



Středoškolská technika 2023

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Meziorbitální transportní systém (NOUStea)

Josef Doležal, Jakub Anděl, Tomáš Engelthaler, Tomáš Hrabák

Gymnázium
Plzeň, Mikulášské nám. 23

Anotace

Tato práce se zabývá nekonvenčním transportem nákladu mezi oběžnými drahami Země, Měsíce a planet. Díky tomu lze využít velmi efektivních plazmových motorů umožňujících levnou přepravu.

Klíčová slova

oběžná dráha; přeprava; vesmír; efektivita

Annotation

This work deals with unconventional transport of cargo between the orbits of Earth, Moon, and planets. Thanks to this, it is possible to use very efficient plasma engines enabling cheap transport.

Keywords

orbit; transport; space; efficiency

Obsah

1	Úvod.....	3
2	Úvod do problematiky vesmírné přepravy	3
3	Pohon	3
3.1	Motory VASIMR.....	3
3.2	Nádrže a palivo	4
4	Hlavní konstrukce	5
5	Chladicí systém.....	6
6	Solární energie	7
7	Postranní moduly	7
8	Velitelský modul.....	8
9	Gravitační habitat.....	8
9.1	Koncept.....	8
9.2	Výpočty.....	9
10	Dráha.....	9
10.1	Koncept	9
10.2	Výpočty.....	10
11	Jak by vše probíhalo	11
11.1	Stavba.....	11
11.2	Provoz	12
12	Maketa	12
12.1	Konstrukce	12
12.2	Elektronika.....	12
12.3	Aplikace	12
13	Závěr	12
14	Použitá literatura	13
15	Seznam obrázků a tabulek	13

1 ÚVOD

Cílem práce je navrhnout teoretický koncept meziorbitálního transportního systému pro levnou vesmírnou přepravu. Zahrnuté požadavky jsou i cena stavby, praktičnost stavby, jednoduchost používání a dodržení dnešních technologií. Pro lepší vizualizaci je také vyrobena maketa v poměru 1:50 a animovaný 3D model v programu Blender.

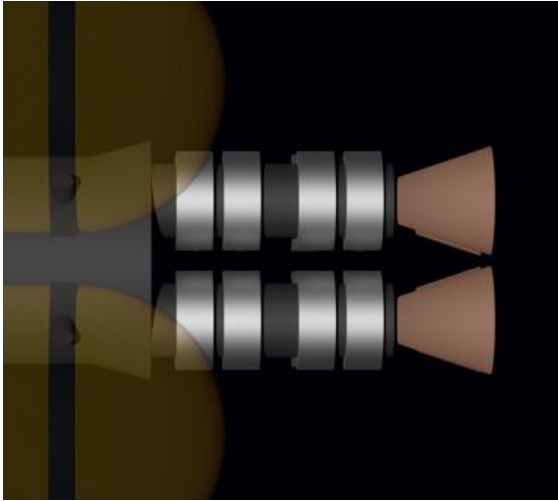
2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VESMÍRNÉ PŘEPRAVY

Hlavními problémy při přepravě nákladů mezi Zemí a jinými vesmírnými objekty jsou výkon a aerodynamika raketového nosiče. Toto lze vidět na raketách všeho druhu. Toto rakety omezuje na používání výkonných, ale neefektivních chemických motorů nejenom pro vzlet, ale i na další manévry ve vesmíru. Kvůli této neefektivitě budou jakékoli manévry na oběžné dráze velmi drahé a výrazně omezí množství možného nákladu. Existují ale efektivnější motory, např. Jaderné NERVA, iontové, plazmové VASIMR. Kvůli jejich nízkému výkonu, ale nejdou využít pro vzlet z povrchu. Toto vynahrazují svojí vysokou efektivitou, ideální pro mezi orbitální let. Jejich hmotnost, velikost a cena jim ale velmi komplikuje využití na vyšších stupních dnešních raket, proto se dnes nevyužívají. Tento koncept jich využívá v jejich ideálních podmínkách, na vesmírné lodi určené pouze pro vesmírnou přepravu. Zde nebude problém gravitace ani atmosféra, což umožní motorům zazářit.

