabízený firmou ClydeSpace:

- panel je sestaven s pomocí ověřených výrobních procesů a skládá se z báze uhlíkových vláken, slitiny hliníku a polovodičovými nebo organickými prvky měnící elektromagnetickou energii světla na energii elektrickou
- panely jsou vyráběny ve vysoké kvalitě a sledují standardy ESA, a to hlavně: nanotechnologie – otevírají nové možnosti svobody pro konstruktéry materiály na bázi nitridu – ten slouží jako prostředek ke zvýšení efektivity současných článků nad 30%
- integrované teplotní čidlo a ochranné diody proti přepětí
- na každém panelu jsou dva solární články, poskytovaný výkon z jednoho panelu je 2,1 W
- nabízí se možnost nákupu 3 panelů s magnetickými cívkami a 3 bez nich – integrované magnetické cívky jsou vlastně solenoidy pro vytváření magnetického pole a kroutícího momentu na kosmické lodi, který je využíván systémem řízení polohy
- každý CS má obvykle tři solenoidy kolmé na sebe, aby umožnily ovládání ve všech osách
- k zajištění snadné integrace s naším CS poskytuje ClydeSpace detailní 3D model a podrobný uživatelský manuál

Cena **jednoho** takového panelu vyjde na **2500 dolarů**, pro obložení celého CS šesti takovými panely pak na solidních **15000 USD**. Podobné solární panely nemohou být na ČVUT realizovány (viz kap. 5.1.2).

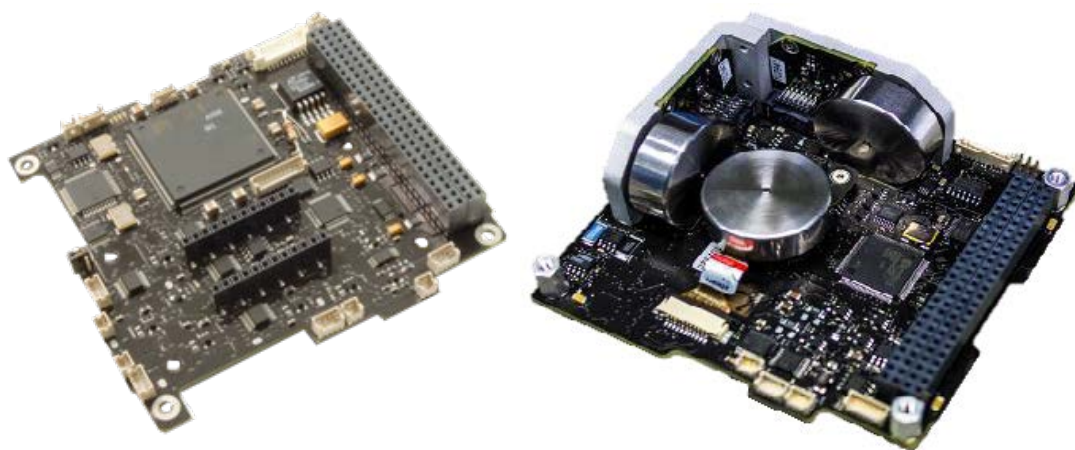


Obrázek 10 : 1U CS panel se dvěma solárními články [7]

3.1.5 Systém určování a řízení polohy

V kapitole 2.3.1 jsem se zmínil o možnostech ovládání našeho malého satelitu. Nedával jsem tehdy tomu moc šancí, ale v případě hardwarového řešení od téhle firmy máme přece jenom možnost určit a dokonce i ovládat náš CS podle potřeby. Jedná se o komponentu ADCS (Attitude Determination and Control System) zabírající minimum místa pro 1U cubesaty, pro 2U a 3U je robustnější a jsou v ní rovnou integrovány reakční kola pro přesnější a snazší polohování. U naší 1U platformy si musíme vystačit s trochu hrubším polohováním s pomoci kombinace ADCS a solárních panelů s integrovanými solenoidy. V modulech ACDS je implementována široká škála řídicích algoritmů, které lze přizpůsobit našim potřebám – například zamezit klesání k Zemi, natočení ke Slunci nebo Zemi dle aktuálních potřeb, atd. Součástí modulu je mimo jiné i GPS přijímač udávající informace o rychlosti a poloze.

Cena: **2000 USD**. ADCS modul může být na ČVUT realizován (viz kap. 5.1.2).



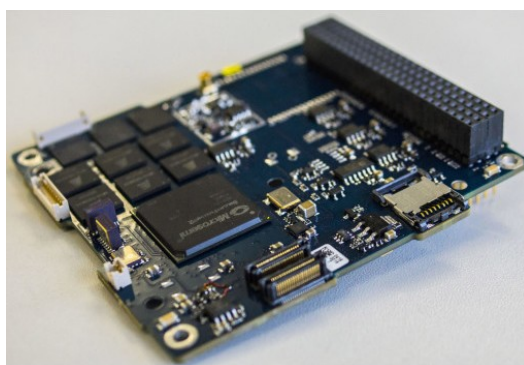
Obrázek 11: ADCS modul bez kol a s reakčními koly [7]

3.1.6 Palubní počítač

Mozek, propojující všechno v každém satelitu, případně kosmické lodi, se nazývá palubní počítač. Ten nám zpracovává a poskytuje data prostřednictvím připojených okolních zařízení/komponent (například z kamery, ze senzorů, atd.) pomocí předem vytvořeného a nahraného do jeho paměti programu. Počítač firmy ClydeSpace je výkonná jednotka speciálně navržena pro mise malinkatých satelitů a založena na prověřeném procesoru Cortex-M3 s taktem 50 Mhz, 8 MB operační paměti MRAM (informace jsou zde uloženy pomocí magnetického pole oproti elektrickému v SRAM), 4 GB flash paměti pro ukládání dat všeho druhu, slot na microSD kartu navyšující možnosti ukládání. Komponenta nabízí dodatečnou flexibilitu a přizpůsobitelnost tím, že poskytuje širokou škálu dalších rozhraní pro užitečné zatížení, snímače, akční členy (část soustavy převádějící informační část procesu na technickou), atd. Další vlastnosti a parametry tohoto mozku jsou:

- ochrana proti vzniku Latch-up efektu, tj. nežádoucího vysoko-proudového stavu, který může vést k selhání polovodičové struktury, resp. přetrvávat až do odpojení napájecího napětí
- zjišťování a oprava chyb v operační paměti pomocí implementovaného kódu SEC-DED (single-error correcting and double-error detecting). Technologie detekce a opravy chyb slouží ke kontrole integrity dat uložených v paměti. Pro nejběžnější implementace je základem schopnost opravit chybu jednoho bitu a případně odhalit chybu ve dvou bitech
- rozsah provozních teplot: -40 °C až 80 °C
- výkon 0,4 mW typický, 1 W max

Cena: **4400 USD**. Palubní počítač může být na ČVUT realizován. (viz kap. 5.1.2).



Obrázek 12 : Palubní počítač CS [7]

Tento palubní počítač je programovatelný softwarovým řešením Bright Ascension Gen1 On-Board Software. Tento všestranný produkt od naší posuzované firmy byl poprvé použitý u projektu UKube-1, což byl první 3U CS Spojeného království vnesený do vesmíru v červenci 2014. SW je snadno přizpůsobitelný pro široký rozsah misí. Umožňuje sofistikované operace kosmických lodí se širokou škálou konfigurovatelných monitorovacích a automatizačních funkcí. Provozní koncepce může být snadno přizpůsobována v průběhu celého vývojového procesu CS. Jedny z možností software jsou :

- dálkové měření, dálkový přenos dat, sdružování, shromažďování a ukládání dat, evidování událostí, plná automatizace s provozními harmonogramy, podpora všech ClydeSpace podsystémů a dodání kompletní související dokumentace.

Cena: 15000 USD

3.1.7 Komunikační zařízení

Ze základního vybavení standardního CS jsme dospěli k poslednímu. Jedním z možných hardwarových řešení pro komunikaci je nabízen S-Band Transmitter, což je kompaktní vysílač určený pro CS mise a pokrývá i potřebu vysokých přenosových rychlostí. Díky QPSK modulaci dosahuje rychlostí až 2 Mb/s (tvoří základ například systému digitální televize DVB-T). Používá kódování otevřené sítě založené na specifikaci IntelSat IESS-308, díky níž je tento produkt kompatibilní s levnými komerčními přijímači.

