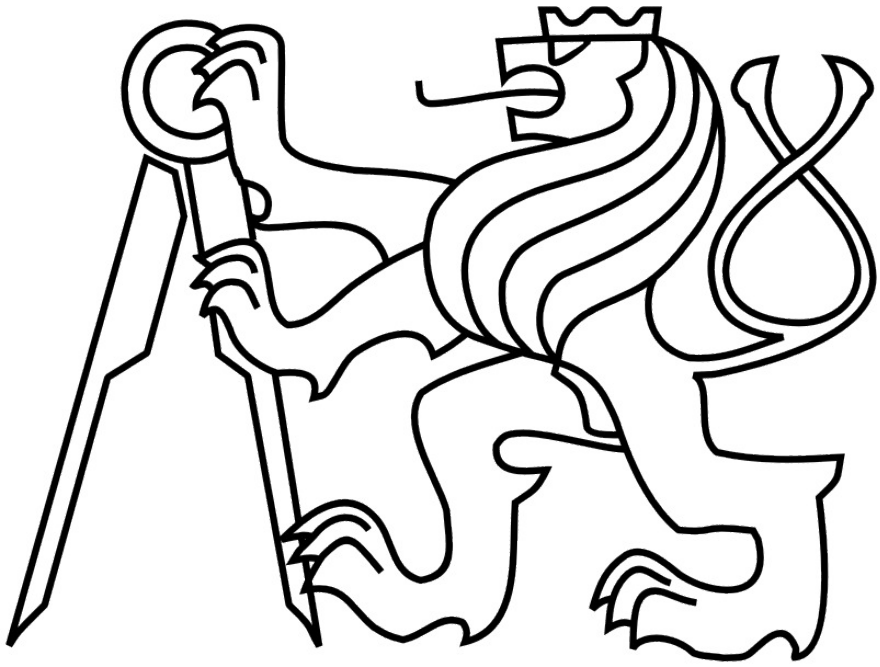
České vysoké učení technické

v Praze

Fakulta strojní

Ústav letadlové techniky



Bakalářská Práce

Solární plachetnice: konstrukční principy

Solar sails: construction principles

Zadání práce

Prohlášení

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

V Praze dne: 17.8.2018 Jan Rozsypal

Poděkování

V první řadě děkuji Mgr. Jaroslavu Kousalovi, Ph.D. za poskytnutí příležitosti se zabývat problematikou solárních plachetnic i přes mezi-oborový překryv. Dále bych rád poděkoval v první řadě mému příteli Ing. Janu Snížkovi, který mi byl oporou a konzultantem pro danou problematiku, Ing. Janu Lukačevičovi za pomoc s nalezením důležitých zdrojů a Ing. Tomáši Baďurovi, Ph.D. za konzultace a vedení mé práce. Dále pak Ing. Dominikovi Jančíkovi bych rád poděkoval za pokus o 3D tisk komponent pro CubeSAT, Danielovi Radulovičovi a Adamu Hagenhoferovi za morální podporu. V neposlední řadě bych rád poděkoval mým milujícím rodičům, kteří mne psychicky i materiálně podporovali po celou dobu mého dlouhého studia.

Anotace

Název práce:	Solární plachetnice: konstrukční principy
Autor:	Jan Rozsypal
Vedoucí práce:	Mg. Jaroslav Kousal, Ph.D.
Akademický rok:	2017/2018
Ústav:	Ú 12122 – ústav letadlové techniky

Anotace: Cílem této práce bylo shrnout historický vývoj solárních plachetnic a jejich konstrukčních řešení. V práci byly nastíněné fyzikální principy, konstrukční rozdělení a realizované či plánované mise solárních plachetnic. V závěru práce autor uvedl srovnání jednotlivých konstrukčních řešení a diskutoval návrh konceptu konstrukčního řešení modelové mise analogické k ESTcube – 1 a popsal 3D tisk modelu sloužícího k demonstraci této technologie.

Klíčová slova: Solární plachetnice, konstrukční principy solárních plachetnic, elektrická solární plachetnice

Annotation

Title:	Solar sails: construction principles
Author:	Jan Rozsypal
Supervisor:	Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D.
Akademic year:	2017/2018
Department:	Ú 12122 – Department of Aerospace Engineering

Annotation: The goal of this paper was to review historical development of the solar spacecrafts and their construction. In the paper were outlined physical principles, constructions, realized and planned missions of the solar spacecrafts. In the end the author compared various construction solutions and discussed concept of the construction solution of the model mission analogical to the ESTcube – 1 and demonstrated production of the module using 3D printing.

Key words: Solar sailing spacecraft, construction principles of solar sailing spacecrafts, electric solar spacecraft

Obsah

1 Úvod do problematiky 4
2 Historie solárních plachetnic 6
2.1 Rané zmínky o světle jako zdroji pohybu 7
2.2 Solární plachetnice v science fiction literatuře 7
2.3 První pokusy pod křídly NASA 8
2.4 Echo 1 a 2: nafukovací odrazivé satelity 9
2.5 Použití slunečního tlaku pro stabilizaci družic ... 10
2.6 Vesmírné závody ve hvězdách 11
2.6.1 První pokusy o závod k Marsu 11
2.7 Vznik SSUJ v Japonsku a LSG v Československu 11
2.8 Luna Cup: závod Země – Měsíc 11
2.9 Rusové zkonstruovali mohutné zrcadlo 14
2.10 Sluneční plachetnice jako symbol tolerance 15
3 Fyzikální princip solárních plachetnic 16
3.1 Proč se vůbec zabývat solárními plachetnicemi 16
3.2 Rozdělení typů solárních plachetnic 16
3.3 Tlak slunečního záření 17
3.4 Solární vítr a gravitační síly 18
3.5 Manévrovatelnost solární plachetnice 20
4 Typy konstrukčních řešení solárních plachetnic 21
4.1 Rozdělení konstrukčních řešení solárních plachetnic 23
4.1.1 Samostabilní konstrukce 23
4.1.2 Konstrukce stabilizované rotací 24
4.1.3 Solární plachta diskového typu 24

4.1.4 Heliogyro – větrné mlýny 24

5 Současný stav plánovaných či realizovaných konstrukcí solárních plachet 27

5.1 IKAROS – první pochodeň vyslána směr Venuše 27

5.2 The Planetary Society – Přes Cosmos 1 po LightSail 1 a 2 28

5.3 Realizované či plánované mise na bázi modulárního systému CUBESAT 28

5.3.1 LightSail 1 a 2 28

5.3.2 Surrey Space Centre – CubeSail 29

5.3.3 czCube – Česká amatérská družice 29

5.4 Koncepty návrhů konstrukcí uvažovaných pro budoucnost 30

5.4.1 Near Earth Asteroid Scout 30

5.4.2 Breakthrough Starshot 31

6 Koncepce konstrukčního řešení modelové mise analogické k ESTcube – 1 33

6.1 Průběh mise ESTcube – 1 v letech 2013 - 2015: 34

6.2 Konstrukce e-plachty ESTcube - 1 35

6.3 Návrh koncepce konstrukčního řešení 36

6.3.1 Výběr modelu družice pro 3D tisk 36

6.3.2 Proces přípravy 3D tisku a vzniklé komplikace. 38

6.4 Finální model STRATASATT FDM ONE 39

7 Závěr 40

8 Seznam použité literatury 41

9 Seznam použitých obrázků 44

10 Seznam Příloh 46

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Vysvětlivka
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
ESA	European Space Agency
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
U3P	**U**nion pour la **P**romotion de la **P**ropulsion **P**hotonique

Seznam veličin

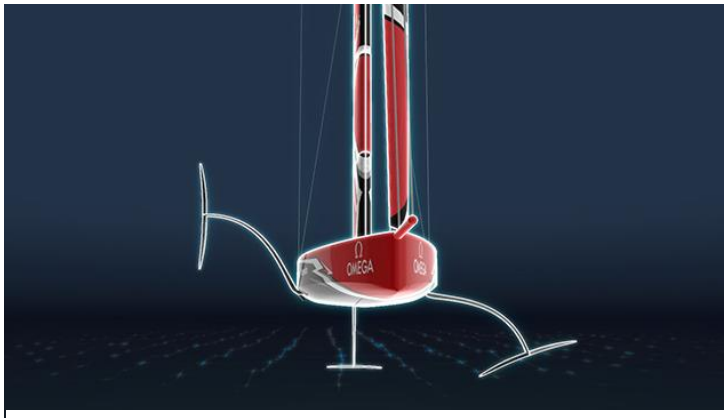
Veličina	Jednotky	Vysvětlivka
F	N	Síla
N	W/m^2	Solární konstanta

1 Úvod do problematiky

„Dívejte se vzhůru na hvězdy a nikoli dolů na nohy. Pokuste se pochopit, co vidíte a proč existuje vesmír. Buďte zvědaví.“

Stephen Hawking

Inspirován citátem slavného zesnulého astrofyzika S. Hawking, autor se v této práci snaží spojit získané zkušenosti z mezinárodních závodů v jachtingu a též svou zvídavost v oboru kosmonautiky, konkrétně v oboru solárních plachetnic. Při pohledu na dnešní závodní plachetnice (viz Obrázek 1) by nejeden čtenář mohl označit plavidlo za kosmické. U létajících lodí s pokročilými technologiemi hydrofoil s aero-dynamickými profily jsou inženýři pozemních plachetnic na prahu konstrukcí kosmických a mnohé technologie, především na poli kompozitních materiálů se překrývají. Dle autora se jachting, začíná přibližovat tomu kosmickému a pouze nedostatečně prozkoumané odvětví meziplanetárního či orbitálního pohonu brání většímu využití a tkví v něm velký potenciál. Peníze investované během historie lidstva do kosmonautiky a především pak do technologií solárních plachetnic, se ještě zdaleka nerovnají odpovídajícímu výkonu, který by měly tyto technologie přinést. V dobách budoucích, s velkými plány, ať už jde o osidlování okolních planet či



Obrázek 1: Radikální jednotrupý design obhájce Amerického poháru z Nového Zélandu pro rok 2021, dle autora práce označitelný za kosmický (Zdroj: Yachting World, (7))

studie na těžení vzácných plynů a nerostů z okolních asteroidů, až po koncepty nejrychlejších kosmických plavidel, které by mělo umět lidstvo kdy zkonstruovat v podobě konceptu Breakthrough Starshot, bude mít dle názoru autora technologie vesmírných solárních plachetnic ještě možnost říct své. Od klasicky poháněných solárních plachetnic proudy fotonů po elektrické, respektive magnetické plachetnice, jejichž zdrojem je sluneční vítr, bude meziplanetární pohon možná minimálně z části záviset právě na nich. Konstrukční řešení plavidel s co největší plochou plachet a nejmenší váhou budou představovat technické konstrukční výzvy. Bude záležet především na vůli samotných organizací a institucí, aby projekty spojené s vesmírnými plachetnicemi dotahovaly do konce a nedocházelo tak k promarnění příležitostí a prostředků, často zapříčiněné selháním nosných raket. Větší zájem o solární plachetnice by též mohl probudit možný objev vodní kapalné plochy, který je však dosud nepotvrzen, na planetě Mars. Pokud by se objev prokázal, byla by to vynikající příležitost právě pro designéry solárních plachetnic, aby zkonstruovali plavidlo, jež by svou plachtu dokázalo složit a použít případně též i na povrchu planet jako je např. právě zmiňovaný Mars.

