



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH STIRLINGOVA MOTORU PRACUJÍCÍHO PŘI NÍZKÉM ROZDÍLU TEPLIT

DESIGN OF STIRLING ENGINE OPERATING AT LOW TEMPERATURE
DIFFERENCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Adam Gavač

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Adam Gavač

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh Stirlingova motoru pracujícího při nízkém rozdílu teplot

v anglickém jazyce:

Design of Stirling Engine Operating at Low Temperature Difference

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Historie, princip a různé varianty Stirlingových motorů
3. Využití Stirlingových motorů, výhody a nevýhody v porovnání se spalovacími motory
4. Experimentální část
5. Diskuse
6. Závěr

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce bude návrh virtuálního modelu Stirlingova motoru pracujícího při nízkém rozdílu teplot. V práci bude rozebrána historie, popis, rozdělení a aplikace Stirlingova motoru. Práce bude obsahovat porovnání Stirlingových motorů s klasickými spalovacími motory. Pro realizaci Stirlingova motoru bude proveden návrh výroby konvenčními technologiemi a aditivní metodou Fused Deposition Modeling. Práce bude obsahovat diskusi, která bude zohledňovat problematické kroky, ke kterým docházelo v průběhu navrhování modelu a porovnání dvou různých technologií návrhu výroby modelu Stirlingova motoru.

Seznam odborné literatury:

1. PÍŠKA, M. a kol. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. HROMÁDKO, J., HROMÁDKO J., MILER, P., HONIG, V. Speciální spalovací motory. Česká zemědělská univerzita v Praze 1. vyd. 152 s. 2011. ISBN 978-80-213-2168-7.
3. FERNANDO S., COSTANTE M. Low temperature Stirling engines pressurised with real gas effects. Energy, vol. 75, 1st October 2014, p. 225-236. ISSN 0360-5442.
4. SHAZLY, J. H., HAFEZ, A. Z., SHENAWY, E. T., ETEIBA, M. B. Simulation, design and thermal analysis of a solar Stirling engine using MATLAB. Energy Conversion and Management, vol. 79, March 2014, p. 626-639. ISSN 0196-8904.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 20.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cieľom práce je oboznámiť čitateľa so všeobecne menej známou alternatívou ku spaľovacím motorom- Stirlingovým motorom. Hlavnými bodmi teoretickej časti sú popis termodynamiky Stirlingovho cyklu v rozsahu potrebnom pre pochopenie funkcie motora, matematické odvodenie účinnosti ideálneho cyklu a popis jednotlivých častí stroja. Poznatky získané v tejto časti práce boli použité pre návrh digitálneho modelu v parametrickom modelári Autodesk Inventor. Následne boli jednotlivé časti vyrobené kombináciou moderných a klasických technológií výroby, model bol zmotnovaný a otestovaný.

Kľúčové slová

stirlingov motor, stirlingov cyklus, aditívna výroba, fused deposition modeling, rapid prototyping

ABSTRACT

The aim of this study is to acquaint the reader with the Stirling engine, which is one of the possible alternatives to generally known combustion engine. The theoretical part has three major purposes: First is to describe thermodynamics of the Stirling cycle in the range that is essential for comprehension of the engine`s operating principle. Second is to mathematically derivate expression for the efficiency of the ideal Stirling cycle. Third is to discuss each of the essential parts of the device. Concepts acquired in the theoretical part were employed to design a digital model in the parametric modeler Autodesk Inventor. Parts were manufactured by a combination of typical and progressive technologies. Engine was assembled and tested afterwards.

Key words

stirling engine, stirling cycle, additive manufacturing, fused deposition modeling, rapid prototyping

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

GAVAČ, A. *Návrh Stirlingova motoru pracujícího při nízkém rozdílu teplot.* Brno 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 67 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

PPEHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Návrh Stirlingova motoru pracujúciho při nízkém rozdílu teplot** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

.....
Datum

.....
Adam Gavač

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som rád poďakoval vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Josefovi Sedlákovi, Ph.D. za odborné vedenie, podporu, cenné rady počas celej doby riešenia a za jeho čas, ktorý mi vždy ochotne venoval. Poďakovanie takisto patrí Ing. Ivanovi Šimončičovi za poskytnutie priestorov jeho firmy pre realizovanie projektu a Mgr. Dane Uhríkovej za jazykovú korekciu práce.

Súčasne by som chcel poďakovať svojim rodičom za podporu, ktorú mi počas celého doterajšieho štúdia poskytovali.