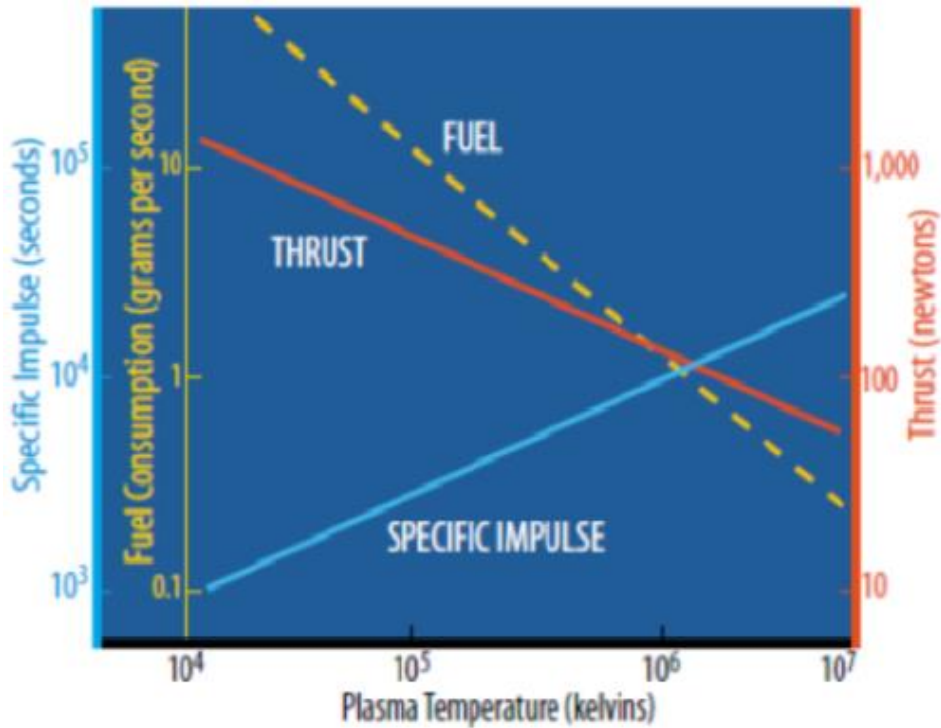
3 POHON

3.1 Motory VASIMR

Motory VASIMR (VARIABLE SPECIFIC IMPULSE MAGNETOPLASMA ROCKET) (1) jsou svým výkonem i efektivitou mezi jadernými a iontovými motory ideální pro efektivní transport nákladu. Díky jejich designu nemají žádné velké pohyblivé součástky. To umožňuje velmi dlouhý, a hlavně opakovatelný provoz bez velkých komplikací. To vše ale přichází za cenu velké spotřeby energie. Ten řeším pomocí jaderného reaktoru v zadní části lodě. Na konceptu využívám 4 tyto motory pro celkový výkon 3,2 kN a efektivitu 2500 Isp podle tohoto grafu (2). Motory mohou měnit svůj výkon za cenu efektivitu, umožňující velkou flexibilitu v drahách, cílech a nákladech.



Obrázek 1: 3D render motorů VASIMR



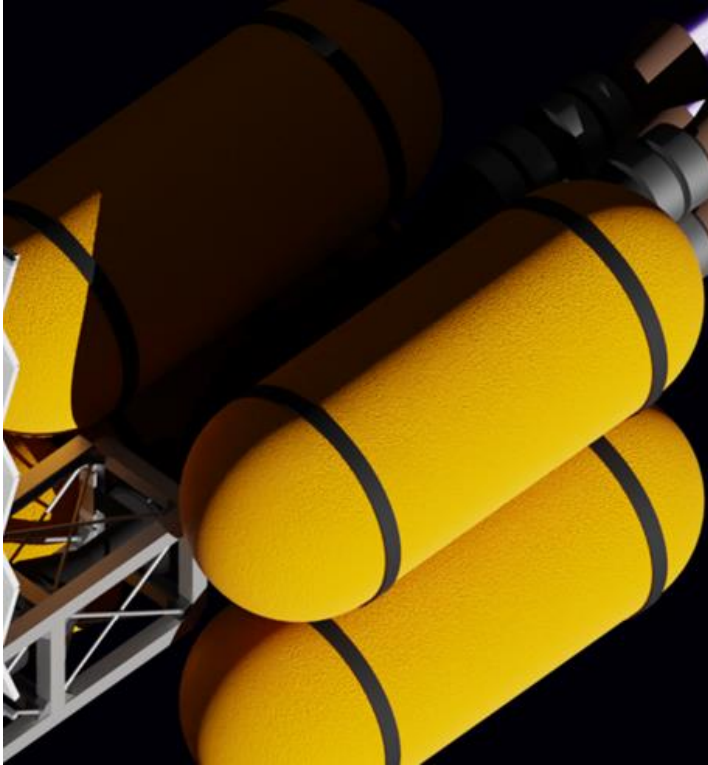
Obrázek 2: Graf poměru výkonu a efektivit motorů VASIMR (1)

