



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav letadlové techniky**

**Návrh Stirlingova motoru pro  
družici typu cubesat**

**Design of Stirling Engine for  
Cubesat**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2022**

**Vojtěch ZEIDLER**

**Studijní program:** N3958 LETECTVÍ A KOSMONAUTIKA  
**Studijní obor:** 3906T008 Letadlová a kosmická technika  
**Vedoucí práce:** Ing. Jan Klesa, Ph.D.



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zeidler** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **467451**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**  
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh Stirlingova motoru pro družici typu cubesat**

Název diplomové práce anglicky:

**Design of Stirling Engine for Cubesat**

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:  
- popis a jednotlivé typy Stirlingova motoru  
- tepelný oběh Stirlingova motoru  
- přenos tepla  
- analýza využitelného teplotního toku  
- návrh motoru  
- analýza navrženého řešení

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího DP.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jan Klesa, Ph.D., ústav letadlové techniky FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **10.09.2021**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Jan Klesa, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje.

V Praze dne 10. 9. 2021

Podpis

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Klesovi, Ph.D. za mnoho cenných rad, připomínek, trpělivosti a za hodnotné konzultace. Děkuji také mé rodině za jejich připomínky k této práci. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem, kteří mě podporovali a motivovali po celou dobu studia, obzvláště Bc. Kateřině Volčkové.

## **Abstrakt:**

Cílem práce je navrhnout Stirlingův motor použitý v družici typu CubeSat na nízké oběžné dráze kolem Země, který by využíval sluneční záření jako zdroj tepelné energie a měl obdobnou účinnost jako fotovoltaické panely. První část shrnuje dřívější vývoj Stirlingových motorů, popisuje jejich různé vývojové směry a zabývá se specifiky návrhu družic. Praktická část se věnuje návrhu, který se skládá z odhadu tepelného oběhu motoru, stanovení hmotnosti pracovní látky a návrhu konstrukce. Poslední část analyzuje navržený Stirlingův motor.

## **Abstract:**

The goal of this thesis is to design Stirling engine for the usage in a CubeSat type satellite on low Earth orbit. The engine would use solar power as a source of thermal energy and the design aims for similar efficiency as photovoltaic cells. First part summarizes past development of Stirling engines, describes their different development branches, and depicts specifics of satellite design. The practical part focuses on the design, which consists of assessment of engine's thermodynamic cycle, determination of working fluid's mass and design of engine. The last part of the thesis analyses the designed Stirling engine.

## **Klíčová slova:**

Stirlingův motor, družice, CubeSat, nízká oběžná dráha, absorpce sluneční energie, elektrická energie CubeSatu, subsystém dodávky elektrické energie, subsystém tepelné regulace

## **Key words:**

Stirling engine, satellite, CubeSat, low Earth orbit, solar energy absorption, electric energy of CubeSat, electrical power subsystem, temperature control subsystem

# Obsah

|     |                                                          |    |
|-----|----------------------------------------------------------|----|
| 1   | Úvod .....                                               | 10 |
| 2   | Historie.....                                            | 11 |
| 2.1 | Reverend Dr. Robert Stirling .....                       | 11 |
| 2.2 | První koncept Stirlingova motoru .....                   | 11 |
| 2.3 | Následná vylepšení Stirlingova motoru .....              | 13 |
| 3   | Typy konfigurací .....                                   | 14 |
| 3.1 | Alfa konfigurace .....                                   | 14 |
| 3.2 | Beta konfigurace .....                                   | 15 |
| 3.3 | Gama konfigurace.....                                    | 16 |
| 3.4 | Free-piston konfigurace.....                             | 17 |
| 3.5 | Speciální typy.....                                      | 18 |
| 4   | Způsoby přenosu tepla .....                              | 19 |
| 4.1 | Kondukce .....                                           | 19 |
| 4.2 | Konvekce .....                                           | 19 |
| 4.3 | Záření.....                                              | 20 |
| 4.4 | Vnitřní tepelná energie .....                            | 21 |
| 5   | Zdroje tepelné energie .....                             | 22 |
| 5.1 | Sluneční energie .....                                   | 22 |
| 5.2 | Energie záření Země.....                                 | 24 |
| 6   | Postup návrhu.....                                       | 28 |
| 6.1 | Rozměry Cubesatu .....                                   | 28 |
| 7   | Příchozí energie.....                                    | 30 |
| 7.1 | Odrážná plocha.....                                      | 30 |
| 7.2 | Výběr materiálů .....                                    | 31 |
| 7.3 | Elementy oběžné dráhy.....                               | 34 |
| 7.4 | Energetická bilance systému sběru příchozí energie ..... | 38 |
| 8   | Ideální tepelný oběh Stirlingova motoru.....             | 41 |
| 8.1 | Postup návrhu tepelného oběhu .....                      | 42 |
| 8.2 | Stanovení parametrů.....                                 | 43 |
| 8.3 | Výpočet a hmotnost pracovní látky .....                  | 46 |
| 9   | Návrh radiátoru .....                                    | 48 |

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 10 Konstrukce motoru.....                           | 49 |
| 10.1 Rozměry válců .....                            | 49 |
| 10.2 Kinematika pohybu pístů .....                  | 50 |
| 10.3 Výška válců .....                              | 52 |
| 10.4 Objem pracovní látky.....                      | 53 |
| 10.5 Ozubená kola .....                             | 56 |
| 10.6 Popis dílů konstrukce Stirlingova motoru ..... | 56 |
| 10.7 Výběr materiálu .....                          | 60 |
| 10.8 Drsnosti a tolerance spojů.....                | 62 |
| 11 Analýza návrhu .....                             | 63 |
| 12 Závěr .....                                      | 65 |
| Seznam použité literatury .....                     | 66 |
| Seznam použitých programů .....                     | 75 |
| Elektronická příloha A .....                        | 1  |

## Seznam tabulek, grafů a obrázků

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABULKA 1 MOŽNÉ PRŮMĚRY VÁLCŮ                                                                   | 50 |
| TABULKA 2 MAXIMÁLNÍ A MINIMÁLNÍ POLOHY PÍSTŮ                                                    | 52 |
| TABULKA 3 CHARAKTERISTICKÉ PARAMETRY NAVRHOVANÉ KONFIGURACE                                     | 53 |
| TABULKA 4 POROVNÁNÍ VYBRANÝCH MATERIÁLU DLE ZÁKLADNÍCH HLEDISEK                                 | 61 |
| TABULKA 5 MATERIÁLY, POLOTOVARY A TECHNOLOGIE VÝROBY DÍLŮ                                       | 61 |
| TABULKA 6 TOLERANCE A DRSNOSTI ULOŽENÍ HŘÍDELŮ V DÍŘE                                           | 62 |
|                                                                                                 |    |
| GRAF 1 SPEKTRÁLNÍ REFLEKTANCE KOVŮ                                                              | 31 |
| GRAF 2 SPEKTRÁLNÍ REFLEKTANCE POVLAKU FRACTAL BLACK                                             | 32 |
| GRAF 3 VÝSKYT ATOMÁRNÍHO KYSLÍKU                                                                | 33 |
| GRAF 4 STÁČENÍ ROVINY DRÁHY PRO RŮZNÉ HODNOTY INKLINACE, VÝŠKY A<br>EXCENRICITY OBĚŽNÉ DRÁHY    | 35 |
| GRAF 5 TEPELNÝ DIAGRAM NAVRHOVANÉHO MOTORU                                                      | 43 |
| GRAF 6 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ PŘEPOČTU MEZI ALFA A BETA KONFIGURACÍ                                | 45 |
| GRAF 7 KOMPRESNÍ POMĚR                                                                          | 46 |
| GRAF 8 ZÁVISLOST PARAMETRU B NA ÚHLU $\phi$                                                     | 51 |
| GRAF 9 POHYB PÍSTŮ V ZÁVISLOSTI NA ROTAČNÍ POHY OZUBENÝCH KOL                                   | 52 |
| GRAF 10 OBJEM PRACOVNÍ LÁTKY V PRŮBĚHU JEDNOHO OBĚHU                                            | 55 |
|                                                                                                 |    |
| OBRÁZEK 1 TEPELNÝ VÝMĚNÍK V ŘEZU (A-B PLECH, KANÁLY C A D)                                      | 11 |
| OBRÁZEK 2 NÁVRH STIRLINGOVA MOTORU V PATENTU Z ROKU 1816                                        | 12 |
| OBRÁZEK 3 PRVNÍ NÁVRH STIRLINGOVA MOTORU Z ROKU 1816                                            | 13 |
| OBRÁZEK 4 STIRLINGŮV MOTOR DLE PATENTU Z ROKU 1827 VĚNOVANÝ UNIVERZITĚ<br>V GLASGOW V ROCE 1828 | 13 |
| OBRÁZEK 5 ALFA KONFIGURACE                                                                      | 14 |
| OBRÁZEK 6 PROPOJENÝ VÍCEVÁLCOVÝ STIRLINGŮV MOTOR                                                | 15 |
| OBRÁZEK 7 BETA KONFIGURACE                                                                      | 15 |
| OBRÁZEK 8 BETA KONFIGURACE S RHOMBICKÝM POHONEM                                                 | 16 |
| OBRÁZEK 9 GAMA KONFIGURACE                                                                      | 16 |
| OBRÁZEK 10 GAMA STIRLINGŮV MOTOR KS90R BLACK ROSS LTD                                           | 17 |
| OBRÁZEK 11 REZONANČNÍ FREE-PISTON STIRLINGŮV MOTOR SPOLEČNOSTI SOLAR<br>IMPULSE FOUNDATION      | 17 |
| OBRÁZEK 12 PELTIERŮV ČLÁNEK                                                                     | 18 |
| OBRÁZEK 13 ZÁVISLOST INTENZITY ZÁŘENÍ NA VLNOVÉ DÉLCE                                           | 21 |



|                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| OBRÁZEK 14 ZÁVISLOST VÝSKYTU SLUNEČNÍCH SKVRN, ERUPCÍ A VÝRONŮ<br>KORONÁLNÍCH HMOT V ČASE (MAXIMUM V ROCE 2001, MINIMA V ROCÍCH 1996 A<br>2006)                                                              | 22 |
| OBRÁZEK 15 PERIODICKÉ ZMĚNY HUSTOTY ZÁŘIVÉHO TOKU                                                                                                                                                            | 23 |
| OBRÁZEK 16 POČET SLUNEČNÍCH SKVRN V HISTORII                                                                                                                                                                 | 23 |
| OBRÁZEK 17 ZÁVISLOST SPEKTRÁLNÍ INTENZITY ZÁŘENÍ NA VLNOVÉ DÉLCE                                                                                                                                             | 24 |
| OBRÁZEK 18 PRŮCHOD ZÁŘIVÉHO TOKU SLUNCE ATMOSFÉROU ZEMĚ                                                                                                                                                      | 25 |
| OBRÁZEK 19 ENERGETICKÝ TOK MEZI ZEMSKÝM POVRCHEM A ATMOSFÉROU                                                                                                                                                | 25 |
| OBRÁZEK 20 ENERGETICKÝ TOK MEZI ATMOSFÉROU A KOSMICKÝM PROSTŘEDÍM                                                                                                                                            | 26 |
| OBRÁZEK 21 CERES GLOBÁLNÍ MAPY Z ČERVENCE 2020 – HUSTOTA ZÁŘIVÉHO TOKU<br>DOPADAJÍCÍHO NA POVRCH ZEMĚ (LEVÁ ČÁST), ODCHOZÍ HUSTOTA ZÁŘIVÉHO<br>TOKU NA HRANICI ATMOSFÉRY A KOSMICKÉHO PROSTŘEDÍ (PRAVÁ ČÁST) | 26 |
| OBRÁZEK 22 ZÁVISLOST INTENZITY ZÁŘENÍ SLUNCE (MODRÁ KŘIVKA) A ZEMĚ<br>(ČERVENÁ KŘIVKA) NA VLNOVÉ DÉLCE                                                                                                       | 27 |
| OBRÁZEK 23 ROZMĚRY CUBESATU                                                                                                                                                                                  | 28 |
| OBRÁZEK 24 PŘÍKLADY VĚTŠÍCH CUBESATŮ                                                                                                                                                                         | 29 |
| OBRÁZEK 25 PODSTAVA PARABOLOIDU                                                                                                                                                                              | 30 |
| OBRÁZEK 26 VÝŠKA PARABOLOIDU                                                                                                                                                                                 | 31 |
| OBRÁZEK 27 VELIKOST A TVAR OHŘÍVAČE                                                                                                                                                                          | 32 |
| OBRÁZEK 28 DOBA VE STÍNU OBĚŽNÉ DRÁHY                                                                                                                                                                        | 34 |
| OBRÁZEK 29 NATOČENÍ ZEMSKÉ OSY K ROVINĚ EKLIPTIKY                                                                                                                                                            | 36 |
| OBRÁZEK 30 POMOCNÁ KRUHOVÁ DRÁHA                                                                                                                                                                             | 37 |
| OBRÁZEK 31 IDEÁLNÍ OBĚH STIRLINGOVA MOTORU                                                                                                                                                                   | 41 |
| OBRÁZEK 32 ABSOLUTNÍ A TECHNICKÁ PRÁCE, PŘIVEDENÉ A ODVEDENÉ MĚRNÉ<br>TEPLO                                                                                                                                  | 42 |
| OBRÁZEK 33 FÁZOVÉ ÚHLY ALFA A BETA KONFIGURACE                                                                                                                                                               | 44 |
| OBRÁZEK 34 SCHÉMA POHYBU RAMENE                                                                                                                                                                              | 51 |
| OBRÁZEK 35 SCHÉMA PŘIPOJENÍ PÍSTŮ K OZUBENÉMU KOLU                                                                                                                                                           | 53 |
| OBRÁZEK 36 SCHÉMA VNITŘNÍHO PROSTORU STIRLINGOVA MOTORU                                                                                                                                                      | 54 |
| OBRÁZEK 37 BEZKARTÁČOVÝ DC ELEKTROMOTOR PICHLER                                                                                                                                                              | 57 |
| OBRÁZEK 38 ROZMĚRY PLOCHY POTAŽENÉ BARVOU PN                                                                                                                                                                 | 58 |



# 1 Úvod

Stirlingův motor se v posledních letech objevuje jako zázračný vynález přinášející levný, ekologický a účinný pohon. Motor navržený Robertem Stirlingem v roce 1816 musel od začátku soupeřit s parním strojem, který nakonec z historického hlediska zvítězil. Následně na něho bylo s příchodem spalovacího motoru skoro zapomenuto.

Ze své podstaty nemůže Stirlingův motor konkurovat v oblasti pohonu těžkých strojů, jako jsou například auta. Důvodem je obtížné docílení vysokého kroutícího momentu. Oblast, kde by mohl Stirlingův motor zazářit, je výroba elektrické energie. Koncepty navrhuje například koncentraci slunečního záření, spalování benzínu nebo využití nukleární energie. Stirlingův motor je již nasazen v ponorkách na výrobu elektrické energie jako náhrada nukleárního pohonu nebo při využívání přebytečného tepla během těžby ropy.

Diplomová práce se zabývá využitím Stirlingova motoru na nízké oběžné dráze Země, kde by využíval slunečního záření. Motor by se měl vejít do rozměrů družice typu cubesat a dosáhnout obdobné účinnosti a výkonu fotovoltaických panelů.



## 2 Historie<sup>1</sup>

### 2.1 Reverend Dr. Robert Stirling

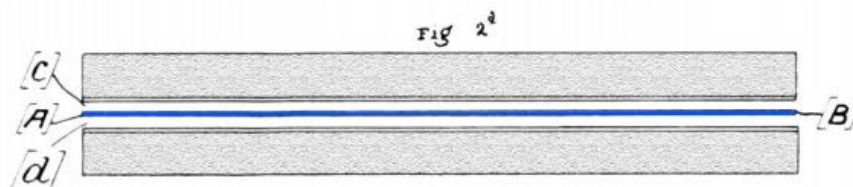
Robert Stirling se narodil 25. října 1790 ve vesnici Perthshire do početné rodiny. Její členové byli farmáři, ale všichni oplývali zájmem o mechanické přístroje. Jeho dědečkovi Michaelu Stirlingovi se například podařilo vyvinout rotační stroj určený na mlácení obilí, který byl poháněn vodní energií.

Záznamy o jeho vzdělání nejsou zcela jednoznačná. V roce 1805 nastoupil na univerzitu v Edinburghu (angl. University of Edinburgh). Studium na univerzitách ve Skotsku studentů pocházejících z farmářských rodin nebylo výjimečné. Následně se stal reverendem Skotské církve a věnoval se studium teologie na univerzitách v Edinburghu a Glasgow (angl. University of Glasgow). Doktorát mu byl udělen v roce 1840 univerzitou v St. Andrews (angl. University of St Andrews).

Robert Stirling umřel 6. června 1878 v Galstonu. V roce 2014 byl uveden do Skotské technické síně slávy (angl. Scottish Engineering Hall of Fame).<sup>[4]</sup>

### 2.2 První koncept Stirlingova motoru

Do historie se Robert Stirling zapsal 16. listopadu 1816 podáním žádosti o patent číslo 4081: Improvements for Diminishing the Consumption of Fuel. <sup>[2]</sup> Patent se zabýval popisem vynálezu Economiser, dnešní regenerátor. Robert Stirling v dokumentu rovněž navrhnul tepelný výměník (Obrázek 1)<sup>[1]</sup>, kde důsledkem protékání studené kapaliny jedním z kanálů a protékání horké kapaliny druhým z kanálů v opačném směru dochází k přechodu tepla z horké do studené tekutiny.



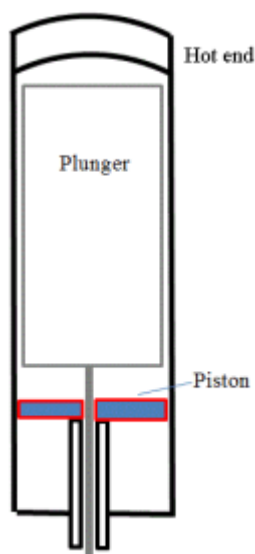
Obrázek 1 Tepelný výměník v řezu (A-B plech, kanály C a D)

<sup>1</sup> Tato kapitola byla zpracována podle [1], [3].



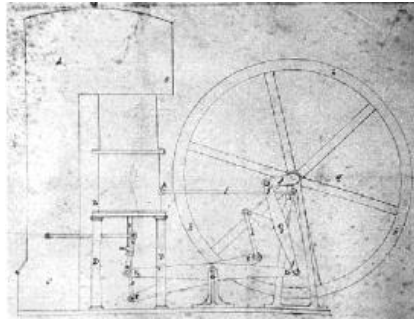
Podobným principem popsal využití odpadního tepla spalín z pece. Vzduch je přiváděn do výhně potrubím a spaliny jsou vyváděny druhým potrubím. Účel obou potrubí je následně obrácen, což má za následek přehřívání vzduchu před vstupem do výhně a tím má pec vyšší účinnost.

Návrh Stirlingova motoru (Obrázek 2)<sup>[1]</sup> popsaného v patentu z roku 1816 (Obrázek 3)<sup>[4]</sup> se skládal z pracovního pístu (v obrázku 2 označení Piston) a posunovacího pístu (v obrázku 2 označení Plunger) ve válci. Na vrchním konci válce bylo zavedeno ohřívání válce a na spodním konci probíhalo ochlazování. Pracovní látka (vzduch) byla ve válci posouvána pracovním válcem a posunovacím pístem, který byl uložen s výraznou vůlí, z jednoho konce válce na druhý. Ohřátý vzduch z horní části válce proudí okolo posunovacího pístu a předává mu část tepla, pracovní látka se ochladí. Opačným prouděním vzduchu z chladnější dolní části válce do teplejší horní části se naopak přehřívá. Posunovací píst tedy plní i funkci regenerátoru.



Obrázek 2 Návrh Stirlingova motoru v patentu z roku 1816

Výhodou umístění pracovního pístu na opačné straně válce, než by byl umístěn tepelný zdroj, tedy například pec, je menší tepelné namáhání pístních kroužků.



Obrázek 3 První návrh Stirlingova motoru z roku 1816

## 2.3 Následná vylepšení Stirlingova motoru

Vylepšení prvního patentu prováděl Robert Stirling společně s jeho o 9 let mladším bratrem Jamesem Stirlingem. Úpravy popisoval patent číslo 5456, který jim byl udělen v roce 1827. Písty byly uloženy ve dvou rozdílných válcích (Obrázek 4)<sup>[1]</sup>, které byly spojeny trubicí, kde byl umístěn samostatný regenerátor. K motoru byl připojen kompresor, který dokázal zvýšit tlak ve válcích až na 20 atmosfér.