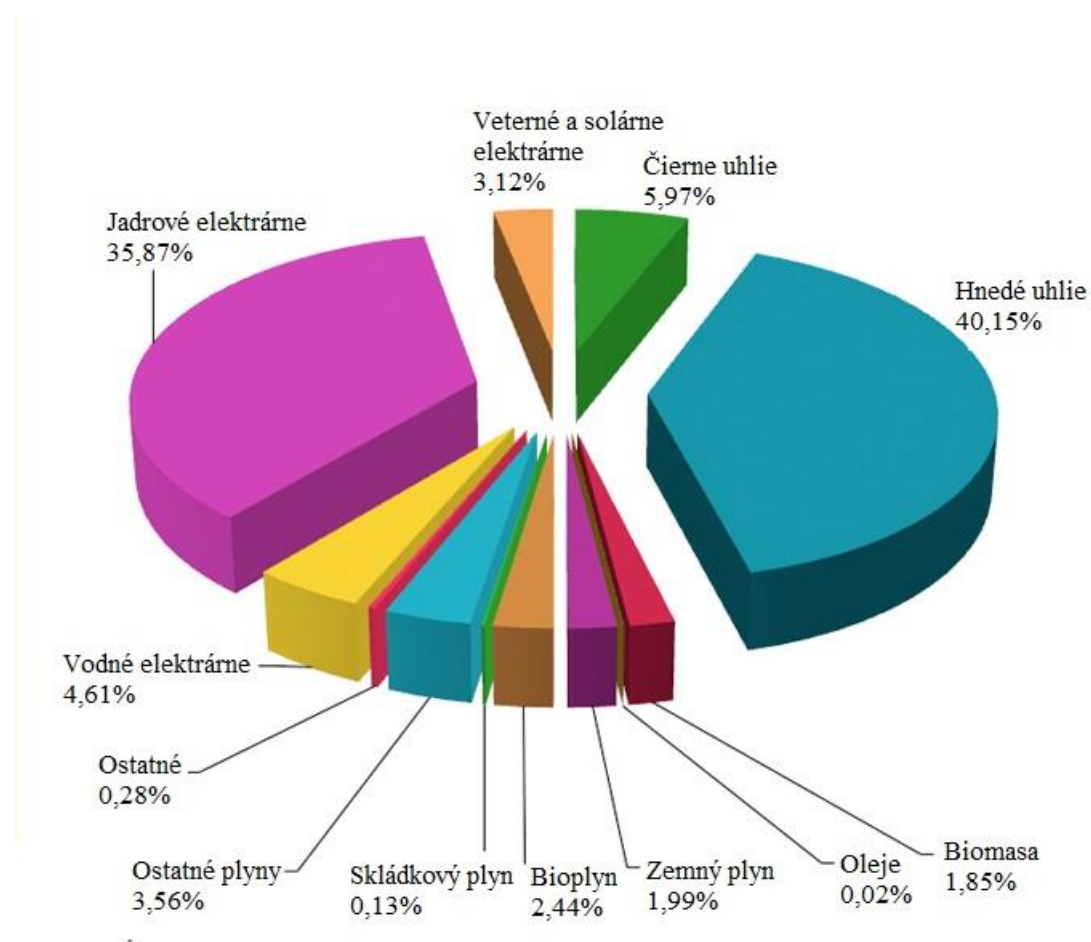
OBSAH

ABSTRAKT	4
PPEHLÁSENIE	5
POĎAKOVANIE	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 HISTÓRIA	11
1.1 Situácia, ktorá predchádzala vzniku Stirlingovho motora	11
1.2 Vznik Stirlingovho motora	11
1.3 Prvá etapa Stirlingových motorov	12
1.4 Druhá etapa Stirlingových motorov	13
1.5 Vývoj v súčasnosti	14
2 ČASTI STIRLINGOVHO MOTORA A ICH FUNKCIA	16
2.1 Výmenníky tepla	16
2.2 Premiestňovací piest	16
2.3 Pracovný piest	17
2.4 Regenerátor	17
2.5 Zvyšné časti motora	18
2.5.1 Kľukový hriadeľ	18
2.5.2 Zotrvačník	19
2.5.3 Pracovná látka	19
3 TERMODYNAMIKA A PRINCÍP FUNKCIE MOTORA	20
3.1 Ideálny Stirlingov cyklus	21
3.1.1 Izotermická kompresia	21
3.1.2 Izochorický ohrev	23
3.1.3 Izotermická expanzia	24
3.1.4 Izochorické ochladzovanie	25
3.2 Termická účinnosť ideálneho Stirlingovho cyklu modifikácie γ	29
3.3 Reálny Stirlingov cyklus	32
4 VARIANTY STIRLINGOVHO MOTORA	34
4.1 Konfigurácia Alfa (α)	34
4.2 Konfigurácia Beta (β)	35
4.3 Konfigurácia Gamma (γ)	36
4.4. Stirlingove motory pracujúce pri nízkom rozdielne teplôt	37

5	VÝHODY A NEVÝHODY STIRLINGOVÝCH MOTOROV V POROVNANÍ SO SPAĽOVACÍMI MOTORMI.....	38
5.1.	Výhody Stirlingovho motora v porovnaní s klasickým spaľovacím motorom.....	38
5.2.	Nevýhody Stirlingovho motora v porovnaní s klasickým spaľovacím motorom.....	39
6	NÁVRH STIRLINGOVHO MOTORA	40
6.1	Návrh dielov určených pre výrobu metódou FDM.....	41
6.1.1	Valec premiestňovacieho piestu	41
6.1.2	Premiestňovací piest	41
6.1.3	Podpora	42
6.1.4	Kľukový kotúč	43
6.1.5	Vidlica.....	44
6.1.6.	Ťahadlo krátke	44
6.1.7	Ťahadlo dlhé	45
6.1.8	Kľuka hriadeľa.....	45
6.1.9	Vložka pracovného piestu.....	45
6.1.10	Vložka pre uloženie ložísk.....	46
6.2	Diely vyrobené konvenčnými metódami obrábania	46
6.2.1	Teplá strana výmenníka tepla	46
6.2.2	Chladná strana výmenníka tepla	47
6.2.3	Pracovný piest.....	48
6.2.4	Valec pracovného piestu	48
6.2.5	Zotrvačník.....	49
6.3	Normalizované diely	49
7	VÝROBA MODELU	50
7.1	Príprava modelu pre tlač	50
7.2.	Tlač modelu	56
7.3.	Postprocessing	57
7.4.	Výroba neplastových dielov	58
7.5.	Montáž modelu	59
	DISKUSIA.....	61
	ZÁVER	63
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	64
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	66

ÚVOD

Hľadanie alternatívnych spôsobov výroby elektrickej energie je jednou z najdôležitejších a zároveň najurgentnejších úloh našej doby. Neuvážené využívanie lacných zdrojov, akým je napríklad uhlie, počas uplynulého storočia sa nepriaznivo a nenávratne podpísalo na kvalite životného prostredia. Aj napriek naliehaniu aktivistov a činnosti vládnych orgánov bolo v Českej republike v roku 2013 vyrobenej viac ako 46% energie spaľovaním čierneho a hnedého uhlia. Ďalších 35,87% bolo vyrobených v jadrových elektrárňach, ktoré sa takisto nepovažujú za ekologicky nezávadné. Pre porovnanie len 7,73% energie bolo vyrobenej vo veterných, slnečných a vodných elektrárňach [1]. Podiel týchto a ďalších zdrojov je uvedený v diagrame na obr. 1.



Obr. 1 Čistá výroba elektriny podľa paliva v Českej republike pre rok 2013 [1]

Vzhľadom k neudržateľnosti tejto situácie je nutné hľadať nové riešenia a nové ekologicky nezávadné spôsoby získania lacnej energie. Nízka cena je esenciálnou požiadavkou, pretože spoločnosť odmieta za elektrinu získanú ekologickou cestou platiť viac, ako by platila v prípade využitia menej priaznivých spôsobov výroby. Jedna z možných ciest ku nezávadnej a lacnej energii by mohla viesť práve cez v minulosti dlho opomínané Styrlingove motory.

Tie sú pre túto úlohu predurčené pre ich schopnosť zisku tepla potrebného pre chod z akéhokoľvek zdroja. To znamená, že môžu byť poháňané slnečným žiarením, alebo teplým prameňom vyvierajúcim na zemský povrch. Takisto môžu byť využité k výrobe dodatkovej energie z odpadového tepla a tak zlepšiť efektivitu daného procesu a znížiť teplotu odpadovej vody pred jej vypustením do prírody. Ďalšími výhodami týchto motorov sú nízka poruchovosť, vysoká účinnosť a minimálne požiadavky na údržbu.