Nádrže a palivo

Motory využívají jako palivo pouze tekutý vodík. Ten je uskladněn ve 4 válcovitých nádržích (3) o celkové kapacitě $1583,36 \text{ m}^3$. Každá nádrž je široká 6 m a dlouhá 16 m. Díky tomu je lze jednoduše dopravit na oběžnou dráhu pomocí loď Starship. Pomocí tohoto vztahu (1) můžeme určit, že celková kapacita lodi bude 112 418 kg tekutého vodíku.

$$m = \rho \times V \quad (1)$$

Pro přepravu paliva na oběžnou dráhu se využijí lodě Starship. S rozměry nákladového prostoru 8 m x 16 m je objemová kapacita cca. 900 m³. Hmotnostní kapacitu spočítáme opět pomocí vztahu (1) za předpokladu, že tekutý vodík má hustotu 71 kg/m³. Vyjde nám 63 900 kg, tedy k doplnění paliva stačí pouze 2 lety Starship.



Obrázek 3: 3D render nádrží

4 HLAVNÍ KONSTRUKCE

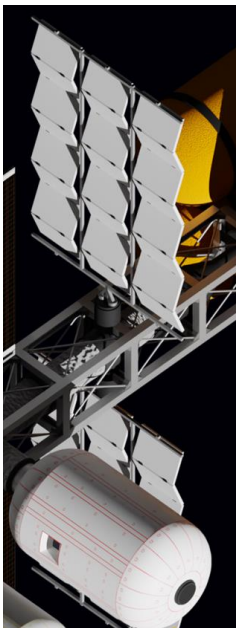
Hlavní konstrukce (4) slouží jako opora celé lodi a místo pro umístění všech ostatních zařízení. Po bocích jsou 4 dokovací porty pro postranní moduly či jiné náklady, např. satelity, nebo jiné větší konstrukce. Na horní a dolní straně jsou umístěny skládající radiátory a rolovací solární panely (podobné těm na ISS). Uvnitř této konstrukce je systém nafukovacích tunelů určený k propojení lodí pro lidskou posádku. Pro menší a přesnější manévry je zde umístěn systém trysek na natlakovaný plyn, který je vhodný pro otáčení celé lodě, nebo malé korekční manévry.



Obrázek 4: 3D render hlavní konstrukce

5 CHLADÍČÍ SYSTÉM

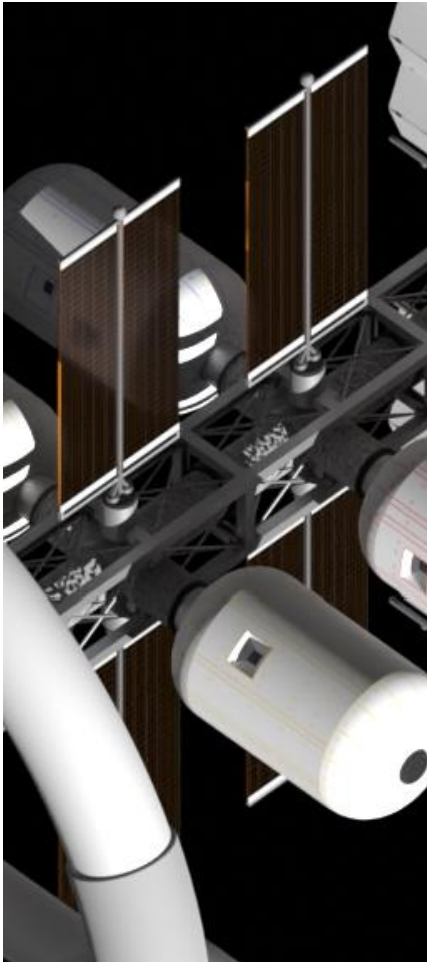
V zadní části lodě se nachází dva tepelné radiátory (5) na odstraňování přebytečného tepla. K tomu slouží amoniak jako chladicí kapalina, proudící ve smyčce důležitými částmi lodi (převážně reaktor), kde odebere přebytečné teplo a odnese ho do panelů, kde se následně pomalu vyzáří a přenesení do vesmíru. Pro ideální operaci jsou radiátory otočné, aby mohly být ke Slunečním paprskům nakloněny kolmo. Toto minimalizuje jejich plochu a zabraňuje zahřívání.



