



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Rozvinovací mechanismus solární
plachetnice**

Deployment mechanisms of solar sails

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Martin PETR

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Jaromír Kučera

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petr** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **491557**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Rozvinovací mechanismus solární plachetnice

Název bakalářské práce anglicky:

Deployment mechanisms of solar sails

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- Rešerši problematiky navržených a prakticky realizovaných konstrukčních řešení rozvinovacích mechanismů solárních plachetnic
- Na základě rešerše zvolte vhodný mechanismus pro použití pro platformu 1U CubeSat.
- Proveďte koncepční návrh vybrané konstrukce a rozvinovacího mechanismu.
- Proveďte konstrukční návrh vybrané konstrukce rozvinovacího mechanismu.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jaromír Kučera ústav letadlové techniky FS


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


Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce:


Ing. Jaromír Kučera
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

29.4. 2022

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé práce, panu Ing. Jaromíru Kučerovi, za možnost pracovat na tomto tématu, za skvělé rady a za velmi přátelský přístup. Rád bych poděkoval také své rodině za podporu v průběhu celého studia, jak materiální, tak psychickou a obzvlášť děkuji svým rodičům za rady ohledně českého jazyka.

Anotační list

Tato bakalářská práce se zabývá rozvinovacími mechanismy solárních plachetnic. Pomocí rešerše je popsána historie a princip solárních plachetnic. Dále se zaměřuje na konkrétní konstrukční řešení realizovaných misí, na což navazuje vlastní koncepční návrh a poté praktický konstrukční návrh.

Autor:	Martin Petr	
Název BP:	Rozvinovací mechanismus solární plachetnice	
Rok vyhotovení:	2022	
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství	
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový	
Ústav:	Ústav letadlové techniky	
Vedoucí BP:	Ing. Jaromír Kučera	
Bibliografické údaje:	počet stran	40
	počet obrázků	22
	počet grafů	1
	počet tabulek	0
	počet příloh	0
Klíčová slova:	solární plachetnice, CubeSat, rozvinovací mechanismus	

Anotation list

This bachelor thesis is focused on deployment mechanisms of solar sails. The research describes history and basic principles of solar sails. Further on it describes specific designs of realized missions, which is afterwards followed up by custom conceptual design and then by practical structural desing.

Author:	Martin Petr
Title of bachelor thesis:	Deployment mechanisms of solar sails
Academic year:	2022
Study program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Field of study:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Department:	Ústav letadlové techniky
Supervisor:	Ing. Jaromír Kučera
Bibliographic data:	no. of pages 40
	no. of pictures 22
	no. of graphs 1
	no. of tables 0
	no. of attachments 0
Key words:	Solar sails, CubeSat, deployment mechanism

Obsah

1. Úvod	10
2. Historie	11
2.1. Solární plachetnice v Science fiction	12
2.2. První projekty	13
2.2.1. Rendez-vous s kometou	13
2.2.2. Záření jako sekundární pohon	13
2.2.3. Hvězdné Rally	14
2.2.4. Luna Cup	15
3. Princip solárního plachtění	16
3.1. Odrazivost plachet	16
3.2. Tlak fotonů	17
3.3. Jak se plachtí ve vesmíru	18
3.3.1. Nízkoperiodní oběhy	19
3.3.2. Nekeplerovské oběžné dráhy	20
3.3.3. Lety do vnitřní sluneční soustavy	20
3.3.4. Mise do vnější části solárního systému nebo mimo něj	20
3.4. Konstrukce solárních plachetnic	21
3.4.1. Pevné trojosé plachty	21
3.4.2. Rotační plachty	22
Heliogyroskopická plachta	22
4. Realizované mise	23
4.1. Ruská Znamya	23
4.2. Plachetnice lidu – Cosmos 1	23
4.3. Ikaros	23
4.4. Lightsail 2	24
4.5. Near-Earth Asteroid Scout	25
4.6. Technologie ACS3	26
4.7. CubeSat	27
5. Rozvinovací mechanismy	28
5.1. Rozvinovací mechanismus IKAROSu	28
5.2. Mechanismy pro plachetnice s pevnou podporou	28
5.2.1. SIASAIL-1	29
První fáze	29
Druhá fáze	29

5.2.2.	ACS3	30
6.	Vlastní konstrukční návrh.....	31
6.1.	Specifikace vlastností plachetnice	31
6.1.1.	Plachta	31
6.1.2.	Tyče	32
6.1.3.	Výpočet síly a Δv	32
6.2.	Konstrukční návrh.....	33
6.3.	Využitelnost plachetnice	35
7.	Závěr.....	36
8.	Použitá literatura.....	37
9.	Seznam obrázků.....	39
10.	Seznam grafů	40

Použité značení

p	tlak
N	sluneční konstanta
c	rychlost světla
P	výkon slunečního záření v konkrétní vzdálenosti od Slunce
P_0	celkový výkon světelného záření
R	vzdálenost tělesa od Slunce
F	síla slunečního záření na plachetnici
S	plocha
m	hmotnost
η	účinnost
a	zrychlení
v	rychlost
M	hmotnost Země
G	Tíha Země
r	vzdálenost tělesa od středu Země
ρ	hustota vzduchu v určité vzdálenosti od Země
C_d	konstanta
A_d	velikost plochy, na kterou působí odpor

Použité zkratky

JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SRC	Space Regatta Consortium
U3P	Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique
SSUJ	Solar Sail Union of Japan
JPL	Jet Propulsion Laboratory
WSF	Wake Shield Facility

1. Úvod

Solární plachetnice jsou obrovská kosmická plavidla s určitou zátěží (kamera, sonda aj.) uprostřed. Velkých rozměrů dosahují kvůli rozloze plachet, které obvykle mají plochu až několik tisíc m². Je to z prostého důvodu, aby bylo dosaženo dostatečně velkého tlaku. Tlak slunečního záření je totiž velmi malý.

Solární plachetnice ještě donedávna nebyly velmi rozšířené. Při samotném návrhu a konstrukci těchto plachetnic totiž narazíme na mnoho problémů a překážek, se kterými se musíme potýkat.

Jako první zádrhel, který nás může napadnout, je nadměrná velikost. Kosmos je ovšem prostorný, takže i pro nás velká plachetnice bude mít místa dostatek. První větší problém je pohon. Jak jsem již naznačil, plachetnice je poháněna slunečním zářením. V průběhu let se zjistilo, že světlo, i když jen velmi málo, působí na hmotu určitým tlakem. Ale tento tlak je opravdu malý.

Dalším problémem je vysunutí plachet. Naše plavidlo totiž musíme do kosmu nejdříve dostat v menších rozměrech. Plachetnice váží okolo 150-200 kg, takže je můžeme snadno vynést raketou na oběžnou dráhu.

V dalších kapitolách si podrobněji popíšeme jednotlivá témata, která jsem velmi stručně popsal v tomto úvodu. Ten by měl sloužit jako úplně prvotní náhled na plachetnice pro čtenáře, který třeba o těchto novodobých průzkumnících vesmíru ještě neslyšel.

Dle mého názoru jsou solární plachetnice opravdu budoucností co se týče prozkoumávání vesmíru. I když jsou velmi pomalu urychlovány, postupem času mohou dosáhnout velkých rychlostí s tím, že palivo nemusíme řešit. Slunce nám svítí stále. Na cestě nemáme žádné překážky, které by nám plachetnici zpomalovaly. Tudíž nám plachetnice stále zrychluje a pluje bez omezení. Díky tomu bychom mohli cestovat dál, než jsme kdy zatím byli.

Samotné téma slunečních plachetnic je obecně velmi zajímavé a opravdu futuristické. Nabízí mnoho podnětných problémů a svým krátkým působením mezi vědci nabízí mnoho oblastí, které mohou být zkoumány. Jednoduše, koncept těchto plachetnic v člověku vzbuzuje pocity jako při čtení sci-fi. Z tohoto důvodu bych rád popsal tato fascinující plavidla a blíže s nimi seznámil širší veřejnost, protože si určitě zaslouží pozornost.

2. Historie

„poskytněte lodě nebo plachty přizpůsobené nebeským vánkům a najdou se takové, jež se přizpůsobí té prázdnotě“.

Tuto větu napsal v roce 1610 Johannes Kepler v jedné své korespondenci s dalším velikánem své doby Galileo Galileim. Galileo v té době zrovna zkoumal čočky a rozvíjel dalekohledy. Kepler mu psal zmíněný dopis jako reakci na Galileovu nově publikovanou práci „Sidereus Nuncius“, v překladu „hvězdný posel“ [1].



Obrázek 1: Solární plachetnice v podobě lodi cestující po vlnách vesmíru [3]

Zrovna v témže roce se pan Kepler jako první zmínil o tlaku elektromagnetického záření. Při pozorování komet letících kolem našeho Slunce, si všiml podivné orientace jejich ohonu směřujícího od Slunce. Tento jev si vysvětloval právě tak, že světlo působí určitým tlakem na prachové částičky v okolí komet. Nějaký čas se tomuto tématu nevěnovala žádná další pozornost [2]. Až v roce 1873 přišel James Clerk Maxwell s přesnějším a uspokojivějším vysvětlením. Ve své publikaci „A Treatise on Electricity and Magnetism“ se zaměřuje na světlo a jeho vlastnosti jako takové. Spojením veškerých předchozích nápadů a experimentálních výsledků dospěl k základním vzorcům popisujícím chování elektrických a magnetických sil ve vesmíru, v čase a hmotě. Jeho elektromagnetická teorie tvrdí, že rádiové vlny, tepelné záření a viditelné světlo jsou všechny stejné podstaty: jediný rozdíl mezi nimi je ve frekvenci jejich vlnění nebo ekvivalentně, v jejich vlnové délce. Co nás ale zajímá je fakt, který Maxwell zmiňuje ve svém díle. Že pokud se vlny šíří určitým médiem, pak bychom mohli očekávat na povrchu tlak úměrný směru šíření této vlny. Jednoduše řečeno uvedl, že elektromagnetické pole nese nejen energii, ale i hybnost. Nezávisle na něm, v roce 1876, Italský Fyzik Adolfo Bartoli doplnil, aby druhý zákon termodynamiky fungoval, musí světlo emitované tělem vyvozovat tlak na dopadající povrch, čímž potvrdil Maxwellovu domněnku. Ačkoli velmi malý, jak naznačoval i Maxwell, tlak záření představuje důležitý bod zkoumání.

Dalším krokem v rozšiřování povědomí o solárním plachtění bylo sci-fi, ve kterém se cestování vesmírem, či dokonce meziplanetární létání pomocí světla, stalo oblíbeným a často skloňovaným tématem. Díky velkému rozvoji mnoha technologií, jako např. intenzivní zdroje světla nebo pumpy schopné vytvořit podmínky velmi blízké vakuu (v malém množství), se

podářilo v roce 1900 ruskému vědci Pyotru Lebedevovi změřit tlak světla na tuhém povrchu. Tato měření byla postupně potvrzena dalšími americkými vědci, čímž se konečně potvrdila elektromagnetická teorie [3].

Nuže, je možné využít nějak světla k pohybu a využít ho pro cestování vesmírem? V roce 1908 švédský vědec Svante Arrhenius navrhoval možný vznik života na zemi pomocí meziplanetárního přesunu pomocí světla. Byl nejspíše prvním, kdo přišel s teorií, že světlo je schopno přenášet předměty mezi planetami. [4]

V roce 1924 se fotonovým pohonem zabývali ruští vědci Tsiolkovsky a Tsander, kteří předpokládali, že velmi tenký kus materiálu by mohl ve vesmíru dosáhnout velkých rychlostí. Jako reakci na mnohé zmínky ve sci-fi literatuře předvedli realističtější návrh konstrukce solární plachetnice. Uvědomili si, že plavidlo bude nutné nejdříve dopravit do volného prostoru, než bude možné rozvinout plachty a zahájit let pod vlivem slunečního záření [1].

Koncem dvacátých let dvacátého století pan H. Oberth představil koncept „kosmického zrcadla“ o průměru kolem 100 km, které mělo přispět k částečnému roztátí ledů v severním ledovém oceánu, čímž se měla ulehčit mořeplavba.

Úplně první užití termínu „Solární plachetnice“ se objevuje v práci amerického inženýra R. L. Garwina ve studii publikované v „Jet Propulsion“ z roku 1958. [2]

2.1. Solární plachetnice v Science fiction

Koncept solárních plachetnic je bezpochyby velmi otevřený pro fantazírování a nové nápady, a proto není překvapivé, že se ho mnozí autoři sci-fi uchytili a zpracovali k obrazu svému.