Ideálnym riešením by bolo umiestnenie veľkého počtu motorov na morské dno v oblasti s teplými podzemnými prameňmi, ktorými by bol motor zahrievaný. Studená strana by bola chladená morskou vodou. Uložením motora hlboko pod morkú hladinu by navyše bolo možné dosiahnuť vysokého tlaku vo vnútri motora, čo výrazne zvyšuje jeho účinnosť. Tlak vo vnútri valca by bol vyrovnávaný tlakom vody a nebolo by teda potrebné použitie prehnane masívnej konštrukcie.

Nakoľko rozsah práce, finančné možnosti a doposiaľ dosiahnuté vedomosti autorovi nedovoľujú vyvinúť stroj, ktorý by dosahoval parametrov dostatočných pre zisk elektrickej energie, bude v praktickej časti vytvorený jednoduchý základný model, ktorý môže v budúcnosti slúžiť ako odrazový mostík pre ďalší projekt alebo na prezentačné účely. Štúdium umožní autorovi využiť a prakticky overiť doposiaľ nadobudnuté vedomosti z predmetov vyučovaných v bakalárskom štúdiu a načerpať nové poznatky z termodynamiky a konštrukcie strojov. Najdôležitejším bodom je však to, že sa autor bude mať možnosť zoznámiť s modernými výrobnými technológiami a pracoviskami, ktoré sú k dispozícii na Ústave strojírenskej technológie Vysokého učení technického, kde má v úmysle pokračovať v naväzujúcom magisterskom štúdiu.

1 HISTÓRIA

V prvej kapitole je stručne popísaná bohatá história Stirlingovho motora od vzniku prvého patentu, jeho rozvoja, následného úpadku do zabudnutia až po jeho nedávne „znovuobjavenie“. Táto časť práce ďalej obsahuje informácie o výskumoch, ktoré boli uskutočnené v najvýznamnejších svetových korporáciach zaoberajúcich sa skúmaním tohto špecifického zariadenia. Posledné strany kapitoly popisujú oblasti, v ktorých sa motor v dnešnej dobe bežne využíva.

1.1 Situácia, ktorá predchádzala vzniku Stirlingovho motora

Počas priemyselnej revolúcie, ktorá prebehla v 18. storočí, bol parný stroj najpoužívanejším priemyselným zariadením. Bol využívaný pre čerpanie tekutín, zdvíhanie ťažkých predmetov alebo chod rotačných mechanizmov. Na prelome 18. a 19. storočia došiel vývoj parných strojov do fázy, kedy boli obrovské motory schopné nahradiť prácu konského záprahu, alebo enormne veľkých vodných kolies [2]. Napriek ich nepopierateľnému úžitku, mali parné stroje mnoho nedostatkov. Jedným z nich bola nízka účinnosť, ktorá sa ešte aj na začiatku dvadsiateho storočia stále pohybovala len v oblasti 2 až 10% [2]. Napriek nízkej cene uhlia sa mnohí majitelia závodov pokúšali o navýšenie účinnosti svojich strojov a zvýšenie profitu. Najväčším nedostatkom však bola nízka bezpečnosť prevádzky. Často dochádzalo k výbuchom kotlov, ktoré sprevádzal masívny únik natlakovanej horúcej pary. To malo za následok smrteľné zranenia robotníkov. Tieto a mnohé ďalšie dôvody nútili inžinierov a vynálezcov vtedajšej doby poohliadnuť sa po alternatívach [2].

1.2 Vznik Stirlingovho motora

Stirlingov motor sa oficiálne zrodil 27.9.1816, keď si tento typ motora nechal pod číslom 4081 patentovať vtedy dvadsaťšesťročný škótsky farár Robert Stirling (1790-1878) [2,3,4]. Lloyd vo svojej práci [2] uvádza, že Robert Stirling pracoval ako farár celých 53 rokov a z tohto dôvodu spochybňuje jeho zásluhy pri vývoji zariadenia. Autor predpokladá, že sa výskumu venoval jeho brat James, ktorý bol inžinierom a mal teda potrebné znalosti termodynamiky a mechaniky pre zostavenie motora. V práci Hromádka [3] nie je o Jamesovi žiadna zmienka a všetky zásluhy sú priznané Robertovi. Blaha v práci [5] priznáva, že Robert študoval latinčinu, gréčtinu, logiku, matematiku a právo, zatiaľ čo jeho brat už vo veku 14 rokov nastúpil na univerzitu a stal sa známym stavebným inžinierom. Napriek tomu zastáva názor, že vynálezcom bol Robert Stirling, ktorý bol od mladého veku vedený ku strojnictvu svojim otcom a vždy preukazoval horlivý záujem o mechaniku.

Patent bol vytvorený osem rokov pred vydaním odbornej práce Sadi Carnata „Úvahy o hybnej sile ohňa a o strojoch vhodných na vyvinutie tejto sily“ [3]. To znamená, že bol stroj vyvinutý ešte v dobe, kedy neexistovala žiadna ucelená teória tepelných motorov. Patent bratov Stirlingových, bez ohľadu na to, kto v skutočnosti stál za vývojom samotného zariadenia dokazuje, že si jeho autor už vtedy uvedomoval všetky podmienky potrebné k efektívnej premene tepla na mechanickú prácu.

V originálnom patente sú špecifikované dva oddelené vynálezy. Prvým a najdôležitejším bol objav „ekonomizéru“- zariadenia, ktoré v dnešnej dobe poznáme pod pojmom regenerátor [2, 5]. Ten je dodnes využívaný nielen v Stirlingových motoroch, ale aj v mnohých iných zariadeniach. Jeho účelom je vhodne ukladať a následne odovzdávať tepelnú energiu do sústavy, čím významne zvyšuje účinnosť. Druhou časťou patentu bol samotný motor,

pomenovaný ako „Vzduchový motor s uzavretým cyklom, využívajúci ekonomizér k zníženiu spotreby paliva“ [2].

Napriek tomu, že bol „ekonomizér“ patentovaný už v roku 1816, reálne nebol v motore použitý až do roku 1827. O ďalšie vylepšenia sa postarali opäť bratia Stirlingoví. V roku 1827 a 1840 obdržal Robert Stirling ďalšie dva patenty (č. 5456 a č. 8652) na zdokonalené varianty svojho vynálezu [3]. V roku 1840 spolu so svojím bratom postavil motor s externým regenerátorom a trubicovým výmenníkom tepla, ktorý zväčšil oblasť tepelnej výmeny. V roku 1845 bol postavený motor s regulovaným tlakom, v ktorom bolo využité samostatné čerpadlo slúžiace k nasávaniu vzduchu do tela motora, kde dochádzalo k jeho stláčaniu. Tento typ motora dokázal vyvinúť výkon 1,8 kW a bol využívaný k pohonu strojov v škótskej zlievarni v meste Dundee počas mnohých mesiacov, až dokým nebol nahradený jeho silnejšou verziou [2].