Obrázek 5: 3D render radiátorů

Solární energie

Nad dokovacími porty postranních modulů jsou dva páry otočných solárních panelů (6), určené hlavně k poskytování energie velitelské kabině a jiným modulům. I když jaderný reaktor by byl schopen vyrobit dostatek energie pro zbytek lodi, bylo by velmi nebezpečné a nespolehlivé mít pouze jeden zdroj. Proto jsou solární panely na své vlastní elektrické síti.



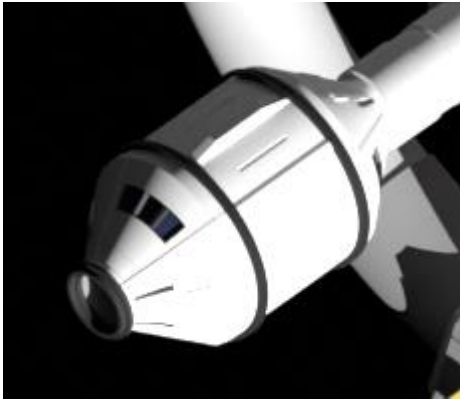
Obrázek 6: 3D render solárních panelů a postranních modulů

6 POSTRANNÍ MODULY

Pro přepravu nákladu je loď schopna mít napojeny až čtyři nafukovací moduly (6). Ty mohou sloužit k přepravě nákladu všeho druhu, nebo jako laboratoře. Díky jejich designu jsou také velmi odolné proti radiaci a mikrometeorům. Z důvodů modularity a flexibility jsou upevněny pomocí dokovacích portů. Toto umožňuje jejich výměnu nebo odstranění, např. při poruše, nebo pro uvolnění místa pro větší náklad.

7 VELITELSKÝ MODUL

Umístěný v předu celé lodě, velitelský modul (7) slouží jako centrum všech operací a jako obytný prostor pro posádku. Kvůli bezpečnosti je úplně samostatný a oddělitelný od zbytku lodě v případě nouze. Proto je vybaven malými solárními panely a systémem manévrovacích trysek jako na hlavní konstrukci.

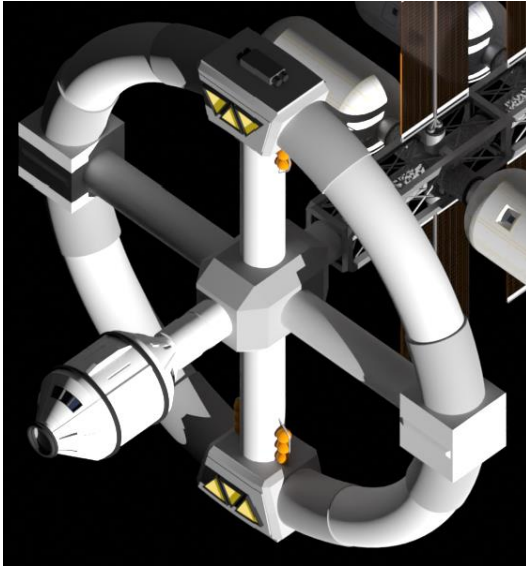


Obrázek 7: 3D render velitelského modulu

8 GRAVITAČNÍ HABITAT

8.1 Koncept

Jedním z největších problémů dlouhého pobytu ve vesmíru je stav beztlíže, kvůli ztrátě kostní a svalové hmoty. Dodnes nebyla loď, která by byla schopna využít rotační habitat, ale v našem měřítku je to zcela možné. Rotační habitat (8) by byl ve tvaru prstence se čtyřmi pevnými kabinami na koncích ramen a nafukovacími tunely mezi nimi. Kabiny jsou navrženy tak, aby se vešly do lodě Starship a pomocí ní se mohly jednoduše zapojit do střední části prstene. Takové zařízení by se dalo využít na testování vlivu umělé gravitace na lidské tělo, nebo na rostliny.