Obrázek 4 Stirlingův motor dle patentu z roku 1827 věnovaný Univerzitě v Glasgow v roce 1828

Další posun ve vývoji přišel v 40. letech 20. století, kdy Dr. Rolf Meijer vedl návrh Stirlingova motoru. Jednou z hlavních změn byl přechod od použití vzduchu jako pracovní látky k lehčím plynům, které jsou efektivnější.<sup>[5]</sup>

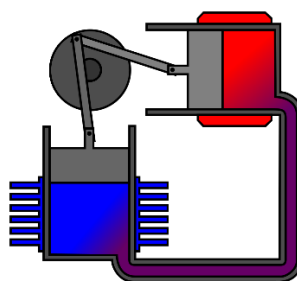


## 3 Typy konfigurací

Stirlingův motor byl zkoušen v různých konfiguracích, z čehož každá má své výhody a nevýhody. Liší se například typem nádoby, ve které je umístěna pracovní látka, způsobem jejího přesunování a dalšími rozdíly.<sup>2</sup>

### 3.1 Alfa konfigurace<sup>3</sup>

Alfa rozložení (Obrázek 5)<sup>[74]</sup> využívá ohřevu a ochlazování pracovní látky ve dvou odlišných válcích. Válce jsou spojeny trubicí, ve které se může nacházet regenerátor. Translačním pohybem pístů dochází k rotačnímu pohybu hřídele.

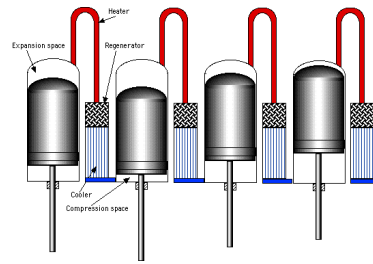


Obrázek 5 Alfa konfigurace

Stirlingův motor v konfiguraci alfa lze rozdělit na dva typy: jednočinný a dvojčinný. Při použití jednočinného typu (Obrázek 5) má každý píst pouze jednu funkci, a to buď kompresi pracovní látky a její posun do horkého válce nebo expanzi a následný posun pracovní látky do studeného válce. V případě dvojčinného typu vykonává píst obě funkce. Dvojčinný typ Stirlingova motoru lze využít například u propojeného víceválcového rozložení (Obrázek 6)<sup>[7]</sup>, kdy je expanzní část jednoho válce spojena s kompresní částí dalšího válce přes ohřívací část, regenerátor a ochlazovací část.

<sup>2</sup> Na obrázcích v této kapitole je ohřev pracovní látky značen červenou barvou a její ochlazování je značeno modrou barvou.

<sup>3</sup> Tato podkapitola byla zpracována podle [6], [7].

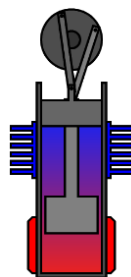


Obrázek 6 Propojený víceválcový Stirlingův motor

Nevýhodou alfa konfigurace je, že musí být utěsněný každý válec, aby pracovní látka neunikala a motor měl maximální účinnost. Oproti ostatním konfiguracím dosahuje celý systém vyšší hmotnosti, zejména kvůli potřebě minimálně dvou válců. Výhodou je jednoduchá konstrukce. Pro větší kompaktnost lze využít propojené víceválcové konfigurace.

### 3.2 Beta konfigurace<sup>4</sup>

Originální patent Roberta Stirlinga obsahoval beta konfiguraci (Obrázek 7)<sup>[75]</sup>. Ohřev i chlazení probíhá pouze v jednom válci. Pohyb pracovní látky mezi jednotlivými částmi je zajištěn posunovacím pístem, okolo kterého může látka proudit. Práce je konaná pracovním pístem, který látku okolo sebe nepropouští. Alternativně lze vést pracovní látku mezi teplou a studenou částí zcela mimo válec.



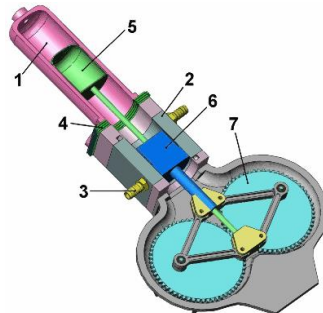
Obrázek 7 Beta konfigurace

Speciálním případem je beta konfigurace s rhombickým pohonem (Obrázek 8)<sup>[76]</sup>, který vyvinul Rolf Meijer. Díky protichůdným silám během cyklu,

<sup>4</sup> Tato podkapitola byla zpracována podle [6], [8].



nedochází k vibracím. Nevýhodou jsou vysoké požadavky na tolerance a vyvážení, což zvyšuje pořizovací cenu a brání většímu rozšíření.

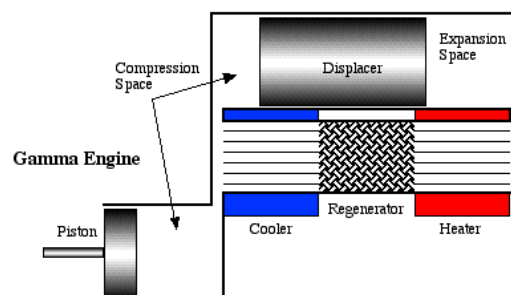


Obrázek 8 Beta konfigurace s rhombickým pohonem

Na rozdíl od alfa konfigurace je beta rozložení Stirlingova motoru kompaktnější, dosahuje menší hmotnosti a utěsnění musí být pouze okolo pracovního pístu. Nevýhodou je komplexnější sestava, vyšší nároky na výrobu a pořizovací cena.

### 3.3 Gama konfigurace<sup>5</sup>

Gama konfigurace je podobná beta konfiguraci zejména tím, že ohřev a chlazení probíhá současně pouze v jednom válci a pracovní látka se přesouvá kolem posunovacího pístu (alternativně mimo válec). Práce je vykonávána pracovním pístem, který se ale nachází v jiném válci než posunovací píst. Oba válce jsou propojeny trubicí (Obrázek 9) nebo na sebe navazují, pokud mají jiný průměr (Obrázek 10)<sup>[9]</sup>. Uspořádání gama se hodně využívá u malých modelářských Stirlingových motorů.



Obrázek 9 Gama konfigurace

<sup>5</sup> Tato podkapitola byla zpracována podle [6], [9].





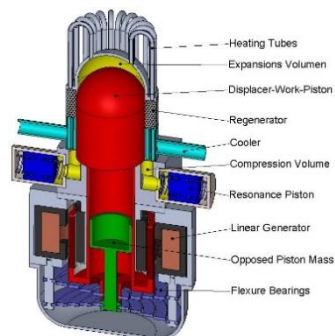
Gama Stirlingův motor se vyznačuje schopností fungovat i při nízkých teplotních rozdílech, který popsal James Senft. Motor využívá velkého poměru průměrů válců (Obrázek 10)<sup>[9]</sup>. Výhodou gama konfigurace je jednodušší konstrukce než u typu beta, ale současně je zachována nutnost těsnění pouze jednoho válce. Zjednodušením konstrukce ale dochází k snížení účinnosti vlivem zvýšení nevyužitého objemu.



Obrázek 10 Gama Stirlingův motor KS90R Black Ross LTD

### 3.4 Free-piston konfigurace<sup>6</sup>

Free-piston konfigurace (Obrázek 11)<sup>[77]</sup> se konstrukcí podobá motorům typu beta a gama, liší se však způsobem tvorby elektrické energie, kdy má translační pohyb pístů za následek přímou produkci elektrické energie v lineárním generátoru.



Obrázek 11 Rezonanční free-piston Stirlingův motor společnosti Solar Impulse Foundation

Pohyb pístů může být buzený a omezovaný například uzavřenou nádobou s plynem, která funguje jako pružina. Pokud je na takový mechanismus připojený

<sup>6</sup> Tato podkapitola byla zpracována podle [6], [10].



pouze posunovací píst, jedná se o typ Ringbom, a pokud je připojený pouze pracovní píst, tak je typ nazývaný Martini.

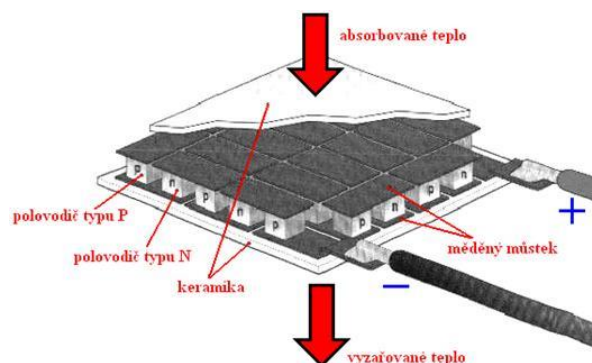
Nejvíce značnou výhodou použití free-piston konfigurace je snížení tření, a tím i energetických ztrát, z důvodu omezení mechanicky spojených součástí. Oproti ostatním konfiguracím je snadněji dosaženo hermetickému utěsnění. Nepřesné výpočty při návrhu však způsobí větší ztráty při provozování motoru.

### 3.5 Speciální typy

Další typy konfigurací Stirlingova motoru pracují podobným způsobem jako již popsané konfigurace. Plošný typ využívá místo válcových pístů například pružnou membránu nebo pohyblivou desku. Lze ho využít pro ohřev větší plochy, tedy i objemu, pracovní látky například pomocí solární energie. Při použití pružné membrány je předností lepší utěsnění a nižší potřeba přesné výroby.<sup>[11][12]</sup>

Rotační typ využívá rotoru s vykrojenou komorou pro pracovní látku a statoru, který látku v jedné polovině ochlazuje a v druhé polovině ohřívá. V každé polovině je zaveden výstup, respektive vstup, pro proudění pracovní látky do, respektive z, pracovního válce, který produkuje rotační energii a pohání rotor.<sup>[13][14][15][16][17]</sup>

Produkci elektrické energie pomocí pouze ohřevu a ochlazování lze docílit i Peltierovým článkem (Obrázek 12)<sup>[18]</sup>, který se neřadí mezi Stirlingovy motory. Působením tepla na jednu stranu Peltierova článku dochází k vytvoření elektrické energie v polovodičích typu P a typu N spojených měděnými můstky. Využívá se například v autochladničkách.<sup>[18]</sup>



Obrázek 12 Peltierův článek



## 4 Způsoby přenosu tepla<sup>7</sup>

Teplu se může šířit prostředím třemi různými způsoby, a to kondukcí (vedením), konvekcí (prouděním) a zářením (sáláním). Aby mohlo dojít ke kondukcí nebo konvekcí, musí být splněný předpoklad, že prostředí, ve kterém se teplo šíří, musí být kontinuum.

### 4.1 Konduktce

Konduktce probíhá předáváním kinetické energie (vibrační a rotační energie)<sup>[21]</sup> atomů a molekul dané látky pomocí srážek se sousedními atomy nebo molekulami. Molekula s vyšší kinetickou energií předá během srážky část energie molekule s menší kinetickou energií. Teplota představuje průměrnou kinetickou energii molekul v oblasti, kde dochází k měření. <sup>[20]</sup> Výsledné teplo představuje celkovou energii atomů a molekul v určité látce. <sup>[20]</sup> Teplotní gradient udává směr, kterým se kinetická energie v látce šíří, tedy kde se teplota snižuje a kde zvyšuje, pokud je celek ideálně izolovaný. Vedení tepla v homogenním a izotropním materiálu popisuje Fourierův zákon (Rovnice 4.1), který udává, že vektor hustoty tepelného toku  $[\vec{q}] = W \cdot m^{-2}$  je přímo úměrný záporné hodnotě teplotního gradientu. Materiálovou charakteristiku představuje součinitel tepelné vodivosti  $[\lambda] = W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , která udává, kolik energie projde daným materiálem plochami o velikosti krychlového metru v metrové vzdálenosti za sekundu, pokud je rozdíl teplot mezi plochami jeden Kelvin:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T. \quad (4.1)$$

Vedení tepla může probíhat ve všech skupenstvích a částice se během procesu nepřemísťují.

### 4.2 Konvekce

Konvekce využívá pro přenos energie pohybu částic dané látky, proto je možné považovat konvekci pouze v tekutinách, tedy v kapalinách a plynech. Energie je unášena tekutinou během přemísťování částic. Přenos tepla

<sup>7</sup> Tato kapitola byla zpracována podle [19], [22].



prouděním lze rozdělit na volnou a nucenou konvekci. Volná konvekce je způsobena rozdílnou hustotou tekutiny při odlišných teplotách. Zahřátím části tekutiny dochází k jejímu zvětšení objemu, což má za následek její stoupání. Nucená konvekce je zapříčiněna vnějším vlivem, například čerpadlem, ventilátorem nebo větrem.

### 4.3 Záření<sup>8</sup>

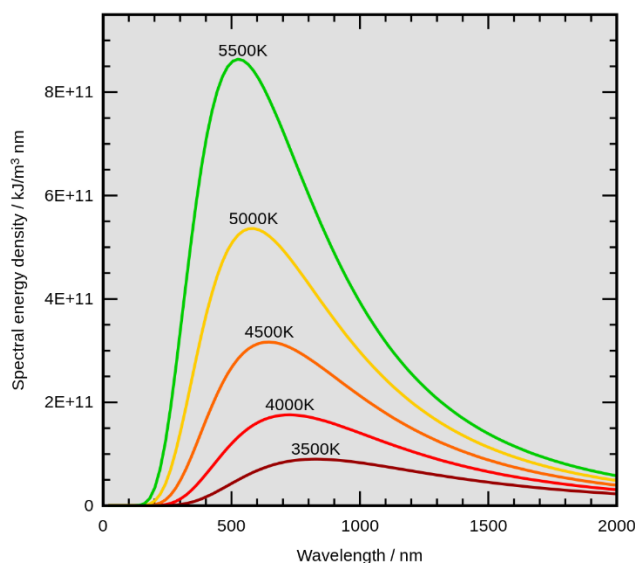
Šíření energie pomocí záření využívá elektromagnetických vln, což znamená, že k přenosu tepla sáláním dochází i ve vakuu. Ve vesmíru je to jediný způsob, jak teplo získat nebo ho vyzářit. Každé těleso o teplotě vyšší než 0 K produkuje elektromagnetické vlny, které s sebou unášejí část vnitřní energie tělesa. Celkovou intenzitu záření tělesa  $[I] = W \cdot m^{-2}$  v závislosti na jeho teplotě  $[T] = K$  udává Stefan-Boltzmannův zákon (Rovnice 4.2). Materiál tělesa je popsán emisivitou  $\epsilon$ . Stefan-Boltzmannova konstanta odpovídá hodnotě  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ . Ze vztahu je patrné, že čím více se těleso ohřívá, tím jeho intenzita záření exponenciálně roste se čtvrtou mocninnou, toho lze například využít při stanovení rovnovážné teploty tělesa, pokud přijímá konstantní zářivý tok:

$$I = \epsilon \sigma T^4. \quad (4.2)$$

Stefan-Boltzmannův zákon vychází integrací Planckova vyzařovacího zákona. Frekvence elektromagnetického vlnění, které vyzařuje těleso, je závislé na jeho teplotě. Čím vyšší má těleso teplotu, tím produkuje elektromagnetické vlnění o vyšších frekvencích. Planckův vyzařovací zákon (Rovnice 4.3) popisuje závislost teploty na intenzitě záření absolutně černého tělesa pro různé vlnové délky elektromagnetického vlnění (Obrázek 13)<sup>[78]</sup>, tedy tělesa s emisivitou  $\epsilon = 1$ , kde  $h = 6,6236 \cdot 10^{-34} J \cdot s$  je Planckova konstanta,  $c = 299\,792\,458 m \cdot s^{-1}$  rychlost světla ve vakuu a  $k = 1,3806 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$  Boltzmannova konstanta:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}. \quad (4.3)$$

<sup>8</sup> Tato podkapitola byla zpracována podle [23].



Obrázek 13 Závislost intenzity záření na vlnové délce

Vlnovou délku elektromagnetického vlnění, která odpovídá nejvyššímu vyzařování energie pro těleso o teplotě  $T$ , určuje Wienův posunovací zákon (Rovnice 4.4), kde je závislost udávána pomocí Wienovy konstanty  $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ . Vlnová délka pro maximální intenzitu záření se posouvá se stoupající teplotou do oblastí nižších vlnových délek:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}. \quad (4.4)$$

## 4.4 Vnitřní tepelná energie

Každé těleso, které má být ohřáté na vyšší teplotu, musí přijmout odpovídající množství energie. Přesnou hodnotu lze vypočítat pomocí kalorimetrické rovnice (Rovnice 4.5). Množství tepla odpovídá změně teploty z počátečního stavu  $T_0$  do stavu požadovaného  $T_1$ . Těleso je popsáno pomocí hmotnosti  $[m] = \text{kg}$  a měrné tepelné kapacity  $[c] = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ :

$$Q = cm(T_1 - T_0). \quad (4.5)$$

Měrná tepelná kapacita se mění se stoupající teplotou. Její hodnotu při určité teplotě je možné vypočítat použitím Shomatovy rovnice.<sup>[24]</sup>

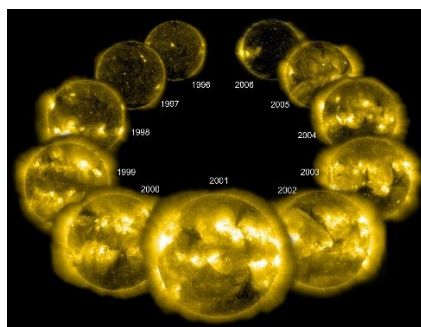


## 5 Zdroje tepelné energie

Primárním způsobem šíření energie v komickém prostředí je pomocí záření. Nejdůležitějším zdrojem fotonů s vysokou energií na oběžné dráze Země je Slunce. Jejich energii je možné přeměnit na elektrickou energii například fotovoltaickými panely. [25] V případě Stirlingova motoru je nutné absorbovat energii Slunce její přeměnou na energii tepelnou a následně na energii mechanickou.

### 5.1 Sluneční energie<sup>9</sup>

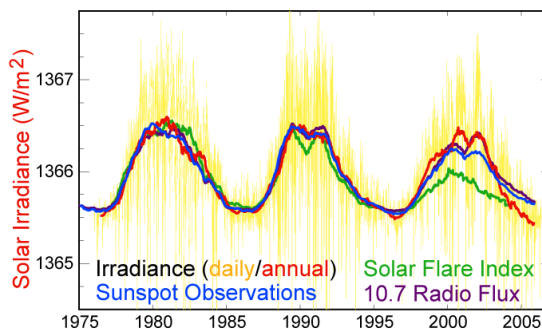
Množství energie, které Slunce vyzařuje směrem k Zemi, není konstantní, nýbrž se v čase mění. Celková hustota zářivého toku (nazýváno sluneční konstanta) závisí například na počtu výskytu slunečních skvrn, slunečních erupcí a výronech koronálních hmot. Čím více jsou tyto jevy v daném období běžné, tím se hustota zářivého toku zvyšuje (Obrázek 14)<sup>[79]</sup>.



Obrázek 14 Závislost výskytu slunečních skvrn, erupcí a výronů koronálních hmot v čase (maximum v roce 2001, minima v rocích 1996 a 2006)

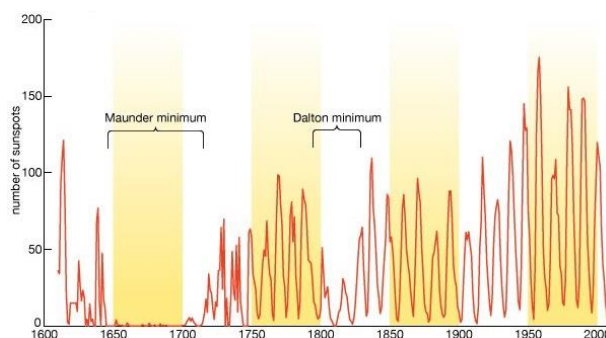
Od roku 1978 je pozorováno periodické opakování období zvýšených a snížených slunečních aktivit přibližně každých 11 let (Obrázek 15)<sup>[80]</sup>. Průměrná hustota zářivého toku Slunce nabývá přibližně hodnoty  $I = 1366 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

<sup>9</sup> Tato podkapitola byla zpracována podle [26], [27], [28], [29], [30].