Například dva francouzští spisovatelé Faure a Graffigny ve své knize z roku 1889

„Neuvěřitelná dobrodružství ruského vědce na planetách“ vypráví o letu, kde se vydáváme z Měsíce na Venuši. Kosmická loď, díky které se uskutečňuje tato cesta, je tvořena velkým zrcadlem, které je poháněno slunečním svitem. Doprostřed tohoto zrcadla autoři umístili samotnou kosmickou loď s posádkou.

Další zmínky o kosmickém pohonu na principu sluneční plachetnice se objevily v USA v článku C. A. Willeye „Clipper ships of space“ z roku 1951. Tento článek vyšel v Astounding Science Fiction Magazine.

Ani spanilé Anglii neuteklo povědomí o těchto plujících obrech, jelikož známý anglický spisovatel A. C. Clark v roce 1964 ve své povídce „The Wind from the Sun“ využil solárních plachetnic jako závodního prostředku. Popisuje v ní závod několika slunečních plachetnic mezi Zemí a Měsícem. Každé plavidlo mělo dvoučlennou posádku a rozlohu plachet v rámci několika kilometrů čtverečních. Této odvážné soutěži ve formě závodu se zanedlouho chytily několik skupin, které vznikaly kvůli společnému zájmu o solární plachetnice.

2.2. První projekty



Obrázek 2 – Carl Sagan v pořadu „Tonight Show“ [Zdroj: The week]

2.2.1. Rendez-vous s kometou

Píše se rok 1976 a v televizním pořadu „Tonight Show“ se objevuje americký popularizátor astronomie Carl Sagan s velmi ambiciózním projektem, který lze velmi trefně popsat jako rande solární plachetnice s kometou. Podobně nevěřící pohled, jako pravděpodobně mnoho sledujících tohoto pořadu v té době, měl i Carl Berglund, když mu tento projekt přistál na stole 6 let před tím. V NASA byl pan Berglund přidělen k tomuto projektu jako hlavní designér. Pod křídly JPL (Jet Propulsion Laboratory) měli za úkol postavit plavidlo, které se mělo dostat ke světu asi nejznámější Halleyově kometě. Ta se měla vracet v roce 1986. Jak je vidět na fotce, Sagan si do talk show vzal dokonce i zmenšený model plachetnice, ze kterého je patrný čtvercový návrh plachet. Předpokládané kilometr široké plachty, vyrobené z myralu (polyesterová fólie), měly využít tlaku slunečního záření pro pohon, spirálovitě se přiblížit ke Slunci blíže než Merkur a tím se vymrštit ven z naší sluneční soustavy. Projekt měl dostat dotaci 5,5 milionu dolarů. Naneštěstí projekt skončil pro nedostatek financí, což jak se dozvíme později, byl největší nepřítel všech projektů solárních plachetnic. Finance! Je to jeden z hlavních důvodů, proč se úspěšné projekty začaly objevovat až v posledním desetiletí. Bohužel to trvá, než se najdou ochotní sponzoři. [5]

2.2.2. Záření jako sekundární pohon

Když už ne jako samostatné plavidlo, začaly se odrazivé plachty používat aspoň jako zařízení pro stabilizaci. V roce 1965 bylo využito tlaku slunečního záření ke stabilizaci sondy Mariner 4 při jejím letu na Mars. Sonda byla vybavena natáčecími pohliníkovánými lopatkami, schopnými odrážet světlo. Tyto lopatky byly umístěné na koncích panelů se slunečními

články, takže při působení tlaku vznikal moment a díky možnosti natáčet lopatky se dala sonda velmi elegantně orientovat.

Dalším způsobem, kterým konstruktéři dobře využily plachty, byla kompenzace momentu slunečního tlaku na konstrukci družic, např. u družice Mariner 10 z roku 1973. Tato družice využívala plachty o ploše 10 m^2 , umístěné na druhé straně družice, čímž se mohla stabilizovat. [1]

Tento princip byl využit i u sondy Messenger, která měla od svého startu v roce 2004 za úkol zblízka prozkoumat povrch Merkuru. Plánovalo se, že sonda třikrát proletí kolem Merkuru. Jelikož byla sonda velmi blízko Slunce, využilo se tlaku solárního záření pro přesnou kontrolu trajektorie, což velmi výrazně snížilo množství pohonných hmot potřebných pro navigaci při prvních dvou průletech. [6]

2.2.3. Hvězdné Rally

Netrvalo moc dlouho než se někdo chopil myšlenky pana Clarka na závody slunečních plachetnic. V 80. letech totiž přilákaly plachetnice množství zájemců a nadšenců, díky čemuž začalo vznikat mnoho skupin. Ve Francii vzniká skupina U3P, tvořená lidmi většinou z organizací jako CNES, ONERA, či Matra Espace. Tato skupina začala propagovat závod plachetnic k Marsu. Závod se měl uskutečnit v roce 1992 u příležitosti 500. výročí objevení Ameriky Kryštofem Kolumbem.

V USA byla roku 1979 založena skupina WSF, která spolupracovala s JPL. Dále se v Japonsku zakládá v roce 1982 SSUJ, a dokonce i v Československu vzniká studentská skupina pod názvem LSG, která se zabývala problematikou solárních plachetnic. Bohužel, brzy se ukázalo, že z projektu opět nic nebude. Bylo to způsobeno malým zájmem a samozřejmě kvůli nedostatku financí. Napomohla tomu i válka v Perském zálivu v roce 1990. Proto přišel v úvahu méně náročnější závod Země-Měsíc, který byl nazván Luna Cup, jehož uskutečnění bylo plánováno na rok 1994. [3]

2.2.4. Luna Cup

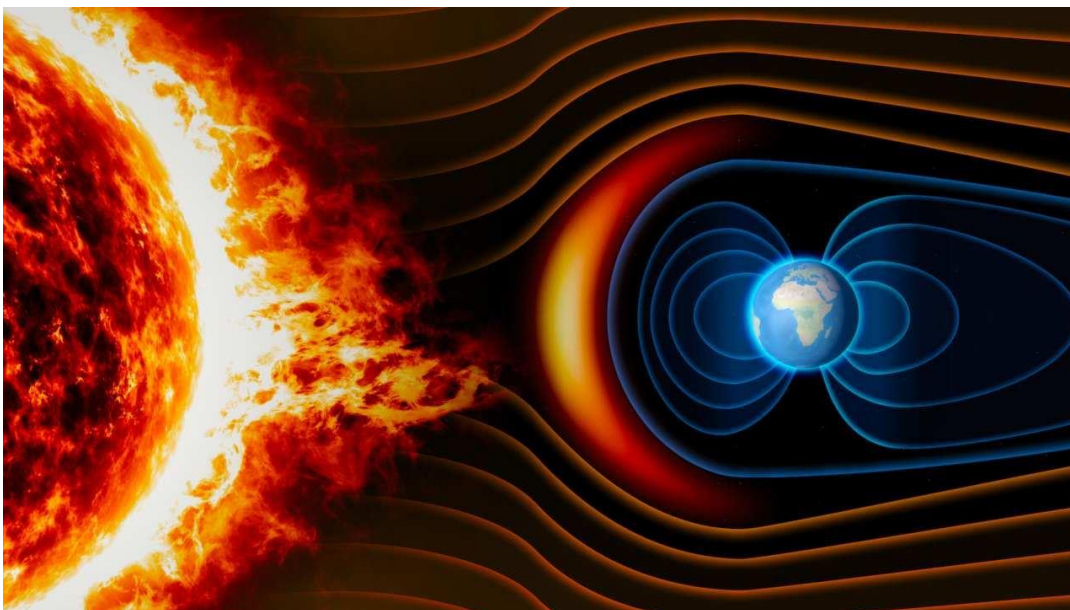
Celkově měly vzniknout tři projekty navrhované pro tento závod. Shrnu zde všechny tři návrhy, jelikož nám to poskytne prvotní náhled na to, jak asi vypadají solární plachetnice po technické stránce a jaký mohou mít přibližný výkon.

- Jako první se podíváme na návrh francouzské skupiny U3P. Ta v konečném návrhu představila čtvercovou plachtu o ploše 4000 čtverečních metrů s celkovou hmotností plavidla dosahující 250 kg. Tyto parametry nám dávají poměr plochy plachty k hmotnosti $16 \text{ m}^2/\text{kg}$. Tento poměr je jedním z nejdůležitějších parametrů u solárních plachetnic a je pro nás důležité, aby byl co největší. Plachta se měla rozpínat na 45metrových tyčích z kompozitního materiálu. Plachta byla zamýšlena z myralové folie o tloušťce 8mm, s účinností odrazu světla 85-88%. Zrychlení v okolí Země se pohybovalo okolo $0,12 \text{ mm/s}^2$ a manévrování se plánovalo zajistit pomocí osmi klapků na okrajích plachty. Užitečné zatížení představovala kamera pro pořízení snímků Měsíce.
- Japonská skupina SSUJ měla 4 stádia návrhů. Konečná konfigurace měla plachtu o rozměrech $30 \times 30 \text{ m}^2$ s celkovou hmotností 96 kg.
- Díky předchozím pokusům NASA měli Američané zřejmě největší zkušenosti. Skupina WSF nabídla mnoho zajímavých geometrií, kde nakonec zvítězila koncepce tříosé stabilizované čtvercové plachty o délce strany 55m, která byla opět z myralové folie o tloušťce 2,54 mm.

Všechny plachetnice se měly vynést na oběžnou dráhu jako přídavné zatížení rakety Ariane 4. Přibližně 3 týdny by stačily pro zkušební manévrování a kalibraci. Vítěznou plachetnicí měla být ta, která jako první pošle na Zemi fotografii středu odvrácené strany Měsíce. Bohužel ani tento závod se neuskutečnil a projekt byl odložen na neurčito. [1]

3. Princip solárního plachtění

Abychom lépe pochopili, jak světlo pohání Solární plachetnici a čím je unikátní, musíme se nejdříve podívat na podstatu létání ve vesmíru. Máme dva způsoby, jak lineárně urychlit kosmickou loď, jak jí udělit hybnost. První způsob využívá klasické rakety, ať už na chemickém nebo více pokročilém elektrickém principu. Spalováním paliva obětujeme část hmoty a podle zákona akce a reakce se loď urychluje. Druhý způsob je interakce kosmické lodě s prostředím. V této kategorii vystupuje právě Solární plachetnice spolu s elektrickou a magnetickou plachetnicí. Sdílené slovo „plachetnice“ v názvu těchto typů plavidel naznačuje pouze to, že zdroj jejich pohybu je sluneční radiace. Elektrická a magnetická plachetnice je urychlována odrazem nabitých částic solárního větru pomocí elektrického nebo magnetického pole. [1]



Obrázek 3 vyobrazení magnetického pole Země a působení solárního větru ze Slunce (Zdroj: Firstpost)

Solární vítr je o mnoho slabší než tlak slunečního záření. Přibližně 5 000-10 000krát. U solárních plachetnic ho můžeme zanedbat do velikostí cca 2000 čtverečních metrů. Solární vítr je proud pozitivně nabitých částic, tvořen převážně vodíkem a heliem. Tlak slunečního záření je založen na částicovém charakteru světla a jeho schopnosti předávat hybnost. Jde o jednoduchý zákon akce a reakce, což nás dostává k tématu odrazivosti plachet.

3.1. Odrazivost plachet

Srovnáme si 3 ideální případy odrazivosti materiálu plachty

- Dokonalý odraz – plachetnice s materiálem odrážejícím světlo jsou nejrozšířenější. Jsou nejúčinnější ve většině případů. V současné době dosahuje účinnost odrazu světla materiálem 88-90 %. Nejenže je nejefektivnější, ale při odrazu světla můžeme plachetnici zároveň (v určitých mezích) řídit. [7]
- Dokonalá absorpce – naopak materiál, který dokonale absorbuje sluneční záření, jednak nedosahuje takové účinnosti, ale hlavně, nelze s takovou plachtou manévrovat. Při dopadu světla na povrch plachty totiž působí výsledná síla pouze ve

směru dopadu. Když natočíme plachtu, změní se pouze účinnost tlaku, ale bez odrazu se nám nemění výslednice a není možné kormidlovat. Černá plachta má zároveň neblahou vlastnost, že absorpcí se velmi zahřívá a dochází tak k nežádoucím pracovním podmínkám pro stroje a některá zařízení se mohou poškodit [7]

- Odraz všemi směry – poslední možností je plachta z materiálu odrážejícího světlo všemi směry. Ačkoliv se zdá, že tento typ plachet nebude nikdy účinnější než plachta, která jednoduše odráží světlo jedním směrem, tým vědců z Rochester Institute of Technology přišel na to, že v konkrétních případech bude účinnější tato poslední možnost. Jedná se o heliocentrické mise jako je např. orbiter slunečních pólů. Tyto plachetnice jsou totiž efektivnější při zvětšování úhlu, pod jakým obíhají planetu. Odkaz na tuto studii je uveden v seznamu literatury pod číslem 8. [8]

3.2. Tlak fotonů

Nyní, když víme jak světlo interaguje s hmotou, mohli bychom si říci, kolik výkonu z toho vlastně můžeme dostat. Jak jsme si již uvedli, pohonem je proud fotonů, který svým tlakem působí na odrazivou plachtu a tím ji pohání. Z tohoto tvrzení by jeden mohl mylně usoudit, že taková konstrukce solární plachetnice nevyžaduje nic víc, než plachtu přivázanou lanem k nějaké zátěži, což by opravdu připomínalo spíše koráb přenesený z moře do kosmu. V tomto srovnání vězí jeden veliký rozdíl, a to v relativní velikosti. Solární plachetnice, jak jsme si již několikrát řekli, potřebují velkoplošné plachty.