1.3 Prvá etapa Stirlingových motorov

Motory, ktorých princíp bol založený na patente Roberta Stirlinga, sa vyrábali v najrôznejších tvaroch a veľkostiach až do prelomu storočí. Zariadenia vynikali svojou jednoduchosťou, bezpečnosťou, tichým chodom a schopnosťou pracovať pri použití akéhokoľvek druhu paliva. Navyše boli v porovnaní s parnými strojmi čisté a ich účinnosť bola výrazne vyššia, vďaka čomu sa stali relatívne populárnymi [2, 4]. V priebehu 19. storočia a na začiatku 20. storočia sa objavovali najrôznejšie aplikácie Stirlingových motorov. Používali sa pre pumpovanie vody pre dobytok, na železničiach, v baniach a dodávali vodu do mnohých sídiel a statkov. Malé motory poháňali zubárske vŕtačky, domáce ventilátory alebo aj šicie stroje. Veľké varianty sa používali napríklad pre pohon navijákov [3].

Výhody stirlingových motorov si uvedomoval aj švédsky vynálezca John Ericsson, ktorý svojimi konštrukciami predbehol dobu. V roku 1853 postavil obrovský lodný motor s piestom o priemere 4,2 m a zdvihom 1,5 m, ktorý bol schopný vyvinúť brzdný výkon 220 kW pri deviatich otáčkach za minútu [3, 4, 5]. V roku 1860 predstavil motor s otvoreným obehom, ktorý v každom cykle miešal prehriaty vzduch s čerstvým, čím sa na jednej strane odstránili problémy s chladením, ale na strane druhej dochádzalo k enormným stratám tepla. Účinnosť zariadenia sa vyšplhala len tesne cez hranicu 2%. V roku 1870 vyvinul prvý Stirlingov motor poháňaný energiou získanou zo slnečného žiarenia. Jeho výkon nám nie je známy, môžeme ho len odhadovať z vety, ktorá zaznela v nahrávke od samotného Ericssona „Solárny motor s výkonom jednej konskej sily vyžaduje koncentráciu slnečného žiarenia z oblasti veľkej 10 štvorcových stôp (9,29 m²)“ [2, 3, 5].

Vývoj Stirlingových motorov bol v 19. storočí výrazne obmedzený metalurgickými možnosťami vtedajšej doby. Z tohoto dôvodu, ako aj z dôvodu vyššej hmotnosti bol napokon vytlačený novo vyvinutým, rýchlo sa rozvíjajúcim spaľovacím a elektrickým motorom. Stirlingov motor upadol do zabudnutia až do 20. rokov minulého storočia [3, 4, 5].

1.4 Druhá etapa Stirlingových motorov

Záujem o tento typ motora prejavil až v roku 1937 výskumný tím holandskej spoločnosti Philips, ktorá intenzívne podporovala vývoj malých motorov s vysokou účinnosťou presahujúcou 30% [2, 3, 4, 5]. Počiatočným cieľom výskumu bolo vytvoriť zariadenie, ktoré by dokázalo vytvoriť dostatok elektrickej energie pre funkciu rádia. Spoločnosť mala stabilné postavenie na európskom trhu a usilovala sa o rozšírenie svojho pôsobenia do odľahlých oblastí Afriky a Ázie, v ktorých nebolo v tej dobe zriadené elektrické vedenie. To znamenalo, že by museli rádiá obsahovať batérie, ktoré boli drahé a predstavovali určitú bariéru pre potenciálnych zákazníkov. Navyše rádiá využívali pre svoj chod elektrónky, ktoré mali zvyčajne vysokú spotrebu energie. Z tohto dôvodu sa zdalo byť použitie generátoru najvhodnejším riešením. Výskumný tím spoločnosti rozhodol, že Stirlingov motor je ideálnym zariadením pre pohon generátoru elektrickej energie predovšetkým kvôli jeho kompaktnosti, tichému chodu, nízkym nárokom na údržbu, bezpečnosti a ekonomickosti. Takisto bolo veľkou výhodou to, že palivom mohol byť parafinový olej, ktorý bol každému dostupný a motor, na rozdiel od motorov spaľovacích nepoužíval zapalovacie sviečky a teda nevytváral interferenciu rádiových vln [2, 3].

Počas nadchádzajúcich troch rokov boli v laboratóriách Philipsu v meste Eindhoven vytvorené rôzne varianty motora s rozsahom výkonov od 6 do 750 W. Experimenty boli zo začiatku venované predovšetkým vplyvu pretlakovania pracovného plynu a použitia plynov s nízkou molárnou hmotnosťou (predovšetkým vodíku a hélia) namiesto vzduchu. Obe vylepšenia spôsobili výrazné zvýšenie výkonu, ale znižovali životnosť zariadenia [2, 3]. V roku 1941 bol vyvinutý motor s názvom Type 10, ktorý využíval nezvyčajnú metódu prenosu tepla na hlavu valca, ktorý bol v kontakte s tekutou zliatinou draslíku a sodíku pumpovanou elektromagnetickým čerpadlom. Táto technológia sa v Stirlingovom motore neosvedčila, v dnešnej dobe sa však využíva pre chladenie jadrových reaktorov [2]. Takisto prebehli pokusy s prehriatym sodíkom, ale po tom, čo došlo k výbuchu v laboratóriu boli všetky experimenty v tejto oblasti ukončené [2].

Pre ďalšie experimenty sa opäť využíval motor Type 10, tentokrát v nepriamom cykle. Hriadel' motora bol poháňaný elektrickým motorom. Zámerom bolo vytvoriť tepelné čerpadlo a nájsť tak možnú alternatívu k freónovým chladiacim zariadeniam, ktoré sú používané v chladničkách a klimatizáciách. Po čase sa zistilo, že chladič založený na nepriamom Stirlingovom cykle je vhodný pre vytváranie kryogénnych podmienok, keďže v okolí hlavy valca bolo možné dosiahnuť teploty blízke -100°C už pri minimálnej izolácii. V roku 1945 bola dosiahnutá teplota -200°C po malých úpravách na zariadení [2].