Tato práce si klade za cíl poskytnout vhled do historického vývoje solárních plachetnic a konstrukčních řešení těchto plavidel. Dále práce mapuje současné a budoucí koncepty solárních plachetnic. Autor v poslední části práce navrhuje koncepční řešení modelové mise analogické k ESTcube – 1 a poukazuje na výhody využití 3D tisku pro vytváření modelů. Autor se domnívá, že by v blízké budoucnosti mohl právě technologie 3D tisku natolik pokročit, že právě při osidlování planety Mars či Měsíce by mohly první příbytky a základny vybudovány touto technologii.

2 Historie solárních plachetnic

První zmínky o možném solárním tlaku pochází již od astronoma Johannese Keplera z roku 1619. Při pozorování ocasů komet se snažil vysvětlit fakt, proč se ocasy komet při průletu kolem Slunce obvykle orientují směrem od této planety. Správně usoudil, že světelné záření působí na prachové částice v ocasech komet určitým tlakem. Teoretické vysvětlení tohoto jevu však přišlo až v rámci elektromagnetické teorie z roku 1873 formulované fyzikem J.C.Maxwellem. Z této teorie vyplývá, že libovolný typ záření působí na libovolné pohlcující či odrážející těleso určitým tlakem. Tento tlak působícího slunečního záření je nepřetržitý, avšak velmi malý, musí proto být vynakládán na velkou plochu v případě, že bychom jej chtěli použít jako pohon. (1)

Obrázek 2: Umělecké ztvárnění 45. výročí průletu Pioneer 10 skrz pás asteriodů od malíře Ricka Guidice (Zdroj: NASA)

2.1 Rané zmínky o světle jako zdroji pohybu

Švéd Svante Arrhenius předpovídal v roce 1908 možné rozšíření teorie panspermického[1] vzniku života na planetě Zemi díky meziplanetárnímu přesunu pomocí světla. Byl zřejmě prvním vědcem, který řekl, že světlo může pohybovat předměty mezi planetami. (2)

První realistické návrhy kosmických plavidel poháněných slunečním zářením přednesli v roce 1924 ruští vědci Ciokovskij a Canděr, kteří si uvědomili fakt, že je potřeba nejprve kosmickou loď dostat do volného prostoru a teprve poté roztáhnout sluneční plachtu zachycující fotony. Na konci dvacátých let dvacátého století H. Oberth představil koncept „kosmického zrcadla" o průměru až kolem 100 km, které mělo přispět k částečnému roztátí ledů v severním ledovém oceánu, což mělo údajně ulehčit mořeplavbu. (1)

Odborný anglický termín „Solar sail", ze kterého vzniklo označení solární plachetnice[2] byl poprvé publikován ve studii nazvané „Jet Propulsion"[3] v roce 1958 americkým inženýrem R.L Garwinem. (3)

2.2 Solární plachetnice v science fiction literatuře

Jeden z hlavních představitelů science fiction spisovatel Arthur Charles Clarke, jež se proslavil především románem *„2001: Vesmírná Odyssea"*, který filmově ztvárnil Stanley

[1] Z řeckého pan („vše") a sperma („semeno")
[2] Termín sluneční plachetnice za který bývá solární plachetnice zaměňována je zavádějící, jelikož hvězda Slunce není jediným zdrojem slunečního záření
[3] Volně přeloženo jako proudový pohon

Kubrick, napsal v roce 1964 povídku „The Wind from the Sun" v překladu „Vítr vanoucí ze Slunce". V této povídce popisuje závod slunečních plachetnic mezi Zemí a Měsícem. Kosmické plachetnice poháněné plachtami několika kilometrů čtverečních plochy a dvoučlenných posádek byly ukázkou spisovatelovi futuristické představivosti. (4)

2.3 První pokusy pod křídly NASA

V šedesátých a sedmdesátých letech se koncepty slunečních plachetnic pohybovaly na úrovni předběžných návrhů. Americký národní úřad pro letectví a kosmonautiku (NASA) uvažoval o projektu, který by zkoumal Halleyovu kometu. To měl být vůbec první pokus zkonstruovat solární plachetnici. Tým vědců pod

Obrázek 3: Carl Berglund prozkoumává snímek z roku 1977, který ukazuje konstrukci kosmické sondy jež se měla přiblížit k Halleyově kometě (Zdroj: The Planetary Society)

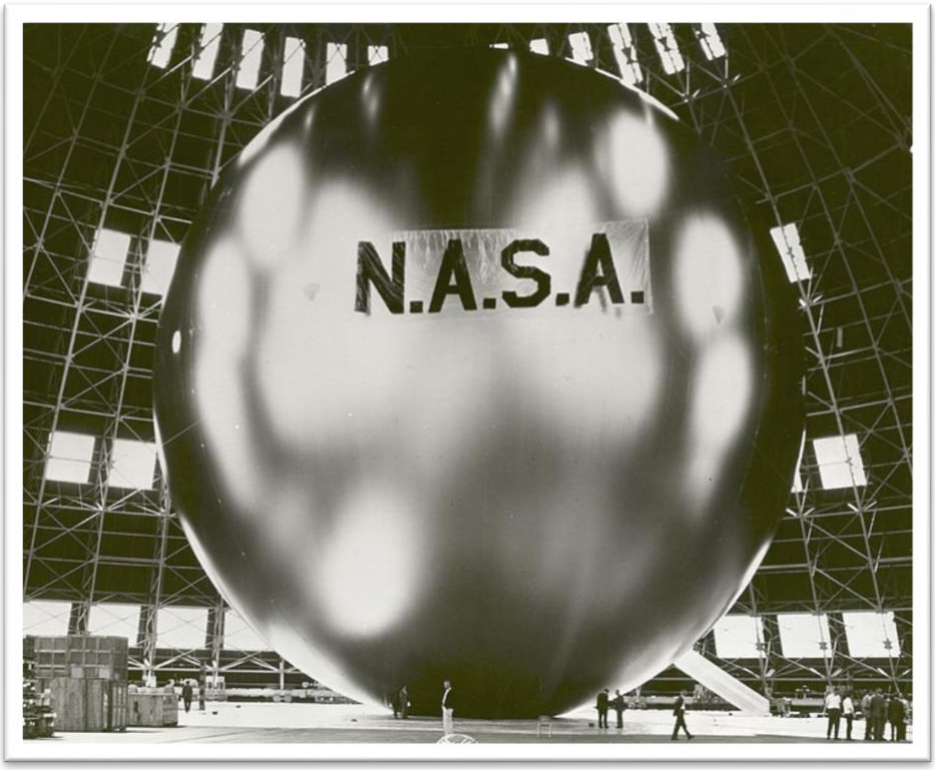
vedením Carla Berglunda (viz Obrázek 2) pracoval na konceptu kosmické lodi, jež se měla přiblížit Halleyově kometě v roce

1986. Projekt měl dle magazínu Time (5) dostat dotaci 5,5 milionu dolarů a vyvíjet dva typy konstrukce: koncept čtvercového křídla a koncept heliogyro konstrukce, které budou dále popsány v kapitole [4]. Bohužel nedostatek financí misi ukončil a tak NASA tento projekt opustila dříve, než byl dokončen. (5)

2.4 Echo 1 a 2: nafukovací odrazivé satelity

Tyto dvě retranslační družice[4] sloužili jako odrazové plochy pro rádiové vlny. Na Obrázku 4 můžeme pozorovat, jak velké tyto družice byly v porovnání s drobnými lidskými postavami. Echo II (1964), větší z dvou sesterských družic šlo o rigidizovatelnou[5] družici o průměru 41 metrů díky které se uskutečnilo první družicové spojení mezi USA a USSR. Povrch byl vyroben z Mylaru s tenkou pohliníkovanou vrstvou. (6)

[4] Retranslační družice slouží jako zprostředkovatel komunikace
[5] Rigidizovat – držet tvar, stabilizovat



Obrázek 4: Satelit Echo 2 enormních rozměrů (Zdroj: (6))

2.5 Použití slunečního tlaku pro stabilizaci družic

Sonda Mariner IV, která byla vypuštěna roku 1965 na misi směrem k Marsu, využívala slunečního tlaku neboli záření ke stabilizaci letu. Na konci slunečních článků se nacházely pohliníkované lopatky, jež dokázaly odrážet sluneční záření a vytvářely tak moment, který sondu orientoval dle potřeby. Později se na několika družicích objevila solární plachta, která sloužila k vyrovnání momentu tlaku slunečního záření na konstrukci družic např. Mariner 10 v roce 1973. Tyto družice disponovaly pouze jedním slunečním článkem. Plachta o rozměrech 2x5 m^2, umístěná na druhé straně družice kompenzovala sluneční tlak a stabilizovala tak loď. Konkrétní mise mezi roky 1992 až 1997 Insat 2 či GOES 8 až 11 lze dohledat v internetové Encyklopedii družic SPACE 40 dostupné

z https://www.lib.cas.cz/space.40/index.html/ [cit. 2018-08-16] (1)

2.6 Vesmírné závody ve hvězdách

2.6.1 První pokusy o závod k Marsu

Z kraje osmdesátých let minulého století skupina nadšenců v USA, ale také v Evropě pojala myšlenku závodů slunečních plachetnic. Ve Francii skupina U3P[6] vyvíjí svůj koncept solární plachetnice a propaguje závod k Marsu, který se měl uskutečnit v roce 1992 k příležitosti 500. výročí objevení Ameriky Kryštofem Kolumbem. (6)

2.7 Vznik SSUJ v Japonsku a LSG v Československu

Vznikají další skupiny, které se zabývají solárními plachetnicemi v Japonsku. Konkrétně je to Solar Sail Union of Japan (SSUJ), která se později též zapojí do návrhu solárních plachetnic pro závod Luna Cup. První zmínky o aktivitě v tuzemském Československu jsou z roku 1981, kdy se utvořila studentská skupina LSG v pražském Planetáriu, která studovala tématiku solárních plachetnic a přinesla návrhy plachetnic. (1)

2.8 Luna Cup: závod Země – Měsíc

Závod k Marsu byl však brzy zavrhnut také kvůli sílícímu tlaku války v Perském zálivu. Byla navržena o mnoho méně náročnější varianta závodu vesmírných plachetnic: Země – Měsíce, tak jak jej též popisuje spisovatel A.C.Clarke již dříve zmiňovaném

[6] U3P – z francouzského **U**nion pour la **P**romotion de la **P**ropulsion **P**hotonique

románu „The Wind from the Sun" z roku 1964, ovšem bez pilotů. (4) Závod měl nést název Luna Cup a měl se uskutečnit v roce 1994. (7)