A proč musí tedy být tak obrovské?

Hvězdy vyzařují velká množství energie ze svého povrchu (toto se označuje jako „vyzařovací výkon Slunce“). Konkrétně u našeho Slunce tento výkon vychází na 63.1 milionů wattů na čtvereční metr, ovšem lineární hybnost momentu je nepřímou úměrná rychlosti světla. Když si toto shrneme na příkladu, objekt o rozloze 1 m² ve vzdálenosti 1 AU přijme přibližně 1366 wattů. Kdyby tento objekt byl dokonalé zrcadlo, působila by na něj celková síla $2 \cdot 1366 / c = 0,0000091$ newtonů. Dále, kdybychom tomuto tělesu přidělili hmotnost 91 gramů, výsledné zrychlení, kterého dosáhne za těchto podmínek, je 0,1 mm/s². Gravitační zrychlení Slunce (umožňuje Zemi stabilně obíhat Slunce) je 5,93 mm/s². Z tohoto je zřejmé, že pokud bychom mířili k více ambiciózním misím, museli bychom zlepšit vlastnosti plachetnic, aby překonaly zrychlení od Slunce. [3]

Pojďme si vyjádřit tyto vztahy a výpočty do obecné rovnice. Číslo 1366 Wattů/m² odpovídá „sluneční konstantě“, kterou značíme N a udává velikost sluneční energie na 1 m² ve vzdálenosti 1 astronomické jednotky od Slunce. Tlak na takto velký objekt za těchto podmínek je tedy:

$$p = \frac{N}{c} = \frac{1366}{300\,000\,000} = 4,55 \cdot 10^{-6} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (3,1)$$

kde c – rychlost světla ve vakuu [km/s²]

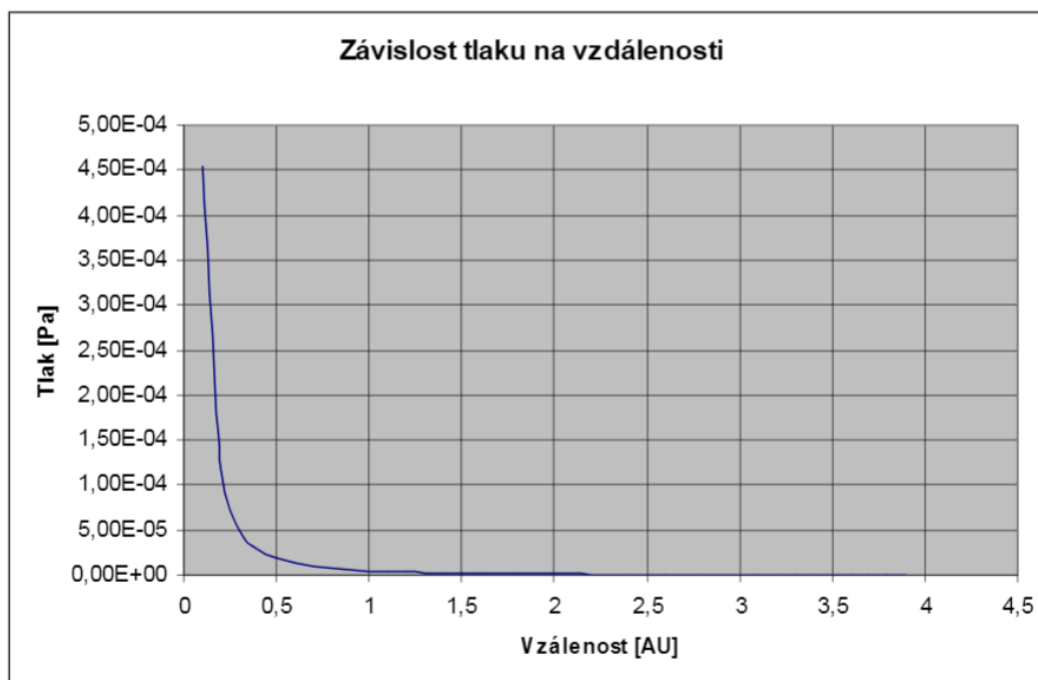
V této rovnici vychází tlak 2 krát menší než v předchozím příkladu. To je způsobeno tím, že nyní jsme neuvažovali plachtu s dokonalou odrazivostí. Pokud bychom chtěli rovnici zobecnit, musíme si uvědomit, že tlak slunečního záření klesá se čtvercem vzdálenosti od Slunce. To si lze představit vzhledem k „celkovému výkonu světelného záření“ P₀. Ten je

konstantní. Abychom dostali hodnotu výkonu slunečního záření v libovolné vzdálenosti, vydělíme tuto konstantu plochou sféry o poloměru R [2]:

$$P = \frac{P_0}{4\pi R^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.2)$$

kde P – výkon slunečního záření ve vzdálenosti R od Slunce

Z tohoto vztahu si můžeme uvědomit další důležitou vlastnost. Se zvětšující vzdáleností výkon, resp. tlak na plachetnici se zmenšuje exponenciálně. Pro konkrétní hodnoty je závislost tlaku na vzdálenosti dobře vidět v grafu (1) na další stránce. [2]



Graf 1 – Závislost tlaku na vzdálenosti [9]

Konečně síla, kterou působí sluneční energie ve vzdálenosti R od Slunce na objekt s plachtou o ploše S, je [9]:

$$F = S \frac{P_0}{4\pi R^2 c} [N] \quad (3.3)$$

Zrychlení bychom dostali vydělením rovnice 3 hmotností plavidla.

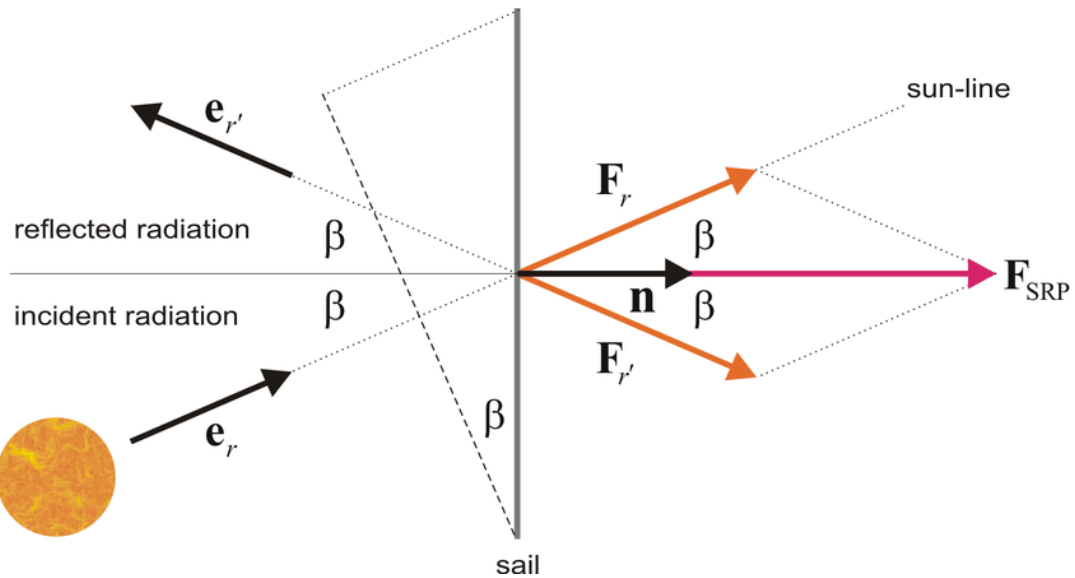
3.3. Jak se plachtí ve vesmíru

V tuto chvíli je jasné, že solární plachetnice nebudou mít využití v každém aspektu vesmírného provozu. Nemůžeme si ji urychlit, kam se nám zachce, kvůli převládající gravitaci Slunce, kterou neumíme překonat, jelikož technicky neumíme zatím sestrojít dost velké plachty. To nám ale samozřejmě nebrání využít gravitačních účinků pro kormidlování plachty a vyvstává tím dost způsobů pro velmi účinné, pro solární plachetnice přímo stvořené, dráhy letu.

Dříve jsem již popisoval odrazivost plachet, a to jaký mají vliv na výsledné působení, resp. tlak částic světla. Zásadní způsob jak v kosmu řídíme plachetnici, je natáčením plachty. Na obr. 4 vidíme vektory znázorňující působení slunečního světla a výslednice těchto účinků na

plachtu. e_r znázorňuje radiaci od paprsků světla. Tento impuls nám dá sílu F_r , která leží na stejné nositelce a má stejný směr.

Úhel natočení β je úhel, který svírá normála plachetnice s přímkou, po níž se šíří světlo od Slunce. Pokud uvažujeme materiál s dokonale odrazivým povrchem, světlo se dále bude odrážet pod stejným úhlem jako je úhel dopadu. V tomto směru vznikne působení odražené radiace $e_{r'}$, díky níž vznikne další síla $F_{r'}$ působící ve stejném, ale opačně orientovaném směru.



Obrázek 4 Výslednice sil od působení solárního záření na plachtu [Zdroj: Researchgate]

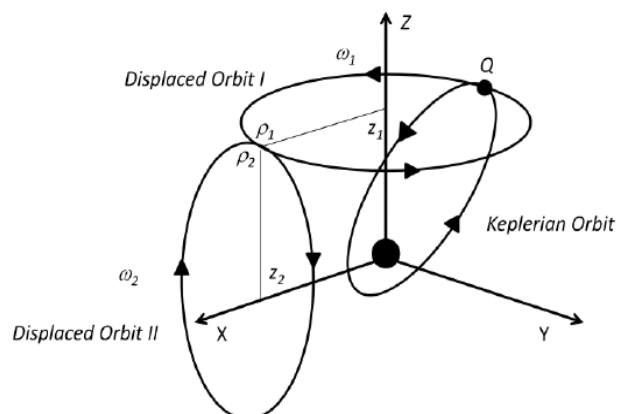
Výsledná síla F_{SRP} (Solar radiation pressure – tlak solárního záření) na tomto obrázku znázorňuje opravdu pouze výslednou sílu od působení solárního záření. Tato síla působí vždy ve směru normály plachetnice. Normála plachetnice je přímka kolmá na aktivní plochu plachty a vychází z jejího středu. Pokud do party proměnných, které působí na plachetnici, přizveme i gravitační sílu Slunce nebo dokonce gravitační pole planet v okolí blízkém dráze letu plachetnice, vše se celkem zkomplikuje. Uvedl bych zde pár misí, pro které byly plachetnice zamýšleny:

3.3.1. Nízkoperiodní oběhy

Pod tuto kategorii spadají hlavně trajektorie s planetami uprostřed. Proto se mluví o oběhu s nízkou periodou. Návrhy plachetnic byly v tomto prostředí koncipovány převážně na pouhé únikové manévry či průlety. Umístění plachetnice na pravidelnou oběžnou dráhu, například Země, si totiž žádá značné technologické požadavky na stavbu. Je to způsobeno tím, že jednou za periodu musí plachetnice podstoupit rotaci v rozmezí 180° , a poté se ihned vrátit do původního stavu, aby maximalizovala přísun energie. [10]

3.3.2. Nekeplerovské oběžné dráhy

Tyto orbity jsem v podstatě již nakoušel při popisu plachet, které odrážejí světlo všemi směry. Při klasických keplerovských oběžích platí, že gravitační a odstředivé síly na těleso v soustavě 2 těles jsou si rovny. Nekeplerovské dráhy jsou typické v tom, že je zapotřebí neustálé, ačkoliv malé, zrychlení v neměnném směru. V tomto případě může být použito právě solární plachetnice k vyvážení rozdílu mezi gravitací a rotačními silami. Tím vyvedeme plachetnici z rovnováhy na novou umělou rovnovážnou polohu od původního přirozeného libračního bodu. [10]