Spolu s tímto vysílačem je nabízená tzv. patch anténa, což je kruhově polarizovaná flíčková anténa. Její malé rozměry, nízký profil a vysoká směrovost z ní dělají výborný doplněk.

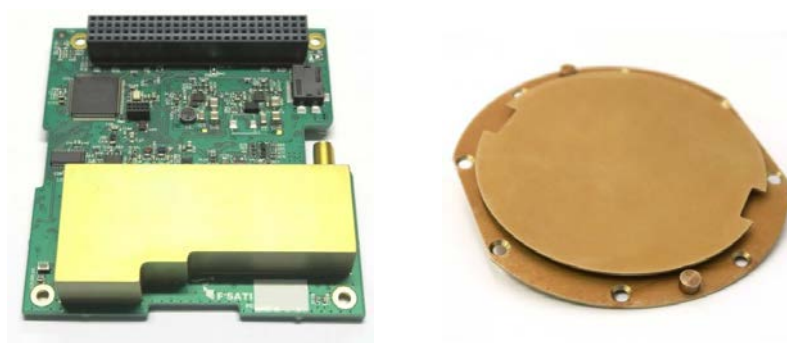
- celková spotřeba energie je při maximálním výkonu menší než 5 W
- přenosová rychlost do 2 Mb/s
- podpora amatérského pásma 2,4 – 2,483 Ghz
- jednoduché digitální rozhraní I2C pro řízení a telemetrii
- SPI sériové rozhraní pro údaje o užitečném zatížení
- Vysílací výstupní výkon je nastavitelný od 24 dB do 30dB po 2 dB

- pracovní teplota -25 °C - +61 °C, váha <100 g + anténa 50 g, napětí 6-12V, rozestup kanálů 500KHz,

S-BAND pokrývá frekvence od 2 do 4 GHz. Toto pásmo provází méně šumu a rušení, než amatérské kmitočty 420-430 MHz, které se také využívají pro Cubesaty. S tímto rozsahem se dá pracovat pomocí malých antén kvůli krátké vlnové délce.

Cena: **8900+4725 USD**

Komunikační zařízení může být na ČVUT realizované (viz kap. 5.1.2).



Obrázek 13: S-Band transmitter a flíčková anténa [7]

Sečtením všech cen komponent se dostáváme na cenu výslednou – **42750 USD + náklady na mezinárodní přepravu zhruba 90-300 eur = necelý 1 000 000 Kč (kurz červenec 2017)** bez softwarového řešení. Otázkou je, jestli ho případný zákazník dostatečně využije a nezvolí jiné, levnější softwarové možnosti. Se softwarem by byla cena o **15000 USD** větší. Musím ale podotknout, že se jedná o základní komponenty, které každému správnému CS náleží. Otázku volitelného payloadu, který přidá na hodnotě, zde neřeším. Jen v případě implementace zakoupených miniaturních kamer, spektrometrů, nebo jiného vybavení určeného pro pikosatelity se můžeme lehce dostat na částky desítek tisíc dolarů.

4 Česká republika již má co nabídnout

Další postup spočíval ve zjištění všech aktivit souvisejících s malými satelity v České republice. Tato kapitola přináší krátký, ale ucelený přehled všeho hlavního spjatého s Cubesaty v naší zemi. Pojdme se s ním krátce obeznámit

4.1 Minulost českých projektů

Od začátku tohoto tisíciletí ušla česká kosmonautika nemalý kus vpřed. To je však z její historie jen malá část. Historie je bohatá a jako národ se ji také pyšníme. Bohužel tak slavné už není to, že na dřívější úroveň jsme se po rozpadu kosmických projektů v polovině 90. let doposud nedostali. Jako příklad lze uvést právě stavbu malých družic. Úplně první, která byla vyvinutá uskupením lidí pod vedením doktora pana Pavla Třísky v tehdejší Geofyzikálním ústavu Československé akademie věd, měla název Magion-1 a byla vypuštěná na oběžnou dráhu před 39 lety – 24. říjen 1978. Družice měla tvar kvádrů o rozměrech $30 \times 30 \times 16$ cm a hmotnost 15 kg. [12] Považuje se za jednu z vůbec prvních malých družic na planetě, dávný předchůdce těch, které v mnoha zemích, včetně rozvojových, staví dnes profesionálové i studenti na univerzitách. Malé družice s kilogramovou hmotností se z okrajové záležitosti staly jedním z hlavních proudů současné kosmonautiky.

I přes celkem slušné pokroky česká kosmonautika dnes pořád v řadě oblastí zaostává za předchozí úrovní. Zde je už úkolem pro příslušný rezort, aby zavedl do stávajícího programu potřebnou dynamiku, která by zvýšila úroveň našeho kosmického výzkumu a tím i získávání jeho přínosů tak, jak se děje ve stále rostoucím počtu ostatních zemí.

Během uplynulých deseti let se u nás objevily pokusy o další malou družici, a jen nedávno se z toho stal první stroj vyneseny do kosmu, který se dá považovat první českou technologickou družici – VZLUSAT-1. Nejedná se však o pikosatelit ale o nanosatelit, jelikož jeho váha je vyšší než mezních 1,33 kg a s většími rozměry. U některých projektů vývoj stagnuje, nebo byl ukončen – tenhle případ se týká právě naší univerzity, z převážné většiny uskupení studentů a zaměstnanců Fakulty elektrotechnické, kde šlo ale o fakultní projekt ve studijním programu Letecké a kosmické systémy s názvem CzechTechSat. Kdybychom to měli analyzovat, tak se buď

nedařilo dosáhnout iniciativy, zájmu a také organizační i technické vytrvalosti, které je zapotřebí k překonání všech souvisejících problémů. Na tohle všechno ale má přímý vliv především financování. Podotknu ale, že pro takový projekt nejsou vedením českých kosmických programů vytvořeny prostě žádné podmínky. Přitom příležitost byla v podobě šestiletého pobídkového programu ESA určeného výhradně pro české organizace od roku 2008 po začlenění ČR do ESA. Ten před 2 lety skončil, ale na projekt malé družice se v něm nedostalo. Přednost dostala strategie financování projektů s co nejrychlejší návratností vložených finančních prostředků. No a to i přesto, že všude na naší planetě jsou investice do kosmického výzkumu považovány za ty do vzdálenější budoucnosti. Přitom v případě projektu univerzitní družice by šlo o ty nejefektivnější investice – do naší mladé generace.

V roce 2014 proběhl v prostorách Fakulty elektrotechnické velmi zajímavý seminář zorganizovaný Českou kosmickou kanceláří o malých družicích v České republice. Byla zmíněna současná situace a možnosti při vypuštění malých družic, dostali na něm prostor všichni řešitelé této problematiky u nás a seznámili ostatní se svými výsledky, možnostmi, plány a problémy s tímto spojené. Já jako účastník jsem se blíže seznámil s tehdejší stavem studentského Cubesatu - ChechTechSat, který byl vyvíjen na Fakultě elektrotechnické ČVUT a jehož náklady hradila z větší části fakulta a menší část i sami vývojáři ze svého, a který měl ze všech prezentovaných největší ambice na úspěch; dále s inženýrským modelem sledovače TimePix (pro japonskou družici RISESat), o kterém jsem se zde již zmiňoval, pak také nanosatelit z Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu VZLUSAT-1 jehož cílem je ověření výrobků nebo technologií na oběžné dráze, které vyrábějí jejich průmysloví partneři a nakonec se představily pikosatelity PilsenCube a CZcube, kde první byl projekt univerzity v Plzni a druhý byl stagnující, nebo spíše již tehdy ukončený projekt který se začal v ČR na poli pikosatelitů vyvíjet jako první.