V roku 1948 Philips vytvoril sériu dvojvalcových motorov, ktoré boli hromadne označené ako Type 24. Za najúspešnejšiu variantu sa považuje Type 24d schopný dosiahnuť výkon 18,5 kW. Bol určený pre použitie v automobile a dokonca bol predstavený Henrymu Fordovi. Napriek tomu sa pod kapotu auta nikdy nedostal [2]. V 50. rokoch minulého storočia nastal veľký rozvoj v metalurgii, ktorý Stirlingovmu motoru otvoril nové možnosti [3]. Intenzívny výzkum v laboratóriách Philips vyvrcholil do vytvorenia malého motora s účinnosťou 30%. V roku 1954 bol vytvorený motor, ktorý využíval ako pracovné médium vodík a bol schopný dosiahnuť výkon 30 kW pri teplote 704°C s účinnosťou 36%. Neskôr bola pri tomto type motora dosiahnutá účinnosť až 38% [4]. Následne spoločnosť Philips zastavila výrobu motorov z dôvodu nízkej finančnej návratnosti a plne sa venovala len vývoju chladiacich zariadení, ktorý ako jediný prinášal zisk [2].

1.5 Vývoj v súčasnosti

Keď Philips ukončil svoj výskumný program, nenastal v oblasti Stirlingových motorov počas nasledujúcich 20 rokov výrazný pokrok [2]. Dá sa predpokladať, že iné spoločnosti odrádzal od vývoja neúspech Philipsu a finančný kolaps celého projektu. Až v roku 1968 švédka FFV Group vytvorila joint venture (spoločné podnikanie) s ďalšími švédskymi spoločnosťami s cieľom preskúmať možnosti vývoja zdokonalenej sériovej verzie moderného Stirlingovho motora. Projekt dostal meno United Stirling. K tomuto kroku prispela z veľkej časti blížiac sa ropná kríza, ktorá vytvorila snahu použiť do motorových vozidiel iné palivá ako benzín a naftu. Spoločnosť použila licenciu od Philipsu a začala s vývojom motora, ktorý mal dosiahnuť výkon 150 kW a bol určený pre mestské autobusy, terénne vozidlá a ponorky. Tento motor sa spoločnosti podarilo postaviť v roku 1970. Motor bol štvorvalcový, so zdvihovým objemom 235 cm³ na každý valec a pri strednom tlaku 22 MPa a 3000 otáčok za minútu dosahoval výkonu 150 kW. Tak vysoký tlak vyvolal pochybnosti o životnosti zariadenia, preto sa spoločnosť United Stirling rozhodla pre vývoj svojho vlastného motora s označením 4-65, ktorý dosahoval rovnaký výkon ako motor Philips už pri tlaku 15 MPa a polovičných otáčkach. Nasledovala ďalšia spolupráca Philipsu a United Stirling s cieľom minimalizovať výrobné náklady. Nakoniec sa však ukázalo, že aj v sérii 10 000 kusov ročne bude cena stále 2,5 krát vyššia ako v prípade rovnako výkonného spaľovacieho motora [2, 3]. V 70. rokoch 20. storočia United Stirling intenzívne pracoval na vývoji pohonnej jednotky pre osobné automobily. Jeden z úspešných variant bol v roku 1974 vstavaný do automobilu Ford Pinto s automatickou prevodovkou a bol predstavený manažérom spoločnosti Ford. Vozidlo sa ukázalo ako komfortné, zaujalo tichým chodom, napriek tomu sa do výroby nedostalo. Vývoj pokračoval až do finálneho typu V4X35, ktorý bol v roku 1974 vstavaný do vozidla Ford Taurus s manuálnou prevodovkou. Použitie kombinácie Stirlingovho motora a manuálnej prevodovky sa ukázalo ako nevhodné, pretože najväčšou slabinou motora je práve rýchla zmena výkonu, ktorú manuálna prevodovka vyžaduje omnoho viac, než automatická. Napriek uspokojivým výsledkom zo skúšobnej jazdy v rozsahu 10 000 km a splnení všetkých požiadaviek na akceleráciu, nebola nikdy začatá jeho sériová výroba. Dôvodom bola vysoká cena motora, ktorú výrazne predražil práve systém regulácie výkonu [3].

V roku 1985 spoločnosť McDonnell Douglas navrhla zariadenie s obrovským parabolickým zrkadlom, schopné natičania sa za slnkom a koncentrovať jeho energiu na centrálnu uložený Stirlingov motor. Týmto spôsobom bolo možné dosiahnuť teplotu až 1430°C. Spoločnosť mala dohodu s United Stirling, ktorá dodala jednotku schopnú vyvinúť elektrický výkon 25 kW pri účtyhodnej účinnosti 31%. Podobné zariadenia sa osvedčili a v Spojených štátoch boli podpísané dohody o výstavbe elektrární, ktoré budú využívať zostavu z parabolického zrkadla a Stirlingovho motora na premenu slnečnej energie na elektrinu. V súčasnosti sa plánuje výstavba niekoľkých elektrární. Jedna z nich má využívať 34 000 zariadení s celkovým výkonom 850 MW. Elektráreň má byť postupne budovaná do roku 2025 v Mohavskej púšti v Kalifornii. Výhodou solárneho Stirlingovho motora pre tieto účely je relatívne nízka cena za kW v porovnaní s inými technológiami využívajúcimi slnečné žiarenie k tvorbe elektriny. Zariadenia takisto vynikajú svojou vysokou životnosťou. Niekoľko zariadení bolo podrobených skúškam v reálnej prevádzke počas takmer dvadsiatich rokov [2, 3].

Z európskych firiem je najvýznamnejšou nemecká spoločnosť Solo Stirling GmbH, ktorá sa zaoberá výrobou kogeneračných jednotiek. Kogeneračná jednotka dosahuje elektrický