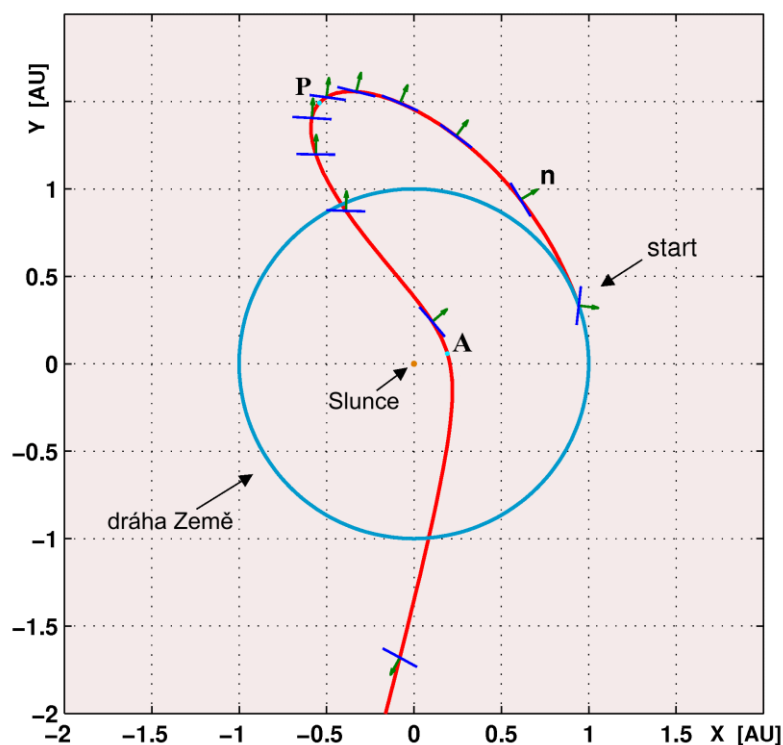
Obrázek 5 – Nekeplerovských orbit [Zdroj: Researchgate]

3.3.3. Lety do vnitřní sluneční soustavy

Další možností jsou lety do vnitřní části sluneční soustavy (první čtyři planety), například pro oběh jiné planety nebo Slunce. Pokud chceme kosmickou loď usadit na oběžnou dráhu kolem cílového tělesa, je nutné, aby při přiletu měla okamžité nulové nadbytečné zrychlení. Na téma těchto misí se často vedou diskuse ohledně efektivity slunečních plachetnic, protože by jim tato mise trvala daleko déle než u vysoko tahových kosmických raket. Solární plachetnice by brzdňý manévr musela provádět již daleko dříve, aby stihla včas „zabrzdit“. Na rozdíl od nich, vysoko tažné rakety jsou sice dražší a potřebují dost paliva pro brzdňý manévr. Ovšem mise by jim zabrala daleko méně času díky rychlému zbrždění na konci dráhy letu. [10]

3.3.4. Mise do vnější části solárního systému nebo mimo něj

Mise ke vnějším planetám by byly opět složitější, kvůli podmínce nulového nadbytečného zrychlení při přiletu. Pokud se ale „omezíme“ pouze na blízké průlety kolem vnějších planet, vyruší se nám tyto negativní elementy. Pokud se dokonce zaměříme na lety mimo naši sluneční soustavu, zjistíme, že plavidla na solární pohon jsou velmi výhodná. [10] Na obr. 6 vidíme příklad vypuštění plachetnice ze Země, kde provádí manévr, díky kterému jí bude poskytnuto velké zrychlení vlivem gravitace Slunce. Tím se „vystřelí“, podobně jako z praku, do vnější části solárního systému. [11]



Obrázek 6 – simulace dráhy letu solární plachetnice [11]

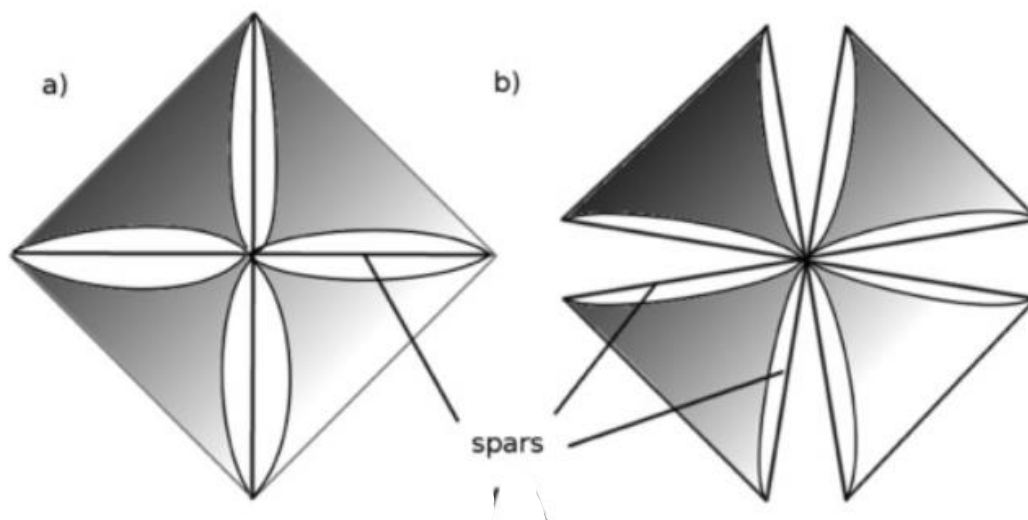
3.4. Konstrukce solárních plachetnic

Jako je mnoho druhů misí, na které lze solární plachetnice použít, existuje i mnoho rozličných typů jejich konstrukcí. I když postupem času vyplulo na povrch pár prvků, které se objevují na všech plachetnicích, jelikož se ukázaly jako nejlepší. Proto se výsledné konstrukce limitují pouze šikovností a představivostí inženýrů. A samozřejmě také technologiemi nám dostupnými. Jeden z nejvíce využívaných prvků je čtvercová plachta. Ta je složena do pozoruhodně malých rozměrů. Tento malý čtverec je následně vynesena do kosmu, kde se rozloží do své původní velikosti. Plachta se rozkládá na ultra-lehkých podporách. Požadavek na plachty je mít co nejtenčí a nejpevnější vrstvu, která zároveň velmi dobře odráží světlo. Rozšířeným materiálem je pohliníkový Mylar, nebo CP-1.

Co se týče tvarů plachetnic, máme 3 základní modely: Pevné-trojosé, heliogyroskopické a rotační diskové plachetnice. [12]

3.4.1. Pevné trojosé plachty

Tyto typy plachet se ve své konstrukci vyznačují pevným rámem, na který jsou plachty uchyceny. Řízení plachetnice se poté uskutečňuje rotací v rámci celé konstrukce. Na druhou stranu, pokud máme segmentovanou konstrukci, mohou rotovat jednotlivé segmenty plachty.



Obrázek 7 Čtvercová a segmentovaná pevná plachta [1]

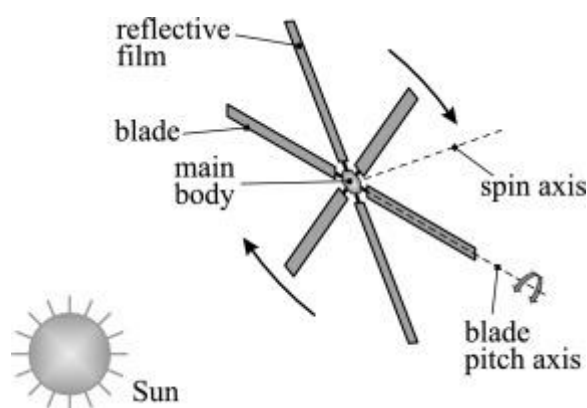
Takovéto konstrukce jsou velmi pevné. Jsou nejjednodušší a nejspolehlivější. Díky pevnému uchycení se plachty nijak nekrotí. Velmi dobře pracují i při zvětšování rozměrů plachet. Jsou způsobilé pro velké měřítko manévřů, které potřebujeme provádět změnou parametrů plachet. Zároveň umožňují plachtění na nižší orbitě než například rotační plachetnice. [1, 13]

3.4.2. Rotační plachty

Jsou specifické tím, že plachty nejsou upevněny na tyčích, ale napínají se pouze působením odstředivé síly, odtud název této kategorie. Obě zmíněné heliogyroskopické i diskové plachty patří do této skupiny. Logicky toto konstrukční řešení neposkytuje takovou pevnost a podporu jako v předchozím případě. Ovšem díky absenci „přebytečné váhy získáváme mnohem lepší poměr mezi objemem plachty a mezi hmotností. [1, 13]

Heliogyroskopická plachta

Heliogyro je rotační solární plachta. Její celková odrazivá plocha je rozdělena do jednotlivých dlouhých proužků, které jsou napínány odstředivou silou. V některých případech se umísťují tělesa s malou hmotností, připojená přes lano, na konce těchto pásů. Jako důsledek dostaneme větší odstředivou sílu. Každý pás se zároveň může natáčet kolem své vlastní osy která prochází středem plachetnice a je kolmá na osu rotace (v obrázku 9. označeno jako „spin axis“). Tím dokážeme korigovat úhel sklonu a můžeme tím docílit co největší účinnosti odrazivé plochy, aby byl co největší vektor zrychlení. Další výhodou je také jednodušší rozvinutí plachty, než u pevných plachetnic. [14, 13]



Obrázek 8 Nákres Heliogyro plachty [14]

4. Realizované mise

4.1. Ruská Znamya

Ačkoliv nešlo o plachetnici, byla Znamya prvním úspěšně vypuštěným plavidlem, které se stavbou velmi podobalo plachetnici. Mnoho principů z tohoto projektu bylo taky ihned aplikovatelných pro solární plachetnice. Jednalo se o experimentální zrcadlo, vypuštěné v roce 1993, které mělo za úkol demonstrovat možnost osvětlovat noční města. Konstrukce této plachty se velmi podobala rotační diskové plachtě. Po vynesení na oběžnou dráhu jako součást rakety pro doplnění zásob na stanici Mir, se ale zjistilo, že účinek plachty po rozvinutí není tak velký, jak se očekávalo. Odraz zrcadla vytvořil na zemi tečku světla o průměru 5 km podle ruské vesmírné agentury SRC. Kužel světla cestoval po zemi rychlostí 8 km/s připomínajíc podobný svit jako měsíc při úplňku.

Rozvinovací mechanismus sestával z 8 rotačních cívek, každá pro jeden segment odrazivé plachty. Rotační část mechanismu sama o sobě nestála za rozvinutím plachty. Ta se rozvinula za působení odstředivých sil a odmotávala se z cívek. Po plném rozvinutí se „tuhost“ resp. rovnost plachty udržovala díky konstantní úhlové rychlosti 1,8 rad/s, což odpovídá lehce přes čtvrt otáčky za sekundu. Nebylo použito žádné podpůrné konstrukce nebo skeletu.

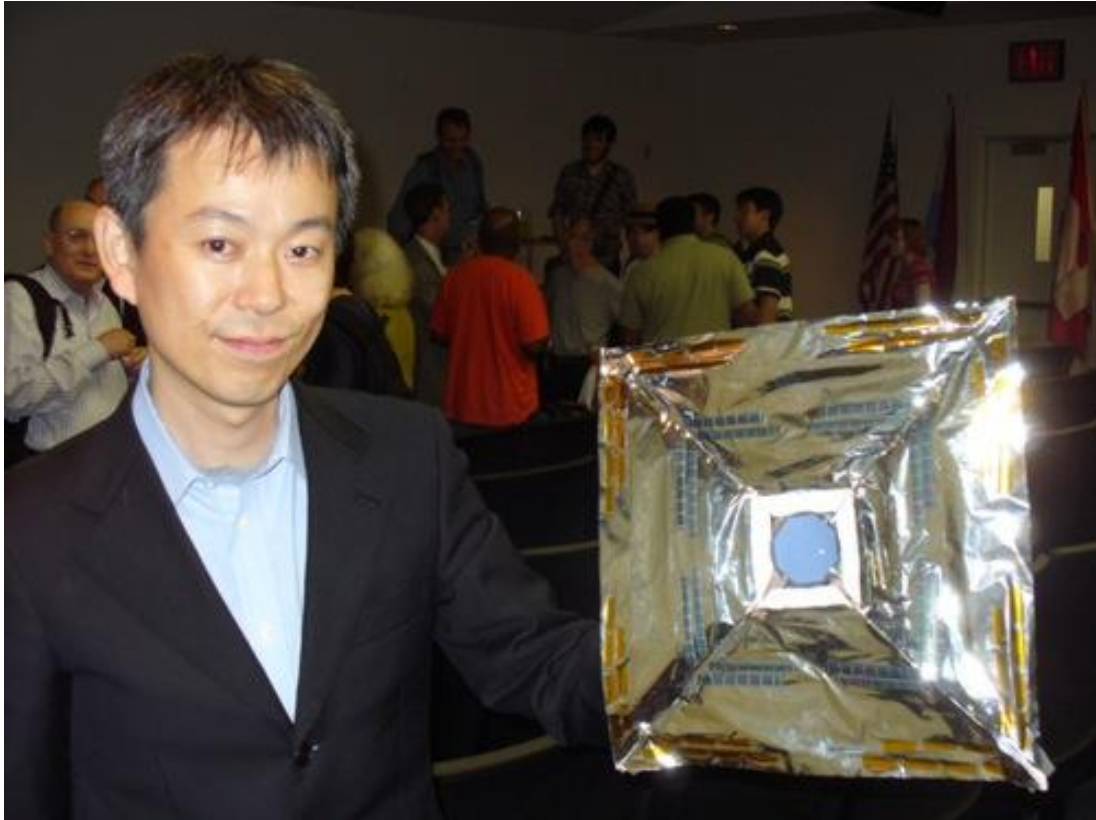
V roce 1999 následovala další mise s větší plachtou. Mise bohužel selhala z důvodu nechtěného kontaktu antény s rozvinující se plachtou a roztrhla ji. Po tomto incidentu se další podobné projekty zastavili. [3,24]