Zajímavým zjištěním bylo, že kolektiv kolem PilsenCube byl v tu dobu největším adeptem na vynesení jejich družice v rámci mnou již dříve zmíněné iniciativy ESA „FlyYourSatellite“, bohužel museli odstoupit po zjištění, že je jejich projekt hotový ne z údajných 90 procent, ale ani ne z poloviny. Jednalo se mimo jiné o vedení potřebné dokumentace neboli jejich osobního kosmického managementu, který buď prostě chyběl, nebo nebyla v průběhu vývoje řádně zpracováván. Seminář však trval celé odpoledne a z dlouhých diskuzí a výměn někdy i tvrdších názorů nebylo možné

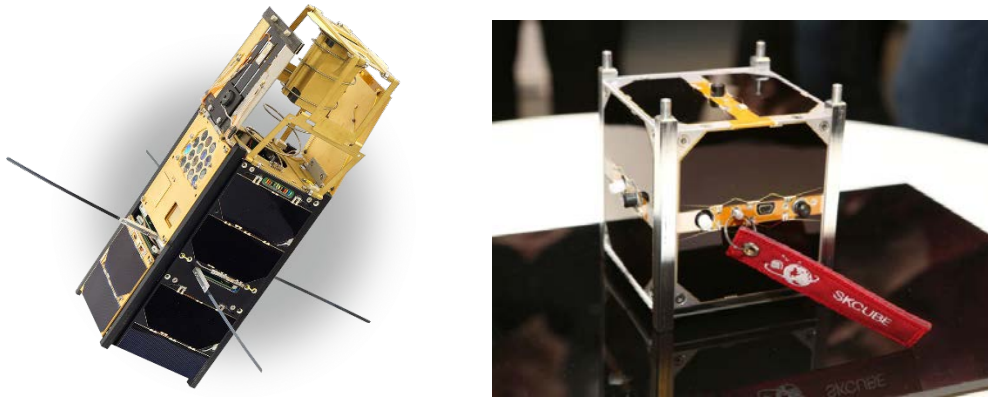
přehlédnout fakt, že každý tým na svém pikosatelitu tvrdě pracoval po celé roky a to i přes neustále problémy jak s financováním, tak i s počátečními nedostatky zkušeností a chybějícím kvalitně zpracovanými postupy know-how o které by se mohli opírat.

4.2 Současnost českých projektů

Dnes, tedy o 2-3 roky později, je situace úplně jiná. Nadějný projekt PilsenCube, který částečně navazoval na czCube, dokončený nebyl kvůli financím. Ani podpora grantové agentury ČR ve výši 3,89 milionu Kč projekt nezachránila. Sám projekt však vycházel s dnes již také ukončeného czCube, odkud se „odštěpili“ 2 členové projektu a pokusili se navrhnout družici vlastní, jejímž cílem bylo zjistit nedostatky a navrhnout lepší řešení napájení CS, stejně tak se zabývali ochranou všech systémů vystavených radiaci a testování rychlé datové komunikace. Nabyté dovednosti tým využil u VZLUSATu-1. [13]

Ten v roce 2011 začal vyvíjet Výzkumný a zkušební letecký ústav a 23. června 2017 byl vynesena spolu s dalšími na oběžnou dráhu indickým nosičem PSLV-38 z kosmodromu SDSC v Indii. Jak jsem již psal, ústav spolupracuje s několika dalšími technologickými partnery, mezi které patří například i ČVUT. Od roku 2013 se ze státního rozpočtu podařilo pro tenhle projekt vyčlenit 6,4 milionů Kč, avšak celková částka se pohybuje okolo číslky 10 milionů. Tahle jedna třetina byla hrazena z vlastních zdrojů partnerských firem. Na palubě najdeme malý rentgenový dalekohled, kompozitní materiál pro stínění kosmické radiace a mnoho dalšího užitečného zatížení. Jeho velikost je 2U. Polovina družice je řešena takovým způsobem, že z ní vyjede další 1U krychle do kosmického prostoru a tudíž se bude jednat o 3U cubesat. Z časového důvodu byly některé díly zakoupeny u zahraničního dodavatele GOMSPACE. [14]

Stojí za to se zmínit, že stejným nosičem a ve stejný den byla vynesena i první slovenská družice, která však splňuje označení 1U pikosatelit. Slovensko tímto otestuje svoje technologie a navíc bude posílat data o blescích a magnetickém poli, což využije například Ústav fyziky atmosféry Akademie věd ČR. SkCube i VZLUSAT-1 jsou součástí mezinárodní mise QB-50 – vypuštění 50 malých družic z celého světa, podporované Evropskou komisí. Účast na misi QB50 přispívá k zapojení České republiky a Slovenska do mezinárodních kosmických aktivit.



Obrázek 14 : Česká 3U nanodružice VZLUSAT-1 a slovenský 1U pikosatelit SkCUBE [8,9]

Další významné dílo CzechTechSat byl projekt Fakulty elektrotechnické na ČVUT a vzešel z nápadu doktoranda na vytvoření vlastního CS. Původně se plánovala velikost 2U ale následně bylo rozhodnuto postavit 1U. Částka bezmála 900 000 Kč přišla od Studentské grantové soutěže. Bohužel druhý český univerzitní projekt CS byl i přesto ukončen. Na mnohé výdaje si vývojový tým musel skládat ze svého a to už znamenalo vážné problémy. Tento CS byl účastníkem dvou letů pomoci stratosférických balónů, jeden z nich byl do 33 km výšky a otestovalo se při tom komunikační zařízení. [15][16]

Jelikož se nepodařilo zajistit potřebné finance, rozhodl se tým okolo CzechTechSatu o vytvoření společnosti SkyFox Labs a dotáhnout tenhle projekt pod novým názvem Lucky-7. Potřebné finance se tým snaží získat zpeněžením v minulosti vytvořených komponent.

5 Průzkum osob a pracovišť na ČVUT

Do této chvíle jsem se zabýval obecnými věcmi týkajícími se malých satelitů. Ukázal jsem tedy, zatím jen spíše zevnějšku, co to CS je a jaké základní náležitosti se k němu vztahují. Nyní z části vypustíme technickou stránku věci a zaměříme se na jádro této práce – na podrobnější popis mého pracovního postupu a jeho výsledky. Při průzkumu osob a pracovišť se paralelně vedly diskuze ústní formou, telefonickou nebo formou e-mailů a část této kapitoly bude mít pokračování v kapitole následující.

5.1. Made in ČVUT

Započít s úkolem hledání a oslovování odborného personálu na naší univerzitě abych zjistil kdo, v jakých laboratořích, alespoň zhruba za jakou cenu a alespoň zhruba za jakou dobu by mohl vyrobit jednotlivé díly a vyvinout základní software pro naši studentskou družici typu Cubesat a to nezávisle na předchozích podobných aktivitách na ČVUT nebo mimo univerzitu, nebylo vůbec lehké. Nejspíše především proto, že to nebyl do té doby ani nijak standartní úkol – nestačilo jen vědět, co chci. Bylo zapotřebí naučit se správně zeptat, správně pochopit odpovědi. A na naší univerzitě to platí dvojnásobně. Je to základ nejen analýz a designu kosmických misí.

Hlavní kritéria pro vyhledávání, výběr a oslovování vybraných relevantních odborníků byly následující:

- Zabývá se daný člověk v současné době space problematikou?
- Byl daný člověk vedoucím vysokoškolské kvalifikační práce zabývající se space problematikou?
- Je daný člověk členem nebo vedoucím působiště, které v minulosti již přišlo do styku s problematikou Cubesat?

Jelikož za těchto stanovených kritérií jsem na začátku průzkumu byl schopný oslovit jen zlomek osob (především lidi okolo původního projektu CzechTechSat), ostatní oslovení se řadili k doporučenému odbornému personálu od dříve oslovených.

V následující tabulce je přehled všech, kteří při tvorbě této práce přišli do kontaktu s mou prosbou o konzultaci ohledně problematiky stavby Cubesat na naší univerzitě. Jednotlivé barvy značí výsledek oslovení:

- ■ bez odpovědi
- ■ konzultace proběhla telefonicky/e-mailem
- ■ konzultace proběhla při osobní schůzce

Tučně jsou označení lidé zabývající se v současné době přímo problematikou kosmických aplikací a řešení. Všechny konkrétní informace v této a z části následující kapitole, vztahující se k možnostem výroby jednotlivých komponent, následně pocházejí přímo od níže uvedených lidí z ČVUT a dají se považovat za výsledek průzkumu.