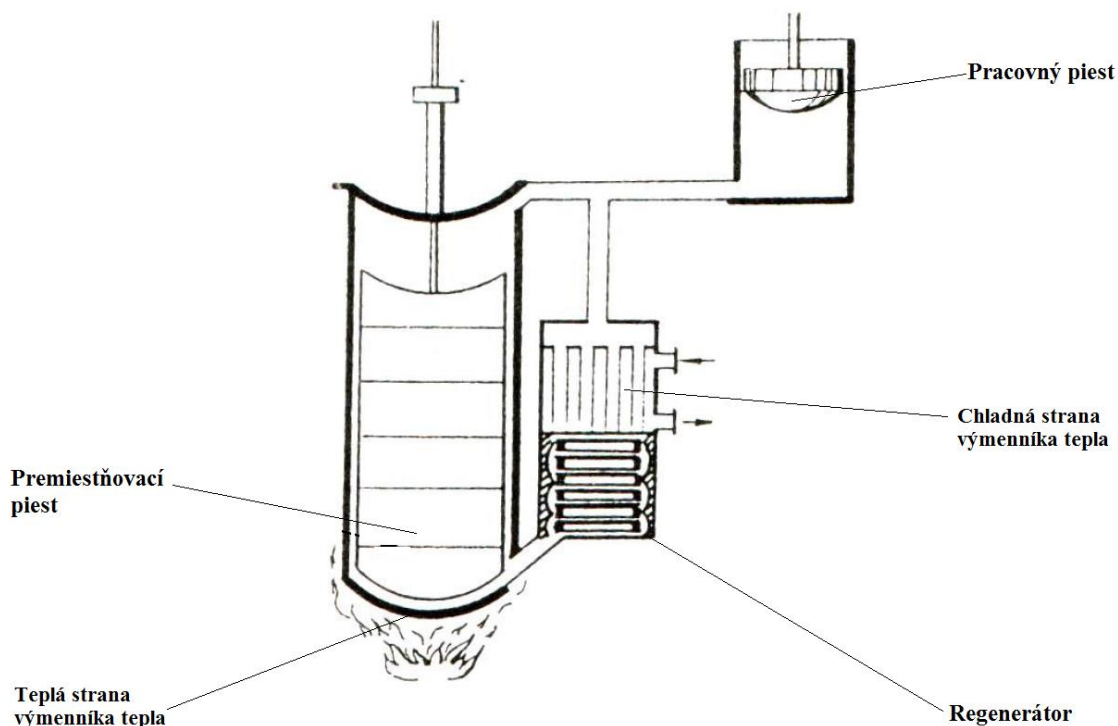
výkon 7,5 kW pri tlaku 13 MPa s účinnosťou 24%. Pracovnou látkou je hélium, ktoré sa za chodu prehreje až na teplotu 650°C. Bežne uvádzaný servisný interval pre výmenu oleja a doplnenia hélia je 5000- 8000 hodín [3].

Špičkou vo vývoji a výrobe Stirlingových motorov je švédka spoločnosť Kockums AB. Tá sa v posledných rokoch zamerala na vývoj a výrobu vysoko výkonných pohonných jednotiek pre ponorky, v ktorých využívajú motor dotiahnutý do dokonasti s výkonom 75 kW. Použitie Stirlingovho motora v ponorke je vhodné vzhľadom k tichému chodu a absencii vibrácií (ponorky sa stávajú ťažšie spozorovateľné). Jednotka navyše nevyžaduje pre svoj chod spaľovanie vzduchu a zo všetkých strán je obklopená morskou vodou, ktorá umožňuje jednoduché a účinné chladenie [3].

V Českej republike sa od roku 2001 vývojom Stirlingových motorov zaoberá firma TEDOM s.r.o., ktorá sa usiluje o vytvorenie kogeneračnej jednotky. V rokoch 2002 a 2003 bol vývoj podporovaný Ministerstvom priemyslu a obchodu v rámci projektu s názvom „Výskum a vývoj zariadení určených na kombinovanú výrobu elektrickej energie a tepla vo výkonovej triede mikrokogenerácie na báze Stirlingovho motora s možnosťou spaľovania biomasy“. V dnešnej dobe prebieha vývoj už z vlastného financovania firmy a celkové náklady projektu výrazne presiahli 40 miliónov českých korún [3].

2 ČASTI STIRLINGOVHO MOTORA A ICH FUNKCIA

Stirlingov motor má 4 hlavné časti, ktoré sú pre jeho správnu funkciu nepostrádateľné. Na obr. 1.1 je schéma jednoduchého motora vyvinutého bratmi Stirlingovými. Regenerátor a chladič je oddelený od tela motora. Tento variant bol vybraný účelne, pretože jeho schéma je názorná a funkcia jednotlivých častí z neho ľahko pochopiteľná.



Obr. 2.1 Schéma motora vyvinutého bratmi Stirlingovými v roku 1840 [2]

2.1 Výmenníky tepla

Tepelné výmenníky slúžia k prívodu a odvodu tepla. V motore sa nachádzajú vždy dva, jeden slúži na zahrievanie pracovného plynu a druhý naopak na jeho ochladzovanie. Na obr. 2.1 je teplá strana výmenníka zároveň najspodnejšou časťou motora a je zahrievaná horákom. Chladná strana je tvorená potrubím, ktorým preteká studená voda. Existuje veľa typov výmenníkov a nespočetné množstvo ich rôznych konfigurácií. Účel však zostáva vždy rovnaký a je ním prenos tepla z tepelného zdroja na pracovnú látku na horúcej strane výmenníka a odvod tepla z pracovnej látky do okolia na jeho chladnej strane [2, 6].

2.2 Premiestňovací piest

Tepelné výmenníky v motore vytvárajú dva póly s odlišnou teplotou. Úlohou premiestňovacieho piestu je zaručiť pohyb pracovného plynu medzi týmito dvoma oblasťami tak, aby sa počas chodu motora rovnomerne striedal ohrev plynu s jeho ochladzovacím a vďaka tomu bolo zabezpečené rovnomerné rozpínanie a stlačovanie látky. Ideálny premiestňovací piest má nízku hmotnosť, pretože čím nižšia je jeho hmotnosť, tým pohotovejšie dokáže zrýchľovať a spomaľovať bez toho, aby spotreboval