4.2. Plachetnice lidu – Cosmos 1

Velmi nadějný byl projekt připravovaný ve spolupráci Američanů a Rusů. Fascinujícím faktem této plachetnice (mimo její konstrukci) je i to, že finance na její stavbu byly zprostředkovány pomocí dotací od nadšenců a podporovatelů vesmírného vývoje z celého světa (tzv. crowdfunding). Konstrukci tvořilo 8 trojúhelníkových plachet. Jejich rozvinutí měly na starosti nafukovací ráhna. Jak už to bylo u většiny projektů, i tady měla plachetnice obrovskou smůlu. Ruská raketa selhala a nedokázala vynést plachetnici na oběžnou dráhu. [3]

4.3. Ikaros

Konečně, po dlouhých letech, i přes veškeré neúspěchy a odklady, Japonská agentura JAXA úspěšně vypustila první, plně funkční solární plachetnici, která se sama rozvinula. Změřilo se, že na ní působí síla slunečního záření o velikosti 1,12 mN a následně bylo potvrzeno i funkční řízení plachetnice. Plachetnice Ikaros byla vynesena do kosmu raketou, která ji následně ještě urychlila směrem k Venuši. Rozvinutí plachet proběhlo rotací plachetnice a uvolněním lehkých závaží, napomáhajících rozložení.



Obrázek 9 - Vedoucí projektu IKAROS Osamu Mori s maketou [15]

Další zajímavost provázející tuto plachetnici, se vztahuje ke způsobu natáčení plachetnice. Poloha plachetnice se dala ovládat pomocí panelů, které byly rozmístěny ve dvou řadách po obvodu celé plachetnice (oranžové obdélníky po obvodu makety na obr. 9). Každý panel obsahoval tekuté krystaly. Zapnutím panelu začal krystal odrážet světlo s vyšší účinností než vypnutý panel. Jelikož celá sonda rotovala kolem osy procházející jejím středem a kolmé na plochu plachty, probíhalo natáčení postupným zapínáním a vypínáním panelů. [15]

4.4.Lightsail 2

Předchůdcem této plachetnice bylo její starší dvojče Lightsail 1. Pod křídly The Planetary society byla Lightsail 1 vypuštěna do kosmu v roce 2015 jako testovací projekt. V návaznosti na její úspěch odstartovala i Lightsail 2 v roce 2019. Obě plachetnice nesly ve svém středu Cubesat (mini satelity ve tvaru kostky). Hlavní úkol byl ukázat, že solární plachetnice jsou validní způsob pro malé, nízkoorbitní satelity. Váha celé plachetnice byla 5 Kg s rozlohou plachty 32 m².



Obrázek 10 - Lightsail 2 nad Indonésií, 25. června 2021 [Zdroj: The Planetary Society]

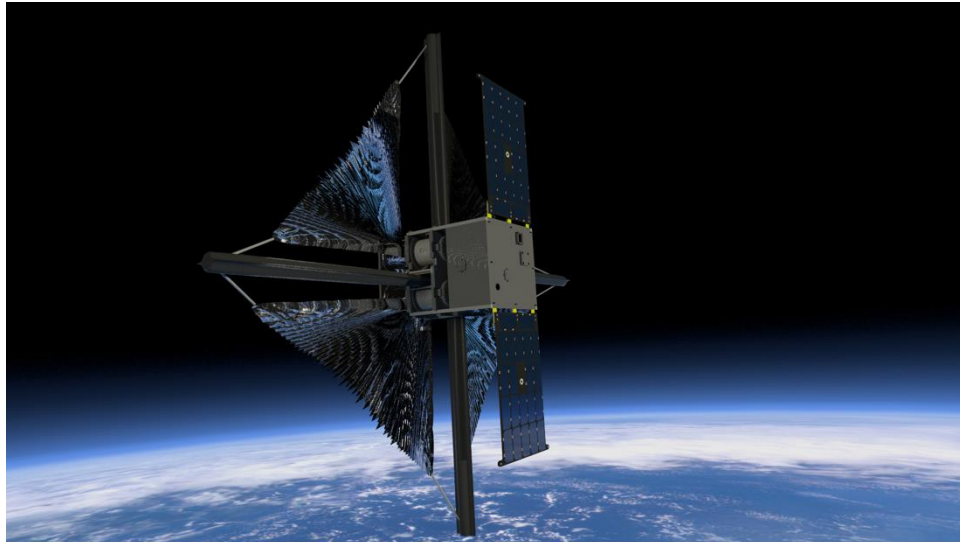
I když za úplně první úspěšnou plachetnici se považuje IKAROS, autor jednoho internetového článku ze stránky „vedator.org“ poukázal na to, že IKAROS byl na svou dráhu k Venuši urychlen pomocí rakety. Nicméně IKAROS opravdu dokázal měnit směr a poskytl mnoho skvělých poznatků. Na druhou stranu Lightsail 2 je opravdu první plachetnicí, která bez vnější pomoci, pouze díky plachtě a solárnímu svitu, dokázala sama měnit svou orbitu a i nyní úspěšně létá nad našimi hlavami a pořizuje úchvatné snímky jako je například na obrázku 10. [16]

4.5. Near-Earth Asteroid Scout

Přeloženo z angličtiny, Skaut blízko-zemních asteroidů, je další z plánovaných misí NASA. Jak název napovídá, cílem této mise je pozorovat asteroidy v blízkosti Země a sbírat data. Sběr dat má na starosti opět CubeSat, který bude součástí solární plachetnice, jež jej bude pohánět. Plachta s rozlohou 86 m² z pohlinikovaného polymeru, se bude rozkládat na nerezových tyčích ze slitiny. Studování asteroidů je důležité pro získání lepších poznatků o jejich vlastnostech. V blízké budoucnosti bychom z nich mohli těžit kovy a jiné nerostné suroviny. Dalším důležitým bodem proč zkoumat asteroidy, je možnost srážky s naší planetou. Původní plánovaný start měl být již na podzim minulého roku, tedy 2021. Nyní je plachetnice již postavená a připravená k letu. Všechny testy již proběhly. Aktuální start mise je plánován na Duben roku 2022. [17]

4.6. Technologie ACS3

Název „Advanced composite solar sail system“ stojí za nově vyvíjenou technologií, týkající se konstrukce solárních plachetnic. Jde o využití kompozitních materiálů, které NASA dokázala zdokonalit natolik, že jsou vhodné pro vesmírné použití. Jde o velmi lehký materiál a v budoucnu by mohl přispět k vytvoření levnějších, a hlavně větších plachetnic. Cíl této mise je dopravit a plně rozvinout plachtu na podpěrách z kompozitu. Prozatím je start této mise plánován nejdříve v polovině roku 2022. [18]

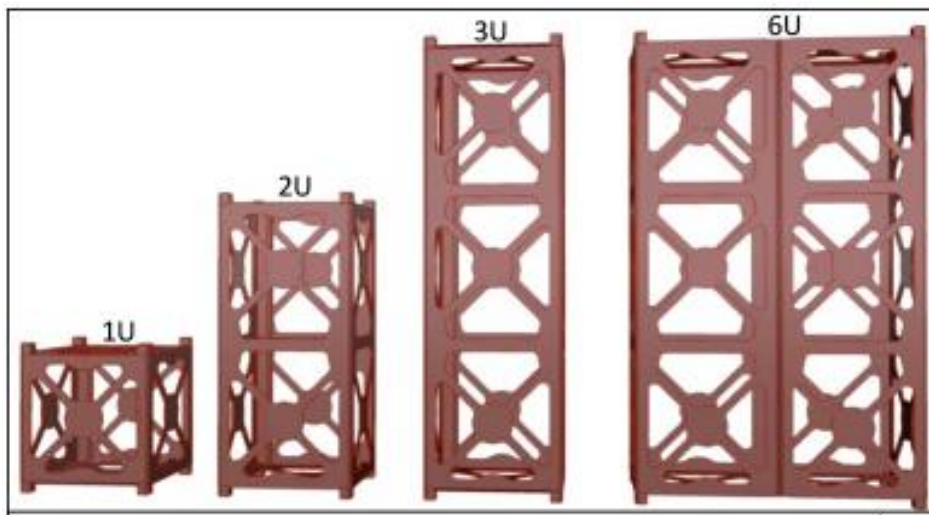


Obrázek 11 - Ilustrační obrázek rozvinující se plachty [19]

Velikostně je tělo koncipováno jako 12U CubeSat. Plachta je tvořena z tenkých filmů metalizovaného polyethylen naftalátu (PEN). I s metalizací je šířka vrstvy plachty pouhých 2.115 μm . Délka 4 podpěrných tyčí bude 7 metrů a s plně rozloženou plachtou vytvoří plochu o velikosti 80 m^2 . [20]

4.7. CubeSat

Jak napovídá název, CubeSat, je malý krychlový satelit. Standartně má 1U CubeSat velikost strany 10 cm a limitní váhu 1,33 kg. Tyto kostky se ovšem dají skládat dohromady a tím tvoří větší celky – 1,5U; 3U; 6U.



Obrázek 12 Velikosti CubeSatů, při spojování více kostiček dohromady [25]

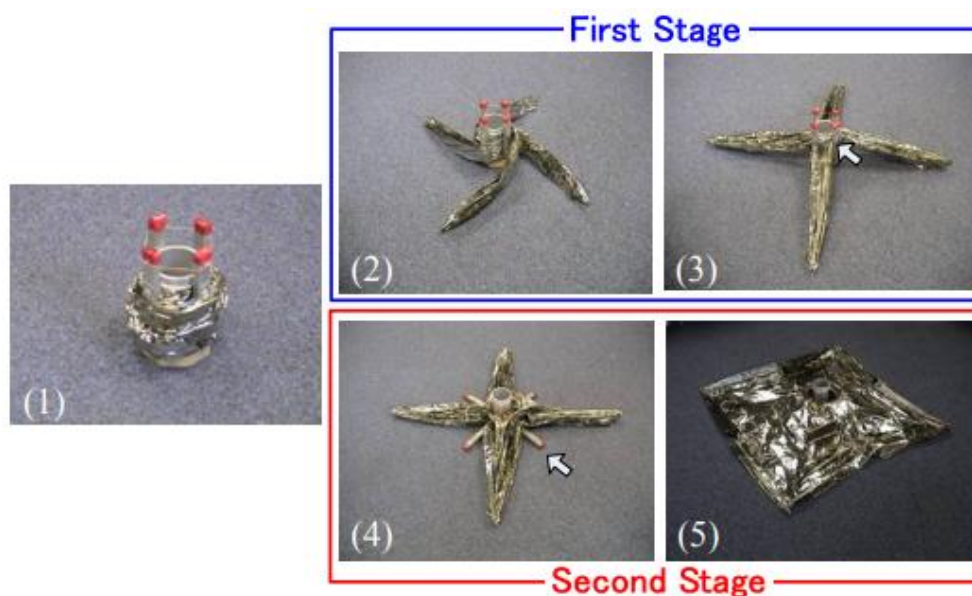
Původní smysl těchto mini satelitů byl pro studijní a testovací účely, s délkou vývoje do 2 let. Mnoho studentů z univerzit tvořili vlastní satelity, které mohli vypouštět do vesmíru a testovat pomocí nich nové technologie využitelné v budoucích misích. CubeSat se stal velmi rychle oblíbeným díky svým malým rozměrům, jednoduchosti a díky nízkým požadavkům na náklady. V poslední době se široce používají i ke komerčním a vojenským účelům. S rostoucím zájmem vzniklo i mnoho systémů pro pohánění CubeSatů ve vesmíru. Solární plachetnice právě velmi dobře vychází s CubeSaty, proto je v moderní době vidíme velmi často pohromadě. Vnitřek těchto družic tvoří často různé měřicí komponenty, sloužící právě jako zdroj informací pro univerzity na zkoumání vesmíru, pro sběr vlastních dat. Mohou být vybaveny i zařízeními pro sledování prostředí Země z vesmíru např. různé kamery. Ve spojení se solárními plachetnicemi obsahují často kameru, sloužící pro pořizování snímků, či systémy pro řízení orientace plachet a chování celého plavidla. [25]

5. Rozvinovací mechanismy

V této části bakalářské práce bych chtěl podrobně popsat typy mechanismů, sloužící k rozložení plachty, nebo podpěr, na kterých jsou plachty připevněny. V další kapitole si zvolím konkrétní typ mechanismu, který použiji a provedu pro něj vlastní konstrukční návrh. Problém s rozvinovacími systémy je v tom, že plachetnice se sama nevynese na oběžnou dráhu nebo do samotného kosmu. Proto musí být nejdřív vše kompaktně složeno, vyneseno raketou a poté se vše musí úspěšně rozložit.