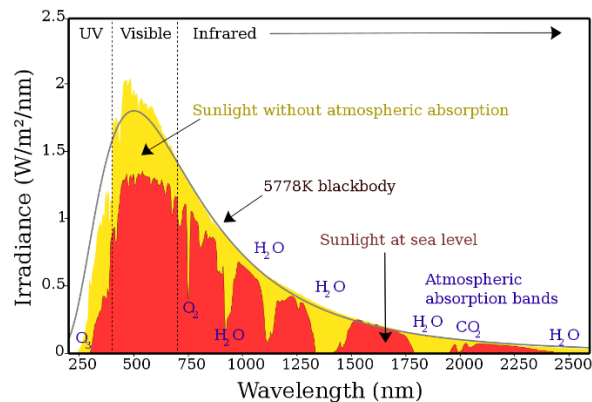
Obrázek 15 Periodické změny hustoty zářivého toku

Historická data ukazují, že energie vyzářená Sluncem se mění i ve větších časových intervalech. Například snížený počet slunečních skvrn v 14. až 19. století, tzv. Maunderovo minimum, (Obrázek 16)<sup>[81]</sup> byl jedním z důvodů Malé doby ledové, která vrcholila v 17. století.<sup>[31][32]</sup>



Obrázek 16 Počet slunečních skvrn v historii

Fotony vyzářené ze Slunce se liší v jejich energii, to znamená, že částice mají různé frekvence elektromagnetického vlnění (Obrázek 17)<sup>[82]</sup>. Podle naměřených dat vyzařuje Slunce nejvíce v oblasti viditelného spektra elektromagnetického vlnění. Většinu zbylých fotonů ze Slunce má vlnové délky ve spektru infračerveném a ultrafialovém.<sup>[33][34][35]</sup>



Obrázek 17 Závislost spektrální intenzity záření na vlnové délce

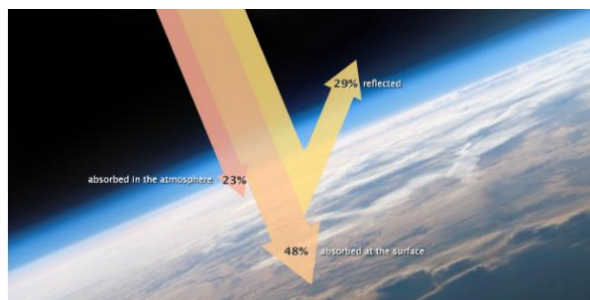
Na obrázku 17 představuje žlutá plocha společně s červenou celkovou hustotu zářivého toku mimo atmosféru Země. Energie, která dopadá na povrch Země, je zaznamenaná červeně. Spektrální intenzitu záření Slunce lze aproximovat úvahou, že by Slunce bylo nahrazeno ideálním černým tělesem. Ze Stefan-Boltzmannova vztahu vychází, že by takové těleso mělo dosahovat teploty 5778 K, aby se zachovala hustota zářivého toku (na obrázku 17 je značeno šedou křivkou). Zářivý tok opouštějící absolutně černé těleso o teplotě 5778 K se shoduje s průměrnou hodnotou zářivého toku, které Slunce vyzáří. Spektrální intenzita slunečního záření se v čase nepříliš mění vlivem pohybu Slunce a vlivem vnitřních procesů.

## 5.2 Energie záření Země<sup>10</sup>

Slunce vyzařuje směrem k Zemi nepřetržitě energii, která následně ovlivňuje Zemi a její atmosféru. Přeměny energie zemského povrchu a atmosféry lze zjednodušeně určit z měření a pozorování fyzikálních mechanismů. Průchodem sluneční energie atmosférou (Obrázek 18)<sup>[83]</sup> je 23 % absorbováno plynnými molekulami a atomy, prachovými a dalšími částicemi. Atmosféra, oblaka a části zemského povrchu s určitou reflektivitou odráží 29 % příchozí energie. Zbytek sluneční energie (48 %) je absorbováno zemským povrchem.

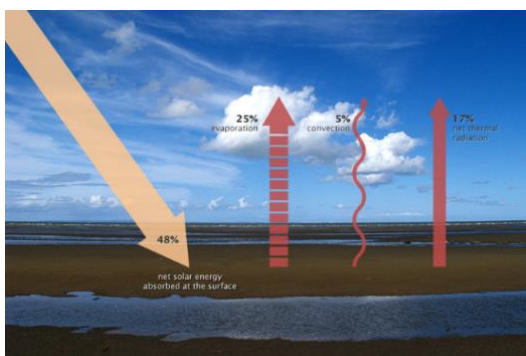
<sup>10</sup> Tato podkapitola byla zpracována podle [13].





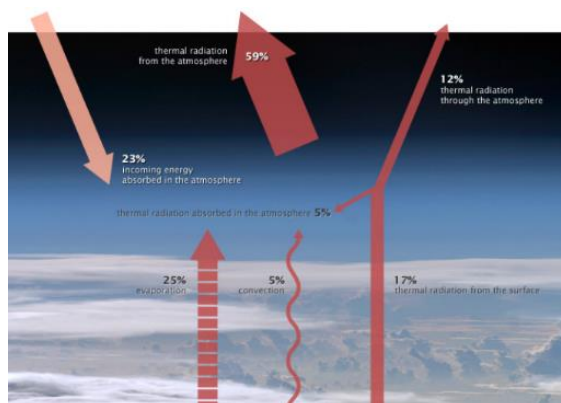
Obrázek 18 Průchod zářivého toku Slunce atmosférou Země

Země vyzařuje zpět do atmosféry stejné množství energie, jako kolik z ní absorbuje (Obrázek 19)<sup>[83]</sup>. Část energie (25 % z celkové sluneční energie) je pohlcena vodou, která jí využije pro fázovou přeměnu z kapalného skupenství na plynné. Vodní pára se následně stává součástí atmosféry. Konvekcí odchází povrchem 5 % energie. Vlivem skleníkových plynů a dalších částic vyzařuje atmosféra energii radiací zpět do zemského povrchu. Země je vůči součtu záření její atmosféry a 17 % celkové příchozí sluneční energie v nulové energetické bilanci.



Obrázek 19 Energetický tok mezi zemským povrchem a atmosférou

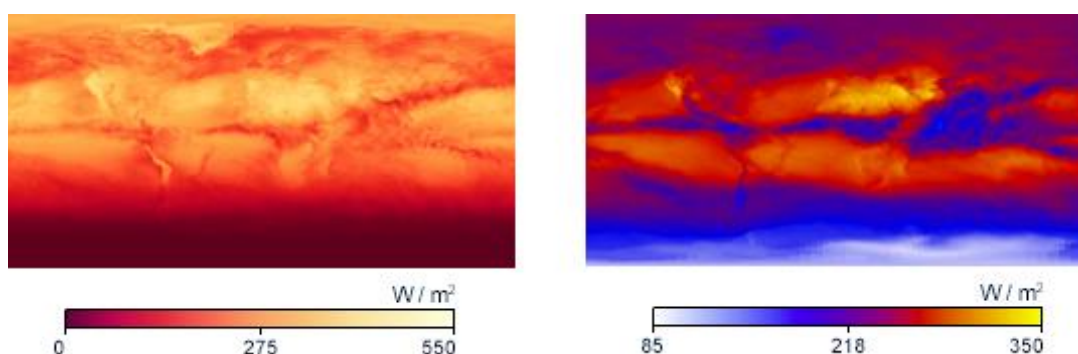
Energie záření povrchu prochází atmosférou, která absorbuje část této energie, zpět do kosmického prostředí (Obrázek 20)<sup>[83]</sup>. Do kosmu vyzařuje také energii také atmosféra. Vyzářená energie Zemí a atmosférou dosahuje 71 % celkové příchozí sluneční energie.



Obrázek 20 Energetický tok mezi atmosférou a kosmickým prostředím

Množství přijaté i vyzážené energie Zemí a její atmosférou není nikdy konstantní, závisí na sluneční aktivitě, poloze Země vůči Slunci, fázi dne, zeměpisné šířce, oblačnosti a dalších vlivech. Příchozí sluneční zářivý tok lze aproximovat na průměrnou hustotu zářivého toku na všech místech hranice atmosféry a kosmického prostředí, která nabývá hodnoty  $I_{in} = 340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . To znamená, že Země a její atmosféra by měly průměrně vyzářovat zpět do kosmu hustotu zářivého toku  $I_{out} = 241,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

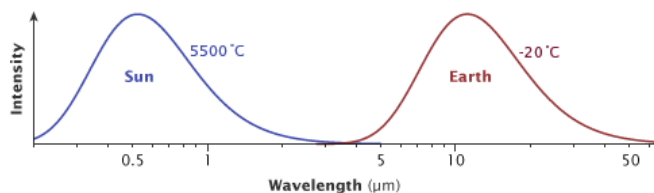
Pro určení přesnějších hodnot odchozí energie vzhledem k zeměpisné poloze (Obrázek 21)<sup>[84]</sup> lze využít data projektu Clouds and the Earth's Radiant Energy System (zkr. CERES), který je součástí programu Earth Observing System (zkr. EOS) patřící agentuře National Aeronautics and Space Administration (zkr. NASA). Projekt pozoruje a měří různé vlastnosti atmosféry a povrchu Země.



Obrázek 21 CERES globální mapy z července 2020 – hustota zářivého toku dopadajícího na povrch Země (levá část), odchozí hustota zářivého toku na hranici atmosféry a kosmického prostředí (pravá část)



Pro možnou absorpci vyzářené energie Země je nutné znát, v jakých vlnových délkách těleso vyzařuje. Jelikož je Země chladnější těleso než Slunce, vyzařuje fotony s větší vlnovou délkou, tedy v infračerveném spektru (Obrázek 22)<sup>[85]</sup>.



Obrázek 22 Závislost intenzity záření Slunce (modrá křivka) a Země (červená křivka) na vlnové délce

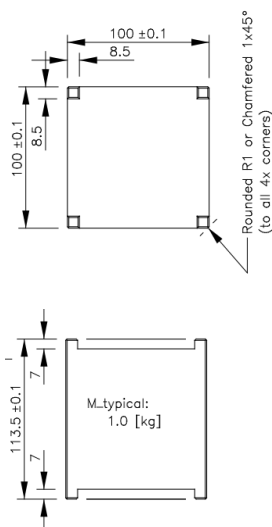


## 6 Postup návrhu

Návrh Stirlingova motoru lze rozdělit na několik hlavních částí: zajištění získávání příchozí energie, systém radiace tepla, tepelný oběh Stirlingova motoru, konstrukce. Systém sběru příchozí energie a radiace tepla (odchozí energie) musí být navržený přednostně, aby mohl být určen tepelný oběh Stirlingova motoru a tím i očekávaný výkon motoru. Poslední fáze návrhu obsahuje stanovení tvaru a velikosti konstrukce, aby vyhovovala tepelným a dynamickým nárokům a chránila motor před kosmickým prostředím.

### 6.1 Rozměry Cubesatu

CubeSat je definován jako pikodružice (0,1 až 1 kg) nebo nanodružice (1 až 10 kg), která má rozměr krychle o velikosti strany 100 mm a maximální hmotnost 1,33 kg (Obrázek 23)<sup>[86]</sup>.



Obrázek 23 Rozměry cubesatu

Díky normalizovaným rozměrům lze spojit několik základních bloků do větších Cubesatů, které se nazývají dle počtu základních bloků (Obrázek 24)<sup>[86]</sup>.



Obrázek 24 Příklady větších cubesatů

Určení rozměrů CubeSatu je stěžejní pro návrh, jelikož udává maximální rozměry Stirlingova motoru. Dále popsaná konstrukce byla navržena, aby rozměry nepřesahovaly velikost jednoho základního bloku. Důvodem je, že před návrhem nebyly známé přesné specifikace mise, při které by měl být Stirlingův motor použit.



## 7 Příchozí energie

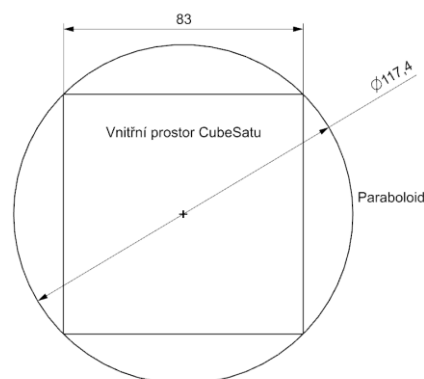
Před návrhem Stirlingova motoru je nutné analyzovat, kolik energie bude do motoru přicházet. Cílem návrhu je využít slunečního záření. Družice proto bude disponovat odrážecí plochou, která bude směřovat sluneční záření do koncentrovaného místa, ve kterém bude umístěn malý element (ohřívač), který bude ohříván. To znamená, že energie záření Slunce se bude po odrazu transformovat na tepelnou energii vlivem ohřevu daného elementu. Následně jím bude proudit tepelný tok do horkého válce Stirlingova motoru. Pro další postup návrhu tepelného oběhu motoru je nutné určit přibližný tepelný tok a teplotu ohřívání elementu.

### 7.1 Odrážná plocha

Zvolena byla pevná odrazná plocha, která bude již rozevřená a připravená uvnitř konstrukce. To má za následek zmenšení cenného místa uvnitř CubeSatu, ale výhodou je, že nemůže dojít k selhání během rozevírání odrážecí plochy, což by byl kritický mechanismus pro úspěch mise.

Tvar odrážecí plochy byl zvolen rotační paraboloid, který odráží sluneční záření, pokud dopadá kolmo na odrážecí plochu, do jednoho bodu v prostoru – ohniska. Alternativním tvarem by mohla být například sestava rovinných ploch, polovina válcové plochy (kruhová, eliptická, parabolická podstava nebo sférická plocha).

Podstava paraboloidu bude ohraničena vnitřním prostorem CubeSatu, který je omezený jeho konstrukcí (Obrázek 25).



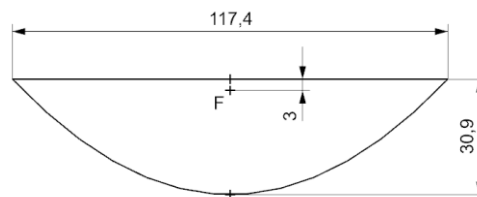
Obrázek 25 Podstava paraboloidu



Výška paraboloidu byla určena pomocí řešení rovnice paraboly (Rovnice 7.1):

$$x^2 = 2 \cdot p \cdot y, \quad (7.1)$$

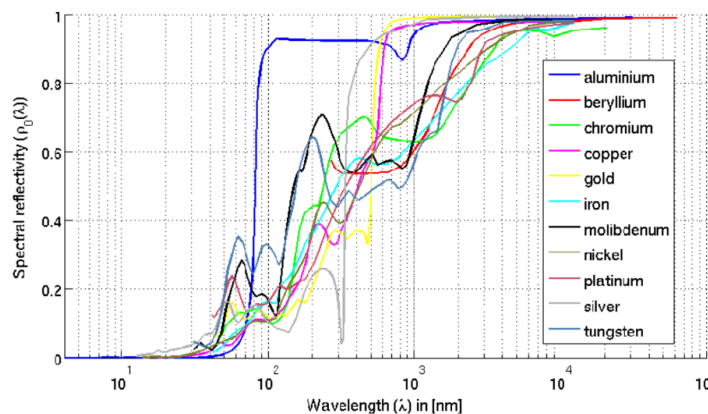
kteřá je daná vzdáleností  $p$  jejího ohniska od řídící přímky paraboly, v místě stranové úhlopříčky CubeSatu. Ohnisko  $F$  bylo posunuto od podstavy kvůli možné odchylce reálného ohniska z důvodu nerovností plochy způsobené výrobou (Obrázek 26).



Obrázek 26 Výška paraboloidu

## 7.2 Výběr materiálů

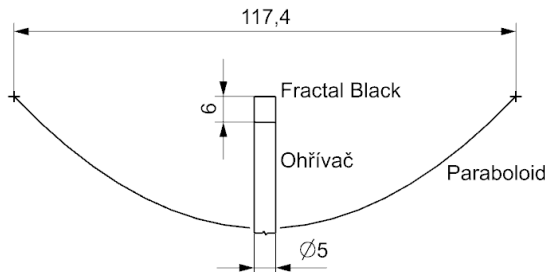
Materiály byly vybrány zejména podle hlediska jejich absorptivity (pohltivost) a reflektance (odrazivosti) vzhledem ke spektrální intenzitě záření Slunce. Vnitřní povrch paraboloidu by měl být tvořen materiálem, který má co nejvyšší reflektanci. Docílit toho lze například pokrytím povrchu tenkou vrstvou kovu – zlato, stříbro, hliník. Zvolena byla vrstva hliníku z důvodu nižší ceny a vyšší reflektance v oblasti nižších vlnových délek. Dále bude uvažována průměrná reflektance odrážecí plochy zářivého toku Slunce  $R_{OP} = 0,88$  (Graf 1)<sup>[71]</sup>.<sup>[68]</sup> Levnější alternativou může být potažení povrchu vrstvou Mylaru, který dosahuje obdobných hodnot reflektance.<sup>[69]</sup>



Graf 1 Spektrální reflektance kovů

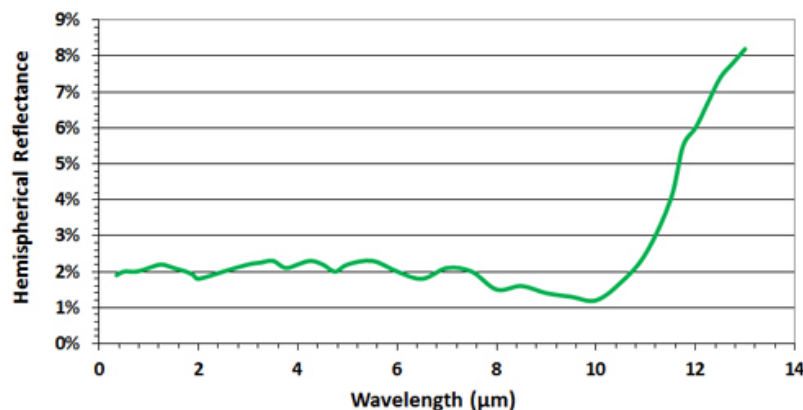


Ohříváč, který bude ohříván a jímž bude proudit teplo do teplého válce Stirlingova motoru, bude mít tvar malého válce (Obrázek 27). Průměr válce musí být navržen tak, aby skrz něho mohlo proudit takové množství výkonu, které je potřeba pro funkci motoru, a aby vyhovoval teplotním podmínkám.



Obrázek 27 Velikost a tvar ohříváče

Měď byla zvolena jako materiál ohříváče. Důvodem je vysoká tepelná vodivost  $\lambda_{Cu} = 394 \text{ W/mK}$  a dostatečně vysoká teplota tání  $t_{t,Cu} = 1083 \text{ }^\circ\text{C}$ .<sup>[42]</sup> Měď však nedosahuje přijatelné absorptivity, proto bude potažena vysoko absorpčním povlakem. Vybrána byla vrstva Fractal Black společnosti Acktar, která dosahuje vysoké absorptivity v oblasti vlnových délek slunečního záření (Graf 2)<sup>[59]</sup> a která je vyhovující do pracovních teplot až  $380 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dále bude uvažována absorptivita a emisivita vrstvy Fractal Black  $A_{FB} = E_{FB} = 0,97$ .<sup>[58][59]</sup>



Graf 2 Spektrální reflektance povlaku Fractal Black

Levnější variantou povlaku s vysokou absorptivitou by mohlo být použití černého matného laku, například černá silikonová barva PN společnosti MAP Space Coatings, u které výrobce uvádí absorptivitu ve spektru solárního záření  $A_{PN} = 0,95$  a emisivitu v infračerveném spektru  $E_{PN} = 0,9$ .<sup>[65]</sup> Další možností by

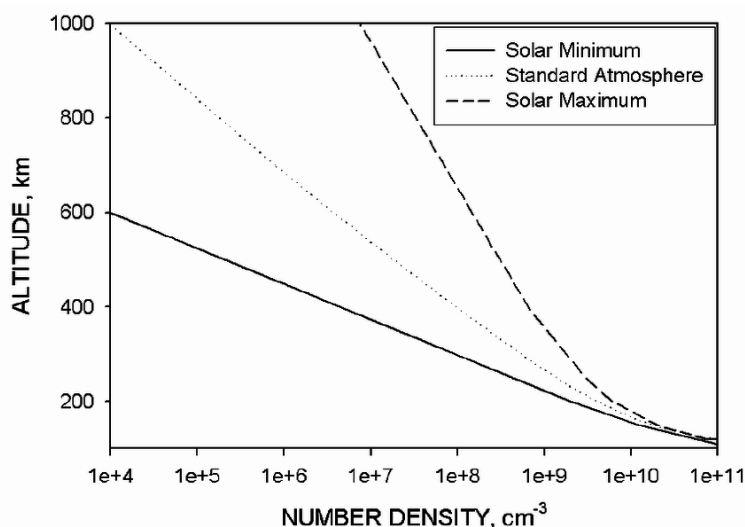




mohlo být vytvoření vrstvy černě zoxidované mědi (oxid měďnatý), tedy na povrchu ohřívače, která by dosahovala absorptivity  $A_{CuO} = 0,88$ .<sup>[60][61]</sup>

Rozměry ohřívače, jeho teplota a emisivita v oblasti příslušné vlnové délce udávají, kolik energie ohřívač vyzáří do okolí. Návrh se snaží o co nejvyšší teplotu, tím se ale zvyšuje i vyzářená energie. Pokud by měl ohřívač po celé jeho ploše povrch s vysokou absorptivitou a tím i vysokou emisivitou, ustálila by se jeho teplota na nízkých hodnotách, proto je potažena vysoko absorpční vrstvou pouze část pláště a podstavy válce v okolí ohniska paraboloidu (Obrázek 27).