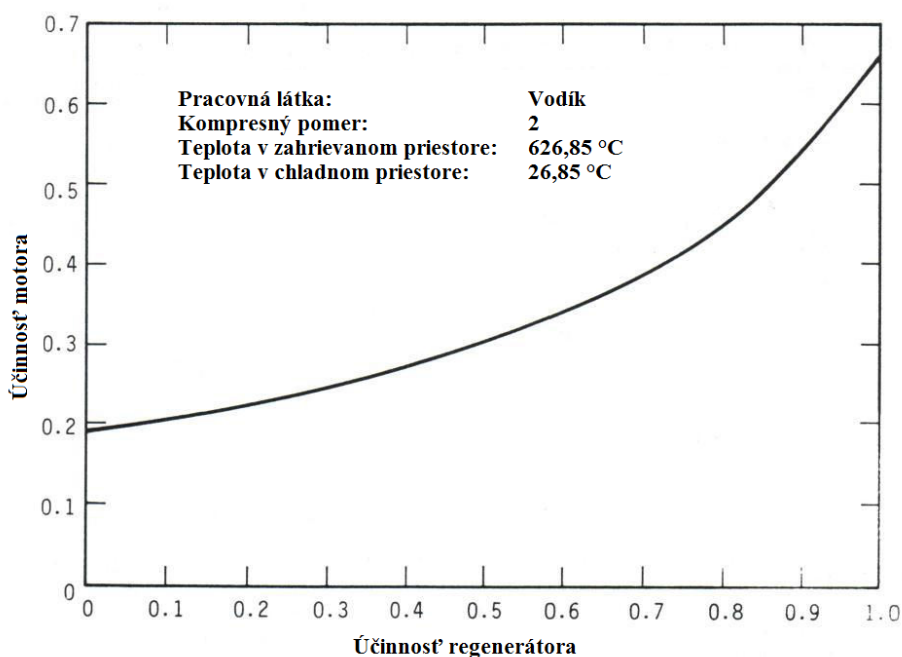
príliš veľké množstvo energie získanej v pracovnom cykle. Ďalšou požiadavkou na pracovný piest je, aby bol vyrobený z tepelne nevodivého materiálu, čím sa zabráni nežiadúcemu prenosu tepla medzi dvoma stranami rozličných teplôt. Takisto by mal byť pevný, schopný zabezpečiť nízky prietokový odpor a vytvárať minimálny mŕtvy objem v priestore medzi jeho okrajom a stenou valca, v ktorom je uložený. Mŕtvy objem je definovaný ako objem plynu, ktorý sa nezúčastňuje pracovného cyklu. Väčšina Stirlingových motorov využíva premiestňovací piest podobný piestu pracovnému. Najväčším rozdielom medzi týmito dvoma časťami je to, že premiestňovací piest je uložený vo svojom valci tak, že sa ich steny nestýkajú. Tým je umožnený voľný prietok plynu v priestore medzi stenami piestu a valca [2, 6].

2.3 Pracovný piest

Pracovný piest sa podobá piestu, ktorý sa nachádza v spaľovacom motore s vnútorným spaľovaním. Jeho úlohou je prenášať prácu, ktorú koná pracovný plyn počas izotermickej expanzie, na kľukový hriadeľ motora. Piest by mal byť ľahký a dokonale vyvážený. Materiál piestu musí odolávať zvýšenej pracovnej teplote. Jeho uloženie v pracovnom valci by malo zabezpečiť minimálne trenie, ale zároveň dostatočné tesnenie voči úniku plynu. V prípade nízkoteplotných Stirlingových motorov je vznikajúci pretlak v motore nízky, preto sú nároky na utesnenie jednoducho splniteľné [2, 6].

2.4 Regenerátor

Regenerátor je zrejme najzaujímavejšiu, najpokrokovejšiu a najdiskutovanejšiu súčasťou Stirlingovho motora [2]. Ako bolo spomenuté v podkapitole 1.2, regenerátor (vtedy nazývaný „ekonomizér“), bol hlavným bodom patentu Roberta Stirlinga z roku 1816. Jeho úlohou je pracovať ako dočasné úložisko tepla, ktoré je schopné rýchlo prijať teplo z ohriateho prúdiaceho plynu a následne ho odovzdať vo chvíli, kedy plyn začne prúdiť v opačnom smere. To znižuje nároky na množstvo tepla dodaného a odovzdaného v tepelnom výmenníku a výrazne prispieva k zvýšeniu účinnosti motora [2, 5, 6]. John Ericsson zdôraznil význam regenerátora, keď v roku 1855 vyslovil známu vetu, že pomocou zväzkov drôtu je možné získať väčší výkon ako z hromady uhlia (Pozn.voľný preklad z anglického originálu „... We will show practically that bundles of wire are capable of exerting more force than shiploads of coal...“ [2]). Efekt regenerátora je zobrazený na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Závislosť účinnosti motora na účinnosti regenerátora [2]

Termodynamická analýza regenerátora je náročná a presahuje rozsah tejto práce. Pre splnenie experimentálnej časti je nutné dodržať nasledujúce požiadavky na regenerátor:

- musí byť vyrobený z materiálu s dobrou tepelnou vodivosťou,
- musí byť zabezpečený dobrý prechod tepla,
- jeho plocha musí byť čo najväčšia,
- musí byť zvolený optimálny profil matrice,
- musí byť zabezpečená nízka tepelná vodivosť pozdĺž smeru toku pracovnej látky,
- hydraulický prierez má byť malý,
- musia byť zabezpečené nízke straty prúdením,
- musí vytvárať čo najmenší mŕtvy objem.

Pre nízkotepelný Stirlingov motor je regenerátor zvlášť dôležitý, pretože bez neho nie je schopný prevádzky [2, 5, 6].

2.5 Zvyšné časti motora

V ďalšom texte je popísaná funkcia tých častí motora, ktorých vzhľad sa výrazne líši pri každom z variant stroja. Funkcia, ktorú spĺňajú, je ale rovnako dôležitá ako tá, ktorú vykonávajú hlavné časti motora popísané v predošlom texte.

2.5.1 Kľukový hriadeľ

Kľukový hriadeľ sa zvyčajne príliš neliší od toho, ktorý bežne vidíme v motore s vnútorným spaľovaním. Skladá sa z hriadeľa, na ktorom je pripevnená kľuka. Tá je spojená cez ťahadlo

s pracovným piestom. Pohyb piestu spôsobený izotermickou expanziou pracovného plynu je prenesený cez ťahadlo na kľukový hriadeľ. Vhodným mechanizmom sa transformuje pohyb translačný na pohyb rotačný. Rozpohybovaním hriadeľa sa zabezpečí pohyb ostatných častí motora [2, 6].

2.5.2 Zotrvačník

Stirlingov cyklus sa skladá zo štyroch fáz, z ktorých len jedna, izotermická expanzia, produkuje zisk práce. Úlohou zotrvačníka je udržiavať motor v pohybe počas zvyšných troch fáz cyklu. To je obzvlášť dôležité pre motory, ktoré pracujú pri nízkych otáčkach. Do kategórie motorov s nízkymi otáčkami patria aj modely pracujúce pri nízkom rozidele teplôt [2, 6].

2.5.3 Pracovná látka

Pracovnou látkou Stirlingovho motora je plyn, ktorým je naplnený. Voľba plynu výrazne ovplyvňuje jeho termodynamickú účinnosť a výkon. Obecne platí, že plyny s nižšou molovou hmotnosťou majú nižšiu hustotu a vykazujú nižšie straty pri prúde regenerátorom. Nevýhodou ich použitia sú vysoké nároky na utesnenie zariadenia a vyššia cena samotnej látky. Najčastejšie testovanými látkami sú vodík a hélium. Použitím reálneho plynu sa výrazne znižuje účinnosť motora. Príčinou sú straty pri prúde. Straty bývajú najväčšie v regenerátore. Na druhej strane použitie reálneho plynu zvyšuje výkon motora, pretože je schopný výraznejšej zmeny tlaku pri stláčaní a rozpínaní [2, 7]. Ďalšou výhodou reálnych plynov je cena a nižšie nároky na utesnenie motora.