5.1. Rozvinovací mechanismus IKAROSu

Navrhovaná rozvinovací metoda byla rozdělena do dvou fází, jak je vidět na obr. 13. V první části (1) vidíme smotanou plachtu. Každý segment čtvercové plachty je skládán jako harmonika a následně navinut kolem hlavního těla mechanismu. V první fázi se odmotá jen malá část, v podstatě se oddaluje pouze můstek, přes který jsou spojené segmenty plachty, jak je vidět ve (2). V moment, kdyby se do prostoru chtěla rozevírat plachta, je tomuto zabráněno tyčkami, které slouží jako záklapky a plachta vytvoří kříž. Důvod pro takto složité rozdělování rozvinovacích fází je, že kdyby nebylo zabráněno dalšímu rozpínání plachet, tak by se jednotlivé segmenty namotaly zpět na hlavní tělo satelitu, kvůli rotaci celé plachetnice. První fáze musí tedy ještě probíhat staticky. V druhé fázi, když se dostatečně velkou odstředivou silou vytvoří „pevný kříž“, se odklopí záklapky (4) a plachetnice dokončí rozvinovací manévry do úplného rozvinutí plachty. Druhá fáze již může probíhat dynamicky. [21]



Obrázek 13 Rozvíjení plachetnice IKAROS – JAXA [21]

5.2. Mechanismy pro plachetnice s pevnou podporou

Obecně vzato, ať už se jedná o jakýkoliv mechanismus ve vesmíru, je vždy vhodné, aby co nejvíce operací bylo automatických. Je za potřebí velmi spolehlivý mechanismus, který zaručí požadovaný výsledek s co největší samostatností. Toto je jeden z hlavních problémů, jež řešíme při návrhu solárních plachetnic a rozhodně není jednoduché přijít na vkusné a elegantní řešení, i když je velmi fascinující pozorovat veškeré vymoženosti, se kterými inženýři přišli za ta léta.

Tyče, které drží plachtu napnutou, nemusí být až tak pevné. V plachetnicích proto často nalezneme podpěry, které jsou relativně poddajné a dají se tedy pod napětím srolovat kolem těla mechanismu. Jediný nutný zásah z naší strany je poté uvolnění něčeho, co drží vše pohromadě a plachetnice se již sama rozloží. Velké množství rozvinovacích mechanismů je směřovaných právě tímto směrem. [1]

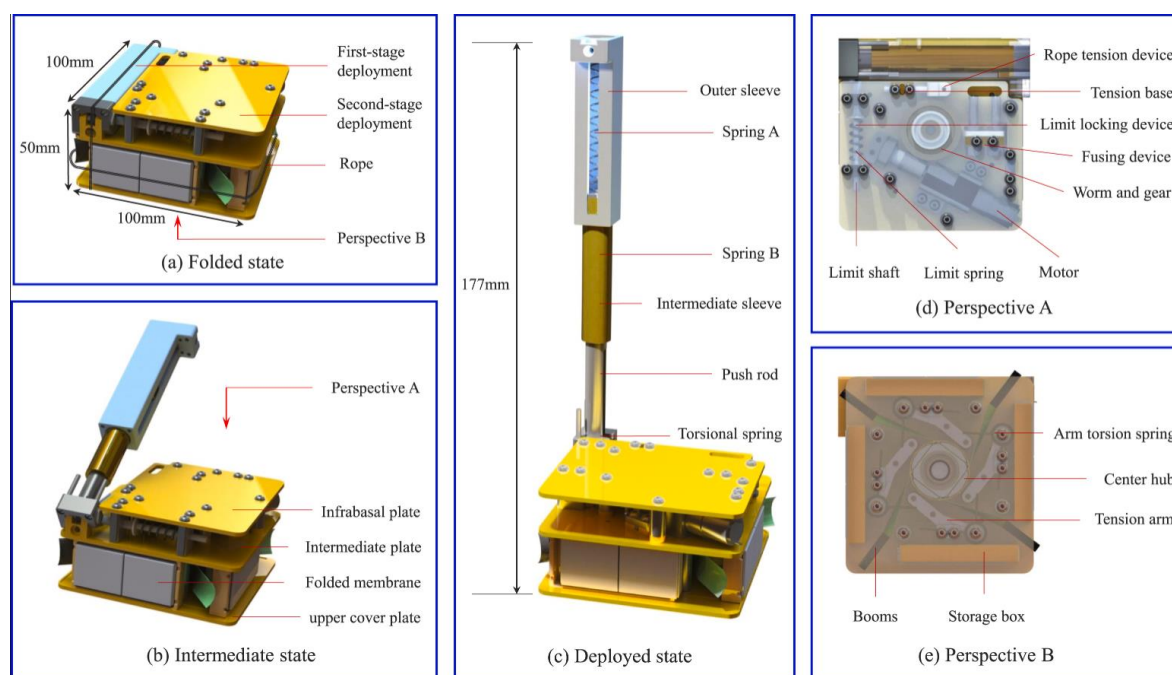
5.2.1. SIASAIL-1

SIASAIL-1 je testovací mise z produkce společností SIA a CAS, směřovaná na oběžnou dráhu Země. Jedná se o zmenšený model 0,5U, založený na 6U cubesatu. Celková váha soustavy je 1 kg. Start proběhl v srpnu roku 2019 a úspěšné rozvinutí proběhlo v prosinci.

První fáze

Tato mise opět obsahovala 2 fáze, ovšem v tomto případě šlo o potřebu oddálit od sebe systém solární plachetnice a cubesat, pro jeho správnou funkčnost.

V první fázi dochází k rozložení ramene, jak je vidět na obr. 14 (b) a (c). Rameno je uloženo pod napětím díky pružinkám, které ho po uvolnění lana otočí o 90° a následně vysunou. Tímto se vytvoří mezera o velikosti 130 mm, zajišťující vhodný prostor pro satelit. Zde je nutno umístit jakési limitující zařízení „Limit locking device“, na obr. 14(d) pod jako „Limit shaft“. Pokud by se tak neučinilo, pružiny by vymrštily rameno příliš rychle a došlo by k obrovským vibračním což je nepřijatelné. [19]



Obrázek 14 detailní popis rozvinovacího mechanismu plachetnice SIASAIL-1 [19]

Druhá fáze

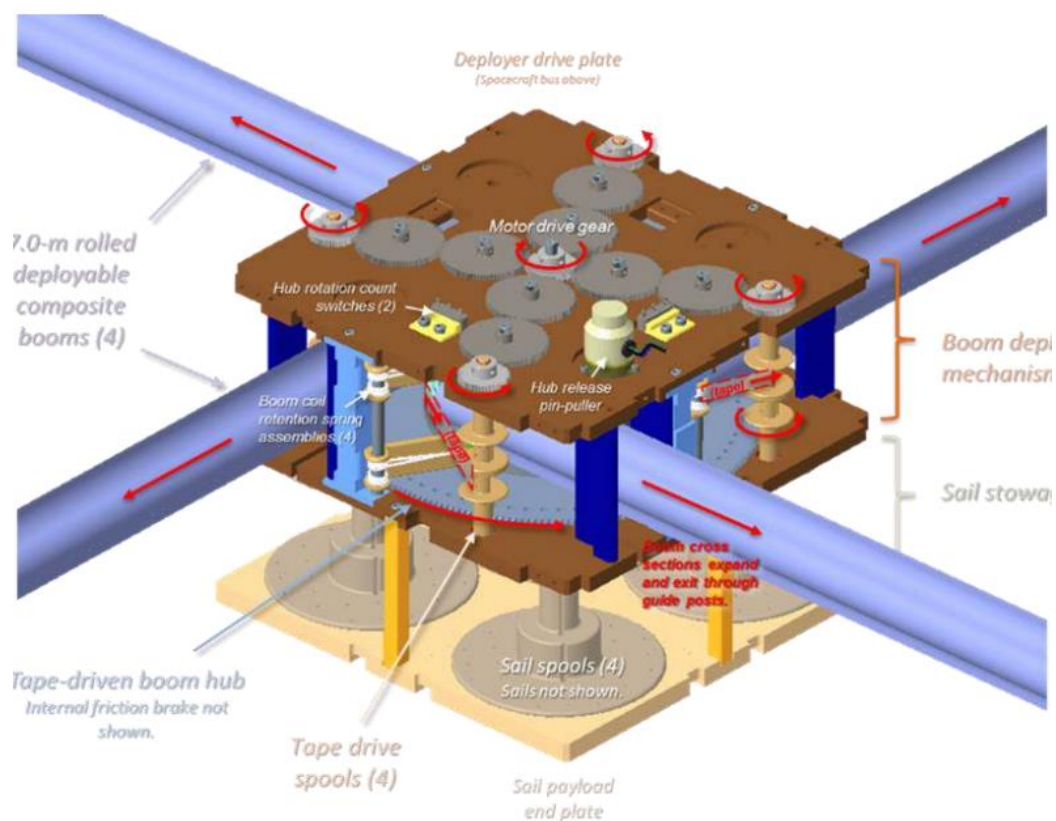
V druhé fázi již dochází k roztažení tyčí a rozložení plachty. Podpůrné tyče jsou vyrobeny z polymeru, posíleného o uhlíková vlákna (z anglického CFRP). Tyče jsou připevněné a namotané na centrální cívku – obr. 14 (e) „central hub“. Dále jsou na stejném obrázku vidět 4 ramena – „tension arm“ – kde každé je vybaveno ještě kroučící pružinou – „arm tension spring“, čímž je vytvořena síla kolmo na polymerové tyče namotané na cívce, aby nedošlo k předčasnému rozbalení systému. V moment, kdy dojde ke spuštění druhé fáze, se začne

pomocí motoru točit šnekové a ozubené kolo – „worm and gear“ – a dojde k vytažení tyčí, a zároveň s tím i rozvinutí plachty, jež je uchycena na tyčích. [19]

Jelikož je celé zařízení v podstatě na pružinách, musíme ho nějak udržet ve složeném stavu, což je zde řešeno pomocí lanka. Proto je zde integrováno tzv. „fuse device“ - lze přeložit jako rozbuška, či zápalné zařízení. To má za úkol pomocí odporu zahřát drát a tím rozpojit lanko. Následně dochází k postupnému rozkládání, popsánému v této podkapitole. Zároveň je potřeba udržet lanko neustále napnuté, aby se nepovolilo a nedošlo opět k předčasnému rozbalení plachetnice. Proto je zde navíc umístěno jednoduché zařízení pro udržení lanka v napnutém stavu. [19]

5.2.2. ACS3

Právě SBS – „Sail-Boom-subsystem“, název pro část soustavy obsahující plachtu s tyčemi a rozvinovacím mechanismem, je nejkompaktnějším elementem plavidla ACS3. Jeho rozvinovací mechanismus funguje na principu svinovacího metru. Zpětným motorizovaným navinutím kovových pásek, navinutých spolu s tyčemi, dojde k jejich vysunutí. Oproti jiným systémům má tento velkou výhodu v tom, že značně minimalizuje riziko zaseknutí se celého mechanismu. [20]