Zbývá část ohřívače nebude potažena speciální vrstvou. Odhalená část mědi bude vyleštěna, čímž se sníží emisivita  $E_{OH} = 0,05$  (Graf 1).<sup>[42][67][60]</sup> Problém představuje kosmické prostředí na nízké oběžné dráze Země. Prostředí se již nedá popsat jako atmosféra, nicméně se zde vyskytuje ve velké míře atomární kyslík (Graf 3)<sup>[87]</sup>.



Graf 3 Výskyt atomárního kyslíku

Atomární kyslík reaguje s mědí a mění její barvu. Důsledkem je zvýšení emisivity, a tím zvýšení energie, kterou ohřívač vyzařuje, a snížení jeho teploty. Řešením může být použití ochranné vrstvy, kterou by byla leštěná měď potažena a která by vytvořila bariéru mezi ohřívačem a atomárním kyslíkem. Zvolit vhodný materiál ochranné vrstvy, který by splňoval požadavek nízké emisivity v infračerveném spektru, nereagoval s mědí a měl vysokou pracovní teplotu, je obtížné. Další možností může být ochranná trubice okolo části nepotaženého



ohříváče, která by se ohříváče nedotýkala, což by mělo za následek přestup tepla mezi oběma částmi pouze radiací. Návrh uvažuje typ dráhy, při které by byla natočena strana CubeSatu s odrazecí plochou kolmo na vektor rychlosti letu. Ohříváč by byl při podobné misi vystaven atomárnímu kyslíku minimálně, proto není nutné uvažovat jeho ochranný systém. Alternativním řešením by mohla být substituce leštěné mědi za leštěný hliník, který s atomárním kyslíkem nereaguje a dosahuje podobné emisivity v infračerveném spektru výměnou za sníženou tepelnou vodivost.<sup>[42][67][60][70]</sup>

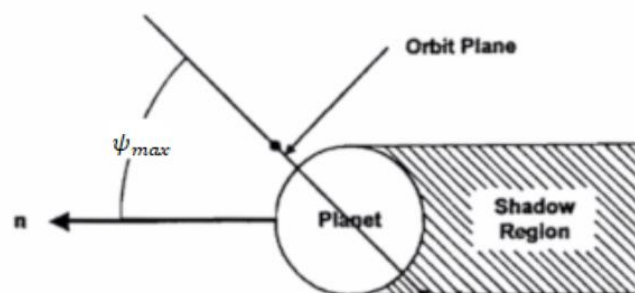
### 7.3 Elementy oběžné dráhy

Oběžná dráha, po které se CubeSat pohybuje, udává, kde se bude družice v každém bodě oběhu nacházet a jak se mění její orientace vůči Zemi a Slunci. Důležitým aspektem návrhu systému dodávky elektrické energie je doba, kterou družice stráví ve stínu Země, a doba, kdy je družice osvětlena. Pro kruhovou oběžnou dráhu a libovolný úhel roviny dráhy ke směru Slunce  $\psi$ , který je určen z inklinace dráhy  $i$ , lze stanovit maximální úhel  $\psi_{max}$ , při kterém bude dráha procházet stínem planety a jak dlouho bude přechod trvat  $T_n$  (Obrázek 28)<sup>[71]</sup>:

$$\sin \psi_{max} = \frac{R_0}{R_0+h}, \quad (7.2)$$

$$T_n = \frac{T}{180} \cdot \arccos\left(\frac{\cos \psi_{max}}{\cos \psi}\right), \quad (7.3)$$

kde  $T$  je perioda oběžné dráhy,  $R_0$  poloměr planety a  $h$  výška oběžné dráhy.



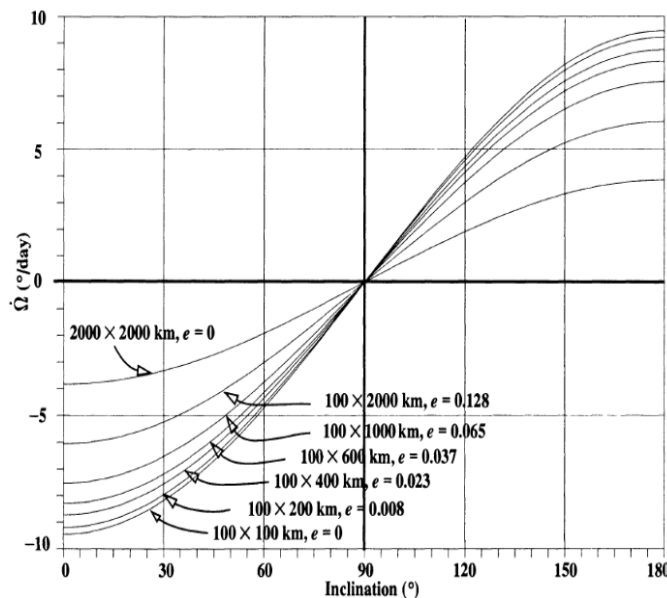
Obrázek 28 Doba ve stínu oběžné dráhy

Úhel roviny dráhy ke směru Slunce  $\psi$  se mění během oběhu planety kolem Slunce. Důvodem je změna polohy Slunce vůči Zemi a regrese uzlové přímky. Gravitační pole Země je značně nesymetrické, což ovlivňuje objekty na oběžných



drahách. Hlavním vlivem je polární zploštění Země, které má dva hlavní efekty na oběžnou dráhu – stáčení roviny dráhy (regrese uzlové přímky) a precese přímky apsid.

Stáčení roviny dráhy se využívá především u heliosynchronních drah, které jsou speciální podskupinou drah. Rovina heliosynchronní dráhy se stáčí rychlostí  $\dot{\Omega}_{SSO}$  přesně  $360^\circ$  za jeden oběh Země kolem Slunce, tedy za jeden siderický rok, a tím udržuje konstantní úhel mezi rovinou dráhy a směrem ke Slunci (Graf 4)<sup>[72]</sup>. Většinou se využívají heliosynchronní dráhy s inklinací blízkou  $90^\circ$ .<sup>[72]</sup>



Graf 4 Stáčení roviny dráhy pro různé hodnoty inklinace, výšky a excentricity oběžné dráhy

Pro dalších výpočtů a návrh je stanovena kruhová heliosynchronní oběžné dráhy ve výšce  $h = 700 \text{ km}$ , která neprochází stínem Země. Rychlost stáčení roviny reprezentuje změnu vzestupného úhlu oběžné dráhy  $\dot{\Omega}_{SSO}$ :

$$\dot{\Omega}_{SSO} = \left( \frac{d\Omega}{dt} \right)_{SSO} = \frac{360}{SR} = \frac{360}{365,25636042}, \quad (7.4)$$

$$\dot{\Omega}_{SSO} = 0,98560912^\circ / \text{den},$$

kde  $SR$  je jeden siderický rok.

Dle požadavků na oběžnou dráhu a využitím hlavní poloosy  $a$  (součet poloměru Země  $R_0 = 6378 \text{ km}$  a výšky dráhy  $h$ ), excentricity  $e$  lze vypočítat nutnou inklinaci. Dráha je definována jako retrográdní:



$$\left(\frac{d\Omega}{dt}\right)_{SSO} = -2,06474 \cdot 10^{14} \cdot \frac{\cos i}{a^{3,5} \cdot (1-e^2)^2},$$

$$i = \arccos\left(\frac{\left(\frac{d\Omega}{dt}\right)_{SSO}}{-2,06474 \cdot 10^{14}} \cdot a^{3,5} \cdot (1-e^2)^2\right), \quad (7.5)$$

$$i = \arccos\left(\frac{0,98560912}{-2,06474 \cdot 10^{14}} \cdot (700 + 6378)^{3,5} \cdot (1-0^2)^2\right),$$

$$i = 98,18705731^\circ.$$

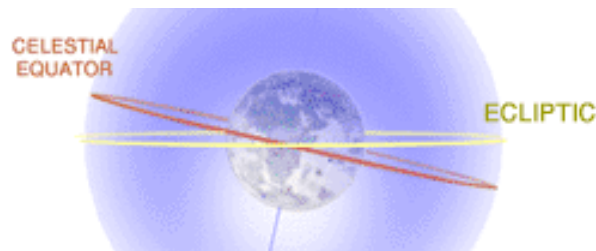
Maximální úhel  $\psi_{max}$  sklonu dráhy k vektoru slunečního záření (na obrázku 28 značen  $n$ ), aby družice procházela stínem Země:

$$\psi_{max} = \arcsin\left(\frac{R_0}{R_0+h}\right) = \arcsin\left(\frac{6378}{6378+700}\right), \quad (7.6)$$

$$\psi_{max} = 64,30330124^\circ.$$

Reálný úhel sklonu dráhy k vektoru slunečního záření  $\psi$  dané oběžné dráhy je určen ze znalosti inklinace a natočení zemské osy k rovině ekliptiky  $SZO$  (Obrázek 29)<sup>[71]</sup>:

$$\psi = i - SZO = 98,18705731 - 23,5 = 74,68705731^\circ. \quad (7.7)$$



Obrázek 29 Natočení zemské osy k rovině ekliptiky

Z výpočtů vychází, že reálný úhel sklonu dráhy k vektoru slunečního záření je větší než maximální úhel sklonu dráhy k vektoru slunečního záření, aby družice procházela stínem Země ( $\delta > \psi_{max}$ ). To znamená, že družice je osvětlena po celou dobu jejího oběhu kolem Země.

Předchozí výpočty uvažovaly pouze inklinaci dráhy a navedení družice na ideální délku vzestupného úhlu, tedy že délka vzestupného úhlu v jarní rovnodennosti  $\Omega_{JR} = 90^\circ$ . Nicméně dráha může dosahovat i jiných hodnot délky vzestupného úhlu a stále být trvale osvětlena.

V době jarní rovnodennosti (na obrázku 28 je vektor  $n$  totožný se směrem k jarnímu bodu) může délka vzestupného úhlu můžu dosahovat:



$$\Omega_{JR} \in \left( (90^\circ - (90^\circ - \psi_{max})); (90^\circ + (90^\circ - \psi_{max})) \right) \cup \left( (270^\circ - (90^\circ - \psi_{max})); (270^\circ + (90^\circ - \psi_{max})) \right). \quad (7.8)$$

Vlivem natočení zemského rovníku vůči rovině ekliptiky, musí délka vzestupného úhlu během zimního slunovratu (21. prosince) dosahovat hodnoty:

$$\Omega_{ZS} \in \left( (0^\circ - (90^\circ - \psi_{max})); (0^\circ + (90^\circ - \psi_{max})) \right), \quad (7.9)$$

pokud by dosahoval hodnoty  $180^\circ$ , část trajektorie družice by procházela stínem Země.

To znamená, že během jarní rovnodennosti by měla být délka vzestupného úhlu:

$$\Omega_{JR} \in \left( (90^\circ - (90^\circ - \psi_{max})); (90^\circ + (90^\circ - \psi_{max})) \right), \quad (7.10)$$

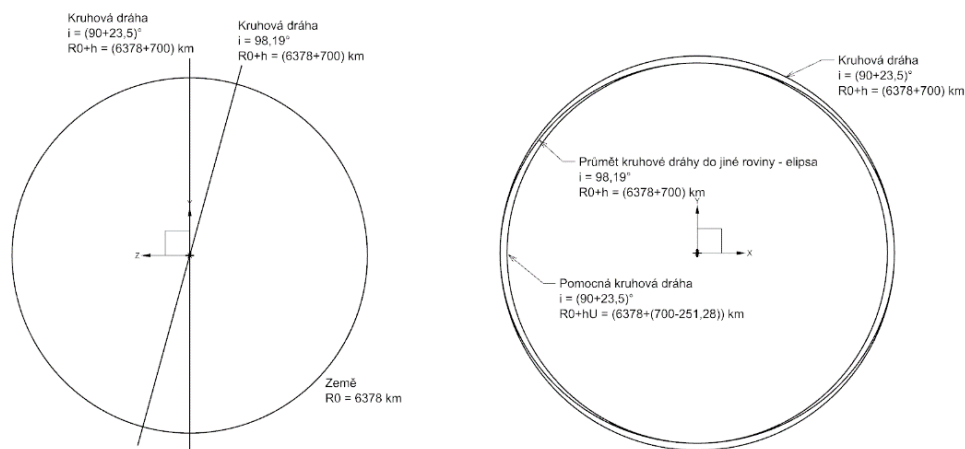
pokud by se uvažovala inklinace  $i = 90^\circ + 23,5^\circ$ .

Pro inklinaci  $98,18705731^\circ$  by se interval zmenšil. Pro výpočet byla zavedena menší pomocná kruhová trajektorie, jejíž poloměr odpovídá délce vedlejší poloosy kruhové trajektorie s inklinací  $98,18705731^\circ$  v průmětu do roviny trajektorie s inklinací  $90^\circ + 23,5^\circ$  (Obrázek 30 (osa z směřuje ke Slunci (osa  $z = n$ ) a Země leží ve středu souřadného systému)):

$$\psi_{maxU} = \arcsin \left( \frac{R_0}{R_0 + h_U} \right),$$

$$\psi_{maxU} = \arcsin \left( \frac{6378}{6378 + (700 - 251,2846644)} \right), \quad (7.11)$$

$$\psi_{maxU} = 69,1106364^\circ.$$



Obrázek 30 Pomocná kruhová dráha



Následně by mohla délka vzestupného úhlu během jarní rovnodennosti dosahovat hodnot:

$$\Omega_{JR} \in \left( (90^\circ - (90^\circ - \psi_{maxU})); (90^\circ + (90^\circ - \psi_{maxU})) \right). \quad (7.12)$$

Dále bude uvažováno, že družice byla navedena ideálně a délka vzestupného úhlu trajektorie během jarní rovnodennosti bude  $\Omega_{JR} = 90^\circ$ .

## 7.4 Energetická bilance systému sběru příchozí energie

Důvodem řešení energetické bilance systému sběru příchozí energie je nutnost určit, jaký energetický tok bude proudit přes ohříváč do teplého válce Stirlingova motoru, a odhadnout, jaké teploty lze v teplém válci očekávat, což bude využito během návrhu tepelného oběhu motoru. Energetická bilance byla řešena při platnosti základních předpokladů:

- odrazecí plocha ovlivňuje ohříváč pouze skrze odražené sluneční záření,
- část ohříváče za odrazecí plochou je dokonale izolována,
- teplý válec Stirlingova motoru, který je napojen na ohříváč, je izolovaný od dalších částí motoru.

Zářivý tok  $\Phi_{OP}$ , který vstupuje do ohříváče, lze určit z intenzity záření Slunce  $I_S$ . Zářivý tok Slunce  $\Phi_S$  (dopadající skrze plochu o velikosti podstavy odrazecí plochy  $S_{OP}$ ) je zmenšený o reflektivitu odrazecí plochy  $R_{OP}$  a absorptivitu ohříváče  $A_{OH}$ . Z důvodu kompenzace předpokladu, který uvažuje, že pro účely mise nebude nutný přesný systém stabilizace CubeSatu a proto nebude CubeSat vždy ideálně natočen směrem ke Slunci, byl uvažován koeficient  $k_S$ , který snižuje zářivý tok o 30 % (Rovnice 2.2):

$$\begin{aligned} \Phi_{OP} &= R_{OP} \cdot A_{OH} \cdot k_S \cdot I_S \cdot S_{OP}, \\ \Phi_{OP} &= 0,88 \cdot 0,97 \cdot 0,7 \cdot 1366 \cdot 0,083^2 = 5,6229 \text{ W}. \end{aligned} \quad (7.13)$$

Teplotu ohříváče  $T_{OHmax}$  lze určit pomocí Stefan-Boltzmannova vztahu. Ohříváč přijímá zářivý tok od odrazecí plochy, čímž zvyšuje svou teplotu. Důsledkem zvyšování teploty ohříváče se zvyšuje i teplo, které objekt vyzáří.



Maximální teplota ohříváče je určena z jeho tepelného ekvilibria, kdy Stirlingův motor neodebírá žádný výkon, tedy kdy absorbovaný zářivý tok od odrazné plochy dosahuje stejných hodnot jako maximální zářivý tok vyzařovaný ohříváčem (součet zářivého toku části ohříváče s vrstvou Fractal Black  $\Phi_{FB}$  plochou  $S_{FB}$  a zářivého toku části ohříváče, který není potažený,  $\Phi_{OH}$  plochou  $S_{OH}$ ):

$$\begin{aligned}\Phi_{OP} &= \Phi_{FBmax} + \Phi_{OHmax}, \\ \Phi_{OP} &= E_{FB} \cdot \sigma \cdot T_{OHmax}^4 \cdot S_{FB} + E_{OH} \cdot \sigma \cdot T_{OHmax}^4 \cdot S_{OH}, \\ T_{OHmax} &= \sqrt[4]{\frac{\Phi_{OP}}{\sigma \cdot (E_{FB} \cdot S_{FB} + E_{OH} \cdot S_{OH})}}, \\ T_{OHmax} &= \sqrt[4]{\frac{5,6229}{5,6704 \cdot 10^{-8} \cdot (0,97 \cdot 0,000114 + 0,05 \cdot 0,000393)}}, \\ T_{OHmax} &= 934,4 \text{ K}.\end{aligned}\tag{7.14}$$

Ohříváč však v reálných podmínkách nikdy teploty  $T_{OHmax}$  nedosáhne, jelikož motor odebírá část tepelného výkonu, což má za následek snížení teploty ohříváče. Pro další výpočty je nutné stanovit maximální přípustný zářivý tok vyzařovaný ohříváčem. Čím vyšší bude zářivý tok ohříváče, tím vyšší bude teplota horkého válce motoru, ale tím bude mít motor k dispozici menší tepelný tok. Určeno bylo, že maximální přípustný zářivý tok ohříváče bude dosahovat 15 % zářivého toku od odrazné plochy, to znamená, že zbytek zářivého toku (85 %) musí být využito motorem. Teplota ohříváče  $T_{OH}$ :

$$\begin{aligned}0,15 \cdot \Phi_{OP} &= \Phi_{FB} + \Phi_{OH}, \\ T_{OH} &= \sqrt[4]{\frac{0,15 \cdot \Phi_{OP}}{\sigma \cdot (E_{FB} \cdot S_{FB} + E_{OH} \cdot S_{OH})}}, \\ T_{OH} &= \sqrt[4]{\frac{0,15 \cdot 5,6229}{5,6704 \cdot 10^{-8} \cdot (0,97 \cdot 0,000114 + 0,05 \cdot 0,000393)}}, \\ T_{OH} &= 581,5 \text{ K}.\end{aligned}\tag{7.15}$$

Pokud bude ohříváč dosahovat teploty  $T_{OH}$ , pak tepelný tok vstupující do motoru  $\dot{Q}_{IN}$  je:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{IN} &= \Phi_{OP} - (\Phi_{FB} + \Phi_{OH}), \\ \dot{Q}_{IN} &= 5,6229 - 0,15 \cdot 5,6229 = 4,7795 \text{ W}.\end{aligned}\tag{7.16}$$

Tepelný tok prochází mědí z ohříváče do horkého válce pomocí kondukce tepla. Přesné rozměry trasy tepelného toku nejsou známy, avšak rozměry



ohříváče jsou stanoveny a motor se bude nacházet bezprostředně za odraznou plochou, proto lze vypočítat přibližnou teplotu horkého válce  $T_{HV}$ :

$$\begin{aligned}\frac{\dot{Q}_{IN}}{A_{OH}} &= -\frac{\lambda_{Cu}}{H_{OH}} \cdot (T_{HV} - T_{OH}), \\ T_{HV} &= -\frac{H_{OH}}{\lambda_{Cu600}} \cdot \frac{\dot{Q}_{IN}}{A_{OH}} + T_{OH}, \\ T_{HV} &= -\frac{0,031}{383} \cdot \frac{4,7795}{1,96 \cdot 10^{-5}} + 581,5 = 561,8 \text{ K},\end{aligned}\tag{7.17}$$

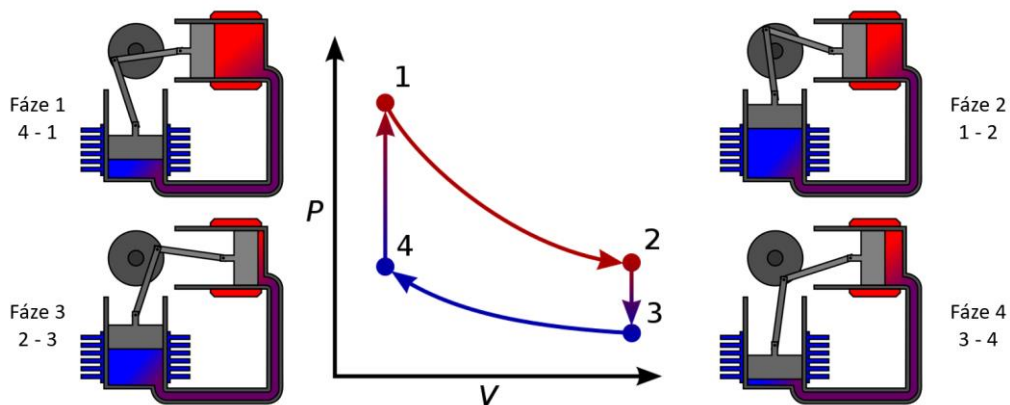
kde  $\lambda_{Cu600}$  je tepelná vodivost mědi při teplotě 600 K.<sup>[62]</sup>





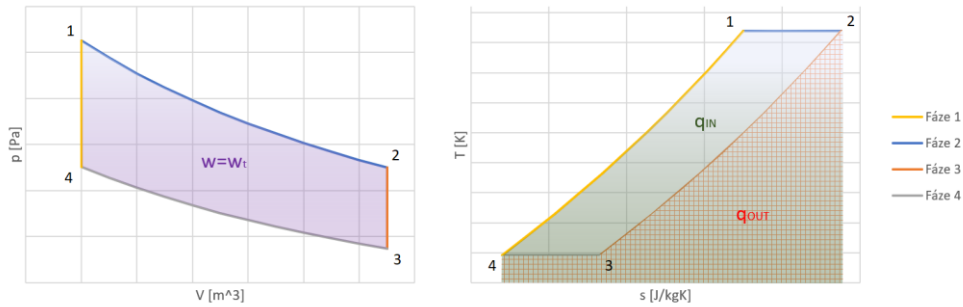
## 8 Ideální tepelný oběh Stirlingova motoru

Ideální tepelný oběh Stirlingova motoru je stanovený pomocí 4 fází (Obrázek 31)<sup>[88]</sup>. Během Fáze 1 se pracovní látka nasává do teplého válce, kde se zvyšuje její teplota a tlak v motoru, a dochází k izochorické změně. V bodě 1 se nachází většina pracovní látky v horkém válci a dochází k izotermické změně (Fáze 2). Pracovní látka se rozpíná a naplňuje studený válec. Následuje chlazení plynu při izochorické změně (Fáze 3), kdy dochází i k poklesu tlaku. Poslední fáze (Fáze 4) prochází izotermickou změnou, kdy má pracovní látka konstantní teplotu a dochází ke zmenšení objemu a růstu tlaku. Jakoukoliv změnu stavu lze popsat rovnicí. V případě izochorické a izotermické změny lze použít Charlesův a Boyle-Mariottenův zákon.