Návrhy pro měsíční závod Luna Cup:

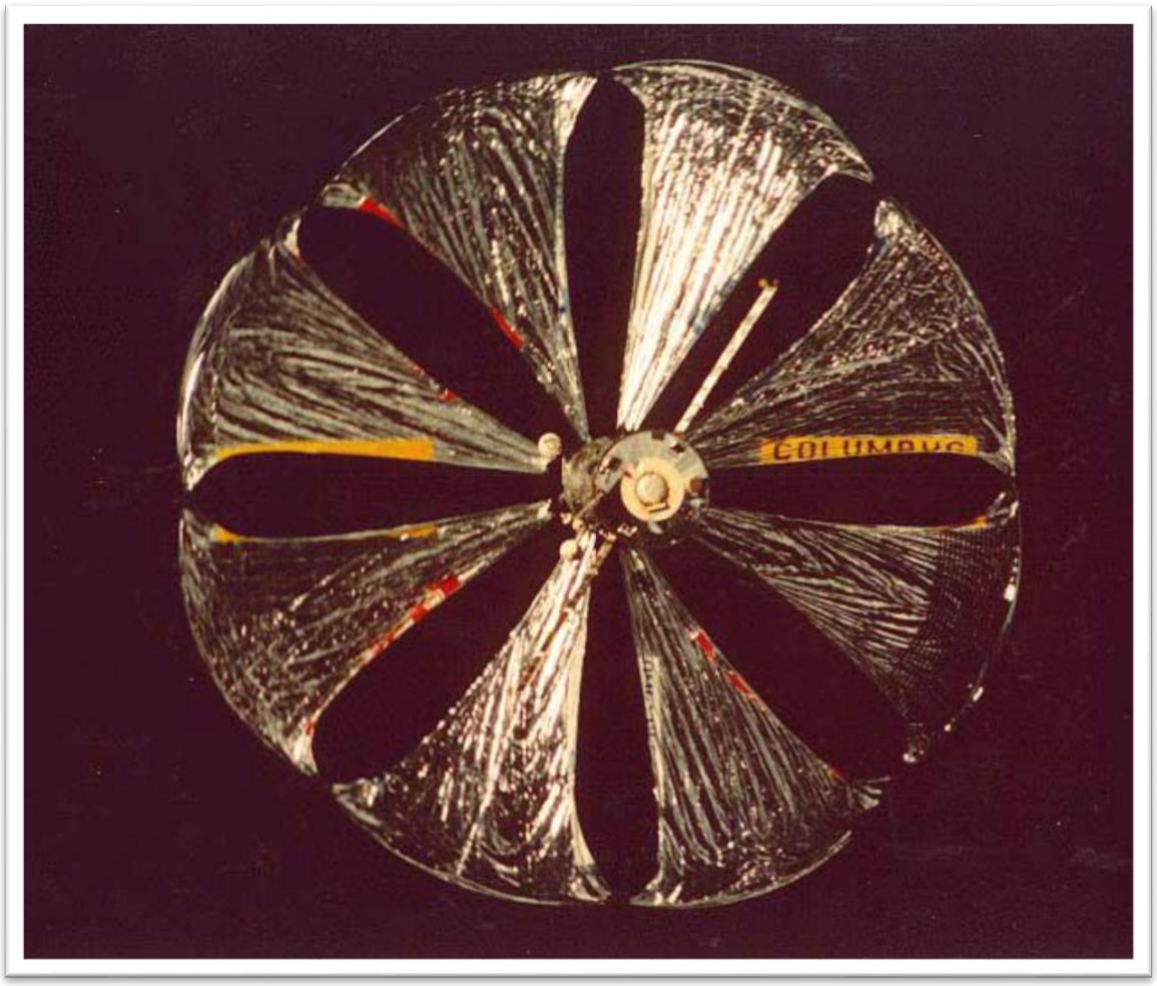
1. Čtvercovou plachtu navrhovala francouzská skupina U3P o ploše 4.000 m^2 na diagonálních podpěrách z kompozitního uhlíkového materiálu dlouhých 45 m a hmotnosti necelých 250 kg. Materiál plachty byl navržen jako mylarová fólie od firmy DuPont o tloušťce 8 mm. K odrazu světla mělo docházet s účinností 85-88%, k orientaci plavidla měly sloužit sluneční čidla z každé strany plavidla. Manévrovatelnost mělo zajistit osm klapek na okrajích plachty.
2. Japonská SSUJ navrhovala plavidlo s plachtou o rozměrech 900 m^2 a hmotností 96 kg.
3. Nejhlubší znalostí solárních plachetnic v té době disponovaly Spojené státy americké, na jejichž půdě se postupně vyvíjely koncepty solárních plachetnic od sedmdesátých let. Pro závod k Měsíci byla navržena konstrukce o co největší ploše a sice čtvercové plachty o straně 55 m, vyrobené z mylarové folie o tloušťce 2,54 mm. Designeři navrhli systém rozvinutí plachty pomocným systémem, který by plachetnice pro získání větší rychlosti odhodila.
4. Svůj návrh konceptu představila též Československá skupina LSG pod vedením Ing. Marcela Grüna pod názvem „minimální sluneční plachetnice". Skupina též ve svých studiích zvažovala konstrukci uhlíkových kompozitních tyčí, které pod vlivem ultrafialového záření zpolymerovaly a došlo tak k jejich zpevnění. Svůj návrh prezentovali na 33. mezinárodním astronautickém kongresu

IAF v Paříži v roce 1982, kde získali první cenu v kategorii undergraduate (studenti). K realizaci tohoto projektu nikdy nedošlo.

Všechny plachetnice měly být vyneseny jako přídavné zařízení na palubě rakety Ariane 4 v roce 1994. Předpokládalo se přibližně dvou až tří týdenní zkušební manévrovací období pro kalibraci a vyladění řízení plachetnic. Vítězem se měl stát ten, který jako první pošle na zem fotografii středu odvrácené strany Měsíce. Bohužel celý program byl odložen na neurčito. (1)

2.9 Rusové zkonstruovali mohutné zrcadlo

Ruští inženýři se solárními plachetnicemi zabývali již od osmdesátých let, avšak plachetnice ve smyslu solární plachetnice s pohonem na solární záření nevznikla, pouze zkonstruovali velké zrcadlo Znamya (viz Obrázek 5). Toto zrcadlo testovali pro účely zvýšení efektivity solární energie. Uvažovali též o možném budoucím napájení kosmických plavidel pomocí této odrazivé technologie. Po několika dnech, kdy plavidlo vyzařovalo přibližně třikrát víc, než měsíc shořelo při vstupu do atmosféry Země. Druhá verze Znamya pak po střetu s kosmickou raketou Mir nebyla schopna provozu. (8)



Obrázek 5: Znamya 2 zrcadlová solární plachetnicee (Zdroj: Smithsonian, (8))

2.10 Sluneční plachetnice jako symbol tolerance

Za zmínku stojí ještě nedokončený projekt, ve kterém ESA podpořila organizaci UNESCO[7] v projektu nazvaném „Star of Tolerance", tedy hvězda tolerance. Koncept byl navržen v roce 1997 N. Razavim v Paříži. Solární plachetnice byla navržena s plachtou 1600 m^2 a mělo se jednat o plavidlo pozorovatelné pouhým okem. Loď by kroužila přibližně dva roky na oběžné dráze a symbolizovala by globální komunikaci a měla vést k omezení válek a nastolení tolerance mezi národy. Po dvou letech by pak zamířila dále do kosmu. Do tohoto projektu a výroby jejího modelu investovala ESA[8] a DLR[9] 1,5 mil. DEM. Kromě modelu se projekt nepodařilo realizovat. (1)

[7] UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
[8] ESA – European Space Agency
[9] DLR – Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e. V.

3 Fyzikální princip solárních plachetnic

3.1 Proč se vůbec zabývat solárními plachetnicemi

Velká část hmotnosti dnešních družic tvoří pohonné systémy. I přes to není zásoba dodatečné rychlosti nijak velká a především je velmi omezená, jelikož při jejím použití je spotřebováváno palivo. Jediný zdroj energie a tudíž pohonu externího charakteru, který v kosmu lze využít je tak solární záření. Hvězda Slunce produkuje dva hlavní typy záření:

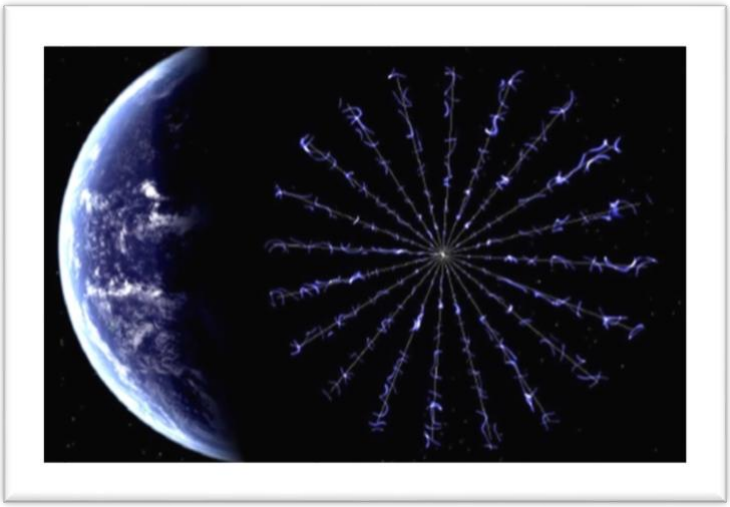
- solární záření, které lze chápat jako proud fotonů
- o mnoho slabší solární vítr. Ten se sestává z plazmatického proudu nabitých částic. Toto záření lze využívat pro meziplanetární lety či též jako záložní zdroj pohonu. (9)

3.2 Rozdělení typů solárních plachetnic

V této práci autor nastíní fyzikální princip solárních a příbuzných elektrických a magnetických plachetnic. Na úvod je potřeba si ujasnit konkrétní rozdělení solárních plachetnic dle typu a jejich využití. Plachetnice se dělí podle typu plachty a s tím i souvisejícím typu pohonu, který využívají:

- Solární plachetnice s odrazivou fyzickou plachtou fungující na principu přenosu hybnosti z proudu fotonů světelného (solárního) záření.
- Elektrická solární plachetnice – někdy též E-sail využívající mnohonásobně slabší (5.000 až 10.000 x)

solární vítr, zachycující pomocí kladně nabitého dlouhého mikrodrátu nataženého kolem plavidla (viz



Obrázek 6).