Obrázek 8: 3D render gravitačního habitatu

8.2 Výpočty

Abychom spočítali potřebnou tečnovou rychlost, budeme potřebovat poloměr prstene a cílové obvodové zrychlení. Poloměr je 20 m a cílové zrychlení 3.71 m/s^2 . Upravením vztahu (2.1) dostaneme vztah (2.2) a můžeme spočítat tečnovou rychlost, která vyjde $8,613 \text{ m/s}$.

$$a_c = \frac{v^2}{R} \quad (2.1)$$

$$v = \sqrt{a_c \times R} \quad (2.2)$$

Pomocí vzorce (2.3) spočítáme úhlovou rychlost $0,43 \text{ rad/s} = 4,11$ otáček za minutu.

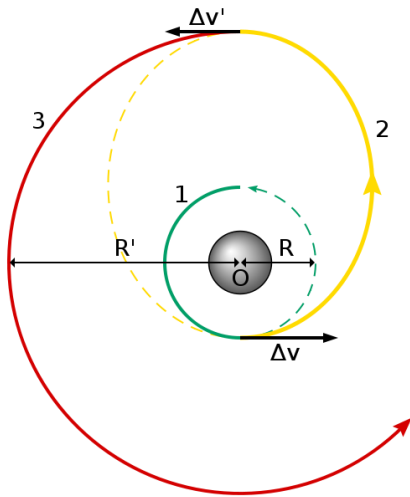
$$\omega = \frac{v}{R} \quad (2.3)$$

Hodnota $4,11 \text{ rpm}$ a tečnová rychlost $8,6 \text{ m/s}$ jsou pro lidi snesitelné a mohly by být pohodlné nejenom pro astronauty, ale i turisty, či jiné pasažéry. Na toto téma se musí provést ještě hodně výzkumu, ale tento prsten je určitě v rámci možností.

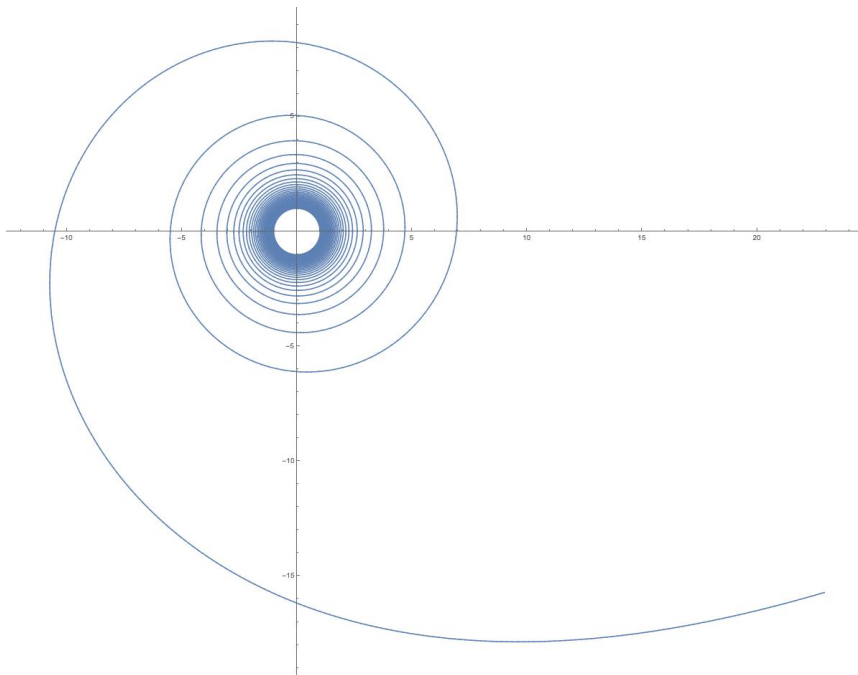
9 DRÁHA

9.1 Koncept

Kvůli velmi nízkému výkonu motorů nelze využít standardních Hohmannových manévrů (9). Proto pro cestu mezi oběžnou drahou Země a Měsíce je nejideálnější spirální dráha (10). Té se využije pro postupný vzestup i sestup oběžných drah. Bohužel spirální dráhy nejsou nejrychlejší. Lety Apollo letěli pomocí Hohmannových manévrů k Měsíci tři dny, pomocí spirální dráhy by stejná cesta trvala cca 6 dní.