Obrázek 31 Ideální oběh Stirlingova motoru

Pracovní (p-V) a tepelný (T-s) diagram je možné použít pro vizualizaci absolutní práce  $w$ , technické práce  $w_t$ , přivedeného měrného tepla  $q_{IN}$  a odvedeného měrného tepla  $q_{OUT}$ . Všechny veličiny se promítají do diagramů jako plocha pod křivkou (Obrázek 32) Množství přivedeného měrného tepla do oběhu je vyobrazeno pod křivkou fáze 1 a 2 a odvedené měrné teplo pod křivkou fáze 3 a 4.



Obrázek 32 Absolutní a technická práce, přivedené a odvedené měrné teplo

Absolutní práce je práce tlakových sil při expanzi nebo kompresi. Technická práce představuje výslednou práci při jedné otáčce stroje. Odpovídající množství tepla musí být do oběhu přivedeno, aby stroj odvedl danou práci. Žádný stroj nemá 100% tepelnou účinnost, proto z oběhu odchází určité teplo.

## 8.1 Postup návrhu tepelného oběhu

Pro návrh Stirlingova motoru lze využít znalosti teploty teplého válce a tepelného toku do motoru pro stanovení hmotnosti pracovní látky, kterou přicházející tepelný tok dokáže ohřát na požadovanou teplotu. Určením tepelné účinnosti oběhu, vstupujícího měrného tepla do motoru a hmotnosti pracovní látky je možné stanovit potřebnou velikost radiátoru.

Měrné teplo  $q_{IN}$ , které je potřebné do oběhu dodat, se skládá z měrného tepla potřebného na izochorickou změnu  $q_{izochor}$  a měrného tepla potřebného na izotermickou změnu  $q_{izoter}$  (Obrázek 32). Obě měrná tepla je možné vypočítat pomocí vztahů:

$$\begin{aligned} q_{izochor} &= c_v \cdot (T_1 - T_4), \\ q_{izoter} &= T_1 \cdot (s_2 - s_1) = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}, \\ q_{izoter} &= r \cdot T_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}, \end{aligned} \quad (8.1)$$

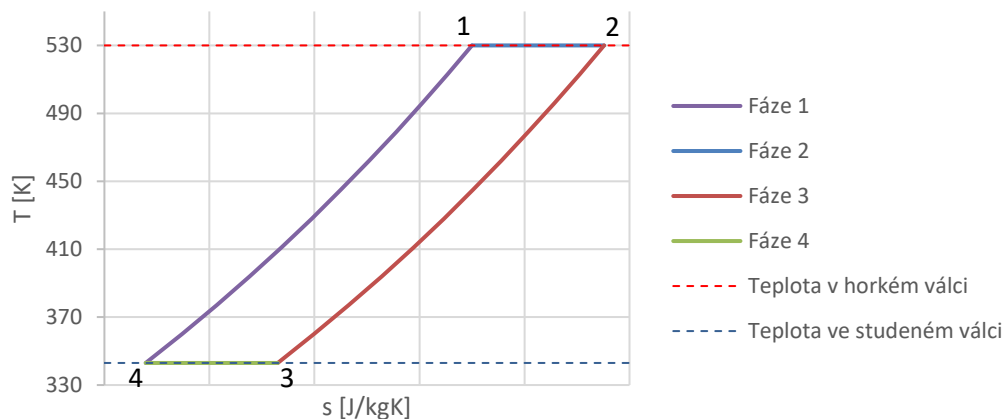
kde  $c_v$  je měrná tepelná kapacita při konstantním objemu a  $r$  plynová konstanta pracovní látky.



## 8.2 Stanovení parametrů

### 8.2.1 Teploty ve válcích

Rovnice 8.1 odhalují, jaké parametry motoru a jeho oběhu je nutné pro další postup výpočtu stanovit – pracovní látku, poměr tlaků v bodě 1 a v bodě 2  $p_1/p_2$ , teplotu pracovní látky v teplém válci  $T_1$  a studeném válci  $T_4$  (Graf 5). Rozměry motoru nejsou známy, proto nelze přesně stanovit, jaký rozdíl teploty vznikne během přestupu tepla z horkého válce do pracovní látky v horkém válci, proto byla pro výpočet odhadnuta teplota  $T_1 = T_2 = 530 \text{ K}$ . Návrh bude usilovat o teplotu pracovní látky ve studeném válci  $T_4 = T_3 = 343 \text{ K}$ .



Graf 5 Tepelný diagram navrhovaného motoru

### 8.2.2 Pracovní látka

První Stirlingovy motory byly naplněny vzduchem při atmosférickém tlaku, který sloužil jako pracovní látka. Důvodem bylo, že technologie nedosahovala dostatečné úrovně, aby bylo vybráno jiné médium či vyšší tlak. Následovaly přetlakové vzduchové motory, které při stejných ostatních parametrech vykonaly více práce.

V minulosti se konstruovalo a experimentovalo s motory, které obsahovaly jinou pracovní látku než vzduch. Nejlépe se osvědčil například vodík nebo helium. Obě látky mají několikanásobně vyšší plynovou konstantu a měrnou tepelnou kapacitu při konstantním než vzduch, což má za následek zvýšení měrného tepla při zachování ostatních parametrů oběhu (Rovnice 8.1). <sup>[64]</sup> Pokud by bylo

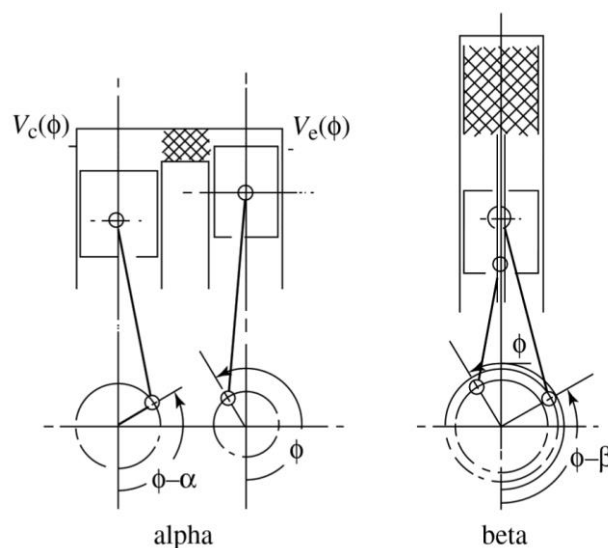


potřeba zachovat hodnotu přivedeného tepla do oběhu z důvodu omezeného chlazení, znamenala by změna pracovní látky na vodík nebo helium možnost snížit teplotní rozdíl v horkém a studeném válci. Nevýhodou helia a zejména vodíku je malá velikost jejich atomů, proto dochází k rychlému úniku pracovní látky z motoru. Jejich výhodou oproti vzduchu je možnost použít ve válcích kapalná maziva, která po zahřátí a kontaktu se vzduchem vybuchují, jelikož jsou tvořeny převážně z uhlovodíků. Alternativou ke vzduchu by mohl být například dusík, jehož parametry jsou podobné vzduchu.

Pracovní látkou byl zvolen vzduch při atmosférickém tlaku. Důvodem je snadnější testování a plnění motoru, lehčí konstrukce a nižší únik vzduchu mimo Stirlingův motor.

### 8.2.3 Poměr tlaků

Poslední parametrem, který je potřeba stanovit, je poměr tlaků v bodech 1 a 2  $p_1/p_2$  tepelného oběhu motoru (Graf 5). Návrh vychází z optimálního Stirlingova motoru typu beta nazvaný Vari-Engine, který byl popsán v experimentu Iana Larquea a Geoffa Vaizeyho. Vari-Engine byl optimalizován pro nejsnadnější startování, nejlepší běh motoru a nejnižší pracovní teploty. Charakteristické parametry Vari-Engine motoru jsou poměr zdvihového objemu pracovního pístu vůči zdvihovému objemu posunovacího pístu  $\lambda = 0,7$  a fázový posun posunovacího pístu před pracovním pístem  $\beta = 50^\circ$  (Obrázek 33)<sup>[5]</sup>.



Obrázek 33 Fázové úhly alpha a beta konfigurace



Charakteristické parametry beta konfigurace lze převést na ekvivalentní charakteristické parametry alfa konfigurace, a to fázový posun dějů v horkém válci před ději ve studeném válci  $\alpha$  a poměr objemu horkého  $V_E$  a studeného  $V_C$  válce  $\kappa$ , pomocí rovnic (Graf 6)<sup>[5]</sup>:

$$\kappa = \frac{V_E}{V_C} = \sqrt{1 + \lambda^2 - 2 \cdot \lambda \cdot \cos \beta},$$

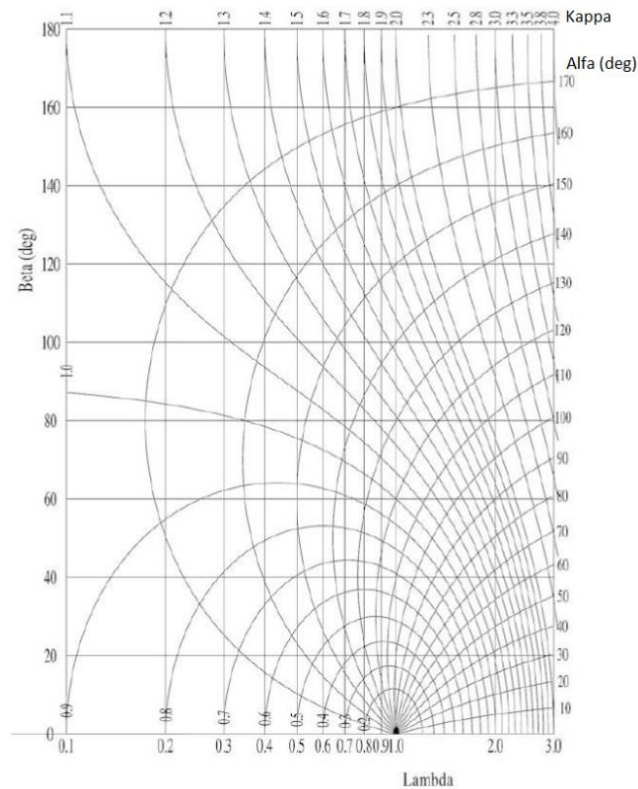
$$\kappa = \sqrt{1 + 0,7^2 - 2 \cdot 0,7 \cdot \cos 50} = 0,768, \quad (8.2)$$

$$\kappa \approx 0,75,$$

$$\alpha = 180^\circ + \operatorname{atan} \left( \frac{\lambda \cdot \sin \beta}{\lambda \cdot \cos \beta - 1} \right),$$

$$\alpha = 180 + \operatorname{atan} \left( \frac{0,7 \cdot \sin 50}{0,7 \cdot \cos 50 - 1} \right) = 135,73^\circ, \quad (8.3)$$

$$\alpha \approx 135^\circ.$$



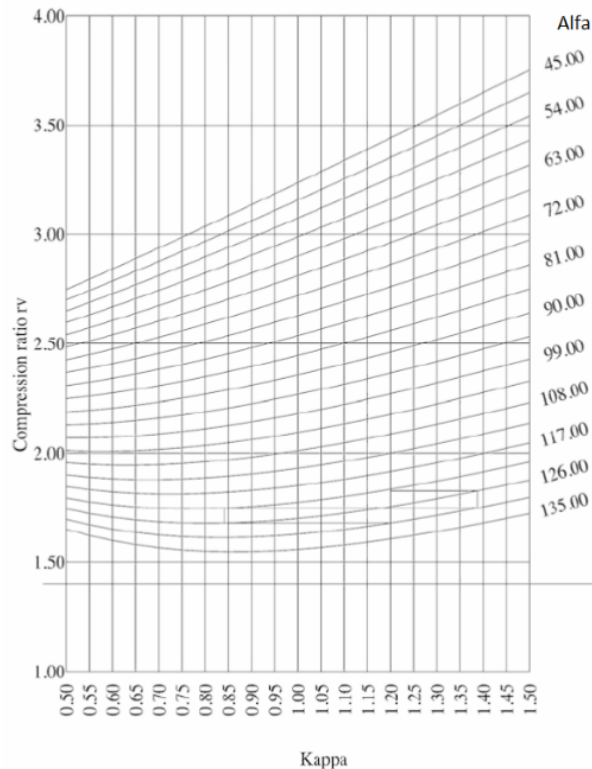
Graf 6 Grafické znázornění přepočtu mezi alfa a beta konfigurací

Stanovené optimální charakteristické parametry alfa konfigurace je možné využít pro výpočet kompresního poměru  $r_V$ , který představuje poměr největšího a nejmenšího objemu pracovní látky, tedy objem v bodu 3  $V_3$  a v bodu 1  $V_1$  tepelného oběhu. Objem vzduchu v bodě 3  $V_3$  je totožný s objemem vzduchu



v bodě 2  $V_2$ , jelikož se jedná o idealizovaný tepelný oběh. Kompresní poměr je možné určit pomocí grafu 7<sup>[5]</sup>:

$$r_V = \frac{V_3}{V_1} = \frac{V_2}{V_1} = 1,557 \approx 1,55. \quad (8.4)$$



Graf 7 Kompresní poměr

Ideální tepelný oběh Stirlingova motoru je tvořen mezi body 1 a 2 izotermickou změnou (Graf 5). Vztah stavů v daných bodech matematicky popisuje Boyle-Mariottenův zákon ze stavové rovnice:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_1} = r_V = 1,55. \quad (8.5)$$

### 8.3 Výpočet a hmotnost pracovní látky

Výpočet tepelného oběhu motoru lze stanovit na základě určení měrného tepla  $q_{IN}$ , které je potřebné do oběhu dodat, aby dosahoval předem stanovených parametrů. K výpočtu budou použity rovnice 8.1, pro jejichž řešení jsou známé



všechny parametry (měrná tepelná kapacita při konstantním objemu vzduchu  $c_v = 714 \text{ J/kgK}$ , plynová konstanta vzduchu  $r = 287,04 \text{ J/kgK}$ ):

$$\begin{aligned}
 q_{IN} &= q_{izochor} + q_{izoter} = q_{41} + q_{12}, \\
 q_{IN} &= c_v \cdot (T_1 - T_4) + r \cdot T_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}, \\
 q_{IN} &= 714 \cdot (530 - 343) + 287,04 \cdot 530 \cdot \ln 1,55, \\
 q_{IN} &= 200\,190,25 \text{ J/kg}.
 \end{aligned} \tag{8.6}$$

Maximální hmotnost pracovní látky, kterou dokáže přicházející tepelný tok ohřát na požadovanou teplotu lze stanovit pomocí tepelného toku a počtu oběhů za sekundu, tedy otáček za sekundu. Počet oběhu za sekundu nesmí být příliš vysoký, jelikož by nedošlo k ohřevu v teplém válci nebo ochlazení ve studeném válci, proto bude návrh uvažovat počet oběhů  $n = 5 \text{ ot/s}$ . Maximální hmotnost pracovní látky je stanovena:

$$m_{max} = \frac{\dot{Q}_{IN}}{n} = \frac{4,7795}{5} = 4,77 \cdot 10^{-6} \text{ kg}. \tag{8.7}$$



## 9 Návrh radiátoru

Motorem prostupuje teplo, z něhož je ohřívána pracovní látka, a stroj koná práci. Část vstupujícího tepla musí být pro vykonání oběhu odvedena. Tepelná účinnost stroje udává, jak velké je množství odvedeného tepla, které musí radiátor vyzářit. Tepelnou účinnost ideálního motoru lze stanovit pomocí účinnosti Carnotova cyklu  $\eta$ :

$$\eta = 1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{343}{530} = 35,3 \%. \quad (9.1)$$

Účinnost motoru určuje, jak velká část ze vstupujícího tepla je využita pro práci stroje. Zbytek tepla ( $q_{OUT}$ ) je nutné ze stroje odvést:

$$\begin{aligned} q_{OUT} &= q_{IN} \cdot (1 - \eta) = 200\,190,25 \cdot (1 - 0,353), \\ q_{OUT} &= 129\,557,09 \text{ J/kg}. \end{aligned} \quad (9.2)$$

Využitím znalosti maximální hmotnosti pracovní látky je možné vypočítat množství tepla nutného vyzářit za 1 oběh  $Q_{OUT}$ :

$$\begin{aligned} Q_{OUT} &= q_{OUT} \cdot m_{max} = 129\,557,09 \cdot 4,77 \cdot 10^{-6}, \\ Q_{OUT} &= 0,619 \text{ J}. \end{aligned} \quad (9.3)$$

Plochu potřebnou k vyzáření daného množství tepla předepisuje Stefan-Boltzmannův zákon. Měď byla vybrána jako materiál radiátoru díky její vysoké tepelné vodivosti. Plocha, která bude vyzařovat energii, musí být potažena materiál s vysokou emisivitou v infračerveném spektru. Pro výpočty byla zvolena bílá silikonová barva PCBE společnosti MAP Space Coatings, u které výrobce udává emisivitu  $E_R = 0,88$ .<sup>[65][66]</sup> Teplota radiátoru  $T_R$  je přibližný odhad vycházející z teploty ve studeném válci  $T_4$ . Potřebná minimální velikost plochy radiátoru  $S_R$  je určena:

$$\begin{aligned} \frac{Q_{OUT} \cdot n}{S_R} &= E_R \cdot \sigma \cdot T_R^4, \\ S_{Rmin} &= \frac{Q_{OUT} \cdot n}{E_R \cdot \sigma \cdot T_R^4} = \frac{0,619 \cdot 5}{0,88 \cdot 5,6704 \cdot 10^{-8} \cdot 313^4}, \\ S_{Rmin} &= 6,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 64,58 \text{ cm}^2. \end{aligned} \quad (9.4)$$





## 10 Konstrukce motoru

Rozměry, tvary a materiál konstrukce motoru musí být vybrány tak, aby vyhovovaly zejména tepelným podmínkám a efektivně bránily úniku pracovní látky do vakua. Dále musí vyhovovat pevnostním a dynamickým požadavkům.

Konstrukce byla navrhována dle výpočtů a nabytých znalostí z předchozích kapitol.

Důležitým aspektem návrhu je zajištění, aby byly všechny pohyblivé části motoru vždy v silové rovnováze. Jakýkoliv translační a rotační pohyb působí 3. Newtonovým pohybovým zákonem akce a reakce na zbytek CubeSatu, a tím ovlivňuje jeho orientaci.