Obrázek 6: HERTS je koncept vesmírného plavidla používající elektrickou solární plachtu (Zdroj: NASA, Marshall Space Flight Center)

- Magnetická solární plachetnice –jedná se o koncept solární plachetnice, využívající solární vítr. (3)

3.3 Tlak slunečního záření

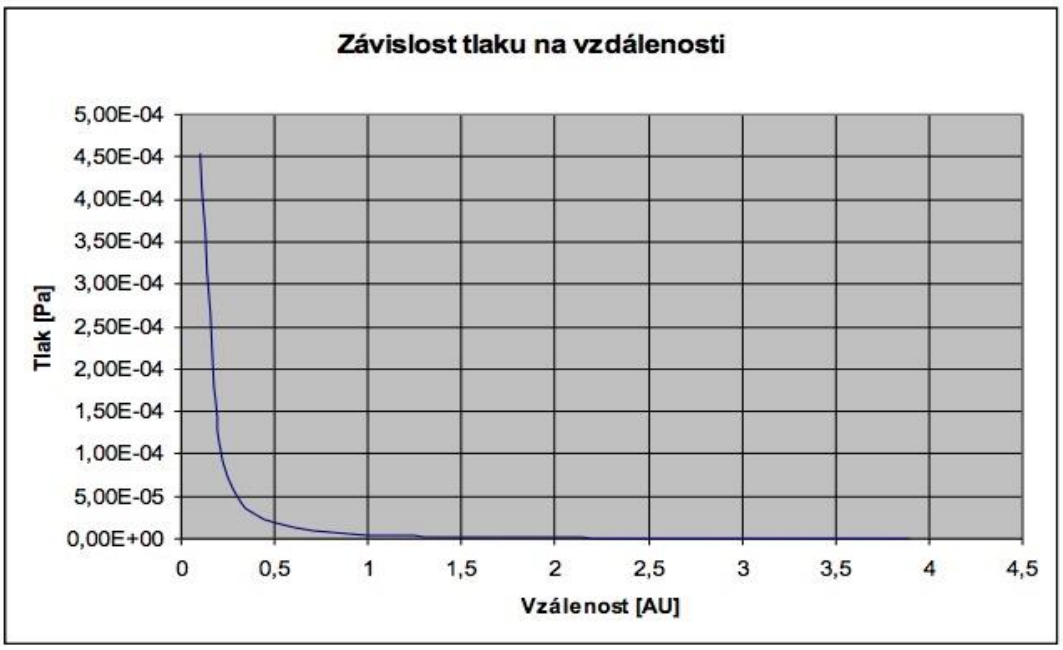
Sluneční plachetnice využívají tlaku slunečního záření, který vyzařuje Slunce. Dopadající energie označována též jako sluneční (solární) konstanta je ve vzdálenosti Země - Slunce rovna N = 1367 W/m^2

Tlak slunečního záření p na 1 m^2 je pak dán vztahem:

$$p = \frac{N}{c} = 1367 \frac{J}{(s * m^2 * c)} = 4{,}43 * 10^{-6}\ Pa$$

Při 100% odrazu je pak hodnota tlaku dvojnásobná.

Je ovšem potřeba si uvědomit fakt, že hodnota solárního tlaku se mění se čtvercem vzdálenosti. Odvozujeme tento fakt od předpokladu, že celkový výkon P_0 světelného záření je konstantní při uvažování Slunce jako hvězdy, jež nebude v příštích několika tisíci letech měnit svou intenzitu záření. S tímto faktem je nutné při plánování manévrů a meziplanetárních misí počítat.



Graf 1: Závislost slunečního tlaku na vzdálenosti (Zdroj:Fořt, (3))

3.4 Solární vítr a gravitační síly

V úvahách zmiňovaných v předchozí podkapitole nebyl uvažován vliv slunečního větru, ten je řádově 5.000 až 10.000 krát menší než sluneční záření. Jedná se o konstantní proud nabitých částic, jež proudí směrem od zdroje, tedy v naší soustavě se jedná o směr od Slunce k Zemi. Pro funkčnost klasické solární plachetnice jej můžeme přibližně do plochy plachty 2.000 m^2 zanedbat[10]. Pro technologie elektrické a

[10] Plazmatický proud nabitých částic proudících od Slunce nemá dostatečnou hmotnost pro ovlivnění klasických solárních plachetnic, výjimkou jsou solární erupce jako tomu bylo u mise NanoSail-D2

magnetické solární plachetnice však představuje hlavní složku pohonu, jelikož elektrostatické, potažmo magnetické pole tvořící plachtoví dokáží zachytávat neboli absorbovat daleko menší částice a tím pádem i síly. (1)

Kromě solárního větru působí na solární plachetnice též gravitační síly, které je potřeba uvažovat při manévrování a nastavování plachty pro požadovaný kurz. Správným nastavením plachty lze řídit plavidlo a měnit tak polohu, trajektorii či orbitální dráhu.

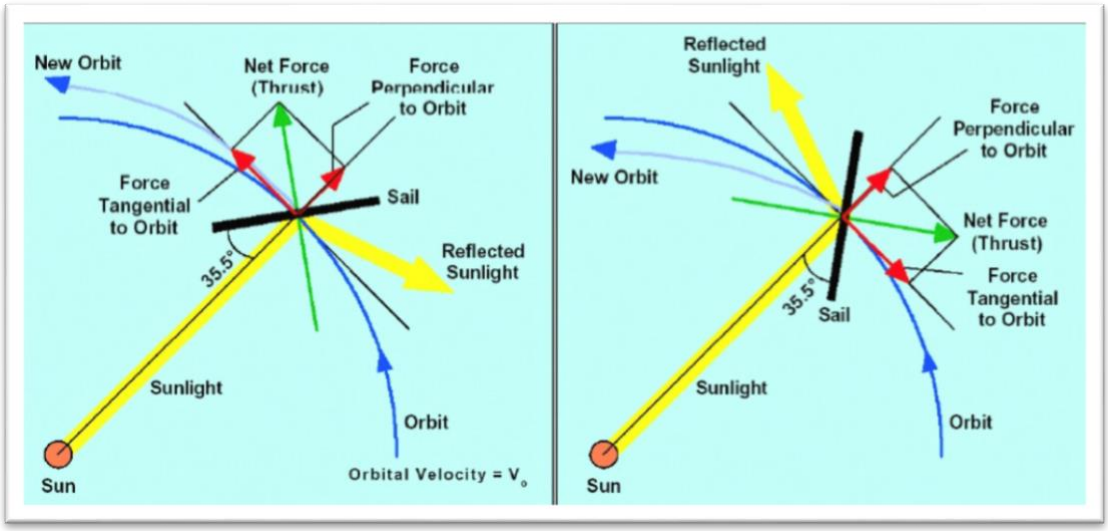
Intenzitu gravitačního pole uvažované hvězdy ve vzdálenosti $\boldsymbol{l}$ je dána vztahem:

$$\boldsymbol{K(l) = \kappa \frac{M}{l^2} [N.kg^{-1}]}$$

Kde **κ** značí gravitační konstantu a **M** hmotnost dané hvězdy. (3)

3.5 Manévrovatelnost solární plachetnice

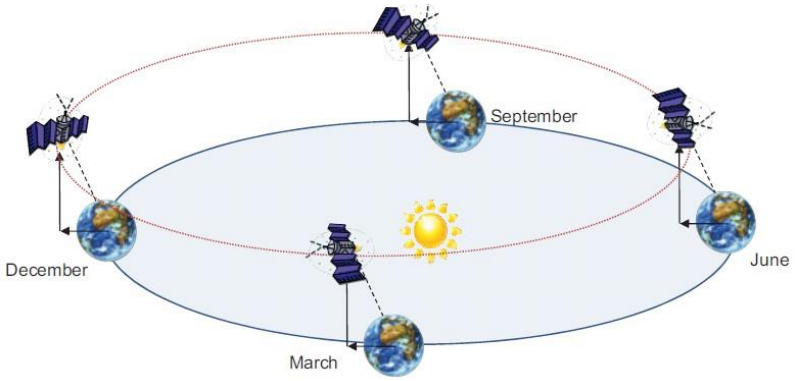
Podobně jako zemská plachetnice může natáčením plachty měnit vektorový součet za pomoci kýlu jdoucího pod plavidlo, solární plachetnice využívá na podobném principu jako další sílu gravitaci. Z ilustračního Obrázku 6 lze vyčíst princip změny orbitální dráhy pomocí vektorového součtu sil vzniklých natočením plachty.



Obrázek 7: Názorné zobrazení manévrovacích schopností solární plachetnice pomocí součinu vektorových sil (Zdroj: (10)

Solární plachetnici lze také umístit na oběžnou dráhu planet jako statit[11] mimo rovinu procházející Sluncem viz Obrázek 8. (10)

[11] Statit – družice umístěná ve stacionární poloze na orbitální dráze



Obrázek 8: Družice fungující jako statit pomocí solární plachty (Zdroj: (10))

4 Typy konstrukčních řešení solárních plachetnic

Motivace ke konstrukci solárních plachetnic je zřejmá od svého počátku. Využití energie, jež v meziplanetárním prostoru je a může být využita nejen jako zdroj energie, ale též jako pohon. Vyžití externího zdroje pohonu přináší významné úspory vyplívající z potřeby nižšího objemu paliva přítomném na daném vesmírném palivu. Tento fakt vede k celkově nižší hmotnosti družice a tím pádem i možnému snížení nákladů na jednotlivé mise.

Solární plachetnice a jejich konstrukce podléhá několika základním technickým problémům:

- Požadována konstrukce co největší možné plochy plachty;
- Snaha o dosáhnutí co nejmenší hmotnosti;
- Zajištění spolehlivosti rozkládání;
- Manévrovatelnost v meziplanetárním prostoru;
- Přijatelné náklady na výrobu.

Z toho plyne jednoduché tvrzení, kterým se řídí stavitelé kosmických plachetnic: zkonstruovat co nejvíce odrazivou plachtu s co největší možnou plochou při co nejnižší hmotnosti za co nejnižší náklady.

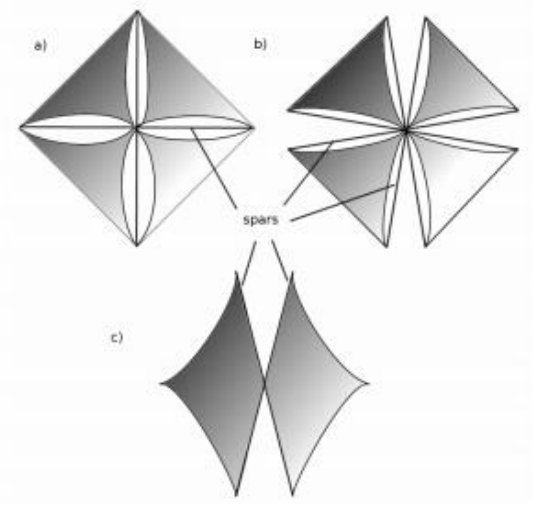
Jak je na první pohled zřejmé nejedná se o triviální úkol. S přibývajícím počtem konceptů a skupin zabývajících se problematikou solárních plachetnic je jasné, že se této technologii v čase přikládá větší váha.

4.1 Rozdělení konstrukčních řešení solárních plachetnic

4.1.1 Samostabilní konstrukce

Dle (11) rozdělujeme konstrukce solárních plachetnic na tuhé (tj.: takové, které potřebují k udržení rozvinutého stavu podporu) a stabilizované dostředivou silou.