Obrázek 9: Hohmannova dráha (2)



Obrázek 10: Spirální dráha (3)

9.2 Výpočty

Nejprve musíme spočítat Δv lodi. Tohoto docílíme pomocí vztahu (3.1) a za předpokladu, že I_{sp} motorů je 2500 s, hmotnost lodi bez paliva je 100 t (m_0) a palivo 212,4 t (m_f), spočítáme, že to je 18 470 m/s.

$$\Delta v = I_{sp} g_0 \ln \frac{m_0}{m_f} \quad (3.1)$$

Následně musíme spočítat, kolik Δv je potřeba k letu na oběžnou dráhu Měsíce a zpět. Nejefektivnějším způsobem to zabere 8200 m/s, ovšem spirální dráhy nejsou nejefektivnější, a proto spočítáme jejich poměr efektivit z papíru (4) pomocí vztahu (3.2) v polárních souřadnicích. Δv = reálná potřebná změna rychlosti, Δv_h = nejefektivnější změna rychlosti, $n = \frac{r_0}{r}$, r_0 = poloměr původní dráhy = 300 km, r = poloměr cílové dráhy = 300 000 km. Výsledkem je číslo cca 2,2, což znamená, že potřebné Δv je $2,2 * 8200 \text{ m/s} = 18\,040 \text{ m/s}$.

$$\frac{\Delta v}{\Delta v_h} = \left[\sqrt{2 \left(1 + \frac{2\sqrt{n}}{n+1} \right)} - 1 \right]^{-1} \quad (3.2)$$

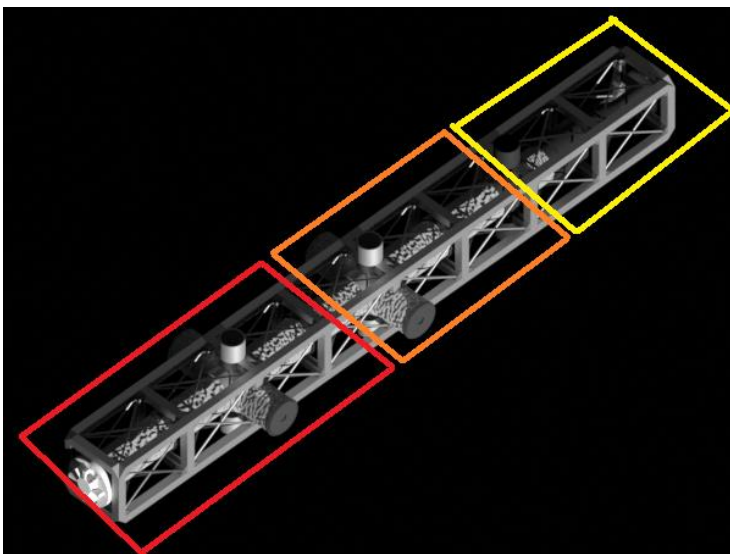
Jelikož se jedná o spirální dráhu a motory budou zapnuté většinu cesty, můžeme spočítat dobu, jak dlouho bude let trvat pomocí vztahu (3.3). Budeme předpokládat, že průměrná hmotnost bude 156 200 kg a síla bude $4 * 800 \text{ N}$. Tyto data čerpám z papíru (2) grafu (3). $v = (18\,040 \text{ m/s}) / 2$, to nám vyjde 81,35 hodin. Toto cestu tam a zpět prodlouží na cca 6 dní

$$t = \frac{v \times m}{F} \quad (3.3)$$

10 JAK BY VŠE PROBÍHALO

10.1 Stavba

Stavba by probíhala po částech. Ty by se na oběžnou dráhu vysílaly v lodích Starship. V dnešní době to je asi nejlepší a nejlevnější raketový nosič k přepravě na oběžnou dráhu. Díly jsou velikostně navrženy tak, aby se vešly do jeho nákladního prostoru. To umožní jednoduchou stavbu, kde Starship bude schopna s otevřeným nákladním prostorem manévrovat a díl napojit bez potřeby výstupu astronautů. Hlavní konstrukce je rozdělena na tři části (11).