Zejména z důvodu snížení tření a zvýšení plynulosti pohybu pístů ve válci byla zvolena beta konfigurace s rhombickým pohonem („ojnice“ pístů provádí pouze translační pohyb). Konfigurace je vhodná i z hlediska silové rovnováhy a tepelné izolace a dále zajišťuje nižší únik pracovní látky mimo prostor válců, což má za následek delší běh motoru.<sup>[36]</sup>

### 10.1 Rozměry válců

Maximální hmotnost pracovní látky, vypočítaná z tepelných měrných toků uvnitř motoru, představuje maximální objem teplého válce  $V_{Emax}$ :

$$V_{Emax} = \frac{m_{max}}{\rho_{PL500}} = \frac{4,77 \cdot 10^{-6}}{0,7078} = 6,74 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3, \quad (10.1)$$

kde  $\rho_{PL500}$  je hustota vzduchu při teplotě 500 K.<sup>[73]</sup>

Objem teplého válce musí být menší než vypočítaná hodnota, aby dosahoval motor navrhovaných otáček. Stanovení poloměru a výšky válce je dáno optimalizací návrhu. Větší poloměr válce bude znamenat vyšší sílu působící na píst, jelikož stejný tlak účinkuje na větší plochu. Pokud však bude poloměr příliš velký, nestačí se pracovní látka dostatečně ohřát, a proto budou klesat otáčky motoru.

Možné průměry válců byly uvažovány v tabulce 1 z průměru děl  $d_{vys}$  vyrobených pomocí normovaných výstružníků.<sup>[42]</sup> Ze znalosti maximálního objemu horkého válce  $V_{Emax} \approx 6500 \text{ mm}^3$  lze vypočítat výšku válce  $h_{vys}$  a obsah plochy  $S_{vys}$  sloužící k přechodu tepla do pracovní látky (obsah pláště válce).



| dvys. | rvys. | hvys.  | Svys.   |
|-------|-------|--------|---------|
| 5     | 2,5   | 331,04 | 5199,96 |
| 6     | 3     | 229,89 | 4333,32 |
| 7     | 3,5   | 168,9  | 3714,3  |
| 8     | 4     | 129,31 | 3249,91 |
| 9     | 4,5   | 102,17 | 2888,79 |
| 10    | 5     | 82,76  | 2599,98 |
| 12    | 6     | 57,47  | 2166,57 |
| 14    | 7     | 42,22  | 1856,93 |
| 16    | 8     | 32,33  | 1625,08 |
| 18    | 9     | 25,54  | 1444,25 |
| 20    | 10    | 20,69  | 1299,99 |
| 22    | 11    | 17,1   | 1181,87 |
| 24    | 12    | 14,37  | 1083,47 |
| 26    | 13    | 12,24  | 999,78  |
| 28    | 14    | 10,56  | 928,91  |
| 30    | 15    | 9,2    | 867,08  |
| 35    | 17,5  | 6,76   | 743,3   |
| 40    | 20    | 5,17   | 649,68  |

Tabuška 1 Možné průměry válců

Velikost CubeSatu a výběr beta konfigurace omezuje výšku válce. Průměr válců byl s ohledem na maximalizaci plochy  $S_{vys}$  zvolen  $d = d_{HV} = d_{SV} = 16 \text{ mm}$ .

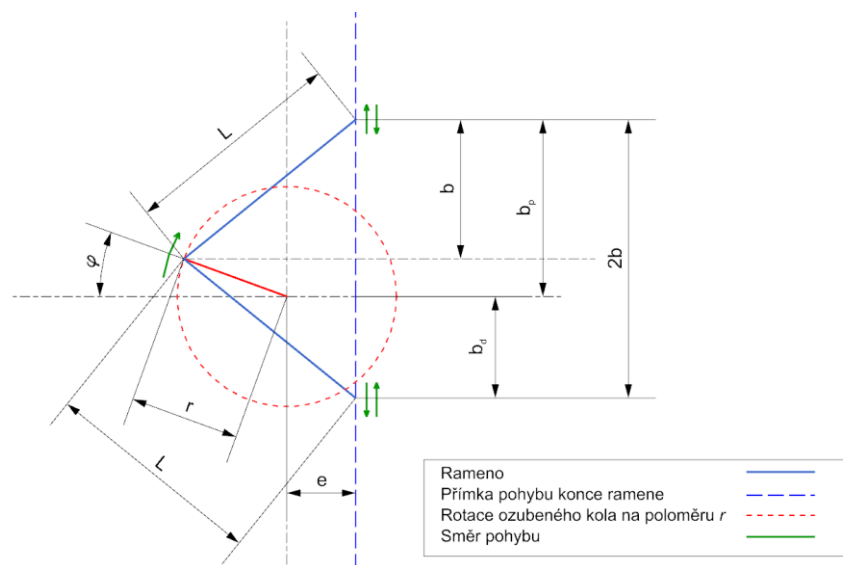
## 10.2 Kinematika pohybu pístů

Písty v beta konfiguraci s rhombickým pohonem jsou uloženy ve válcích koaxiálně a konají translační pohyb, který je převáděn na rotační pohyb ozubených kol, jejichž spojení zajišťuje plynulý chod motoru. Fázový posun  $\beta$  posunovacího pístu před pracovním pístem je obvykle  $90^\circ$ , jelikož zajišťuje harmonický pohyb. Vhodným nastavením kinematiky mechanismu, který spojuje písty s ozubeným kolem (dále spojovací mechanismus), lze docílit fázového posunu  $\beta = 50^\circ$  (optimalizace pro nejsnadnější startování, nejlepší běh motoru a nejnižší pracovní teploty) za cenu odchýlení od harmonického pohybu.<sup>[36]</sup>

Nastavení kinematiky mechanismu proběhlo pomocí délky ramene  $L$ , poloměru  $r$  rotačního pohybu prvního konce ramene spojeného s ozubeným kolem a pomocí vzdálenosti  $e$  přímky translačního pohybu druhého konce ramene od středu rotačního pohybu (Obrázek 34). Správným vybráním

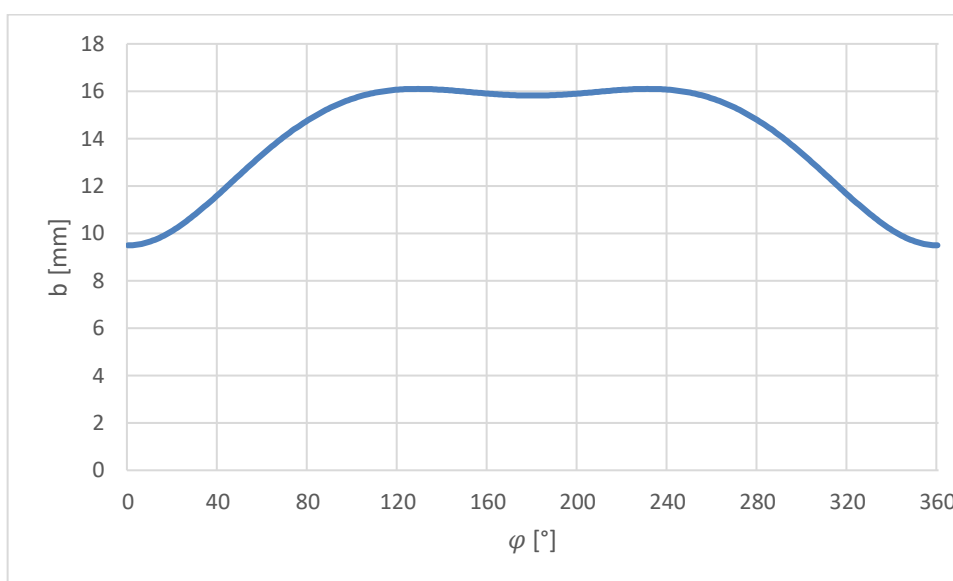


hodnot  $L$ ,  $r$  a  $e$  lze docílit požadovaného pohybu pístů s ohledem na výšku celého motoru, aby nepřesahovala maximální rozměry CubeSatu. Zvoleny byly hodnoty:  $L = 16,1 \text{ mm}$ ,  $r = 8 \text{ mm}$  a  $e = 5 \text{ mm}$ .

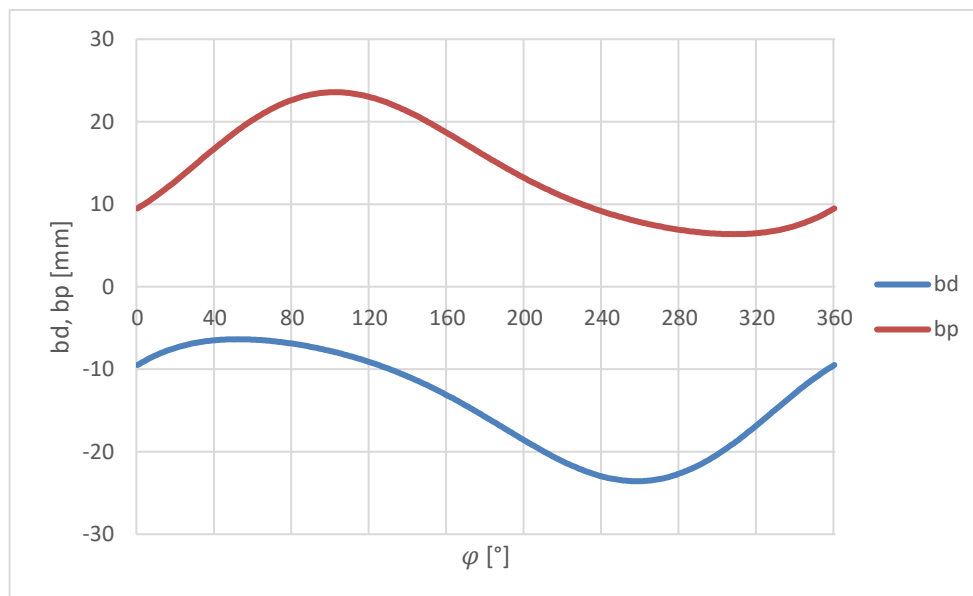


Obrázek 34 Schéma pohybu ramene

Pohyb konců ramene udává ve výpočtu ozubené kolo skrze úhel  $\varphi$  a je reprezentován vertikální vzdáleností  $b$  (Graf 8), ze které je možné určit vertikální vzdálenost konců pracovního pístu  $b_p$  a posunovacího pístu  $b_d$  od horizontální osy ozubeného kola (Graf 9).



Graf 8 Závislost parametru  $b$  na úhlu  $\varphi$



Graf 9 Pohyb pístů v závislosti na rotační pohy ozubených kol

Na grafu 9 lze pozorovat reálný pohyb pístů, který lze při dané konfiguraci očekávat. Tabulka 2 zobrazuje maximální a minimální polohy pístů a při jakých úhlech  $\varphi$  se do dané polohy dostávají.

|               | max( $b_p$ ) | min( $b_p$ ) | max( $b_d$ ) | min( $b_d$ ) |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| [mm]          | 23,576       | 6,373        | -6,373       | -23,576      |
| $\varphi$ [°] | 102          | 308          | 52           | 258          |

Tabulka 2 Maximální a minimální polohy pístů

Fázový posun  $\beta_{max}$  maximálních hodnot polohy posunovacího pístu před pracovním pístem a fázový posun  $\beta_{min}$  jejich minimálních poloh nabývá optimalizované hodnoty  $\beta_{max} = \beta_{min} = 50^\circ$ . Fázový posun se však během oběhu mění až o  $\Delta\beta \approx \pm 20^\circ$ , jelikož se nejedná o harmonický pohyb.

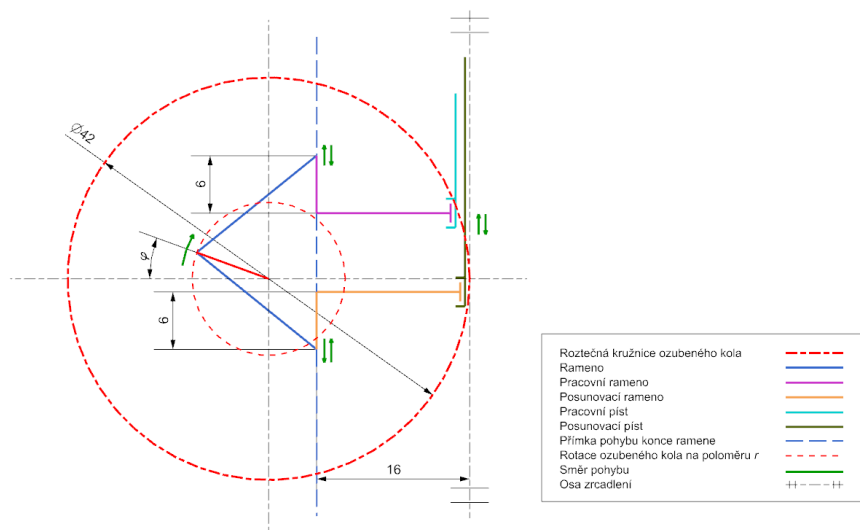
### 10.3 Výška válců

Vzdálenost, kterou písty urazí od maxima do minima, představuje zdvih pístů a dosahuje hodnoty  $h_{sw_r} = 17,203 \text{ mm}$  (Tabulka 2). Dále je uvažován zdvih pístů  $h_{sw} = 18 \text{ mm}$ , což vyhovuje podmínce maximálního objemu horkého válce z tabulky 1.

Na grafu 9 a v tabulce 2 lze vidět, že maximální poloha posunovacího pístu a minimální poloha pracovního pístu má mezi sebou vůli. Správným návrhem



posunovacího a pracovního ramena je možné minimalizovat vůli a ušetřit místo v CubeSatu (Obrázek 35).



Obrázek 35 Schéma připojení pístů k ozubenému kolu

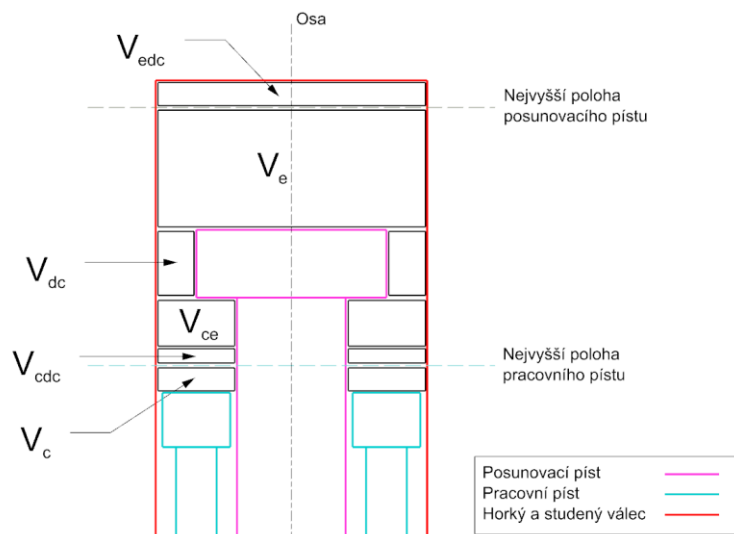
## 10.4 Objem pracovní látky

Charakteristické parametry beta konfigurace Stirlingova motoru jsou fázový posun  $\beta$  a poměr zdvihových objemů  $\lambda$  (Tabulka 3), které je možné přepočítat na charakteristické parametry alfa konfigurace  $\alpha$  a  $\kappa$  (viz předchozí kapitoly).

| $\beta$ [°] | $\lambda$ [-] | $\alpha$ [°] | $\kappa$ [-] |
|-------------|---------------|--------------|--------------|
| 50          | 0,7           | 135          | 0,768        |

Tabulka 3 Charakteristické parametry navrhované konfigurace

Prostor uvnitř válců se vlivem pohybu pístů během oběhu zmenšuje a zvětšuje. Pro zjednodušení výpočtu byl rozdělen do několika částí (Obrázek 36 (rozměry pístů nejsou v měřítku)).



Obrázek 36 Schéma vnitřního prostoru Stirlingova motoru

Pomocí optimální velikosti tzv. přídavného dead objemu a poměru zdvihových objemů je možné určit rozměry pístů. Přídavný dead objem  $V_{dc}$  je konstantní a pozitivně ovlivňuje ohřev zbytku pracovní látky. [5] Dále jsou konstantní prostory  $V_{edc}$  a  $V_{cdc}$ , které jsou v motoru uvažovány kvůli vůli z důvodu tvarových nepřesností.

Součet maximálního objemu v expanzní části  $V_E = \max(V_e) + V_{edc}$  a přídavného dead objemu  $V_{dc}$  je označen  $V_{dc}^+$  [5]:

$$\frac{V_{dc}^+}{V_E} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \lambda + \sqrt{1 + \lambda^2 - 2 \cdot \lambda \cdot \cos \beta}),$$

$$\frac{V_{dc}^+}{V_E} = \frac{1}{2} \cdot (1 + 0,7 + \sqrt{1 + 0,7^2 - 2 \cdot 0,7 \cdot \cos 50}), \quad (10.2)$$

$$\frac{V_{dc}^+}{V_E} = 1,234,$$

$$V_E = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot (h_{sw} + h_{edc}) = \pi \cdot \left(\frac{16}{2}\right)^2 \cdot (18 + 1), \quad (10.3)$$

$$V_E = 3820,177 \text{ mm}^3,$$

$$V_{dc}^+ = V_E \cdot \frac{V_{dc}^+}{V_E} = 3820,177 \cdot 1,234 = 4714,438 \text{ mm}^3, \quad (10.4)$$

$$V_{dc} = V_{dc}^+ - V_E = 4714,438 - 3820,177, \quad (10.5)$$

$$V_{dc} = 894,261 \text{ mm}^3.$$

Přídavný dead objem  $V_{dc}$  je dán mezikružím mezi válcem a hlavou posunovacího pístu. Výška hlavy pístu  $h_d$  byla určena ze znalosti křivek pohybu pístů z grafu 9, kdy se po odečtení vůle mezi minimem pracovního pístu a



maximem posunovacího pístu křivky nepřiblíží na vzdálenost menší než  $6,25 \text{ mm}$ . Dále rozměry motoru umožňovaly navýšení výšky o  $5 \text{ mm}$ . Výška hlavy pístu  $h_d$  tedy může dosahovat součtu hodnot  $6 \text{ mm}$  a  $5 \text{ mm}$ :

$$V_{dc} = \left( \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{d_d}{2}\right)^2 \right) \cdot h_d,$$

$$d_d = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \frac{V_{dc}}{\pi \cdot h_d}} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{16}{2}\right)^2 - \frac{894,261}{\pi \cdot 11}}, \quad (10.6)$$

$$d_d = 12,349 \text{ mm},$$

$$d_d \approx 12 \text{ mm}.$$

Poměr  $\lambda$  zdvihového objemu pracovního pístu  $V_{swp}$  vůči zdvihovému objemu posunovacímu pístu  $V_{swd}$  lze využít k určení průměru „ojnice“ posunovacího pístu  $d_{dr}$  [5]:

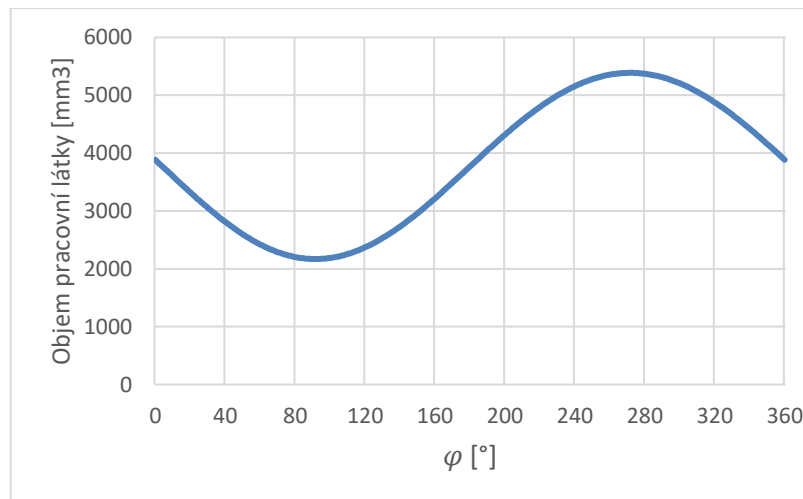
$$\lambda = \frac{V_{swp}}{V_{swd}} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h_{sw} - \pi \cdot \left(\frac{d_{dr}}{2}\right)^2 \cdot h_{sw}}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h_{sw}} = \frac{d^2 - d_{dr}^2}{d^2}, \quad (10.7)$$

$$d_{dr} = \sqrt{d^2 - \lambda \cdot d^2} = \sqrt{16^2 - 0,7 \cdot 16^2} = 8,764 \text{ mm},$$

$$d_{dr} \approx 8,8 \text{ mm}.$$

Součtem jednotlivých částí objemu pracovní látky z obrázku 36 v závislosti na úhlu ozubeného kola lze stanovit celkový objem pracovní látky během jednoho oběhu (Graf 10):

$$V = V_e + V_{edc} + V_{dc} + V_{ce} + V_c + V_{cdc}. \quad (10.8)$$



Graf 10 Objem pracovní látky v průběhu jednoho oběhu



## 10.5 Ozubená kola

Parametry ozubených kol jsou v návrhu určeny především konstrukcí klikového mechanismu, který spojuje písty a ozubená kola, jeho kinematikou a volným prostorem v CubeSatu. Z popisovaného návrhu je dané, že průměr roztečné kružnice musí mít hodnotu  $d_r = 42 \text{ mm}$ . Modul ozubení byl zvolen  $m_{oz} = 1,5$  dle normy ČSN 01 4608. Průměr hlavové kružnice  $d_a$ , patní kružnice  $d_f$ , základní kružnice  $d_b$ , počet zubů  $z_{oz}$  byly určeny <sup>[42]</sup>:

$$d_a = d_r + 2 \cdot m_{oz} = 42 + 2 \cdot 1,5 = 45 \text{ mm}, \quad (10.9)$$

$$d_f = d_r - 2,5 \cdot m_{oz} = 42 - 2,5 \cdot 1,5 = 38,25 \text{ mm}, \quad (10.10)$$

$$d_b = d_r \cdot \cos \alpha_t = 42 \cdot \cos 20 = 39,467 \text{ mm}, \quad (10.11)$$

$$z = \frac{d_r}{m_{oz}} = \frac{42}{1,5} = 28, \quad (10.12)$$

kde  $\alpha_t$  je čelní úhel záběru pro přímé zuby dle normy ČSN 01 4607.