Mezi tuhé samostabilní konstrukce řadíme clipper (a), quad (b) (připomínající znak Maltézských rytířů) a koncept zvaný motýl (c). Tyto konstrukce mají uchycení plachet k podporám nebo též stěžňům, bez kterých by nedržely plachty tvar. Konstrukční řešení quad vyžaduje dva stěžně na každý segment plachty, ovšem poskytuje možnost vytvoření momentu, který může zajistit velmi dobré manévrování. Koncept motýlího rozložení může nabízet snížení váhy ovšem za cenu snížení pevnosti konstrukce (viz Obrázek 9). Pevné konstrukce s podporou jsou zřejmě nejpravděpodobnějším typem konstrukcí solárních plachetnic jež budou v budoucnosti dále rozvíjena a testována. (11)



Obrázek 9 Tuhé konstrukce solárních plachetnic: clipper, quad a motýl (Zdroj: (11))

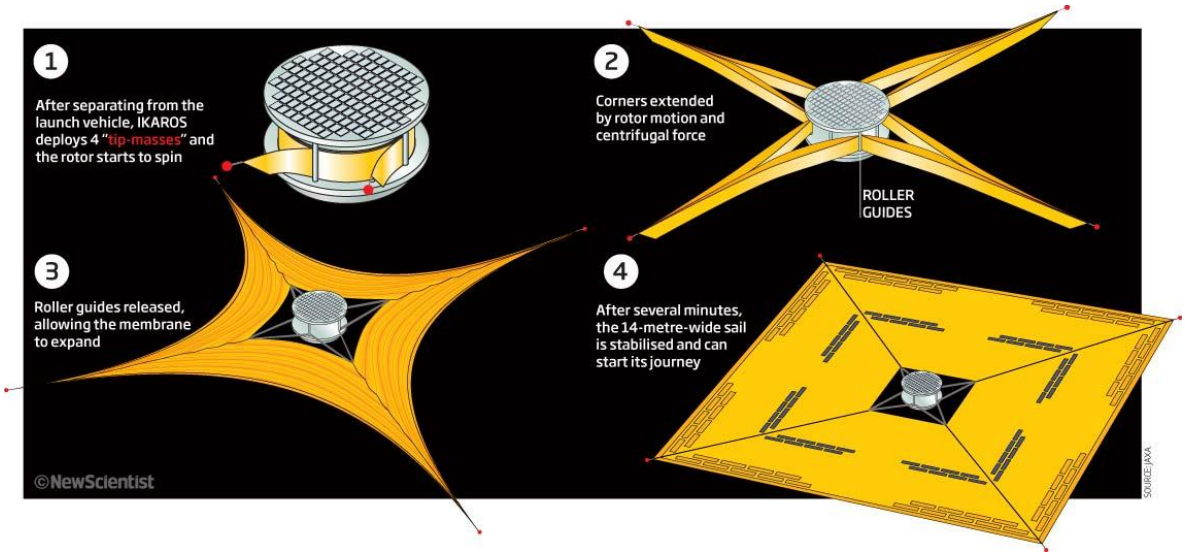
Touto konstrukcí disponovala např. plachetnice společnosti NASA NanoSail D2, LightSail 1 či CubeSail a zřejmě také Breakthrough Starshot, která je však zatím ve stádiu konceptu. Autor popíše jednotlivé mise v kapitole 5.

4.1.2 Konstrukce stabilizované rotací

Hlavním principem konstrukčních řešení bez podpory jsou odstředivé síly, které udržují plachtu stabilní a v rozevřené poloze. Do této kategorie patří dva hlavní typy konstrukcí: 1) plachta ve tvaru disku; a 2) heliogyro. Následující sekce práce tyto dva typy líže popíše.

4.1.3 Solární plachta diskového typu

Plachtu diskového typu, ale čtvercového půdorysu rozvinula v roce 2010 japonská mise IKAROS. Na Obrázku 10 je popsán ve čtyřech krocích postup rozvinutí. Plachta byla navinuta na družici a pomocí odstředivé síly se rozvinula do napnutého stavu. Na plachtě jsou umístěny LCD panely, kterými lze modul ovládat pomocí nastavitelné odrazivosti. Plavidlo stále komunikuje s velitelstvím organizace JAXA, i když již není ve stádiu probíhající mise.



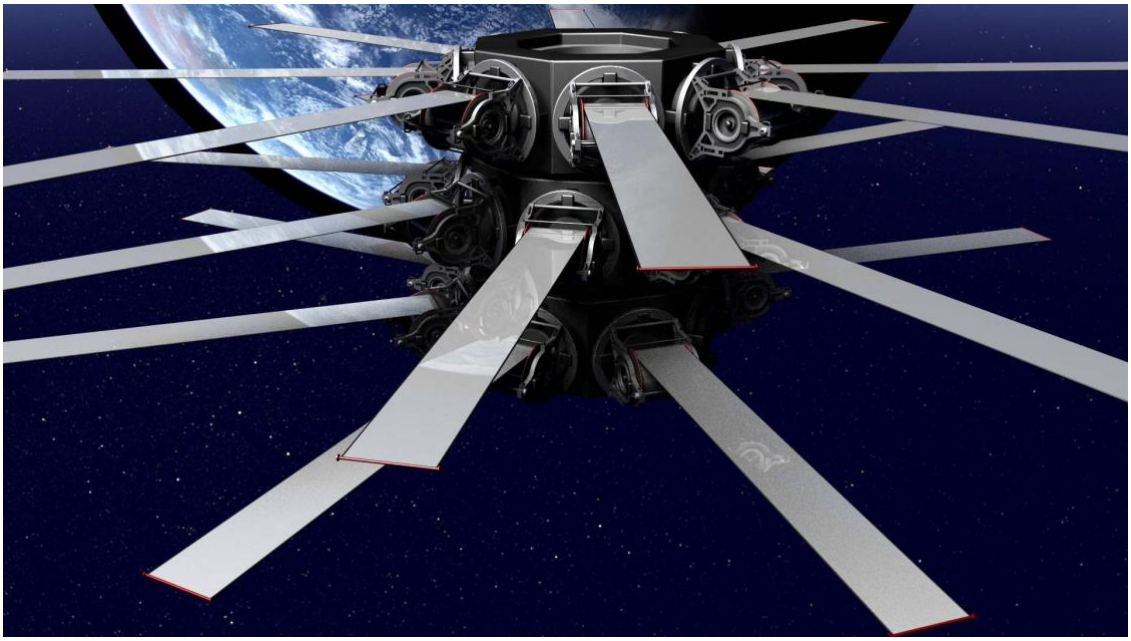
Obrázek 10 Systém rozvinutí diskové plachty družice IKAROS

4.1.4 Heliogyro – větrné mlýny

Tento koncept byl vyvíjen již od šedesátých let v laboratořích NASA, avšak nikdy se nedočkal realizace. Koncept

připomínající vesmírné větrné mlýny je složen z řady dlouhých segmentů plachet používající částečně princip helikoptér. Dlouhé elementy sloužící jako plachty se vysouvají zvlášť na oddělených navíjecích zařízeních a je tak odbourán problém rozkládání a komplikace spojené s balením čtvercových či jiných plachet.

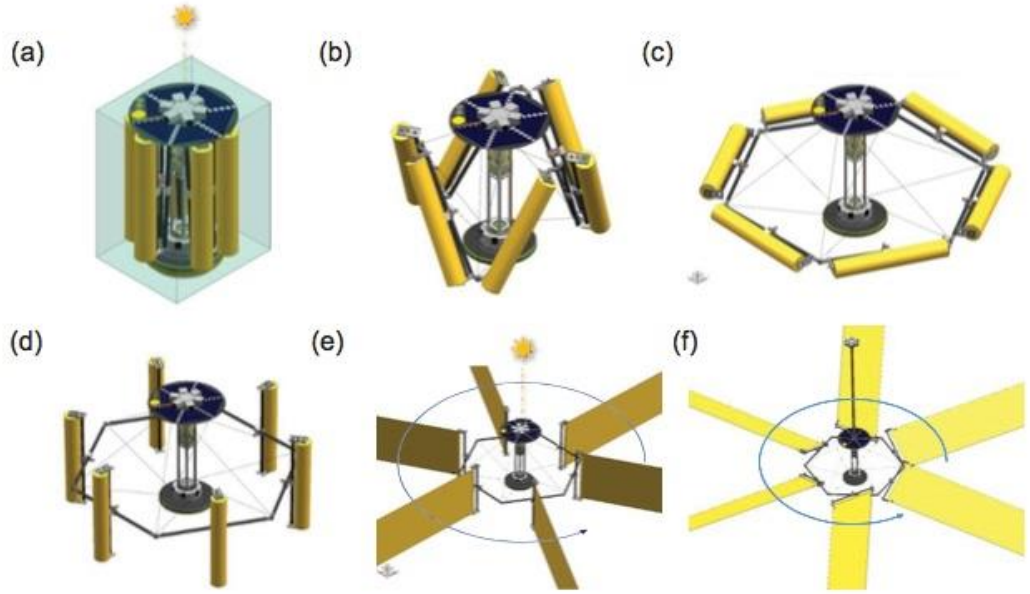
Jak je uvedeno v **(12)** po úspěšné misi IKAROS, koncepty spojené s otáčením plavidla pro jeho stabilizaci dostaly nové impulzy a mezi nimi také koncept heliogyra, jež by se snad v budoucnu



Obrázek 11: Heliogyro s rozkládajícími se segmenty plachet připomínající vesmírný mlýn (Zdroj: Nick's Graphics) (13)

mohl dočkat malé testovací podoby, také díky úspěšné demonstraci plachetnice IKAROS. IKAROS sice nedisponuje systémem heliogyra, ale patří do stejné skupiny solárních plachetnic stabilizované odstředivou silou. (12)

Vědci v NASA pracují na konceptu postaveném pro solární plachetnice oblíbené platformě CubeSat s pracovním názvem HELIOS[12] (viz obrázek 12)(12).