Jméno	Pracoviště	Účel oslovení	
Ing. Zuzana Tatičková	FS UST	Výroba kostry CS	■
Ing. Jan Tomíček, Ph.D.	FS UTOPM	Výroba kostry CS	■
prof. Dr. Ing. František Holešovský	FS UTOPM	Výroba kostry CS	■
Ing. Lubomír Štajnochr	FS UTOPM	Výroba kostry CS	■
doc. Ing. Josef Zicha, CSc.	FS ÚPŘT	Výroba kostry CS	■
Ing. Jiří Hájek, Ph.D.	FEL KKT	Technická připravenost LVR	■
Ing. Ladislava Černá	FEL LDFS	Solární panely + baterie	■
Ing. Pavel Hrzina, PhD.	FEL LDFS	Baterie pro CS	■
Ing. Martin Šimůnek	FEL KM	Literatura k Onboard COMP pro CS	■
Doc. Dr. Ing. Pavel Kovář	FEL RADIO	CS antény	■
Ing. Ladislav Sieger, CSc.	FEL KF	Podmínky vývoje CS	■
prof. Ing. Miloš Mazánek, CSc.	FEL KEP	CS antény	■
Ing. Radek Dobiáš, Ph.D., MBA	FIT KČN	SW a HW pro CS	■
doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.	FEL RADIO	Podmínky vývoje CS	■
Prof. Ing. Jan Holub, Ph.D.	FEL KM	Podmínky vývoje CS	■
doc. Ing. Martin Hromčík, Ph.D.	FEL KŘT	ADCS modul	■
Doc. RNDr. René Hudec CSc.	FEL RADIO	Podmínky vývoje CS	■
doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.	FEL KP	ADSC modul, Small Satellite Platform	■
Ing. Jaroslav Laifr	FEL KM	Aktuální stav personálu na FEL	■
doc. RNDr. Bohuslav Rezek, Ph.D.	FEL KF	Možnosti katedry ve vývoji pro space	■

Zdeněk Lukeš	FSV, GNSS	CS software development	
doc. Ing. Jan Roháč, Ph.D.	FEL KM	AIT fáze	
Ing. Michal Kuneš	dříve FEL	Podmínky vývoje CS	

Tabulka 1: Seznam vybraného a doporučeného odborného personálu

5.1.1 Výroba kostry CS

Otázky ohledně možnosti výroby kostry CS (kap. 3.1.1) byly logicky směřovány na Fakultu strojní. Došlo na výměnu emailů s příslušnými zaměstnanci fakulty a ke dvěma osobním návštěvám.

Informace vycházejí z konstrukce, která byla postavena pro CzechTechSat a dnes se stavba kostry dá opět bez problémů realizovat. Konstrukce měla sloužit jako kostra pro zástavbu komponent a následně se měl vyrobit letový model. V původním standardizovaném návrhu jsou vnitřní rohy o velmi malém poloměru, které se velmi těžko obrábějí, a proto došlo na optimalizaci konstrukce. Výroba byla vzhledem k velikosti dílu zajišťovaná v laboratořích FS pomocí 3D frézky na které se realizoval výsledný návrh a vycházelo ze specifikace CDS. Povinné rozměrové parametry jsou sice dány, ale na každé univerzitě si každý dělá svoji kostru podle svých nápadů a možností. Definované rozměry podle CDS jsou z důvodu umístění celého CS do vypouštěcího zařízení P-POD, které netoleruje žádné vnější odchylky kromě těch předepsaných. Při výrobě této kostry bylo například provedeno maximální zjednodušení příčnicku. Všechny potřebné díly se dají vyrobit na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Je to otázka konstrukce. V případě vytvoření týmu by bylo dobré využít dalších možností, např. 3D tisk (který pro FS zatím zajišťuje externí firma), případně na 5-osém stroji, který by se měl v blízké budoucnosti pořizovat. Minulý projekt se řešil na stroji 3-osém a rozdíly jsou následující:

- 3-osý stroj znamená, že nástroj se může pohybovat ve 3 osách, tedy je schopný obrábět těleso pouze z 1 strany, chci-li obrábět z druhé strany je nutné výrobek otočit, z čehož plynou problémy týkající se přesnosti, jelikož jakmile těleso odepnu a upnu znovu, je velká pravděpodobnost změny polohy. Za druhé při odepnutí a upnutí můžeme lehce vnést nějakou deformaci v místě dalšího upnutí

- 5-osé obrábění umožňuje výrobek upnout tak, že jsem ho schopny během obrábění otáčet stále v jednom upnutí, tudíž bez ztráty přesnosti. Tohle má dva faktory – já jsem schopny výrobek obrobit z jedné strany, následně otočit a obrábět z druhé strany, anebo to funguje tak, že se nástroj přetáčí okolo výrobku. Na druhou stranu je konstrukce sama o sobě méně přesná, protože má více stupňů volnosti z důvodu dalšího zařízení, které se stará o pohyb a naklápění. To má nějaké volnosti, k původním 3 osám se přidají další 2 a dohromady se starají o výslednou přesnost. Ve výsledku je to tedy něco za něco. Ekonomický vliv na výrobu to má ten, že díky tomu, že se nemusí přepínat a vyrábí se naráz, tak ta výroba může proběhnout v kratším čase s jinými parametry.

Jsou zkratka různé výrobní metody a různé výrobní náklady. Nejprve je potřeba říct co se vyrábí a pak se počítají náklady (skládají se z obrábění a montáže). Mužů sice mít velmi dobrou sadu dílů, ale montáž bude tak složitá, že zabere několik hodin a ve finále se konstrukce prodraží. Protože ten výrobek (díly) se například 5 hodin vyráběl(y) a 5 hodin montoval(y). Můžeme však konstrukci optimalizovat tak, že se bude 7 hodin obrábět, ale montáž zabere 20 minut. Ušetřil jsem 2,5 hodiny a náklady jsou jinde. Zaleží, kam až si dovolím ve výrobním procesu „skákat“. Řeknu si, že konstrukce je hotova a řeším technologii výroby. Tam si ale také mužů vybrat obrábění, nebo 3D tisk, atd. Rozhodnu-li se například pro obrábění (odebírání materiálu dokud není dosaženo požadovaného tvaru) – musím se dále rozhodnout pro polotovar nebo surový materiál. Varianty konstrukce jsou frézování, tvarování z ohýbaného plechu a konstrukce z 3D tisku (tedy 3 základní varianty). Konstrukce z ohýbaného materiálu bude náročná na přípravu, protože na ohýbání potřebuji patřičné formy, podle kterých se materiál ohne. Jsou potřeba stroje na ohýbání, prostřihování a je to poměrně složitý výrobní proces. Postup obrábění (frézka, soustruh, atd.) je známější a výroba bude levnější. Konstrukce ale musí obrábění přežít, musí být dostatečně subtilní, jelikož příliš tenké stěny se múzou bortit a nepůjde je obrábět.

U 3D tisku je drahá cena stroje, nicméně když už ho mám tak je to jen o ceně výroby, která ale taktéž není nejmenší, protože použití laseru vede k vysokým provozním nákladům stroje plus cena materiálu, jelikož práškový hliník bude stát více než ingot (jedná se o kovový hutní polotovar určený ke zpracování). 3D tisk je založen na modelové desce, na kterou postavím model, modelová deska jede určitou rychlostí

a po ní jede laser taktéž určitou rychlostí, ale je svým způsobem úplně jedno jestli stavíme v modelové desce jeden model anebo několik vedle sebe. Rychlost je stejná, ale hodinový čas stroje také stejný, takže pokud jede stroj za 10000 Kč/hod a model vyrábíme 4 hodiny, tak nás výrobní náklady stojí 40000 Kč s tím, že jsme tam mohli vyrábět jeden model (například stěna CS) anebo modelu několik.

Abychom dosáhli žádaného výsledku, budeme před výrobou volit materiál a v našem případě to bude hliníková slitina. Při navrhování konstrukce CS dbáme na to, aby vyrobené díly do sebe následně bez problémů pasovaly. Snažíme se zamezit deformacím při zpracovávání materiálu, což jinak povede k dalšímu nárůstu pracovní doby stroje a také vyšším nákladům. Před zahájením výroby je zapotřebí mít hotovou technickou dokumentaci:

- Konstrukční (výkresy, technické podmínky, atd.)
- Technologickou (technologický projekt, postupy, speciální nářadí, atd.)