## 10.6 Popis dílů konstrukce Stirlingova motoru

Celý Stirlingův motor (elektronická příloha A) a všechny díly byly navrženy zejména z hlediska kinematické funkčnosti motoru. Cílem bylo i zajištění jednoduchého sestavení a možnosti motor rozebrat a zajistit, aby měl motor co největší výkon v co nejmenších rozměrech. Osa válců motoru je posunutá mimo spojnicí průsečíků stranových úhlopříček protilehlých stran CubeSatu o  $4 \text{ mm}$  z důvodu velikosti motoru.

### 10.6.1 Elektromotor

Cyklické ohřívání a ochlazování pracovní látky působí na písty, které konají práci a roztáčí ozubená kola, ke kterým jsou připojeny 2 elektromotory. Cílem elektromotorů je přeměna rotace hřídele na elektrickou energii. Jejich vhodnou volbou je možné výstupní elektrický výkon maximalizovat. Největším omezením při výběru jsou však rozměry elektrického motoru.

Cílem výběru bylo vyhledat bezkartáčový DC elektromotor s co nejvyšší hodnotou  $KV$ , tedy otáček na 1 Volt. Vybrán byl elektromotor BOOST 10<sup>11</sup> společnosti Pichler  $KV = 1400 \text{ ot./V}$ , který váží  $49 \text{ g}$  (Obrázek 37)<sup>[89]</sup>. Připevněný

<sup>11</sup> Dostupné zde: <https://shop.pichler.de/Brushless-Motor-BOOST-10-KV1400>





je k ochranné schránce pomocí přepážky, skrze kterou je elektromotor přišroubován. Přepážka nahrazuje přípevňovací elementy, které jsou součástí balení elektromotoru.



Obrázek 37 Bezkartáčový DC elektromotor Pichler

Alternativou může být elektromotor BOOST 15<sup>12</sup>, který má příznivější hodnotu  $KV = 1000 \text{ ot./V}$ , ale již by nemohl být použit v návrhu kvůli větším rozměrům.

Výrobci neuvádí přesné rozměry elektromotorů a jejich upevňovacích elementů (pouze vnější průměr a délku těla), proto je nutné upravit ostatní parametry po jejich změření. Rozměry elektromotoru BOOST 10 byly odhadnuty z obrázků a z technických výkresů, které společnost Pichler uvádí u větších modelů (přípevňovací šrouby jsou vymodelovány dle normy BN 1435<sup>13</sup>).

Kabeláž motorů je nutné vyvést mimo ochrannou schránku, k čemuž slouží díra v horní části ochranné schránky. Těsnění je docíleno pomocí těsnící pasty nebo tmelu.

### 10.6.2 Studený válec a ochranná schránka

Studený válec volně přechází v horní část ochranné schránky. Obě části mohou být vyrobeny z jednoho dílu či odděleně a následně svařeny dohromady. Dolní část ochranné schránky je připojena k horní části ochranné schránky pomocí 32 šroubů s válcovou hlavou a drážkou<sup>14</sup> dle normy ISO 1207 vyrobené z oceli pevnostní třídy 4.8. <sup>[42]</sup> Těsnění spoje ochranné schránky je docíleno pomocí plechu, který je po sešroubování deformovaný ochrannou schránkou. Těsnění může být vyříznuto z plechu pomocí laseru či jiné technologie a dolní ochrannou schránku je nutné vyrobit obráběním.

<sup>12</sup> <https://shop.pichler.de/Brushless-Motor-BOOST-15-KV1000>

<sup>13</sup> Dostupné například zde: <https://www.briol.cz/sroub-s-krizovou-drazkou-a-valcovou-hlavou-freedriv-bn-1435>

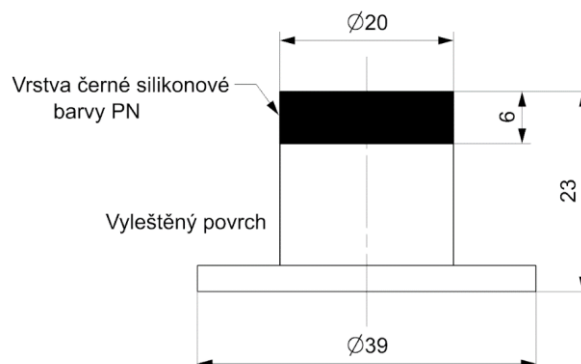
<sup>14</sup> Dostupné například zde: <https://www.briol.cz/sroub-s-drazkou-din-84a-valcova-hlava>



Vnější povrch (v kontaktu s vakuem) obou dílů ochranné schránky a studeného válce je pokryt vrstvou disponující vysokou emisivitou v infračerveném spektru. Zvolena byla bílá silikonová barva PCBE společnosti MAP Space Coatings, u které výrobce udává emisivitu  $E_R = 0,88$  a kterou lze použít v kosmickém prostředí (výběr viz předchozí kapitoly).<sup>[65][66]</sup>

### 10.6.3 Horký válec

Horký válec má především za úkol absorbovat sluneční energii a ohřívat pracovní látku uvnitř motoru. Může být vyrobený obráběním nebo tvářením s následnou úpravou povrchu. Horní část horkého válce je potažena vrstvou s vysokou absorptivitou ve spektru slunečního záření (Obrázek 38). Vybrána byla černá silikonová barva PN společnosti MAP Space Coatings s absorptivitou ve spektru solárního záření  $A_{PN} = 0,95$  a emisivitu v infračerveném spektru  $E_{PN} = 0,9$ . Zvolená barva je vhodná pro použití v kosmickém prostředí.<sup>[65]</sup> Zbytek neobarvené plochy v kontaktu s kosmickým prostředím je nutné dokončit úpravami povrchu, aby měl povrch co nejmenší drsnost, a tím i co nejmenší emisivitu (vhodná drsnost  $Ra = 0,1$ ) (viz předchozí kapitola).



Obrázek 38 Rozměry plochy potažené barvou PN

Horký válec je spojen se studeným válcem pomocí 8 šroubů s válcovou hlavou a drážkou dle normy ISO 1207 vyrobené z oceli pevnostní třídy 4.8. Pod hlavu šroubů jsou použity pružné podložky<sup>15</sup> dle normy DIN 7980 (ekvivalent ČSN 02 1740) vyrobené z pružinové oceli, které působí proti samovolnému povolání šroubů.<sup>[42]</sup>

<sup>15</sup> Dostupné například zde: <https://www.briol.cz/podložka-pruzna-din-7980-pro-srouby-s-valcovou-hlavou>



Mezi horkým a studeným válcem musí být vůle, aby bylo eliminováno vedení tepla přes styk válců. Těsnění je docíleno pomocí těsnícího kroužku, který je špatným vodičem tepla. Během montáže horkého válce těsnící kroužek deformuje horký i studený válec.

#### 10.6.4 Spojovací mechanismus

Kompletní mechanismus, který spojuje ozubená kola a pracovní a posunovací píst je tvořen sestavou ramen, čepů a pojistných kroužků. Díly skupiny ramen jsou nenormalizované části vyrobené obráběním nebo vyřiznutím z plechu laserem či jinou technologií.

Skupina dílů pojistných kroužků<sup>16</sup> je tvořena dle normy DIN 471 (ekvivalent ČSN 02 2930) vyrobené z pružinové nebo nerezové oceli. <sup>[42]</sup> Skupina dílů čepů s hlavou byla navržena dle normy ČSN EN 22341 (ČSN 02 2109), avšak je nutné čepy vyrobit, jelikož kupované čepy mají nevyhovující drsnost a tolerance povrchu pro dané použití (případně je možné čepy koupit a následně provést úpravu povrchu a obrobit drážku pro pojistný kroužek).

#### 10.6.5 Vyvážení

Důležitým aspektem je celkové silové vyvážení motoru. Ozubená kola a elektromotory se vyvažují navzájem opačnou rotací, jelikož jsou ozubená kola v soukolí a elektromotory umístěny zrcadlově přes plochu.

Translační pohyb pístů, čepů, pojistných kroužků a jejich ramen je nutné vyvážit protichůdným závažím. Závaží umístěné na ozubených kolech by bylo efektivní pouze v případě harmonického pohybu pístů. Proto není možné replikovat pouze hmotnost pístů, ale i jejich pohyb. Zároveň je nutné, aby se závaží pohybovalo v ose, ve které se pohybují písty, aby nedocházelo k rotaci celého cubesatu. Vyvážení translačního pohybu pístů bude po vyrobení docíleno experimentálním měřením.

#### 10.6.6 Spojení Stirlingova motoru a cubesatu

Ochranná schránka a odrazná plocha je spojena s konstrukcí CubeSatu pomocí imbus šroubů s půlkulatou hlavou<sup>17</sup> dle normy ISO 7380 vyrobené z oceli pevnostní třídy 4.8. <sup>[42]</sup> Dolní část ochranné schránky obsahuje ploché výstupky

<sup>16</sup> Dostupné například zde: <https://www.briol.cz/pojistny-krouzek-din-471-pro-hridele-s-drazkou>

<sup>17</sup> Dostupné například zde: <https://www.briol.cz/sroub-imbus-pulkulata-hlava-iso-7380>



s dírou pro šroub, které mohou být vyrobeny obráběním společně s ochrannou schránkou nebo vyrobeny z plechu a následně navařeny. Obdobné ploché výstupky se nachází i na odrazné ploše, které by z důvodu ochrany tvaru odrazné plochy bylo vhodné vyrobít tvářením přednostně a následně tvářením docílit přesného tvaru odrazné plochy. Mezi studeným válcem a odraznou plochou je z důvodu izolace ponechána vůle. Odrazná plocha vytváří svou polohou stín celého Stirlingova motoru (kromě horkého válce).

## 10.7 Výběr materiálu

Výběr vhodného materiálu pro daný díl (Tabulka 5) ovlivňují zejména hlediska: odolnost proti korozi, tepelné vlastnosti, vliv kosmického prostředí na materiál a technologické požadavky na výrobu dílu. Materiál by měl být dobře obrobitelný nebo dobře tvarovatelný a měl by se vyrábět ve vhodných polotovarech.

Díly Stirlingova motoru potřebují dosáhnout různých vlastností, proto byly zvoleny hliníkové slitiny a korozivzdorné oceli jako základní skupiny výběru z důvodu jejich dobré korozivzdornosti a možnosti je kombinovat s jinými typy slitin. Ze stejného důvodu nebyly použity slitiny mědi, které by nepříznivě ovlivňovaly jiné materiály, i když by byly ideální kvůli jejich nejvyšší tepelné vodivosti. Nevýhodou slitin mědi je také nepříznivá reakce s atomárním kyslíkem, který se vyskytuje na nízké oběžné dráze. <sup>[70]</sup> Výběr z hliníkových slitin dále omezuje obsah hořčíku, který by dle normy ECSS-Q-ST-70-36C neměl přesáhnout 3 % při vysokoteplotních aplikacích nad 66 °C. <sup>[39]</sup>

Posledním kritériem výběru byla dostupnost na trhu, proto byly zvoleny velmi rozšířené materiály v průmyslu. Vybrána byla hliníková slitina 1050, která dosahuje vysokých hodnot tepelné vodivosti a využívá se na výrobu zrcadel a reflektorů, hliníková slitina 6061, která má vyšší pevnost než slitina 1050 za cenu málo snížené tepelné vodivosti, a korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 (dle normy AISI označena 304 a dle normy ČSN označena 17 240), která je využita kvůli nízké tepelné vodivosti. Porovnání všech vybraných materiálů lze vidět v tabulce 4.



| Materiál                      |                             | EN AW-1050A | EN AW-6061              | X5CrNi18-10             |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|
| Hustota                       | $[\rho] = \text{kg/m}^3$    | 2700        | 2700                    | 8000                    |
| Tepelná vodivost              | $[\lambda] = \text{W/mK}$   | 230         | 209                     | 16,2                    |
| Polotovary                    |                             | plechy      | tyče, trubky,<br>plechy | tyče, trubky,<br>plechy |
| Obrobitelnost                 |                             | špatná      | dostačující             | dobrá                   |
| Tvarovatelnost                |                             | výborná     | dobrá                   | dobrá                   |
| Reakce s kosmickým prostředím |                             | žádná       | žádná                   | žádná                   |
| Korozivzdornost               |                             | vysoká      | vysoká                  | vysoká                  |
| Obsah hořčíku                 | $[\text{Mg}] = \%$          | 0,05        | 0,8 - 1,2               | 0                       |
| Teplotní roztažnost           | $[\alpha] = \mu\text{m/mK}$ | 23,5        | 23,4                    | 16,9                    |

Tabulka 4 Porovnání vybraných materiálu dle základních hledisek

| Díl                         | Materiál    | Polotovar |
|-----------------------------|-------------|-----------|
| Horký válec                 | EN AW-6061  | Tyč       |
| Studený válec               | EN AW-6061  | Tyč       |
| Posunovací píst             | X5CrNi18-10 | Tyč       |
| Posunovací rameno           | EN AW-6061  | Tyč       |
| Pracovní píst               | X5CrNi18-10 | Tyč       |
| Pracovní rameno             | EN AW-6061  | Tyč       |
| Rameno                      | EN AW-6061  | Plech     |
| Ozubená kola                | X5CrNi18-10 | Tyč       |
| Odrážná plocha              | EN AW-1050A | Plech     |
| Horní ochranná schránka     | EN AW-6061  | Tyč       |
| Dolní ochranná schránka     | EN AW-6061  | Tyč       |
| Deformační kroužek válec    | X5CrNi18-10 | Trubka    |
| Těsnění ochranná schránka   | EN AW-1050A | Plech     |
| Čep                         | X5CrNi18-10 | Tyč       |
| Šroub M2x6                  | Ocel        | Kupované  |
| Šroub M2x10                 |             |           |
| Šroub M3x5                  |             |           |
| Šroub M4x12                 |             |           |
| Šroub Stavěcí               |             |           |
| Pružná podložka             |             |           |
| Posunovací pojistný kroužek |             |           |
| Pracovní pojistný kroužek   |             |           |
| Čep posjtný kroužek         |             |           |

Tabulka 5 Materiály, polotovary a technologie výroby dílů

Horký válec by mohl být vyroben i z hliníkové slitiny 1050 tvářením a alternativou ke korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 by mohla být titanová slitina Ti 6Al-4V. [53]



## 10.8 Drsnosti a tolerance spojů

Plynulý a dlouhodobý chod motoru je závislý na přesné výrobě, hladkém povrchu a nízkých rozměrových a geometrických tolerancích. Všechny spoje hřídele v díře ve Stirlingově motoru jsou popsány v tabulce 6.

| Díra                | Hřídel          | Uložení | Drsnost díra | Drsnost hřídel |
|---------------------|-----------------|---------|--------------|----------------|
| Studený/Horký válec | Pracovní píst   | H7/g6   | Ra 0,2       | Ra 0,2         |
| Pracovní píst       | Posunovací píst | H7/g6   | Ra 0,2       | Ra 0,2         |
| Posunovací rameno   | Posunovací píst | H7/f7   | Ra 0,8       | Ra 0,8         |
| Pracovní rameno     | Pracovní píst   | H7/f7   | Ra 0,8       | Ra 0,8         |
| Rameno              | Čep             | H7/g6   | Ra 0,4       | Ra 0,4         |
| Ozubené kolo        | Rameno          | H7/g6   | Ra 0,4       | Ra 0,4         |
| Elektromotor        | Ozubené kolo    | H7/f7   | Ra 0,8       | Ra 0,8         |

Tabulka 6 Tolerance a drsnosti uložení hřídelů v díře

Předepsané drsnosti mohou být docíleny broušením, leštěním, superfinišováním a honováním. <sup>[54]</sup> Rozdílnou teplotní roztažnost oceli X5CrNi18-10 a hliníkových slitin 1050 a 6061 lze zanedbat, jelikož nepřesnosti dané předepsanými tolerancemi dosahují několikanásobných hodnot z důvodu malých rozměrů motoru. <sup>[46][50][51][52]</sup>

Tření způsobené pohybem spojů je možné snížit mazivem. Jelikož byl zvolen pracovní látkou vzduch, musí být využita suchá maziva, například grafit (viz předchozí kapitola).

Speciální požadavek na povrch má díl odrazná plocha, která musí být vyleštěn pro dosažení co nejvyšší hodnoty reflektance, proto je povrchu předepsána drsnost  $Ra 0,1$ .

Hřídel elektromotoru je uložena v ozubeném kole s vůlí. Převod momentu je docílen pomocí stavěcího imbus šroubu<sup>18</sup> dle normy ISO 4026 vyrobené z oceli.

<sup>18</sup> Dostupné například zde: <https://www.briol.cz/sroub-staveci-imbus-din-913-se-srazenym-koncem>



## 11 Analýza návrhu

Analýza navrženého Stirlingova motoru vychází ze stanovení, kolik dokážou díly ochranné schránky a studeného válce vyzářit energie mimo CubeSat.

Výpočtem tepelné bilance a při platnosti předpokladů:

- Stirlingův motor neodebírání žádný výkon,
- CubeSat vyzářuje energii pouze vnější plochou (plocha v kontaktu s vakuem) dílů ochranné schránky a studeného válce o emisivitě v infračerveném spektru  $E_R = 0,88$ ,
- CubeSat přijímá sluneční záření  $I_{SP}$  plochou  $S_{SP}$  o velikost jedné strany družice a absorptivitou  $A_{SP} = 0,95$ ,
- CubeSat přijímá odražené záření od Země  $I_{AL}$  plochou  $S_{AL}$  danou úhlopříčkami družice a absorptivitou  $A_{AL} = 0,88$ ,

Ize zjistit maximální průměrnou teplotu radiátoru, kterou reálně radiátor nikdy nedosáhne:

$$I_{SP} \cdot A_{SP} \cdot S_{SP} + I_{AL} \cdot A_{AL} \cdot S_{AL} = \sigma \cdot T_{PR}^4 \cdot E_R \cdot S_R,$$

$$T_{PR} = \sqrt[4]{\frac{(I_{SP} \cdot A_{SP} \cdot S_{SP} + I_{AL} \cdot A_{AL} \cdot S_{AL})}{\sigma \cdot E_R \cdot S_R}},$$

$$T_{PR} = \sqrt[4]{\frac{(1366 \cdot 0,95 \cdot 0,01 + 200 \cdot 0,88 \cdot 0,014144)}{5,6704 \cdot 10^{-8} \cdot 0,88 \cdot 0,0317663}},$$

$$T_{PR} = 314,29 \text{ K},$$
(11.1)

kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta a obsahy ploch byly zjištěny pomocí programu Siemens NX a elektronické příloze A.

Reálná teplota bude nižší, avšak čím bude měřena blíže ke studenému válci, tím bude hodnota stoupat. Nejnižší teplota pracovní látky (body 3 a 4 na obrázku 32 a grafu 5) uvnitř válců by mohla dosahovat  $T_4 = 353 \text{ K}$  při konzervativním odhadu.

Stanovením očekávané teploty  $T_4$  je možné pokračovat určením nejvyšší teploty pracovní látky při tepelné oběhu. Družice přijímá sluneční energii jejím odrazem od odrazné plochy do horkého válce. Množství energie je dáno součtem



$S_{OP+}$  ploch průmětu paraboloidu odrazné plochy do roviny kolmé na sluneční paprsky a podstavy horkého válce:

$$\begin{aligned}\Phi_{OP} &= R_{OP} \cdot A_{PN} \cdot k_S \cdot I_{SP} \cdot S_{OP+}, \\ \Phi_{OP} &= 0,88 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 1366 \cdot 0,004614 = 4,742 \text{ W},\end{aligned}\quad (11.2)$$

kde  $R_{OP}$  je reflektivita odrazné plochy,  $A_{PN}$  absorptivita vrstvy černé barvy na horkém válci,  $k_S$  koeficient uvažující chyby výroby.