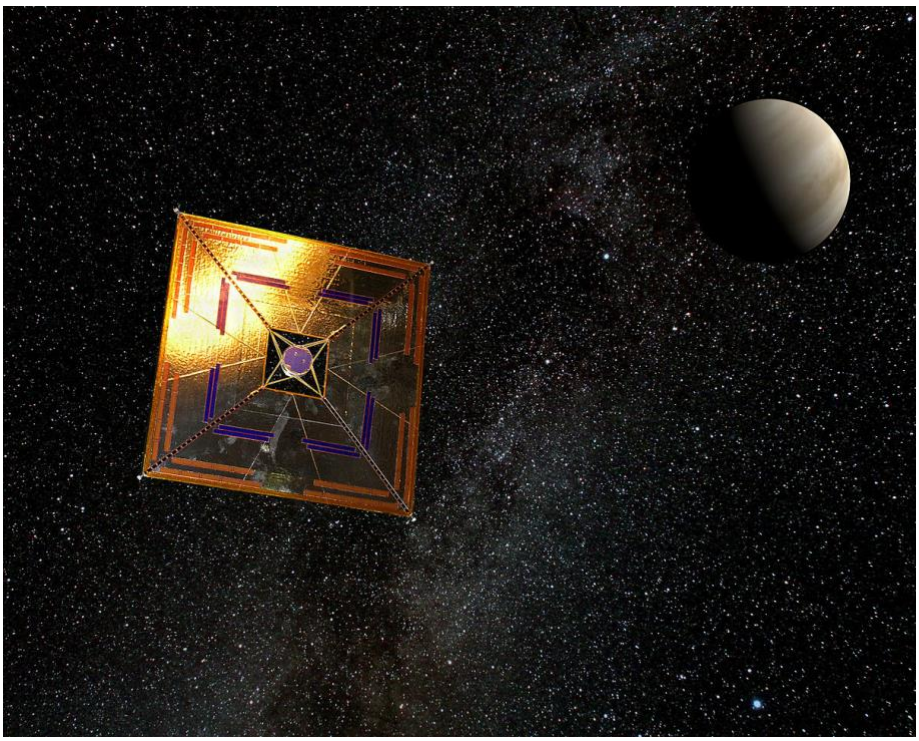


Obrázek 12: HELIOS a jeho rozkládací sekvence (Zdroj Advances in Solar Sailing (12))

[12] HELIOS – High-Performance, Enabling, Low-Cost, Innovative, Operational Solar Sail

5 Současný stav plánovaných či realizovaných konstrukcí solárních plachet

5.1 IKAROS – první pochodeň vyslána směr Venuše



Obrázek 13 IKAROS - nejznámější využití čtvercové plachty (Zdroj: JAXA)

Japonská agentura JAXA se zapsala do historie solárních plachetnic, když se jí podařilo v roce 2010 vyslat na misi směr Venuše první meziplanetární plavidlo IKAROS[13], které je

[13] Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun

považováno za historicky první úspěšnou kosmickou misi v jejímž průběhu byla využita solární plachetnice.

5.2 The Planetary Society – Přes Cosmos 1 po LightSail 1 a 2

K organizacím zabývajícím se solárními plachetnicemi zajisté patří *The Planetary Society.* Organizaci, která byla na pokraji rozpuštění, zachránil šikovný tah s umístěním kampaně na platformu kickstarter a vybráním více než 1,2 mil. Amerických Dolarů přímo od drobných podporovatelů. Po neúspěšném pokusu o suborbitální test mise Cosmos 1 v roce 2001, kdy selhalo oddělení nákladu přišlo selhání rakety Volna při startu a Cosmos tak zůstal v kolonce neúspěšných misí. V roce 2015 zkonstruovala Planetary Society s 32 m^2 Mylarovou 4,5 μm tlustou plachtou družici Lightsail – 1(A).

5.3 Realizované či plánované mise na bázi modulárního systému CUBESAT

5.3.1 LightSail 1 a 2

LightSail 2 je projekt při, kterém se demonstrovala řízená sluneční plavba pomocí satelitu postaveném na platformě CubeSat vyvinuté společností The Planetary Society, globální neziskové organizace věnované průzkumu vesmíru. Rozměry modulu činily 10 × 10 × 30 cm a plachta se rozkládala na ploše 32 m2.
LightSail2 je v současné době naplánován jako sekundární užitečné zatížení vesmírného testovacího programu (STP-2) na raketě Falcon Heavy v roce 2018. [5]

20. května 2015 byla vypuštěna téměř identická kosmická loď

LightSail 1 (dříve nazývaná LightSail-A [1]) a její sluneční plachta byla nasazena 7. června 2015.

5.3.2 Surrey Space Centre – CubeSail

V anglickém *Surrey Space Centre* (SSC) vyvinuli koncept postavený na platformě CubeSat oblíbeného 3U formátu, tedy tři základní moduly univerzální družice CubeSat spojené

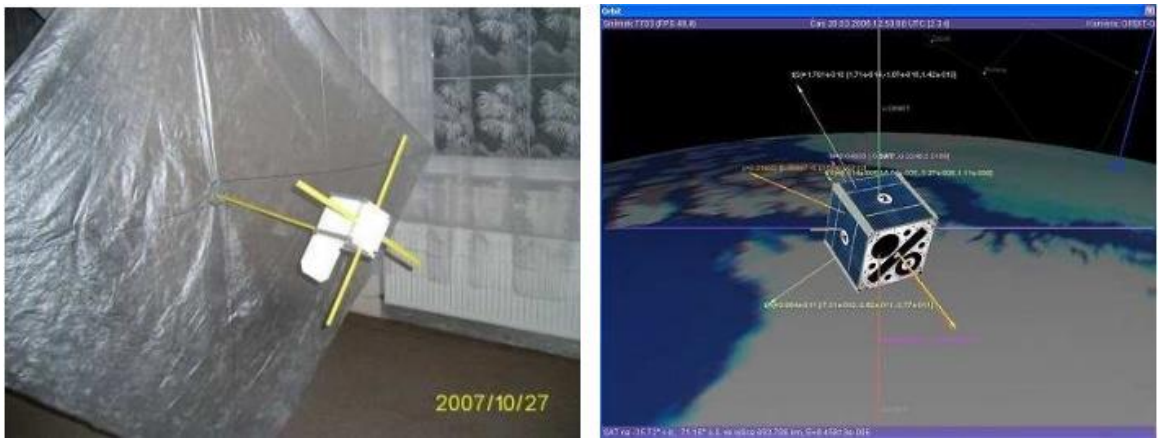
Obrázek 14: CubeSail vyvinutý Surrey Space centrem

dohromady podobně jako projekt LightSail v předchozí kapitole. Projekt počítal s plachtou o velikosti 5x5 m. Rozkládací systém bude umístěn ve dvou CubeSat prostorech, jelikož dle projektu otestuje následné samozničení o zemskou atmosféru. Projekt se nepodařilo zatím zrealizovat, i když dle (14) byl projekt ve finální fázi.

5.3.3 czCube – Česká amatérská družice

Pokus o zkonstruování české družice pod názvem czCube proběhl v letech 2004 – 2014. Tento projekt byl ukončen především kvůli nedostatečným financím potřebným pro start nanodružice.

Pro tento projekt byl vypracován koncepční návrh skládání o velikosti 4 m^2 s nosníky dlouhými 30 cm. Pomocí dvou servomotorů bylo v plánu řídit těžiště plachty a tím ji řídit. Pro správné fungování solárního pohonu byla navržena orbitální dráha okolo 700 km. (14)



Obrázek 15: Model czCube s napnutou plachtou a český návrh, jenž měl dobývat vesmír (Zdroj: (14))

5.4 Koncepty návrhů konstrukcí uvažovaných pro budoucnost

5.4.1 Near Earth Asteroid Scout

Společnost NASA v roce 2017 představila v rámci programu George C. Marshall Space Flight Centre (MSFC) koncept průzkumníků blízkých asteroidů. Tento koncept je postaven na univerzálním rozměru modulu CubeSat, který využívá většina solární plachetnic či konceptů v dnešní době.

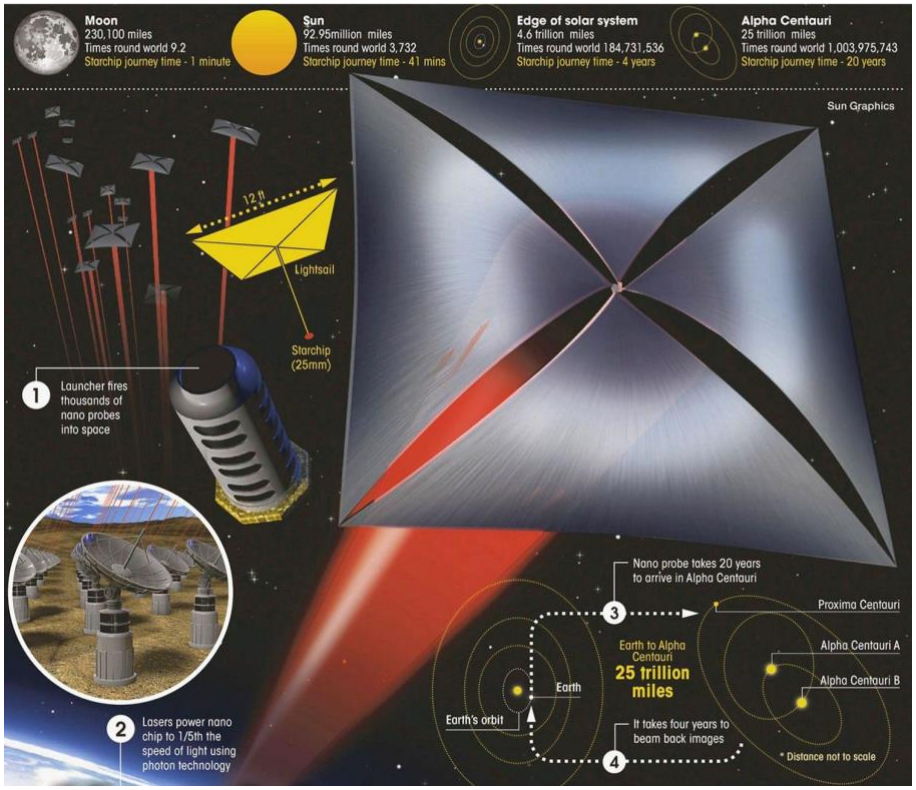
Mise *NEA Scout* je navržena s těmito parametry:

- Standardizovaná platforma Cubesat o velikosti 6U (20 x 10 x 30 cm);
- Solární plachta o velikosti 86 m^2 typu klipr;

- Maximální vzdálenost od Země 1 AU[14];
- Cíl mise je pozorování asteroidů v okolí planety Země a též demonstrovat nízkonákladový průzkum asteroidů v okolí Země;
- Hlavní výhoda této mise spočívá ve zkušeném týmu z MSFC a JPL organizací.