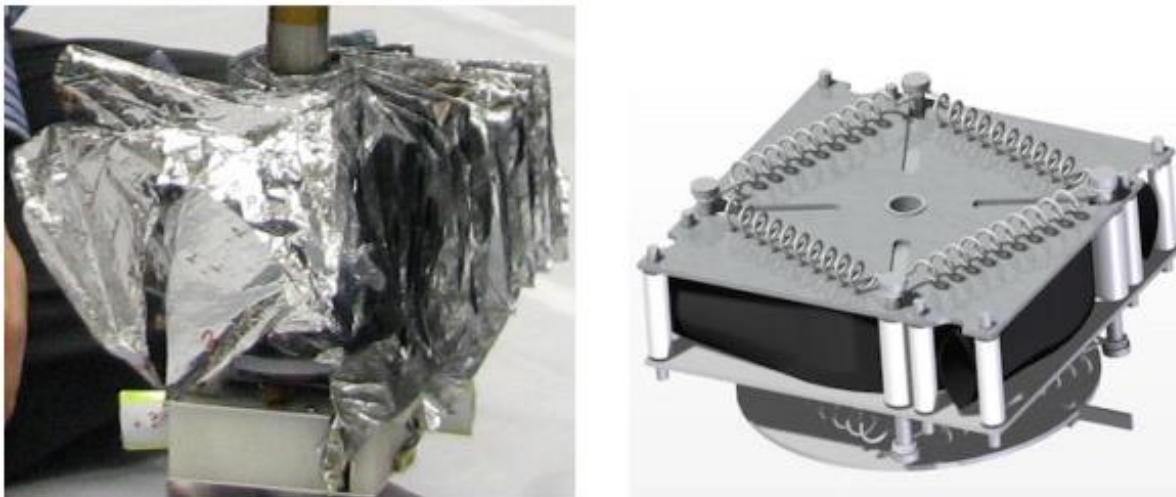


Obrázek 15 Rozvinovací mechanismus plachetnice ACS3 [20]

Na obrázku můžeme vidět „Tape drive spools“. Jsou to 4 cívky na které se zpátky namotávají plechové proužky. Tyto cívky jsou řízené motorem, který je roztočí převodem skrze ozubená kola, čímž započne celý proces vysouvání. Zde je vidět hlavní rozdíl ve srovnání např. s mechanismem SIASAIL-1 kde byly tyče tlačeny vpřed, a proto musely být také stlačovány kolmo na cívku, aby nedošlo k zaseknutí, čímž by se tyč začala hromadit uvnitř zařízení, a to by bylo zjevně devastující. [20]

6. Vlastní konstrukční návrh

Pro svůj konstrukční návrh jsem zvolil typ mechanismu s pevnou podporou ve formě tyčí. Můj původní záměr byl, aby plachetnice měla co nejméně prvků, jež se musí řídit. Například jsem nechtěl používat motory pro rozvíjení tyčí. Proto jsem se inspiroval systémem plachetnice CubeSail (obr. 16). Je zde totiž využito zkrutné pružiny, která díky předpětí otáčí centrální cívku a tím vysouvá tyče.



Obrázek 16 - Rozvinovací mechanismus Cubesail [22]

6.1. Specifikace vlastností plachetnice

Výsledná plocha plachty, pro kterou jsem navrhoval mechanismus je 1 m^2 . Nejedná se o nijak velkou plochu. Nicméně i tak bude schopna měnit svou oběžnou dráhu, resp. výšku své oběžné dráhy. Dalším důvodem pro volbu menší plochy je využití pružiny. Ta se totiž může „natáhnout“ pouze do určitých mezí, a kdybychom příliš mnohokrát otočili cívku a tím napnuli pružinu, již by nefungovala správně. U plachetnic s velmi dlouhými tyčemi je proto lepší používat soustavu motoru a převodu pro otáčení bubny s tyčemi.

6.1.1. Plachta

Pro materiál plachty jsem zvolil Mylar. Jedná se o typ speciální polyesterové fólie. Přesněji řečeno jde o tzv. BoPet film – biaxiálně orientovaný polyethylen-tereftalát. Tento tenký film se vkládá mezi podobně tenké vrstvy hliníku pro zlepšení reflexivních vlastností plachty. Někdy se používá i velmi tenká vrstva chromu pro zvýšení tepelné emisivity plachty. Mylar je zde velmi oblíbená volba, díky své velké pevnosti v tahu i přes to, jak má tenkou vrstvu. Dále díky dostupnosti a nízké ceně.

Celková tloušťka plachty, kterou budu používat je $12 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 12 \text{ }\mu\text{m}$.

Celková váha plachty potom bude $m_p = 16,68 \text{ g}$

6.1.2. Tyče

Pod křídly DLR byly vyvinuty tyče s uhlíkovými vlákny. Celým názvem CFRP, neboli Carbon-fiber-reinforced polymers, jsou velmi pevné a tuhé tyče s nízkou hustotou. Výhodou těchto podpor je možnost smotat je na buben s použitím napětí. Po uvolnění mají tyto polymery tendenci vracet se do původního tvaru. Velmi dobré srovnání najdeme u svinovacích metrů, konkrétně páska, na které jsou měřicí čárky. Dá se říct, že jde o pevnostně vylepšenou pásku s daleko příznivější hustotou. Ve svém návrhu používám čtyři 71 m dlouhé tyče.



Obrázek 17 - Demonstrace flexibility kompozitní tyče [23]

Celková váha tyčí bude $m = 282,5 \text{ g}$

6.1.3. Výpočet síly a Δv

Předpokládané nasazení této solární plachetnice je na oběžné dráze Země. Poloměr vzdálenosti od Slunce je 1 AU, využiji tedy sluneční konstanty $N=1366 \text{ W}$. Rozloha plachetnice S je 1 m^2 a účinnost plachty (odrazivost) jsem si určil hodnotu $\eta = 85\%$. Výsledná síla pohánějící plachetnici bude:

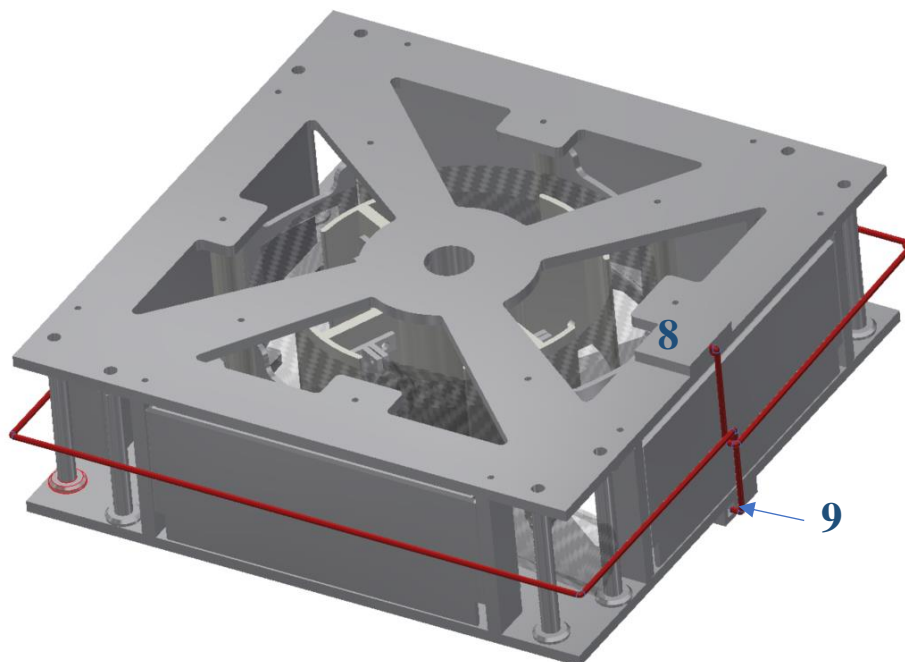
$$F_p = \frac{N \cdot S \cdot \eta}{c} = \frac{1366 \cdot 0,85}{300\,000\,000} = 3,87 \cdot 10^{-6} \text{ N} \quad (6.1)$$

Hmotnost celé soustavy pro 1U je standardně 1 kg. Velikost Cubesatu používám 0,5U a druhou polovinu zabere rozvinovací mechanismus a prostor složené plachty. Při těchto parametrech je výsledné zrychlení:

$$a = \frac{F_p}{m} = \frac{3,87 \cdot 10^{-6}}{1} = 3,87 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,0039 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2} \quad (6.2)$$

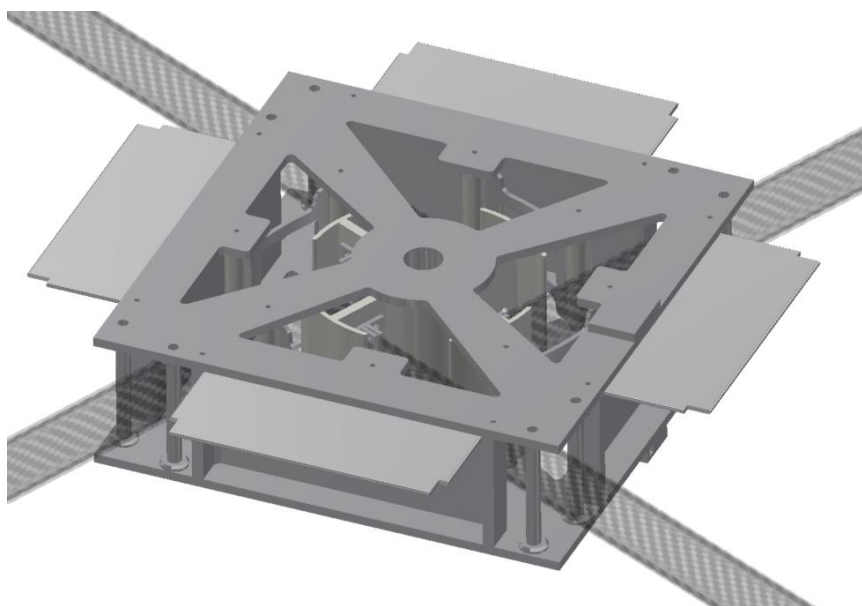
6.2. Konstrukční návrh

Na obr. 18 je vidět model v aplikaci Inventor. Jde o stav kdy je plachetnice složená. Tyče jsou namotány na cívku a jednotlivé segmenty plachty jsou uloženy ve skříních po obvodu.

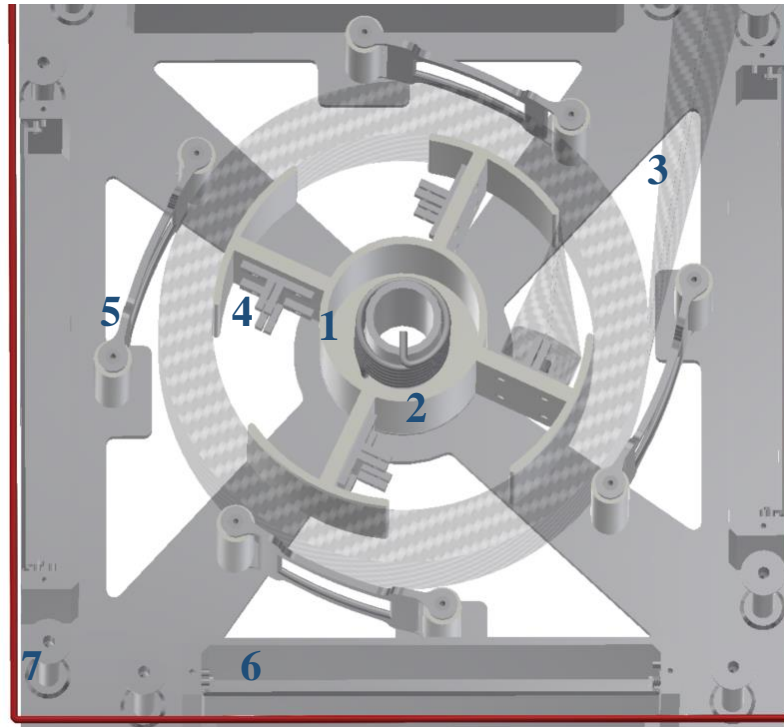


Obrázek 18 - Model složené plachetnice

Na dalším obr. 19 je vidět rozložený model rozvinovacího mechanismu s vysunutými tyčemi a otevřenými dveřmi skříní, ze kterých se začne rozkládat plachta přichycená na tyče ve dvou cípech a jedním cípem uchycena ve skříní. V obou modelech jsou tyče jako průhledné pro přehlednost.