Horký válec využije absorbovanou energii na ohřev pracovní látky  $\dot{Q}_{IN}$  nebo jí vyzáří přes vrstvu černé barvy  $\Phi_{PN}$  a zbytkem vnějšího povrchu  $\Phi_{HV}$ :

$$\begin{aligned}\Phi_{OP} &= \dot{Q}_{IN} + \Phi_{PN} + \Phi_{HV}, \\ \Phi_{OP} &= n \cdot m_{PL} \cdot c_{PL} \cdot (T_1 - T_4) + \sigma \cdot T_1^4 \cdot E_{PN} \cdot S_{PN} + \\ &\quad + \sigma \cdot T_1^4 \cdot E_{HV} \cdot S_{HV}.\end{aligned}\quad (11.3)$$

Po dosažení teploty  $T_1$  lze z rovnice 11.3 vypočítat otáčky motoru  $n$ . Teplotu  $T_1$  je možné určit z požadované tepelné účinnosti Carnotova cyklu, která byla stanovena na hodnotu  $\eta = 0,35$ :

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \frac{T_4}{T_1}, \\ T_1 &= \frac{T_4}{1-\eta} = \frac{353}{1-0,35} = 543,08 \text{ K}.\end{aligned}\quad (11.4)$$

Z rovnice 11.3 následně vychází otáčky motoru  $n = 1,24 \text{ ot./s}$ .





## 12 Závěr

Diplomová práce měla za úkol navrhnout Stirlingův motor pro použití v družici typu cubesat, která by byla vypuštěna na nízkou oběžnou dráhu. Cílem bylo zajistit podobné účinnost a výkon, jaký by bylo možné očekávat od fotovoltaických článků. Podmínkou bylo možnost motor opakovaně rozebrat.

V první části diplomové práce autor popsal předchozí vývoj, typy konfigurací a jejich specifika. Dále se zabýval možnými mechanismy přesunu tepelné energie a jejím zdrojem.

Návrh tepelného oběhu předcházelo stanovení oběžné dráhy družice, která byla pro zjednodušení uvažována heliosynchronní. Družice by při takové dráze byla konstantně osvětlena. Pomocí odhadu tepelného oběhu, byla zjištěna maximální hmotnost pracovní látky. Beta konfigurace s rhombickým pohonem byla zvolena z důvodu úspory prostoru v družici a silového vyvážení motoru.

Problémovým bodem návrhu je odhad rozdílu teploty  $T_1$  a teploty horkého válce a rozdílu teploty  $T_4$  a teploty studeného válce. Experimentální měření či simulace ohřevu pracovní látky je pro přesnější návrh nutností.



## Seznam použité literatury

- [1] REID, John S.. Stirling Stuff. *University of Aberdeen* [online]. Datum neveden [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1604/1604.02362.pdf>
- [2] LOVERIDGE, D.W.. Robert Stirling – Preacher and Inventor. *Taylor & Francis Online* [online]. 31.1.2014 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/tns.1978.001?needAccess=true&journalCode=yhet19>
- [3] WOERLEN, Isaac. Robert Stirling. *Hot Air Engines* [online]. Datum neveden [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <http://hotairengines.org/inventors/stirling>
- [4] SCOTTISH ENGINEERING HALL OF FAME. Reverend Doctor Robert Stirling. *Scottish Engineering Hall of Fame* [online]. Datum neveden [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <http://www.engineeringhalloffame.org/profile-stirling.html>
- [5] ORGAN, Allan J.. *Stirling Cycle Engines: Inner Workings and Design*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2014, 296 s. ISBN 9781118818428.
- [6] BACHELIER, Camille. Stirling Engines. *Royal Institute of Technology Stockholm* [online]. červenec 2009 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [http://smarthome.duke.edu/sites/smarthome.duke.edu/files/KTH\\_Stirling\\_Engine.pdf](http://smarthome.duke.edu/sites/smarthome.duke.edu/files/KTH_Stirling_Engine.pdf)
- [7] URIELI, Israel. Alpha Stirling Engines. *Ohio University* [online]. Datum neveden [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html>
- [8] URIELI, Israel. Beta Type Stirling Engines. *Ohio University* [online]. Datum neveden [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/beta.html>
- [9] URIELI, Israel. Gamma Type Stirling Engines. *Ohio University* [online]. Datum neveden [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/gamma.html>
- [10] QIU, Songgang a Laura, SOLOMON. Free-Piston Stirling Engine Generators. *IntechOpen* [online]. 5.3.2018 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/energy-conversion-current-technologies-and-future-trends/free-piston-stirling-engine-generators>



- [11] BROESKA, Sergei. Flat Plate Solar Stirling Engine. *YouTube* [online]. 21.5.2016 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=8QE-CmKxz40>
- [12] BROESKA, Sergei. Flat Plate Solar Stirling Engine. *Create the Future* [online]. 22.5.2016 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://contest.techbriefs.com/2016/entries/sustainable-technologies/6615>
- [13] UNT Stirling Engine Research Group. Animation of an innovative rotary displacer Stirling engine. *YouTube* [online]. 18.2.2016 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=kcp61Ob933c>
- [14] GOLDEN REVIEWER. Rotary Displacer Stirling Engine Final Version. *YouTube* [online]. 7.8.2014 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Q3KE0OBRI6E>
- [15] MDEVINK. Rotary Displacer Stirling LTD Engines. *YouTube* [online]. 30.9.2008 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=V\\_K8mpe9tjY](https://www.youtube.com/watch?v=V_K8mpe9tjY)
- [16] JEPLANS. Rotary Heat Engine Part 3.1 Air Delivery System. *YouTube* [online]. 11.1.2014 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=nVrM1iFqihE>
- [17] BASTLER48. Rotary-Stirling-Engine with magnetical coupling to Displacer. *YouTube* [online]. 12.2.2019 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=rcEkObqHe4Q>
- [18] REICHL, Jaroslav a Martin, VŠETIČKA. Peltierův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. Datum neveden [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [19] ŠESTÁK, Jiří a František, RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993, 299 s. ISBN 80-01-00957-2.
- [20] STARTALK. Neil deGrasse Tyson Explains Heat vs Temperature. *YouTube* [online]. 3.3.2021 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=yzUFXcC\\_P2Q](https://www.youtube.com/watch?v=yzUFXcC_P2Q)
- [21] THE CHEMISTRY DICTIONARY. Definition of Temperature. *Chemicool Dictionary* [online]. Datum neveden [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://www.chemicool.com/definition/temperature.html>



- [22] PUCHOLT, Zdeněk. Vedení tepla. *Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci* [online]. Datum neveden [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: [http://www.matfyz.eu/dokumenty/olomouc/labcv/molekulftmd/U06\\_vedeniTepla.pdf](http://www.matfyz.eu/dokumenty/olomouc/labcv/molekulftmd/U06_vedeniTepla.pdf)
- [23] GANJI, Davood Domairry a Amin, SEDIGHIAMIRI. Radiation Heat Trasfer. *ScienceDirect* [online]. 2018 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/radiation-heat-transfer>
- [24] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. Solid Phase Heat Capacity (Shomate Equation). *NIST* [online]. Datum neveden [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7440508&Units=SI&Mask=7&Type=JANAFS&Table=on#JANAFS>
- [25] DEZIEL, Chris. The Effect of Wavelength on Photovoltaic Cells. *Sciencing* [online]. 15.12.2020 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://sciencing.com/effect-wavelength-photovoltaic-cells-6957.html>
- [26] DUNBAR, Brian. Solar Irradiance. *NASA* [online]. 27.11.2017 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sdo/science/solar-irradiance.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sdo/science/solar-irradiance.html)
- [27] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Solar Cycle Progression. *Space Weather Prediction Center* [online]. Datum neveden [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
- [28] WEN, Guoyong. Solar Radiation. *Goddard Earth Science Research* [online]. 4.1.2021 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://earth.gsfc.nasa.gov/climate/research/solar-radiation>
- [29] DUNBAR, Brian. Solar Cycle 25 Is Here. NASA, NOAA Scientists Explain What That Means. *NASA* [online]. 4.1.2021 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/press-release/solar-cycle-25-is-here-nasa-noaa-scientists-explain-what-that-means>
- [30] DUNBAR, Brian. Total Solar Irradiance: The Sun Also Changes. *NASA* [online]. 24.6.2010 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/Glory/solar\\_irradiance/total\\_solar\\_irradiance.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/Glory/solar_irradiance/total_solar_irradiance.html)
- [31] KOPP, Greg. Total Solar Irradiance Data. *Solar Radiation & Climate Experiment* [online]. 25.2.2020 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://lasp.colorado.edu/home/sorce/data/tsi-data/>



- [32] ZIRIN, Harold. Solar cycle. *Britannica* [online]. 29.1.2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/solar-cycle>
- [33] LI, Hui. Solar Spectrum. *ScienceDirect* [online]. 2016 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-spectrum>
- [34] LISBONA, Emilio Fernandez. Spectral Irradiance. *ScienceDirect* [online]. 2013 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/spectral-irradiance>
- [35] LINDSEY, Rebecca. Climate and Earth`s Energy Budget. *Earth Observatory* [online]. 14.1.2009 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>
- [36] DERVIS, Erol, HAYRI, Yaman a Dogan BATTAL. A review development of rhombic drive mechanism used in the Stirling engines. *ScienceDirect* [online]. 15.5.2017 [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117306597>
- [37] VÁCLAVÍK, Michal. Podklady k předmětu Kosmické systémy. [cit. 2021-07-15].
- [38] ISISPACE. CubeSat information. *ISISPACE* [online]. Datum neuveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.isispace.nl/cubesat-information/>
- [39] ECSS. Norma ECSS-Q-70-36C. *ECSS* [online]. 6.3.2009 [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <http://esmat.esa.int/ecss-q-st-70-36c.pdf>
- [40] PRIMAPOL. Hliníkové slitiny. *PRIMAPOL* [online]. Datum neuveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://www.primapol.cz/produkty/hlinik/>
- [41] ALUMECO. Použití slitiny. *ALUMECO* [online]. Datum neuveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://www.alumeco.cz/technick%C3%A9-informace/%C3%BA-daje-o-hlin%C3%ADku/pou%C5%BEit%C3%AD-slitiny>
- [42] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. Albra, 2017, 943 s. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [43] PROAL. Slitina EN AW-1050A (Al99.5). *PROAL* [online]. Datum neuveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-1050a/>



- [44] ALUNET. EN AW-1050 0 (Al99,5 W7), EN AW – 1050A H14/H24 (Al99,5 F11/G11). *ALUNET* [online]. Datum neveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-1050>
- [45] MAKEITFROM. 1050 (A91050) Aluminium. *MakeItFrom.com* [online]. Datum neveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/1050-A91050-Aluminum>
- [46] AZO MATERIALS. Aluminum 1050 Alloy (UNS A91050). *AZO Materials* [online]. 13.9.2012 [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6586>
- [47] ALUMECO. Přírodní plechy/desky. *ALUMECO* [online]. Datum neveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://www.alumeco.cz/hlink/plechydesky/prodn-plechydesky/g/360>
- [48] BOLZANO. X5CrNi18-10. *BOLZANO* [online]. Datum neveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>
- [49] ALUMINCO. Aluminium Alloy EN-AW 6060. *Aluminco* [online]. Datum neveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: [https://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060\\_MATERIAL-DATA-SHEET\\_ALUMINCO.pdf](https://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060_MATERIAL-DATA-SHEET_ALUMINCO.pdf)
- [50] AALCO. Aluminium Alloy – Commercial Alloy – 6060 – T5 Extrusions. *aalco* [online]. Datum neveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: [https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6060-T5--Extrusions\\_144.ashx](https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6060-T5--Extrusions_144.ashx)
- [51] LENNTECH. Stainless Steel 304. *LENNTECH* [online]. Datum neveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://www.lenntech.com/stainless-steel-304.htm>
- [52] THYSSENKRUPP. Stainless Steel 304 1.4301. *thyssenkrupp* [online]. Datum neveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-304-14301.html>
- [53] NEONICKEL. Ti 6Al-4V (jakost 5). *NeoNickel* [online]. Datum neveden [cit. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-titanu/ti-6al-4v-jakost-5/>
- [54] VYSOKÁ ŠKOLA BĀŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Technologie obrábění. *Fakulta strojní* [online]. 2013 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-](https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-)



- learning/Technologie%20obrabeni%2005%20Brou%C5%A1en%C3%AD%20a%20dokon%C4%8Dovac%C3%AD%20operace%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf
- [55] ELUC. Leštění. *Eluc* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1387>
- [56] HYDRAULICS. Honování. *Hydraulics* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.hydraulics.cz/25042-honovani>
- [57] FEDERAL MOGUL. Návod na instalaci. *FEDERAL MOGUL* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.elit.cz/cs/download/glyco-navod-na-montaz-motorovych-lozisek.pdf>
- [58] ACKTAR. Acktar Brochure. *ACKTAR* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://www.acktar.com/wp-content/uploads/2017/10/Acktar\\_brochure.pdf](https://www.acktar.com/wp-content/uploads/2017/10/Acktar_brochure.pdf)
- [59] ACKTAR. Fractal Black. *ACKTAR* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.acktar.com/product/fractal-black/>
- [60] TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Emisivita běžných materiálů. *Fakulta bezpečnostního inženýrství* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/030/.content/galerie-souboru/studijni-materialy/TechnickaMereni/5\\_EmisivitaBeznychMaterialu.pdf](https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/030/.content/galerie-souboru/studijni-materialy/TechnickaMereni/5_EmisivitaBeznychMaterialu.pdf)
- [61] WIZARD191. Specular reflectance of cupric oxide. *Wikimedia Commons* [online]. 4.9.2009 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Specular\\_reflectance\\_of\\_cupric\\_oxide.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Specular_reflectance_of_cupric_oxide.svg)
- [62] Thermal Conductivity of Metals, Metallic Elements and Alloys. *The Engineering ToolBox* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d\\_858.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html)
- [63] HELMICH, Martin. Podklady k předmětu Pohon letadel. [cit. 2021-07-15].
- [64] OHIO UNIVERSITY. Properties of Various Ideal Gases (at 300 K). *Ohio university* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property\\_tables/gas/idealGas.html](https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/gas/idealGas.html)



- [65] KATSIR, Dina. Black & White Thermal Control Coatings Comparison Experiment. *Acktar* [online]. 11.3.2021 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.acktar.com/thermal-control-coatings/>
- [66] MAP SPACE COATINGS. Documentation. *MAP Space Coatings* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.map-coatings.com/en/page/documentation.php>
- [67] TESTO. Hodnoty emisivit nejdůležitějších materiálů. *testo* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://www.testo.com/cz-CZ/Hodnoty+emisivit+nejd%C5%AFle%C5%BEit%C4%9Bj%C5%A1%C3%ADch+materi%C3%A1l%C5%AF/services\\_knowledgeable\\_thermography\\_emissivity\\_table](https://www.testo.com/cz-CZ/Hodnoty+emisivit+nejd%C5%AFle%C5%BEit%C4%9Bj%C5%A1%C3%ADch+materi%C3%A1l%C5%AF/services_knowledgeable_thermography_emissivity_table)
- [68] ZOLTÁN, Sárosi, KNAPP, W., KUNZ, A. a K. WEGENER. Evaluation of reflectivity of metal parts by a thermo-camera. *Semantic Scholar* [online]. 2010 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-reflectivity-of-metal-parts-by-a-S%C3%A1rosi-Knapp/c2570f834b0138cb937c7e8018fb4379899e2b95>
- [69] Reflecting on Space Benefits: A Shining Example. *SPACEMATDB* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2006/ch\\_9.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2006/ch_9.html)
- [70] SPACEMATDB. Space Materials DataBase. *NASA* [online]. 2006 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.spacematdb.com/spacemat/>
- [71] KOLÁŘ, Jan. Podklady k předmětu Kosmické mise. [cit. 2021-07-15].
- [72] KOUSAL, Jaroslav. Podklady k předmětu Nebeská mechanika a astrodynamika. [cit. 2021-07-15].
- [73] Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient at Varying Temperature and Constant Pressures. *The Engineering ToolBox* [online]. Datum neveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d\\_600.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html)
- [74] WHEELER, Richard. Alpha Stirling. *Wikimedia Commons* [online]. 4.12.2010 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alpha\\_Stirling.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alpha_Stirling.gif)
- [75] YK Times. Stirling Animation. *Wikimedia Commons* [online]. 14.11.2007 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stirling\\_Animation.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stirling_Animation.gif)





- [76] IONUTZMOVIE. BetaStirlingTG4web. *Wikimedia Commons* [online]. 28.10.2010 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BetaStirlingTG4web.svg>
- [77] SOLAR IMPULSE FOUNDATION. Free Piston Resonance Stirling Engine. *Solar Impulse Foundation* [online]. Datum neuveden [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://solarimpulse.com/efficient-solutions/free-piston-resonance-stirling-engine#>
- [78] FIGUPER. Wiens law. *Wikimedia Commons* [online]. 3.3.2015 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wiens\\_law.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wiens_law.svg)
- [79] HILL, Steele. Total Solar Irradiance: The Sun Also Changes. *NASA* [online]. 24.6.2010 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/Glory/solar\\_irradiance/total\\_solar\\_irradiance.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/Glory/solar_irradiance/total_solar_irradiance.html)
- [80] CHIAMIQOV, Xiong. Solar Cycle Variations. *Wikimedia Commons* [online]. 1.2.2008 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar-cycle-data.png>
- [81] ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, INC.. Average Yearly Sunspot Numbers. *Britannica* [online]. 2012 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/solar-cycle>
- [82] TUVALKIN. Spectrum of Solar Radiation (Earth). *Wikimedia Commons* [online]. 13.5.2019 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_spectrum\\_en.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_en.svg)
- [83] SIMMON, Robert. ISS013-E-8948. *Earth Observatory* [online]. 14.1.2009 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>
- [84] NASA EARTH OBSERVATIONS. Energy Global Maps. *NASA Earth Observations* [online]. 2020 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/>
- [85] ROHDE, Robert. Climate and Earth's Energy Budget. *Earth Observatory* [online]. 14.1.2009 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>
- [86] ISISPACE. CubeSat Dimensions. *ISISPACE* [online]. 22.9.2014 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://www.isispace.nl/wp-content/uploads/2015/12/ISIS.STS\\_0.1.001-RevB-Sheet1-1-1U-CubeSat-Dimensions-A0.pdf](https://www.isispace.nl/wp-content/uploads/2015/12/ISIS.STS_0.1.001-RevB-Sheet1-1-1U-CubeSat-Dimensions-A0.pdf)



- [87] BANKS, Bruce A., MILLER, Sharon a Kim de GROH. Low Earth Orbital Atomic Oxygen Interactions With Materials. *ResearchGate* [online]. srpen 2004 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Atomic-oxygen-flux-versus-altitude-for-solar-minimum-nominal-standard-atmosphere-and\\_fig2\\_237393396](https://www.researchgate.net/figure/Atomic-oxygen-flux-versus-altitude-for-solar-minimum-nominal-standard-atmosphere-and_fig2_237393396)
- [88] M0TTY, WHEELER, Richard, KMOTE. Stirlingův motor. *Wikimedia Commons* [online]. 2010 , 2011 [cit. 2021-07-15]. [https://cs.wikipedia.org/wiki/Stirling%C5%AFv\\_motor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Stirling%C5%AFv_motor)
- [89] PICHLER. Brushless Motor BOOST 10. *PICHLER* [online]. Datum neuveden [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://shop.pichler.de/Brushless-Motor-BOOST-10-KV1400>



## **Seznam použitých programů**

[1] Siemens NX 12

[2] Microsoft Excel



## Elektronická příloha A

Soubor StirlinguvMotor.rar obsahující:

- model sestavy
  - Sestava.prt
- modely dílů
  - Cep.prt
  - CepPojistnyKrouzek.prt
  - CubeSat.prt
  - DeformacniKrouzekValec.prt
  - EIMotorLevy.prt
  - EIMotorPravy.prt
  - HorkyValec.prt
  - HorniOchrannaSchranka.prt
  - LeveOzubeneKolo.prt
  - OdraznaPlocha.prt
  - PosunovaciPist.prt
  - PosunovaciPojistnyKrouzek.prt
  - PosunovaciRameno.prt
  - PracovniPist.prt
  - PracovniPojistnyKrouzek.prt
  - PracovniRameno.prt
  - PraveOzubeneKolo.prt
  - PruznaPodlozka.prt
  - Rameno.prt
  - SpodniOchrannaSchranka.prt
  - SroubM2x6.prt
  - SroubM2x10.prt
  - SroubM3x5.prt
  - SroubM4x12.prt
  - SroubStaveci.prt
  - StudenyValec.prt
  - TesneniOchrannaSchranka.prt