5.4.2 Breakthrough Starshot

Tento ambiciózní koncept navrhuje sdružit velmi silné lasery s celkovým výkonem cca přibližně 100x větším, než atomová elektrárna. Futuristický koncept, za kterým mimo jiné stojí též Mark Zuckerberg by mohl vyslat houf cca 1000 kusů nano-sond jež by dorazily k nejbližší další hvězdě Alpha Centauri a prozkoumali by tak i planetu Proximu b, kde by se mohl nacházet život. Projekt začal konceptem v roce 2016. (10)

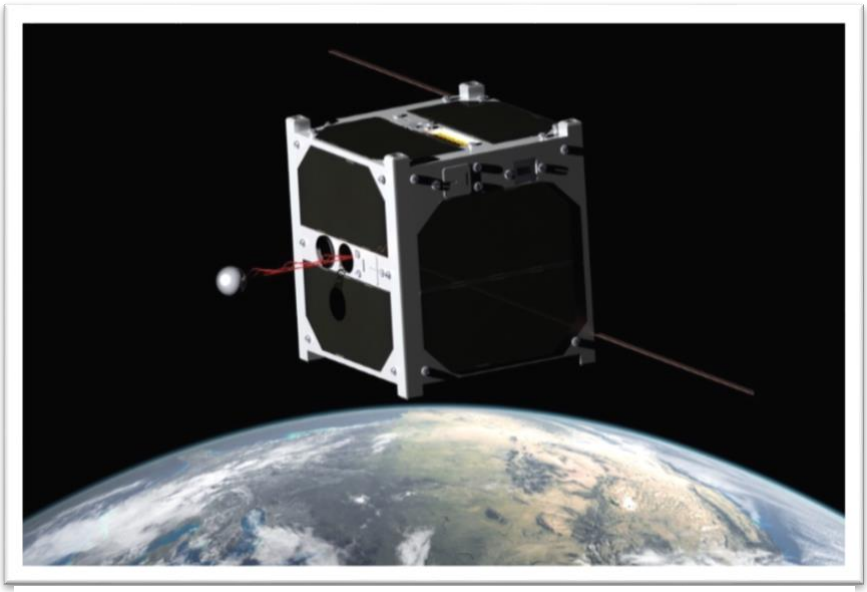


Obrázek 16 Breaghthough Starshot koncept mikroplachetnice s předpokládanou rychlostí až 0,2 c (Zdroj: (10))

[14] AU – Astronimická jednotka = 149 597 870,691 ± 0,03 km

6 Koncepce konstrukčního řešení modelové mise analogické k ESTcube – 1

Autor zvolil modelovou misi, která proběhla v letech 2013 – 15 pod názvem ESTcube – 1, na modulu CubeSat 1U[15] (viz Obrázek 11). Na této misi by autor chtěl lépe pochopit průběh modelové mise a konstrukci elektrostatické plachty. V poslední části se autor zaměří na 3D tisk 1U modulu CubeSat. Mise ESTcube – 1 vznikla na půdě estonské Technické univerzity v Tartu. Hlavním cílem mise bylo názorně otestovat elektrickou solární plachtu, jejíž princip byl popsán v kapitole 4.4. Estonská



Obrázek 17: ESTcube - 1: Pokus o vypuštění Elektrické solární plachetnice (Zdroj: ESTcube, (9))

ESTcube – 1 měla za cíl otestovat koncept s 10 m dlouhým drátem, který bude pomocí elektronového děla nabit kladným nábojem a bude tak vytvářet elektrickou plachtu zachycující částice proudící v plazmatickém proudu od slunce – solární

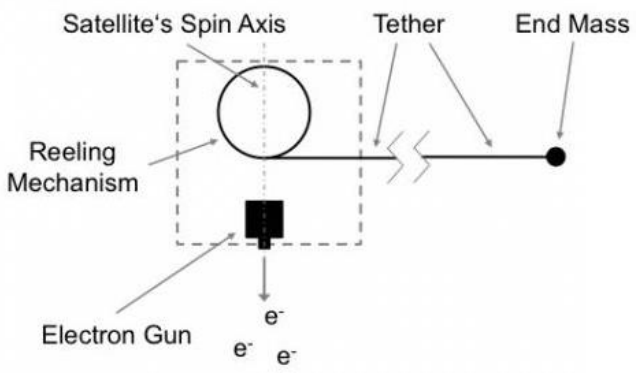
[15] 1U – CubeSat má normovanou velikost, kdy se používá modul o velikosti strany 1U, 3U nebo 6U

vítr. Na Obrázku 11 lze pozorovat drát naznačený červenou barvou v počáteční poloze rozvíjení. Pro mise většího rozměru má mít drát délku až 20 km.

6.1 Průběh mise ESTcube – 1 v letech 2013 - 2015:

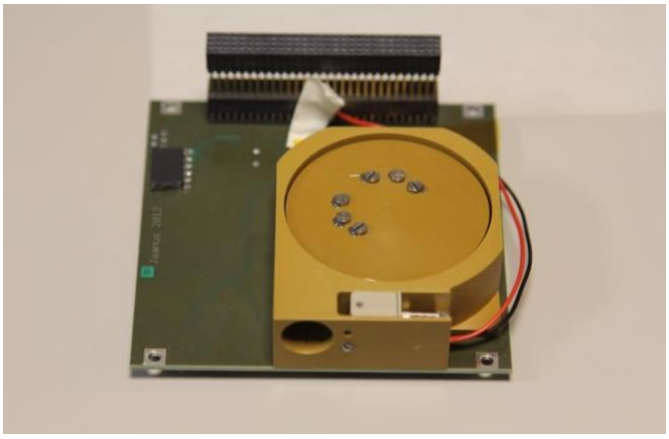
- Modul byl vynesen na nízkou oběžnou dráhu 7. května 2013.
- V březnu roku 2014 se podařilo navázat plné spojení s družicí.
- Bylo zjištěno silné magnetické rušení v rámci modulu, které znemožnilo rozvinutí elektrické solární plachty, experiment tedy nemohl proběhnout.
- Proběhla snaha magnetické rušení přebít, avšak marně, v září 2014 se družice ESTcube – 1 točila 250 stupňů za sekundu, což mělo stačit pro rozvinutí 3 m drátu E-sail z celkových 10 m.
- Experiment započal 16. září 2014 spálením navíjecího zařízení, proběhlo několik pokusů o uvolnění navíjecího zařízení elektrické plachty.
- 13. října 2014 se družice ESTcube – 1 otáčela 841 stupňů za sekundu, což je nejrychlejší otáčení dosažené nechtěným manévrem družice jaké je dosud známo.
- První snímky Estonska byly zachyceny v dubnu 2014, snímky byly tak kvalitní, že vzbudily zájem veřejnosti a ESA si objednala výrobu kamery pro svůj experiment.
- Mise ukončena 17. února 2015, poslední kontakt se vzkazem „Long live Estonia“ byl 17. května 2015 (15).

6.2 Konstrukce e-plachty ESTcube - 1



Obrázek 18: Konstrukční řešení ESTcube – 1(Zdroj: ESTcube, (15))

Estonský modul měl využít své rotace k rozvinutí elektrické solární plachty, označované někdy také jako Heytether[16], tenký drát v řádech mikrometrů, sloužící po nabití elektronovým dělem jako plachta. Při misi v letech 2013 – 2015 se vědci z týmu ESTcube, jež čítal okolo 200 studentů z deseti zemí domnívají (16), že vibrace vzniklé při vynášení modulu zapříčinily poškození a vytvoření velkého rušivého magnetického pole, jež zabránilo rozvinutí plachty. Na Obrázku 13 vidíme navíjecí systém obsahující 10 m drátu s navijákem a motorem.



Obrázek 19 Motor s navíjecím systémem drátu pro ESTcube – 1 (Zdroj: ESTcube)

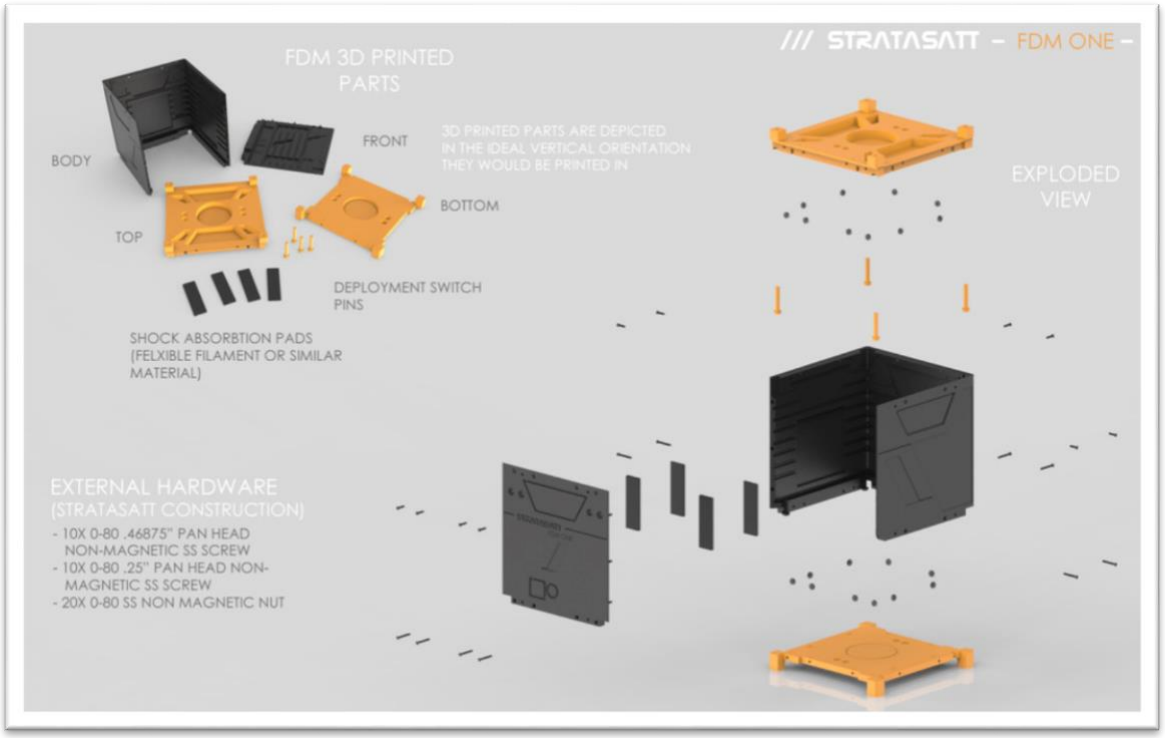
[16] Heytether – označuje tenký drát nabitý kladný nábojem, sloužící jako plachta a zachycující solární vítr

6.3 Návrh koncepce konstrukčního řešení

V dobách rychlého rozvoje se posouvají technologie raketovou rychlostí vpřed a 3D tisk není výjimkou. Autor se rozhodl v závěru práce demonstrovat použití této technologie jakožto možného využití k výrobě prototypů sloužících k lepšímu pochopení konstrukce slunečních plachetnic. Tento demonstrátor může sloužit také jako prostředek ke kýženému cíli jelikož lze díky poměrně snadné možnosti repetativního tisku vytvořit několik možných prototypů.