Obrázek 11: 3D hlavní konstrukce rozdělené na 3 části

10.2 Provoz

Po dokončení stavby bude k dotankování zapotřebí dvou letů modifikované Starship pro přenos tekutého vodíku. Následně se naloží náklad. To může probíhat pomocí jiných raket, např. Falcon 9 apod. Až se loď dostane na oběžnou dráhu Měsíce, náklad se vyloží pomocí lunar landerů na povrchu Měsíce, nebo zůstane na oběžné dráze, např. při stavbě stanice, nebo vyslání satelitů. Po návratu k Zemi se může náklad znovu naložit a celý cyklus opakovat. Hlavní limit výdrže lodi bude nukleární palivo a únava materiálů. Nukleární palivo by šlo doplnit, ale byl by to velmi složitý proces. Podle spotřeby bude možná lukrativní vyměnit celý reaktor. Toto by lodí umožnilo až desítky letů, než bude zapotřebí velkých oprav.

11 MAKETA

11.1 Konstrukce

Pro lepší vizualizaci jsme vyrobili maketu v měřítku 1:50. Hlavní konstrukce je vytvořena z hliníkových profilů tvaru U o délce strany 1 cm a tloušťce 2 mm. Tunely gravitačního prstenu jsou z hliníkové ventilační trubky a tyče podstavců jsou trubky PVC. Plochy solárních panelů jsou z dřeva balza o tloušťce 2 mm a polepeny papírem se vzorem solárního panelu. Konstrukce solárních panelů a radiátorů je z kvádrových dřevěných leteckých nosníků nabarvených na stříbrno. Zbytek dílů je vytisklý na 3D tiskárně z materiálu PLA a HIPS. Hlavní použítá lepidla jsou: dvousložkový epoxid, gelové vteřinové lepidlo, Kanagom, Chemoprén a Herkules.

11.2 Elektronika

Maketa má možnost rozsvítit RGB led diody v dokovacích portech a otáčet solárními panely a radiátorem pomocí servo motorů. Prsten se také dá otáčet pomocí DC motoru. Jako mikrokontroler jsme využili Raspberry Pi Pico W.

11.3 Aplikace

Ovládání je zařízeno pomocí aplikace na tablet, která je napsána v jazyku Kotlin.

12 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout koncept mezi orbitálního transportního systému, který je proveditelný v realitě s dnešními technologiemi, nebo technologiemi blízké budoucnosti. Po výpočtech jsem došel k dobrému výsledku. Nejenom že je něco takového možné, ale mohlo by být i lukrativní. Ve srovnání s jinými projekty, např. Lunar gateway, určitě není mimo možnosti společností NASA, SpaceX, či jiných. Myslím si, že maketa se vyvedla také velmi dobře. I když 3D model vypadá a slouží výborně, maketa je přeci jenom mnohem interaktivnější a zajímavější způsob, jak něco ukázat.

13 POUŽITÁ LITERATURA

1. https://www.researchgate.net/publication/326463400_VASIMR_ENGINE_Variable_Specific_Impulse_Magnetoplasma_Rocket_Engine
2. Leafnode, CC BY-SA 2.5 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5>>, via Wikimedia Commons
3. <https://space.stackexchange.com/questions/8420/general-guidelines-for-modeling-a-low-thrust-ion-spiral>
4. https://ocw.mit.edu/courses/16-522-space-propulsion-spring-2015/7f725e54b9be201164d56ebbd5e08023_MIT16_522S15_Lecture6.pdf
5. <https://bigelowaerospace.com/pages/b330/>
6. [Hill, Paul R.; Schnitzer, Emanuel](#) (1962 September). Rotating Manned Space Stations. In, *Astronautics* (vol. 7, no. 9, p. 14-18). American Rocket Society.
7. [Gordon, Theodore J.; Gervais, Robert L.](#) (1969). Critical Engineering Problems of Space Stations. In S. F. Singer (Ed.), *Manned Laboratories in Space* (p. 11-32). Springer-Verlag.

14 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1: 3D render motorů VASIMR.....	4
Obrázek 2: Graf poměru výkonu a efektivity motorů VASIMR (1)	4
Obrázek 3: 3D render nádrží.....	5
Obrázek 4: 3D render hlavní konstrukce	6
Obrázek 5: 3D render radiátorů	6
Obrázek 6: 3D render solárních panelů a postranních modulů.....	7
Obrázek 7: 3D render velitelského modulu	8
Obrázek 8: 3D render gravitačního habitatu.....	12
Obrázek 9: Hohmannova dráha (2).....	10
Obrázek 10: Spirální dráha (3).....	10
Obrázek 11: 3D hlavní konstrukce rozdělené na 3 části.....	11