Zvolením hliníkové slitiny jednak splníme normy CDS a jednak se bude jednat o materiál s vysokou pevností při zachování malých hmotností, což je i u kostry CS velmi žádoucí. Normy předepisují slitinu z řady 6000 a 7000 (přesněji 6061 a 7075), kde u první převažuje křemík a mangan a druhé měď a zinek. První ze dvou je více odolná proti korozi a lépe se svařuje. Hůře se však obrábí. Druhá je dražší a i hůře svařitelná. Aplikuje se tam, kde vyžadujeme ještě větší pevnost a korozivzdornost. Jak jsem zmínil dříve, musejí být povrchově upraveny alespoň kolejnice. Eloxování se však u takových projektů podrobuje prakticky vždy celá konstrukce. [17]

Na tuhle povrchovou úpravu je tedy v CDS přímo uvedený požadavek. Všechny části satelitu, které přicházejí s P-PODem do styku, musejí být povrchově upravené. Tím zajistíme bezproblémové vyslání do vesmíru. Pro naši kostru tedy můžeme zvolit několik metod povrchových úprav z nichž jako nejsnazší se jeví anodické oxidace. Jedná se o elektrochemický proces, při kterém se na povrchu vytvoří vrstva mezní a vrstva oxidu hlinitého Al_2O_3 . Vhodný typ anodizace se jmenuje „tvrdá anodizace“, která je dobře odolná proti korozi a opotřebení, její tloušťka je okolo 100-200 μm . [18]

Konstrukce satelitu začíná příčnický CS. Jeho úkolem je spojit dvě další součásti – rámy – a je k němu šrouby připevněný plech, který slouží k radiační ochraně komponent a zároveň dělá celou konstrukci tužší. Příčnick se dá vyrobit i z normalizovaného L profilu. Při výrobě kostry se na Fakultě strojní provedlo

zjednodušení tohoto příčnicku. Zjednodušení spočívalo ve sjednocení jeho třech různých variant připojení závitových tyčí ke kostře, což vedlo k nutnosti vyrobit příčník ve 3 typech. Druhá změna se týkala vnitřních zaoblení, která byly zvětšeny a zaobleny do jednoho rozměru, což vedlo ke zkrácení strojního času a také úsporou času při výměně nástrojů. Další změna spočívala v odstranění nefunkčního zaoblení na hlavách příčnicku a tím taktéž došlo k úspoře času. [17]

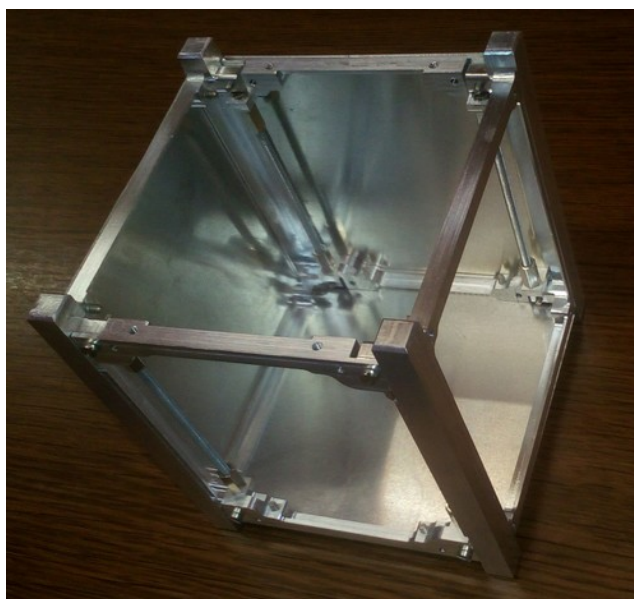
Pro výrobu příčnicku byl zvolen polotovár, který se upnul do frézky FCM 22. Celková doba obrobení jednoho příčnicku trvala 1 hodinu, 15 minut a 24 sekund. Model byl vytvořen v programu Inventor 2013. [17]

Druhou základní součástí tvořící kostru CS je rám. Na něho se již vztahuje nutnost dodržet vnější parametry a tvar podle norem CDS. I zde se provedly mírné úpravy a to především kvůli hraničním možnostem obráběcího stroje na Fakultě strojní. [17] Jedna z úprav se týkala zaoblení vnějších hran kolejnic, které se dotýkají P-PODu. A zde došlo k problému. Kolejnice byly vyrobeny bez nutného zaoblení, které minimalizují pravděpodobnost zaseknutí CS v P-PODu při vypuštění do kosmu. Takhle kostra by tedy v případě letového modelu nemohla být vynesena. Celková doba výroby jednoho rámu činila 3 hodiny, 32 minuty a 58 sekund.

Hotový rám se kontroloval na měřícím mikroskopu ZKM01-250C a drsnoměrem Mitutoyo SJ301. Dva způsoby obrábění kovu měli vliv na drsnost, kde jedna plocha kolejnice byla obrobena čelem nástroje a druhá jeho obvodem. Svůj vliv měl i obrobek, který při obrábění druhé plochy neměl potřebnou tuhost. [17] Všechno však nepřekračovalo stanovené limity.

V případě nové konstrukce je vhodné uvážit zjednodušení celé konstrukce. U příčnicku přichází v úvahu spojení dvou sousedních šroubů, kdy dojde k jeho spojení s rámem a taktéž se ke kostře upne vnější plech. Další změnou by bylo vyrobit základní součásti kostry z polymeru ABS. Praktická změna by byla hlavně v nižším stínění od radiace, což není velký nedostatek, jelikož potřebnou minimální úroveň stínění poskytují solární panely. A v neposlední řadě by bylo vhodné zvážit použití trhacích nýtů namísto šroubových spojů. Jejich aplikace je snazší a ušetří čas potřebný pro řezání závitů a je pro ně možné vyrobit i tenčí stěnu spojovaných součástí, což povede k dalšímu snížení hmotnosti. [17] Ohledně vnějších parametrů by měl být kladen důraz na jejich dodržování podle CDS, o kterém jsem informoval v minulé kapitole.

Další informace s ochotou poskytne pan Ing. Jan Tomíček, Ph.D. z Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie



Obrázek 14 : Zapůjčená kostra CS Fakulty strojní

5.1.2 Výroba jednotlivých elektrotechnických komponent

Nacházíme se v době, kdy se lomí velké evropské projekty a co má dvě ruce a umí anglicky tak se do něčeho začleňuje, anebo se proti něčemu vymezuje a na radost ze života a nadšení pro věc nezbyvá žádný čas. Čas lidí je neuvěřitelný drahý.

Když se má někdo pustit do nějakého velkého projektu, tak půjde především o peníze, ale to není to jediné. Druhá věc je reklamní hledisko viditelnosti. Jelikož ze zvědavosti nikdo nehne prstem. To platí i na FEL a ta se nebude potichu najímat na žádné projekty, kde se s tím bude chlubit někdo jiný. FEL by chtěl mít plné právo zmiňovat se a prezentovat svoje výrobky, ať už budou sloužit pro cokoliv a kohokoliv, například na webech a psát do výročních zpráv o podílení se na projektu. Dnes to totiž funguje tak, že hodně subjektu neudělá nic, ale potom se všude snaží prodat výsledek projektu jako za svůj. Lidé zde nevstoupí do žádného kontraktu, kde se předem zavážou, že o tom nebudou nikde vykládat. Právo pochlubit se o tom, co jsem dělal, je základní věc v průmyslovém světě. Když už se ale v práci zabývám možnostmi návrhu a vývoje CS – prezentovat konečný výrobek potenciálním zákazníkem (subjektem) jen jako za svůj, možné pomocí „velkých financí“ přece jenom je. Tato volba však vyjde extrémně draho a tyto náklady by se logicky daly rozumně využít úplně jinak

Před 3 lety například letěly k Měsíci dvě družice NASA, které byly vůči sobě stabilizovány laserovým interferometrem. Mikroakcelerometrem se měřili změny ve svém pohybu, které byly dány změnou gravitace Měsíce. Byl to velký úspěch, NASA se tím „prsila“ na webu a v odborné literatuře se o tom mnoho napsalo. Zrovna senzory Fluxgate neseného mikroakcelerometru tehdy vyrobil FEL, ale pod takovým kontraktem, že o tom nikdo nevěděl.

Zkoordinovat odborný personál na fakultě vyžaduje pečlivé a dlouhodobé plánování, jelikož lidi na FELu jsou přetíženi především psychicky, tzn. cokoli co je potřeba navíc, než co je obsaženo v kontraktu, bude pro mnohé problém. Ideální případ zaměstnance fakulty je takový, když na jednom projektu pracuje, pak má další, který konzultuje, jelikož podobny dělal někdy v minulosti a pak formálně vede projekt svého doktoranda, protože je jeho školitel, ale jinak tam neděla nic. Kdyby toho měl více, tak je u takového zaměstnance velká pravděpodobnost, že svůj nativní projekt bude brzdit. Situace na FEL je však taková, že mnoho lidí se podílí i na 6-7 projektech, jelikož fakulta má konečný počet členu a pokud chci mít hodně fakultních projektu, musím je logicky pokryt určitým počtem lidí. V blízké budoucnosti se však očekává zlepšení situace, která je nyní v otázce personálních možnosti pro výrobu komponent pro Cubesat prakticky zoufala. Jakékoliv dohody o spolupráci, vývoj a výrobu závisí vždy jen na každém osloveném člověku. Vše je otázkou časového tlaku na lidi, ale z druhé strany i peněz.