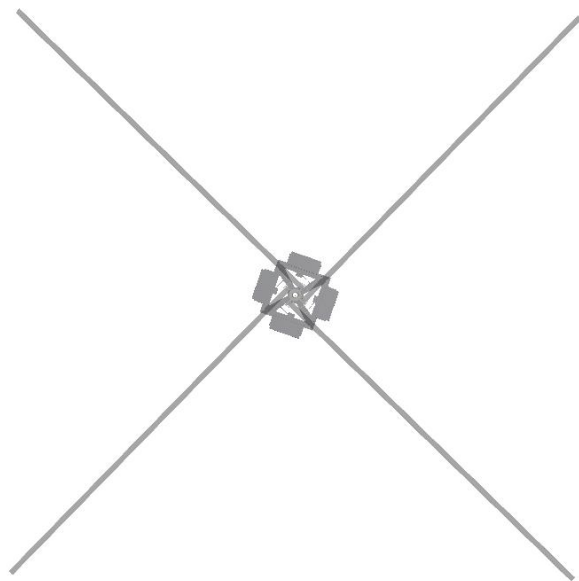


Obrázek 19 - Model rozložené plachetnice



Obrázek 20 - Vnitřek modelu

Na tomto obrázku jsem odložil horní víko pro lepší přehled vnitřku sestavy. Číslo 1 odkazuje na pružinu, která je navinuta kolem válce. Válec je svařený se spodním víkem. Pružinu kryje cívka (2). Dno cívky je spojeno s pružinou a při navíjení tyčí na cívku (směr hodinových ručiček), se začne pružina rozvírat, čímž vznikne pnutí, které bude později nutit cívku k točení do proti směru hodinových ručiček. Tím se tyče začnou opět rozvíjet. Každá tyč (3) je uchycena na cívce pomocí držáku (4). Po obvodu smotaných tyčí jsou rozmístěná ramena, která mají za úkol zabránit zkroucení tyčí při rozvíjení a usměrnit je. Číslem 6 jsou označeny skříňe, kde jsou uloženy smotané segmenty plachty. V rozích jsou vidět v párech pilíře, které slouží jako finální podpora pro orientaci tyčí při opouštění prostor modelu soustavy. Červená čára naznačuje provázek, kterým se obmotá celý mechanismus. Provázek drží tyče i dveře skříňe ve složeném stavu. Po spouštěcím pokynu se provázek přeručí pomocí kovového drátku, který se odporovým ohřevem rozžhaví (obr. 18 (8)). Provázek se začne navíjet zpátky pomocí pružiny jako svinovací metr, do spodní části spodního víka (obr 18 (9)). Dveře skříňe se otevírají samy také pomocí pružiny.

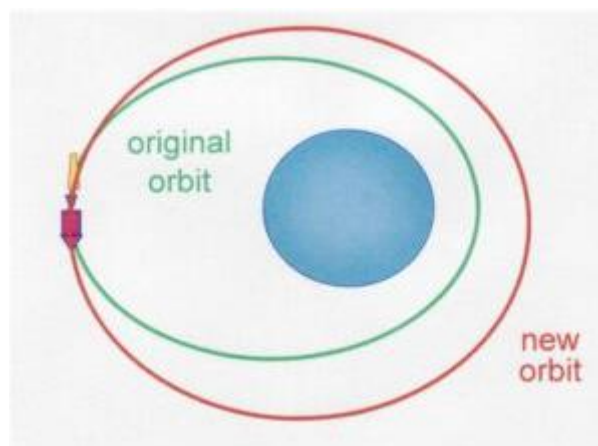


Obrázek 21 - Obrázek celé plachetnice s plně vysunutými tyčemi

Na obr. 21 můžeme vidět délku tyčí, resp. velikost plachty, v porovnání s tělem rozvinovacího mechanismu. Zde mluvíme o plachetnici s rozlohou pouze 1 m². U jiných plachetnic by byl rozdíl daleko markantnější, jelikož tato velikost Cubesatu je standardní (10x10), ovšem rozloha plachty bývá o poznání větší.

6.3. Využitelnost plachetnice

Aby satelit mohl obíhat kolem Země, musíme mu udělit počáteční rychlost, která ho poté udrží na oběžné dráze. Podle toho, jestli chceme například zvýšit výšku orbity, musíme přidat rychlost ve směru pohybu (obr. 21). A naopak pokud chceme snížit orbitu. Ve vesmírném provozu se ale potýkáme s problémem, že atmosféra nekončí v jedné pomyslné rovině, ale hustota vzduchu exponenciálně klesá. Proto veškeré satelity, ať chceme nebo ne, stále klesají, kvůli odporu zbytkového vzduchu na nízké oběžné dráze (LEO). Proto jsem provedl dodatečný výpočet, abych určil



Obrázek 22 - princip zvyšování orbity

výšku, ve které bude naše družice schopna se udržet. To znamená výšku, ve které bude síla od tlaku slunečního záření vyšší než síla, kterou působí na plachtu zbytková atmosféra.

Předpokládám kruhovou oběžnou dráhu, s výškou 450 km nad Zemí. Nesmíme zapomenout přičíst poloměr Země. Zjistíme rychlost, na kterou musíme urychlit satelit:

$$v^2 = MG \left(\frac{1}{r} \right) = 4 \cdot 10^{14} \cdot \left(\frac{1}{6828000} \right) = 58,6 \cdot 10^6 \text{ m/s} \quad (6.3)$$

kde MG pro Zemi je konstanta, r je výška orbity 450 km + poloměr Země 6 378 km. Nyní již spočítáme sílu odporu vzduchu:

$$F_{drag} = \frac{1}{2} C_d \rho A_d v_s^2 = 0,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot 1 \cdot 58,6 \cdot 10^6 = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ N} \quad (6.4)$$

Kde C_d je konstanta, A_d je plocha, na kterou odpor působí, ρ je hustota vzduchu v dané výšce a v_s je rychlost satelitu.

Jak je vidět z výpočtů $F_{drag} > F_p$, síla na plachtu je o něco málo menší. Ve výšce 450 km by tedy plachetnice padala dolů. Tuto plachetnici bych tedy situoval na oběžné dráze od 500 km výš, kde už bude schopna měnit svou orbitu.

7. Závěr

I když původ principu solárního plachtění sahá do dávné minulosti, jsou dle mého názoru tato plavidla stále ještě v plenkách. Ovšem věřím, že již brzy se dočkáme jejich rozkvětu. Shrnul jsem historii a princip fungování těchto magnificentních plavidel. Snažil jsem se poskytnout obecný náhled, co se týče problematiky plachetnic, ale zabrousil jsem i do detailních partií, které mi přišly důležité, a bez kterých by se začátečník v solárním plachtění neobešel. Poskytl jsem výpis pár misí, úspěšných i méně úspěšných, díky nimž se vývoj posouvá dále kupředu. Mým hlavním cílem bylo navrhnout rozvinovací mechanismus pro konkrétní plachetnici. Pro začátek jsem zkoumal pár typů rozvinovacích mechanismů a na jejich základě jsem si načrtl vlastní návrh, který jsem pak realizoval ve formě modelu jako funkční konstrukční návrh.

8. Použitá literatura

- [1] FU, Bo, SPERBER, Evan. Solar Sail Technology - A State of the Art Review. Davis : University of California, 2016. CA 95616.
- [2] HOLUB, Aleš. Malá encyklopedie kosmonautiky. Sluneční plachetnice. [Online] 12. 12 2002. [Citace: 10. 11 2021.] <http://mek.kosmo.cz/zaklady/rakety/solsail.htm>.
- [3] Giovanni, Vulpetti, Jhonson Les, Matloff, Gregory. Solar sails, a novel to approach to interplanetary travel. New York: Copernicus Books, 2008. 244 s. 978-0-387-34404-1
- [4] SVANTE, Arrhenius. Worlds in the making; the evolution of the universe. New York: University of California Libraries, 1908. 20061130224043.
- [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: 20. 12 2021.] <http://www.planetary.org/blogs/jason-davis/2017/20170504-halleys-comet-sail-documents.html>.
- [6] O'SHAUGHNESSY, Daniel J., et al. Fire sail: Messenger's use of solar radiation pressure for accurate mercury flybys. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2009, 133.Part I.
- [7] Artur R. Davoyan, Jeremy N. Munday, Nelson Tabiryan, Grover A. Swartzlander, and Les Johnson, "Photonic materials for interstellar solar sailing," *Optica* 8, 722-734 (2021)
- [8] DUBILL, Amber L.; SWARTZLANDER JR, Grover A. Circumnavigating the sun with diffractive solar sails. *Acta Astronautica*, 2021, 187: 190-195.
- [9] FOŘT, Stanislav. Stručný úvod do teorie letu sluneční plachetnice. Tábor: Gymnázium Pierra de Coubertina, 2009.
- [10] MACDONALD, Malcolm; MCINNES, Colin. Solar sail science mission applications and advancement. *Advances in Space Research*, 2011, 48.11: 1702-1716.
- [11] katedra fyziky FEL ČVUT v Praze. Solární plachetnice [Online]. FEL ČVUT v Praze [cit. 12.1.2022]
- [12] Marshall Space Flight Center. Solar Sail Propulsion [Online]. Huntsville: 2004 [cit. 15.1.2022]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/centers/marshall/pdf/100420main_solar_sails.pdf
- [13] GORBUNOVA, I. et al. The finite-element behaviour simulation of the rotary-type and frame-type solar sails on the geocentric orbits. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering* [online]. 2016, vol. 124, no. 1. ISSN 17578981. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012058
- [14] BASSETTO, Marco, et al. Optimal heliocentric transfers of a Sun-facing heliogyro. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 119: 107094.
- [15] Hofman, Jiří. IKAROS – Japonci už plachtí [Online]. 8 vyd. Praha: AGA, 2010. [cit. 20.1.2022]. ISSN: 1214-1674 Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2010_43_pla.php

- [16] The planetary society. LightSail, a Planetary Society solar sail spacecraft. [Online] [cit. 10.2.2022] Dostupné z: <https://www.planetary.org/sci-tech/lightsail>
- [17] Mahoney, Erin. NEA Scout [Online]. 2021 [cit. 13.2. 2022] Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/nea-scout>
- [18] Hall, Laura. Advanced Composite Solar Sail System: Using Sunlight to Power Deep Space Exploration [Online]. 2021. [cit. 14. 2. 2022]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/small_spacecraft/ACS3
- [19] LIU, Jinguo, et al. SIASAIL-I solar sail: From system design to on-orbit demonstration mission. *Acta Astronautica*, 2022, 192: 133-142.
- [20] WILKIE, William K. Overview of the NASA Advanced Composite Solar Sail System (ACS3) Technology Demonstration Project. In: *AIAA Scitech 2021 Forum*. 2021. p. 1260.
- [21] MORI, Osamu, et al. Development of deployment system for small size solar sail mission. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan*, 2009, 7.ists26: Pd_87-Pd_94. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/tstj/7/ists26/7_ists26_Pd_87/_pdf/-char/ja
- [22] CubeSail: A low cost CubeSat based solar sail demonstration mission
- [23] LEIPOLD, M., et al. Solar sails for space exploration- The development and demonstration of critical technologies in partnership. *ESA bulletin*, 1999, 98: 102-107.
- [24] LIOR, Noam. Mirrors in the sky: Status, sustainability, and some supporting materials experiments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 401-415.
- [25] POGHOSYAN, Armen; GOLKAR, Alessandro. CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. *Progress in Aerospace Sciences*, 2017, 88: 59-83.
- [26] FIESELER, Paul D. A method for solar sailing in a low Earth orbit. *Acta Astronautica*, 1998, 43.9-10: 531-541.

9. Seznam obrázků

Obrázek 1: Solární plachetnice v podobě lodi cestující po vlnách vesmíru [3]	11
Obrázek 2 – Carl Sagan v pořadu „Tonight Show“ [Zdroj: The week]	13
Obrázek 3 vyobrazení magnetického pole Země a působení solárního větru ze Slunce (Zdroj: Firstpost).....	16
Obrázek 4 Výslednice sil od působení solárního záření na plachtu [Zdroj: Researchgate]	19
Obrázek 5 – Nekeplerovských orbit [Zdroj: Researchgate]	20
Obrázek 6 – simulace dráhy letu solární plachetnice [11].....	21
Obrázek 7 Čtvercová a segmentovaná pevná plachta [1].....	22
Obrázek 8 Nákres Heliogyro plachty [14].....	22
Obrázek 9 - Vedoucí projektu IKAROS Osamu Mori s maketou [15]	24
Obrázek 10 - Lightsail 2 nad Indonésií, 25. června 2021 [Zdroj: The Planetary Society].....	25
Obrázek 11 - Ilustrační obrázek rozvinující se plachty [19]	26
Obrázek 12 Velikosti cubesatů, při spojování více kostiček dohromady [25]	27
Obrázek 13 Rozvíjení plachetnice IKAROS – JAXA [21]	28
Obrázek 14 detailní popis rozvinovacího mechanismu plachetnice SIASAIL-1 [19]	29
Obrázek 15 Rozvinovací mechanismus plachetnice ACS3 [20].....	30
Obrázek 16 - Rozvinovací mechanismus Cubesail [22].....	31
Obrázek 17 - Demonstrace flexibility kompozitní tyče [23].....	32
Obrázek 18 - Model složené plachetnice.....	33
Obrázek 19 - Model rozložené plachetnice	33
Obrázek 20 - Vnitřek modelu	34
Obrázek 21 - Obrázek celé plachetnice s plně vysunutými tyčemi.....	34
Obrázek 22 - princip zvyšování orbity	35

10. Seznam grafů

Graf 1 – Závislost tlaku na vzdálenosti [9].....	18
--	----