6.3.1 Výběr modelu družice pro 3D tisk

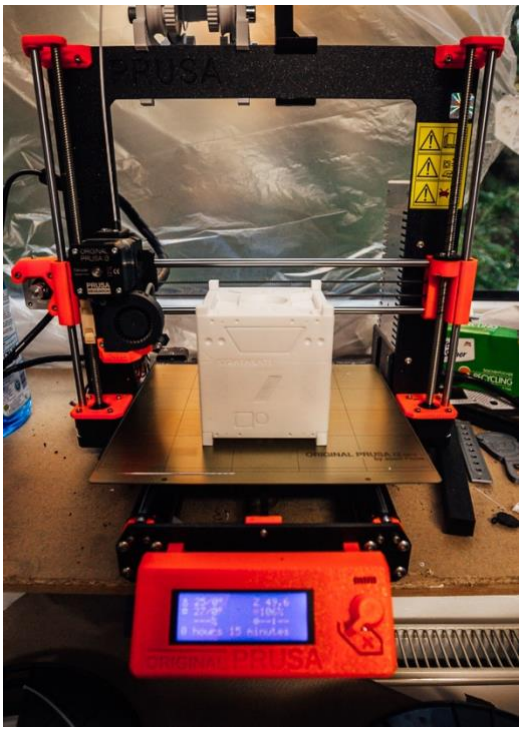
Pro zvolenou modelovou misi autor zvolil jako základní nosný modul standardizovaný formát výzkumných vesmírných družic CubeSat, volně dostupný model s pracovním názvem STRATASATT – FDM ONE, viz Obrázek 14 uživatele #David z internetové knihovny 3D modelů GrabCAD, jenž byl předmětem soutěže o vytvoření co nejuniversálnějšího modelu pro výzkumné modely. Zmíněný model lze nalézt v příloze na CD či online z https://grabcad.com/library/stratasatt-fdm-one-1 [cit. 2018-8-17]



Obrázek 20: Detailní popis zvoleného STRATASATT - FDM One modelu verze 1U CubeSatu

6.3.2 Proces přípravy 3D tisku a vzniklé komplikace

Model bylo potřeba zanalyzovat programem Slic3r Prusa Edition[17] pro použitou 3D tiskárnu i3 firmy Prusa třetí generace. V procesu výroby zmíněného modelu došlo k neočekávané komplikaci v podobě chybného 3D tisku družice, která má sloužit jako názorná ukázka řešení konceptu elektrické plachty. Na Obrázku 21 můžeme pozorovat vychýlení základny vůči stěnám družice o několik mm. Tisk byl proveden opakovaně z měkčího materiálu PETG filamentu 1,75 mm ± 0,05 mm.



Obrázek 21: Použitá 3D tiskárna značky Prusa třetí generace

První pokus však dopadl neúspěšně z důvodu posunutí základny a chybného tisku. (Obrázek 22) Byl proto zvolen mekkčí

Obrázek 22: Nepodařený první pokus o 3D tisk STRATASATTu

[17] Slic3r Prusa Edition – program, který určí tiskárně jak tisknout model po vrstvách ve vybrané hustotě

materiál, aby se ověřil zda-li konstrukce 3D modelu nemůže být příčinou.

6.4 Finální model STRATASATT FDM ONE

Na Obrázku 23 se nalézá prototyp elektrostatické solární plachetnice v jejíchž útrobách by měl být skryt mikrometrický drát namotaný na navijáku tvořící konstrukci plachetnice.

Obrázek 23: Prototyp elektrostatické solární plachetnice vyrobené technologii 3d tisku

Na přiloženém CD-rom je umístěn časosběrný video dokument výroby prototypu.

7 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo popsat historický vývoj solárních plachetnic, stručně poukázat na fyzikální problémy s kterými se solární plachetnice setkávají a dále rozdělení základních typů plachetnic dle literatury. V další části práce bylo diskutováno konstrukční řešení modelové mise analogické k ESTcube – 1. Autor též popsal metodiku 3D tisku použitou k vytisknutí modelu STRATASATT FDM ONE, který sloužil jako demonstrátor možností technologie při navrhování různých konstrukčních či jiných řešení. Autor využil práci k prohloubení znalostí v dané problematice o které si myslí, že bude dostávat čím dál více prostoru. Na tuto práci by rád autor navázal aktivní účastí na některé z misí, které se zaobírají problematikou solárních plachetnic či kosmických misí obecně.

8 Seznam použité literatury

1. **HOLUB, Aleš.** Malá encyklopedie kosmonautiky. *Sluneční plachetnice.* [Online] 12. 12 2002. [Citace: 14. 8 2018.] http://mek.kosmo.cz/zaklady/rakety/solsail.htm.

2. **SVANTE, Arrhenius.** *Worlds in the making; the evolution of the universe.* New York : University of California Libraries, 1908. 20061130224043.

3. **FOŘT, Stanislav.** *Stručný úvod do teorie letu sluneční plachetnice.* Tábor : Gymnzium Pierra de Coubertina, 2009.

4. **CLARKE, Arthur, Charles.** *The Wind from the Sun.* Londýn : Gollancz, 1964. 978-0575600522.

5. **DAVIS, Jason.** Old documents shine new light on NASA's plan to send a solar sail to Halley's Comet. *Planetary Society.* [Online] Planetary Society, 4. 5 2017. [Citace: 15. 8 2018.] http://www.planetary.org/blogs/jason-davis/2017/20170504-halleys-comet-sail-documents.html.

6. **KOUSAL, Jaroslav.** *Fyzikální pohony.* [Výukové materiály k předmětu Nosiče a družice] Praha : ČVUT v Praze, 2016. v.2016-12-01.

7. **PRADO, J., PERRET, A. a PIGNOLET, G.** Site de L'U3P - Solar Sails. *Photonic propulsion.* [Online] U3P, 2007. [Citace: 15. 8 2018.] http://www.u3p.net/prop/commu/cai96_a.htm.

8. **BUNTING, Elaine.** Yachting World. *Radical 75th flying monohull 'could be fastest America's Cup design ever'.* [Online] 21. 11 2017. [Citace: 16. 8 2018.] https://www.yachtingworld.com/americas-cup/111252-111252.

9. **LEWIS, Danny.** Smithsonian. *How a Russian Space Mirror Briefly Lit Up the Night.* [Online] Smithsonian Institution, 21. 1 2016. [Citace: 15. 8 2018.] https://www.smithsonianmag.com/smart-news/how-russian-space-mirror-briefly-lit-night-180957894/.

10. **LÁLA, Petr.** *Malá encyklopedie kosmonautiky.* Praha : Mladá fronta, 1982. 23-079-82.

11. **FU, Bo, SPERBER, Evan.** *Solar Sail Technology – A State of the Art Review.* Davis : University of California, 2016. CA 95616.

12. **MACDONALD, Malcolm.** *Advances in Solar Sailing.* Berlin : Springer, 2013. 9783642349072.

13. **STEVENS, Nick.** Nick's Graphic Blog. *Nick's work in graphics, mostly Lightwave 3d, but other software too.* [Online] 28. 6 2014. [Citace: 16. 8 2018.] http://nick-stevens.com/blog1/uncategorized/heliogyro-work-progress/.

14. **COLLAR, K.** Surrey Space Centre. *Space Missions: CubeSail.* [Online] University of Surrey, 2013. [Citace: 17. 8 2018.] https://www.surrey.ac.uk/surrey-space-centre/missions/cubesail.

15. **HOLUB, Aleš.** Czech amateur cubesat. *Projekt czCube.* [Online] 2014. [Citace: 17. 8 2018.] http://www.czcube.org/cs/index.html. B00A9YGY4I.

16. **ESTCUBE.** ESTcube - 1. *The course of the mission.* [Online] 2015. [Citace: 16. 8 2018.] https://www.estcube.eu/en/estcube-1.

17. **JANHUNEN, P.** *Simulation study od solar wind push on a charged wire: basis of solar wind electric sail propulsion.* Helsinki : Copenicus GmbH, 2007. 25 755–767 2007.

18. **FRIEDMAN, Louis.** *Human Spaceflight: From Mars o the Stars.* Arizona : The University of Arizona Press, 2015. 9780816531462.

19. **DARLING, David.** Satellites and Space probs. *Inflatable Antenna Experiment.* [Online] 2016. [Citace: 15. 8 2018.] http://www.daviddarling.info/encyclopedia/I/Inflatable_Antenna_Experiment.html.

20. *Solar Sails for Space Exploration - The Development and Demonstration of Critical Technologies in Partnership.* **LEIPOLD, M.** 98, Noordwijk : ESA, june 1999.

9 Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Radikální jednotrupý design obhájce Amerického poháru z Nového Zélandu pro rok 2021, dle autora práce označitelný za kosmický (Zdroj: Yachting World, (7)) 4

Obrázek 2: Umělecké ztvárnění 45. výročí průletu Pioneer 10 skrz pás asteriodů od malíře Ricka Guidice (Zdroj: NASA) .. 6

Obrázek 3: Carl Berglund prozkoumává snímek z roku 1977, který ukazuje konstrukci kosmické sondy jež se měla přiblížit k Halleyově kometě (Zdroj: The Planetary Society) 8

Obrázek 4: Satelit Echo 2 enormních rozměrů 10

Obrázek 5: Znamya 2 zrcadlová solární plachetnicee (Zdroj: Smithsonian, (8)) 14

Obrázek 6: HERTS je koncept vesmírného plavidla používající elektrickou solární plachtu (Zdroj: NASA, Marshall Space Flight Center) 17

Obrázek 7: Názorné zobrazení manévrovacích schopností solární plachetnice pomocí součinu vektorových sil (Zdroj: (10) .. 20

Obrázek 8: Družice fungující jako statit pomocí solární plachty (Zdroj: (10)) 21

Obrázek 9 Tuhé konstrukce solárních plachetnic: clipper, quad a motýl (Zdroj: (11)) 23

Obrázek 10 Systém rozvinutí diskové plachty družice IKAROS 24

Obrázek 11: Heliogyro s rozkládajícími se segmenty plachet připomínající vesmírný mlýn (Zdroj: Nick's Graphics) (13) 25

Obrázek 12: HELIOS a jeho rozkládací sekvence (Zdroj Advances in Solar Sailing (12)) 26

Obrázek 13 IKAROS - nejznámější využití čtvercové plachty (Zdroj: JAXA) 27

Obrázek 14: CubeSail vyvinutý Surrey Space centrem 29

Obrázek 15: Model czCube s napnutou plachtou a český návrh, jenž měl dobývat vesmír (Zdroj: (14)) 30

Obrázek 16 Breaghthough Starshot koncept mikroplachetnice s předpokládanou rychlostí až 0,2 c (Zdroj: (10)) 31

Obrázek 17: ESTcube - 1: Pokus o vypuštění Elektrické solární plachetnice (Zdroj: ESTcube, (9)) 33

Obrázek 18: Konstrukční řešení ESTcube – 1(Zdroj: ESTcube, (15)) 35

Obrázek 19 Motor s navíjecím systémem drátu pro ESTcube – 1 (Zdroj: ESTcube) 35

Obrázek 20: Detailní popis zvoleného STRATASATT - FDM One modelu verze 1U CubeSatu 37

Obrázek 21: Nepodařený první pokus o 3D tisk STRATASATTu .35

10 Seznam Příloh

Na přiloženém CD-Rom se nalézá fotodokumentace a časosběrné video výroby 3D vytisknutého modulu STRATASATT FDM ONE. Autor také na přiložené CD nahrál výkresovou dokumentaci k zmíněnému modelu vesmírné družice. Dále se v příloze nalézá materiálový list ze, kterého byl model 3D vytištěn.