EPS, ADCS, Onboard Computer

Technologicky je na Fakultě elektrotechnické možné vyrobit jakýkoliv potřebný čip ke každé komponentě Cubesatu. Problém je ten, že by tato varianta byla až nesmyslně drahá. Rozumnější je zakoupit čipy pro každou komponentu u specializovaných firem. Jiná věc je vyrábět tištěné spoje a navrhnout jednotlivá elektronická řešení schopná pracovat i za velmi nízkých či vysokých teplot. Otázka jednotlivých hardwarových řešení a potřeb (ADCS - kap. 3.1.5, EPS - kap. 3.1.2, Onboard COMP – kap. 3.1.6, atd.) spolu s odpovídajícím firmware by se dala vyřešit v Laboratoři pro vývoj a realizaci na FEL. Přímo pro Space se zde však příliš věci nedělalo. Některé komponenty se vyráběly pro externí firmy, a jestli byly následně použity například ve vesmíru, nikdo neví. S vývojem elektroniky a následnou výrobou

má tato laboratoř bohaté zkušenosti a hlavně výrobní prostory, špičkové technologie pro výrobu i diagnostiku (např. rentgen).

Některé konkrétní vývojové prostředky laboratoře jsou následující:

- pro komplexní návrh desek plošných spojů (Mentor Graphics, OrCAD, CAM350)
- pro návrh mechanických sestav (AutoCAD)
- pro návrh firmwaru desek elektronických zařízení (prostředí pro návrh firmware včetně HW prostředků)
- prostředky pro efektivní podporu testování (JTAG ProVision - včetně HW prostředků) [20]

V případě spolupráce je možné kontaktovat ředitele laboratoře pana Ing. Pavla Tichého, MBA.

Baterie

Otázka baterie (kap. 3.1.3) je technologicky proveditelná, ale je samozřejmě opět žádoucí, aby ve vesmíru fungovala. Projekt napěťového zdroje pro space již na FEL vzniknul a byl úspěšně otestován. Vše zařídil doktorand pan Ing. Laifr v rámci své pozice technického vedoucího v Astronomickém ústavu AV ČR, který se svým týmem vyrobil zdroj pro jeden z instrumentů kosmické sondy JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer), jejíž výrobu zastřešuje ESA. Družice má v roce 2022 odstartovat na osmiletou misi k Jupiteru, u kterého bude zkoumat jeho největší měsíce. Jeho zdroj musí vyhovět extrémním požadavkům na spolehlivost a minimalizaci vlastního rušení (redukovat vlastní emise). Částka na výrobu zdroje v podmínkách FEL dosáhla na „pouhých“ 200 000 Kč. [19] Zde si ale musíme uvědomit, že se také jedná o zdroj pro satelit s výkony překračující stovky Watt. Cena pro baterii nového projektu Cubesatu by oscillovala mezi mnohem nižšími částkami.

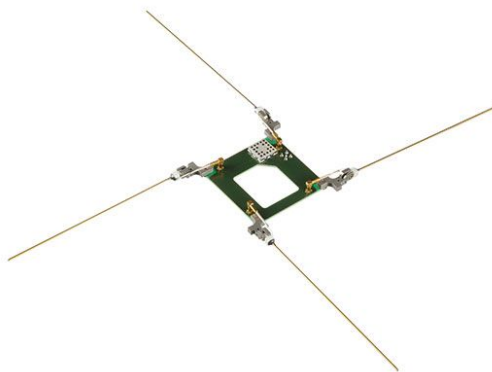
Solární panely

Ohledně solárních panelů (kap. 3.1.4) pro Space nedisponuje ČVUT žádnými výrobními kapacitami. Moduly do vesmíru, tedy i od firmy ClydeSpace, jsou na bázi GaAs (polovodič arsenid galitý) a tudíž jsou i relativně drahé na výrobu. Nevyrábějí se

ani nikde v ČR. Vyrábí se zde průmyslově pouze moduly na bázi křemíku a tenkých vrstev, které se aplikují pouze při pozemských podmínkách (základní výzkum - FEL ČVUT, AV ČR, VUT). Samozřejmě je možné nechat si zalaminovat (přetáhnout průhlednou ochrannou fólií) dodané články, to může udělat na ČVUT např. UCEEB. Na destičky GaAs se obvykle laminace nedává, dává se na nové typy s tenkými vrstvami. Obecně jen v případech možného mechanického poškození. Konkrétní informace poskytne Ing. Ladislava Černá.

Komunikace

S komunikačními prostředky má velké zkušenosti a možnosti Katedra měření. Je možné vyrobit anténu flíčkovou (kap. 3.1.7) i obyčejnou vysouvací (obr. 15), podle požadavků na funkce a rozměry našeho CS. V případě vysouvací jsou antény složeny uvnitř kostry a po vypuštění do volného prostoru se na příkaz obsluhy vysunou. V tomto případě však musíme náš CS přizpůsobit tak, aby následné vysunutí těchto antén umožnil. Společně s anténou jsou schopni obstarat výrobu samotné desky komunikačního zařízení. Nemají však zkušenosti s materiály pro space a vše by bylo otázkou zkoušek a koordinace co nejdobornějšího personálu. Obecně platí, že o možnost používat zvolené frekvence našeho zařízení, by se mělo požádat na Českém telekomunikačním úřadě a odtud získat licenci. Pokud bychom samozřejmě ovládali náš CS z České republiky. Takže už jenom při pomyslení na CS bychom měli pracovat na získání licence. Existuje spousta pravidel, které ve vesmíru dělat nesmíme. Například vyzařovat větší výkon, než povolený, atd. Podrobnější informace poskytne pan prof. Miloš Mazánek, CSc. z Katedry elektromagnetického pole.



Obrázek 15: Příklad vysouvací antény [21]

Řízení polohy

Katedra měření vlastní i speciální skříň, která simuluje beztláčné prostředí a ve které se může vznášet zavěšená hotová družice, se kterou je možné otestovat její polohování vůči magnetickému poli Země, což je úkolem komponenty ADCS (kap. 3.1.5). Momentálně má s funkcemi ADCS mnoho zkušenosti Katedra počítačů, kde se studenti učí v programu Matlab polohovat zavěšený model s reakčními koly simulující reálný satelit. V úvahu připadá využít nabyté zkušenosti a zkoordinovat výrobu ADCS modulu s Laboratoří pro vývoj a realizaci společně s Katedrou řídicí techniky, která má z dob CzechTechSatu přímo zkušenosti při výrobě jejich vlastního ADCS modulu. Katedra radioelektroniky zase disponuje personálem schopným vyvinout a vyrobit kvalitní GPS přijímač pro tento modul. Bližší informace od pana doc. Ing. P. Pačese, PhD (Katedra měření), doc. Ing. M Hromčíka Ph.D (Katedra řídicí techniky), Doc. Dr. Ing. K. Kováře (Katedra měření).

V rámci realizování nového projektu CS na půdě ČVUT je žádoucí sepsat si požadavky na jednotlivé subjekty, co má každá komponenta přesně dělat, jak má být veliká, kolik energie má nejvíce spotřebovávat, případně se dá přenechat celý design na jednotlivých odbornících. Následně by se vyčlenil tým, udělala by se hospodářská smlouva – do kdy, za kolik, jaké mají být výstupy a projekt by se dal do pohybu. Ohledně nutných testů na teplotní a vibrační zatížení pikosatelitu se FEL může pochlubit vlastní klimatickou komorou a vibrační stolicí (kap 2.4.1). Ty se dají využít ve fázi AIT (Assembly, Integration and Test) avšak bez podmínek vakua. S konkrétními dotazy ohledně testovacího vybavení následně pomůže pan doc. Ing. Jan Roháč, Ph.D.

6 Zpracování výsledků průzkumu a celkové hodnocení

Dostat družici na oběžnou dráhu znamená splnit řadu certifikačních podmínek (předepsané testy a jejich uspokojivé výsledky, vše se dokládá až na úroveň měřících protokolů). To s sebou nese i použití předepsaných výrobních technologií, protože jinak se nepodaří testy splnit. Bez toho nás nikdo na oběžnou dráhu nevezme. Toto je na integrátorovi stavby družice.

V případě stavby jen jednotlivých dílů je úloha jednodušší pro toho, kdo dané díly navrhuje, protože otázku certifikace řeší někdo jiný. Přesto je podmínky certifikace nutno splnit. To předpokládá řadu technologií. Jsou to termovakuová komora a zařízení pro vibrační zkoušky, kde ČVUT je schopné provést teplotní a vibrační zkoušky bez simulace vakua. Další díly jsou zkoušeny podle svojí specifikace (např. RTG optika na zařízeních v USA či Německu).

Když se CS staví na vážno (tedy předpokládáme, že skutečně bude vystřelen na oběžnou dráhu a plnit cíle mise), je třeba postavit minimálně 4 exempláře. Jeden bude letový a půjde do kosmu. Druhý zůstane plně funkční na Zemi pro řešení problémů při misi. Zbylé dva budou zničeny během předepsaných testů při vývoji.

Každý CS tedy musí mít určitě napájecí systém, komunikační systém a řídicí počítač. Je otázkou, zda tyto díly vyvíjet, či zakoupit. Jen toto je nevděčná úloha, protože není možné vyvíjet např. řídicí počítač jen pro jednu družici, ale pro sérii opakovaně vypouštěných misí. V případě, že se jedná o jednotlivé experimenty, těch může být řada (astronomické, fyzikální, chemické, biologické a např. Katedra fyziky ČVUT FEL je schopna pokrýt všechny uvedené oblasti) Je třeba vědět, jaký konkrétní CS stavíme a provést rozbor na toto konkrétní zadání. Jestliže předpokládáme vynesení CS na LEO, je třeba do studie zahrnout nejen certifikace pro CS, ale i funkční pozemní segment (komunikační stanici a nejlépe několik rozmístěných po Zeměkouli s ohledem na předpokládanou dráhu CS). Dále tým lidí, kteří budou CS z pozemního segmentu povelovat a budou mít nad ní neustálý dohled (něco jako malý Houston). Další tým lidí, který se bude starat po dobu života družice (několik let) o zpracování výsledků. Vystřelením družice to nekončí, ale naopak začíná.

Mými klíčovými cíli bylo zjistit, jaké máme na naší univerzitě mít možnosti postavit si svůj vlastní miniaturní satelit. Nezávisle na předchozích podobných aktivitách na ČVUT nebo mimo univerzitu. Idea to byla krásná, ale v praxi, jak jsem

zjistil, to obvykle funguje naopak. Projekt se řeší v prostředí omezených časových a finančních prostředků. Na začátku by mělo být zřejmé s kým (kdo a kdy v jaké misi se satelit vystřelí). Z toho vyplývá kolik let je na řešení času a jaký úkol bude družice plnit. Z toho se teprve odvíjí řešení.

Aby byl cíl práce co nejvíce naplněný, tak se zmíním i o negativních zkušenostech při jejím tvoření. V první se jedná se o občasně kontradikce, na které jsem narazil při rozhovorech, kdy informace o možnostech výroby stejné komponenty se u různých oslovených lidí lišily. Druhá zkušenost byla v podobě některých velmi křehkých mezilidských vztahů na ČVUT, což je faktor přímo úměrný na úspěšnost jakéhokoliv projektů, nemluvě o těch kosmických, a ani tvoření této práce to nepomáhalo.

Všichni relevantní lidé zkrátka mají svůj vlastní režim, vlastní spolupráce, kontrakty a aktivity. A rozjet dnes další interní projekty jako stavbu nových komponent pro univerzitní CS by bylo za současné situace velmi náročné. Nejspíše i proto se na FEL nedokončil CzechTechSat, ačkoliv znalosti a dovednosti vedoucího projektu byly na vynikající úrovni. Bohužel to nestačilo, jelikož lidí v tomhle projektu s takovými dovednostmi a časovými možnostmi bylo zapotřebí více. Ale to již odráží potřebnou finanční stránku věci. Podle slov vedoucího týmu CzechTechSat by navíc v současné době v projektu podobného rozsahu udělal mnoho věci úplně jinak. Na druhou stranu (což je podle slov jednoho z dotázaných sci-fi) by se na takový projekt hledělo jinak, pokud by FEL oslovil průmyslový subjekt a došlo by na následující příklad:

- nabízíme vám částku (například) 5 000 000 Kč na 2-3 roky
- kdo by se chtěl ujmout tohoto projektu?
- co navrhujete?
- připravte plán projektu a pobavíme se o tom

Z tohoto postupu by byl zřejmý seriózní zájem a problém ohledně koordinace odborného personálu by byl minimalizovaný. Dobrým příkladem může posloužit například štědře sponzorovaný projekt formule ČVUT. To znamená, že by naši univerzitě v tomto směru pomohl nějaký průmyslový partner nebo partneři, kteří do projektu „něco nasypou“, stejně jako do zmíněné formule. V úvahu přichází například Honeywell Aerospace divize Advanced Technologies.

Z porovnání všech tuzemských projektů s nákupem vyplývá, že v případě nákupu základních komponent vyjde výsledná cena pikosatelitu mnohem nižší, nežli

kdyby takový projekt začínal od nuly. Dostupnost vysoce kvalifikovaného personálu, který na ČVUT je, v kombinaci s dostatečnými časovými možnostmi a řádně zpracovaným plánem projektu by však mohla komerčním řešením směle konkurovat.

Hlavní výhody zahájení vlastního projektu Cubesatu jsou:

- vím přesně, co stavím, z čeho a jak to bude fungovat
- vím přesně, co můj pikosatelit zvládne a jaká jsou omezení
- získám neocenitelný know-how ve velmi perspektivním odvětví nepilotované kosmonautiky

7 Závěr

Vesmír. I když si to neuvědomujeme, vše se v našem životě točí právě okolo něho a zároveň se on točí okolo nás. Patří sem vzduch, světlo, gravitace a mnoho dalších faktorů, které po každém probuzení a před každým usnutím pokládáme za samozřejmost. Jedná se však pouze o vesmír nám blízký, který je již docela dobře probádán a známý. Někde tam, stovky kilometrů nad tímto vesmírem, však existuje vesmír úplně jiný. Ten pravý, o jehož dosažení a přiblížení k němu se snažilo a bude snažit mnoho lidí. Způsobů jeho dosažení je několik. Někdo se do něho dívá ze své rodné planety velkými dalekohledy a snaží se přes biliony kilometrů přiblížit si jeho dávnou historii. Jiný se rozhodne usednout do kosmického korábu a podívat se do něho osobně. Další způsob je vytvořit určitý nástroj, svým způsobem do něho vložit svou duši a vypustit za hranice atmosféry. A právě o tomhle je uvažováno v této práci. O nástroji, který ten pravý vesmír člověku přiblíží i přesto, že se bude nacházet na Zemi.

Práce se dá prakticky rozdělit na 3 části a závěry. V první se jedná o charakteristický popis tohoto nástroje – Cubesatu. Čtenář se seznámil se všemi základními náležitostmi související s tímto názvem. A jelikož žijeme v čím dál více standardizovaném světě, je nutné všechny komponenty a jednotlivé postupy pečlivě evidovat, dokumentovat, atd., stejně tak mít řádně vypracovaný plán projektu, aby se minimalizovala hrozba osudu těch nedokončených.

Popsané části CS lze zakoupit a poskládat od specializovaného subjektu (např. ClydeSpace). Ze srovnání takového řešení s českými projekty vyplývá větší finanční dostupnost a absence časové tísně na úkor nabytých znalostí know-how

Poslední část, v rámci autorových možností a dovedností, co nejvíce přibližuje náležitosti a problémy související s případnou stavbou nového CS přímo na naší univerzitě (což bylo cílem práce), z čehož se dá vyvodit vysoká náročnost dnes rozjet další interní projekt jako stavbu nových komponent univerzitního CS.

Dílo poslouží všem zájemcům o tuto problematiku – studentům, nadšencům, ale i malým, či velkým firmám, které mají své zájmy v oblasti malých satelitů. A v neposlední řadě také tomu, kdo si alespoň jednou v životě řekl:

„Jestli je vesmír odpověď, co je potom otázka?“

8 Použitá literatura

[1] NASA's Cubesat Launch Initiative [online]. NASA [Cit. 2015-11-17]. Dostupné z: nasa.gov/directorates/somd/home/CubeSats_initiative.html

[2] CubeSat Design Specification Rev. 13 [online]. ACADEMIA [Cit. 2015-11-17]. Dostupné z: academia.edu/11525487/CubeSat_Design_Specification_Rev._13_The_CubeSat_Program_Cal_Poly_SLO_CubeSat_Design_Specification_CDS_REV_13_Document_Classification_X_Public_Domain_ITAR_Controlled_Internal_Only

[3] Český detektor SATRAM na družici PROBA-V byl úspěšně aktivován [online]. CSO [Cit. 2015-12-09]. Dostupné z: czechspaceportal.cz/7-sekce/aktuality/cesky-detektor-satram-na-druzici-proba-v-byl-uspesne-aktivovan.html

[4] GRIFEX CubeSat Update [online]. AMSAT-UK [Cit. 2016-02-21]. Dostupné z : amsat-uk.org/2015/02/13/grifex-cubesat-update/

[5] HiNCube passed the vibration acceptance test [online]. [Cit. 2015-11-17]. Dostupné z: andoyaspace.no/?p=1323

[6] ClydeSpace, Solutions for a New Age in Space Capability Overview, Date: 17/05/2017, Clyde Space Confidential.

[7] ClydeSpace [online]. ClydeSpace. [Cit. 2016-02-25]. Dostupné z : <https://www.clyde.space/products>

[8] Česko má po 21 letech funkční družici. Poslechněte si, jak pípá [online]. Technet [Cit. 2017-08-01]. Dostupné z: technet.idnes.cz/vzlusat-1-skcube-ceska-druzice-dks-/tec_vesmir.aspx?c=A170627_124034_tec_vesmir_kuz

[9] JAN 2016: SLÁVNOSTNÉ PREDSTAVENIE SKCUBE [online]. SKCUBE [Cit. 2017-08-01]. Dostupné z: <http://www.skcube.sk/portfolio-view/2016-slavnostne-predstavenie-skcube/>

[10] FORTESCUE, Peter, Graham SWINERD (University of Southampton, UK), John STARK (Queen Mary & Westfield College), Spacecraft Systems Engineering, 4th Edition, ISBN: 978-0-470-75012-4, August 2011, ©2011

[11] LEY, Wilfried (Editor), Klaus WITTMANN (Editor), Willi HALLMANN (Editor), Handbook of Space Technology, ISBN: 978-0-470-69739-9, April 2009

[12] Magion [online]. Wikipedia [Cit. 2017-07-28]. Dostupné z: cs.wikipedia.org/wiki/Magion#Magion_1

[13] PilsenCube [online]. Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni. [Cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <https://www.pilsencube.zcu.cz/>

[14] Časopis České Kosmické Kanceláře 12/2014 [online]. CSO [Cit. 2017-07-29]. Dostupné z: http://www.czechspace.cz/sites/default/files/czechspace_10.pdf

[15] CzechTechSat [online]. CzechTechSat [Cit. 2017-07-29]. Dostupné z: <http://czechtechsat.cz/>

[16] 33 km / 108k ft CzechTechSat Stratospheric Balloon Test Flight - Launch Video [online]. YouTube [Cit. 2017-07-29]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=9i2wwzpiKXo>

[17] PUCHOLT, Radek. Optimalizace výrobního postupu součásti kosmické techniky. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.

[18] FICKOVÁ, Zuzana. Konstrukce a povrchové úpravy piko-satelitu. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.

[19] Student FEL ČVUT pomáhá stavět vesmírnou sondu za 1,5 miliard eur; poletí k Jupiteru [online]. FEL [Cit. 2017-08-03]. Dostupné z: <http://blog.fel.cvut.cz/clanek/43-student-fel-cvut-pomaha-stavet-vesmirnou-sondu-za-1-5-miliard-eur-poleti-k-jupiteru>

[20] Laboratoře pro vývoj a realizaci Fakulta elektrotechnická České vysoké učení technické v Praze [online]. LVR [Cit. 2017-08-01]. Dostupné z: http://lvr.fel.cvut.cz/file/f-f/df/Brozura_LVR_FEL_CVUT_CZ.pdf

[21] CubeSat UHF/VHF Antenna [online]. Nano Avionics [Cit. 2017-08-03]. Dostupné z: <http://n-avionics.com/cubesat-components/communication-systems/cubesat-uhf-vhf-antenna/>

9 Přílohy

Obrázek 16: Specifikace Cubesat podle CDS [2]

Obrázek 17,18: Myšlenková mapa prvotního návrhu bakalářské práce

PLACEMENT OPTIONS FOR DEPLOYMENT SWITCHES AND SEPARATION SPRINGS

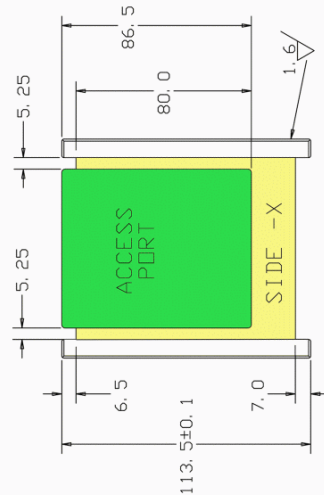
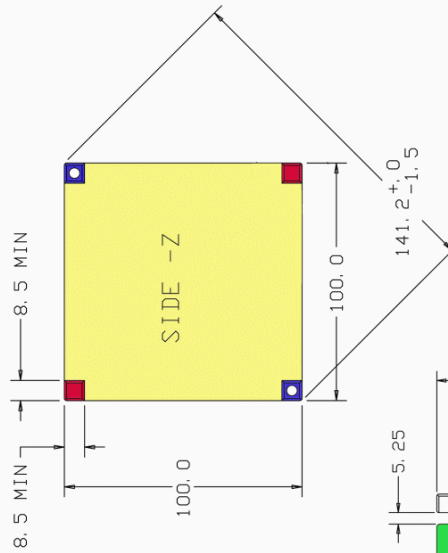
■ = DEPLOYMENT SWITCH

■ = SEPARATION SPRING

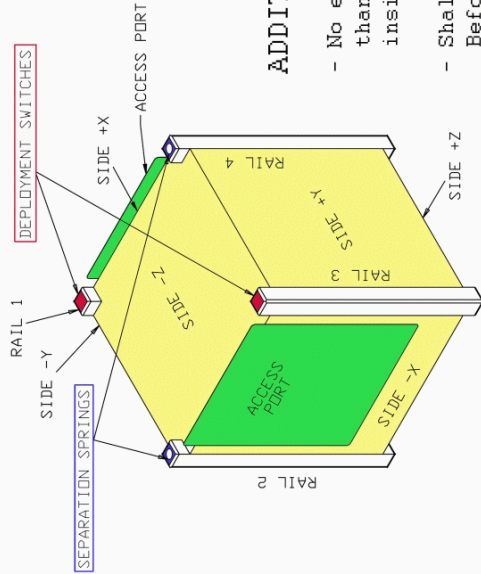
OPTION A



OPTION B



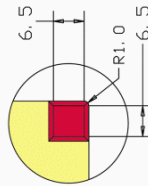
NOTE: Deployment switch and separation spring placement schemes shown in Option A and B. Deployment switch(es) should be compatible with +Z contact points.



ADDITIONAL NOTES:

- No external components other than the rails shall touch the inside of the P-POD.
- Shall incorporate a Remove Before Flight pin OR launch with batteries fully discharged.
- Rails shall be aluminum hard anodized.
- At least one (1) deployment switch shall be incorporated on all CubeSats.
- Center of gravity shall be located within a sphere of 2 cm from its geometric center.
- Separation springs can be found at McMaster Carr (P/N 84985A76).

CONTACT DETAIL FOR SIDE +Z



CUBESAT SPECIFICATION		REV: 12
CALIFORNIA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY AEROSPACE ENGINEERING DEPARTMENT SAN LUIS OBISPO, CA 93407 (805) 756 - 5087		
ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS UNLESS OTHERWISE NOTED.	DATE: August 1, 2009	NOT TO SCALE
ROUND ALL EDGES AND CORNERS.		
±0.1 mm OR BETTER.		