Na výkon a účinnosť motora má takisto vplyv aj tlak pracovnej látky. Platí, že so zvyšujúcim sa tlakom sa takmer lineárne zvyšuje výkon a nelineárne, ale stále uspokojivo účinnosť [2, 7]. Nevýhodami použitia plynu o vyššom tlaku sú vysoké nároky na výrobné materiály a návrh konštrukcie a znížená bezpečnosť chodu.

3 TERMODYNAMIKA A PRINCÍP FUNKCIE MOTORA

Z termodynamického hľadiska je teplo surovinou, ktorú je možné premeniť na produkt, ktorým je mechanická práca. Premena prebieha v energetickom cykle. Stirlingov obeh je len jedným z mnohých cyklov, ktoré môžu byť v motore využité k takejto premene. Všeobecne platí, že každý cyklus je tvorený rôznymi kombináciami izobarického (za konštantného tlaku), izochorického (za konštantného objemu), izotermického (za konštantnej teploty), polytropického (vzťah medzi tlakom a objemom je daný všeobecne známou rovnicou) alebo adiabatického (ohrievanie alebo ochladzovanie prebieha bez zmeny entropie) deja. Každý z obehov je pomenovaný po svojom autorovi. Medzi tie najznámejšie patria:

- 1690 - Papinov cyklus - zložený z 2 izobarických a 2 izochorických dejov.
- 1807 - Cayleyov cyklus - zložený z 2 izobarických a 2 polytropických dejov.
- 1816 - Stirlingov cyklus - zložený z 2 izotermických a 2 izochorických dejov.
- 1824 - Carnotov cyklus - zložený z 2 izotermických a 2 adiabatických dejov.
- 1852 - Joulov cyklus - zložený z 2 izobarických a 2 adiabatických dejov.
- 1853 - Ericssonov cyklus - zložený z 2 izobarických a 2 izotermických dejov.
- 1867 - Ottov cyklus - zložený z 2 adiabatických a 2 izochorických dejov.
- 1873 - Reitlingerov cyklus - zložený z 2 izotermických a 2 polytropických dejov.
- 1893 - Dieselov cyklus - zložený z 2 adiabatických, izobarického a izochorického deju.
- 1894 - Lorenzov cyklus - zložený z 2 polytropických a 2 adiabatických dejov.
- 1896 - Crossleyho cyklus - zložený z 2 polytropických a 2 izochorických dejov.

Pre lepšiu názornosť prebiehajúcich dejov sa cykly obyčajne zobrazujú v grafickej podobe, zvyčajne sa využíva diagram p-V a T-s.

V diagrame p-V je vynesená výška tlaku pracovného plynu vo vzťahu k celkovému objemu motora v každom okamihu cyklu. Každá zmena tlaku bez zmeny teploty spôsobí pohyb piestu, čím sa zmení aj celkový objem.

Diagram T-s zobrazuje závislosť teploty na entropii sústavy. Entropia, ktorej jednotka je Joule na Kelvin je jednou zo stavových veličín. Jedna z definícií entropie opisuje túto veličinu ako mieru neschopnosti systému konať prácu. Čím je hodnota entropie vyššia, tým menej energie môže byť využitéj ku vykonaniu práce [2].

3.1 Ideálny Stirlingov cyklus

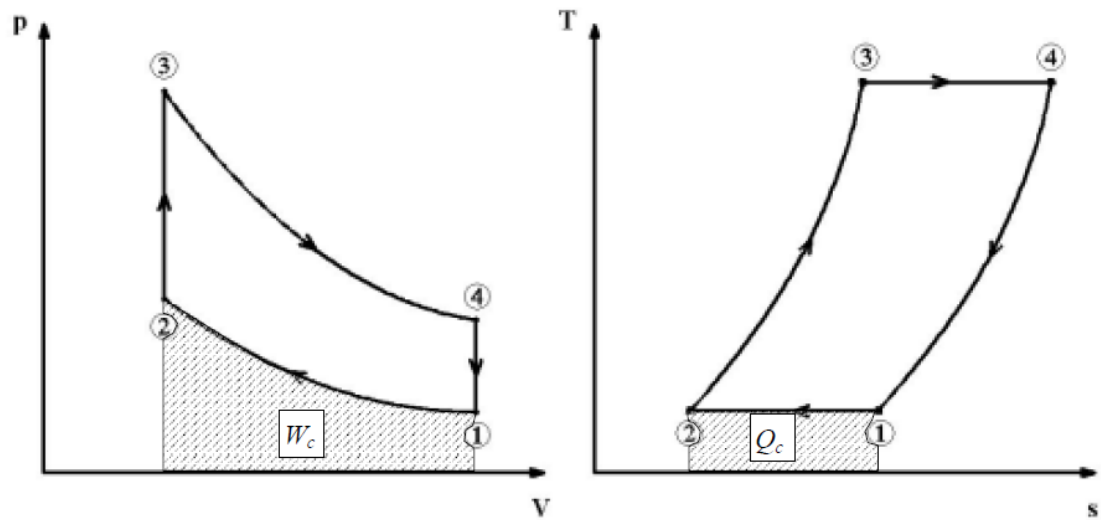
Za ideálny považujeme cyklus, pre ktorý platia nasledujúce predpoklady [2]:

- pracovná látka je ideálny plyn,
- prietokový odpor je vo všetkých miestach nulový- výška tlaku je vo všetkých miestach sústavy v danom momente rovnaká,
- použitie regenerátora ktorý vykazuje nulové straty- v momente, kedy plyn prejde na teplú stranu sústavy je teplota pracovného plynu zhodná s teplotou studenej strany sústavy a v momente, kedy plyn prejde na studenú stranu sústavy je teplota plynu zhodá s teplotou studenej strany sústavy,
- nulové tepelné straty spôsobené kondukciou (vedením), konvekciou (prúdením) a radiáciou (žiarením). Všetko teplo dodané do sústavy je využité pre ohrev pracovného plynu,
- pri izotermickom rozpínaní a stláčaní je v každom bode sústavy rovnaká teplota,
- zmena objemu pri rozpínaní a stláčaní je nespojitá; závislosť zmeny objemu na čase je nespojitá krivka (viz. obr. 3.10),
- mechanické trenie spôsobené pohybom častí motora je nulové,
- mrtvý objem je nulový.

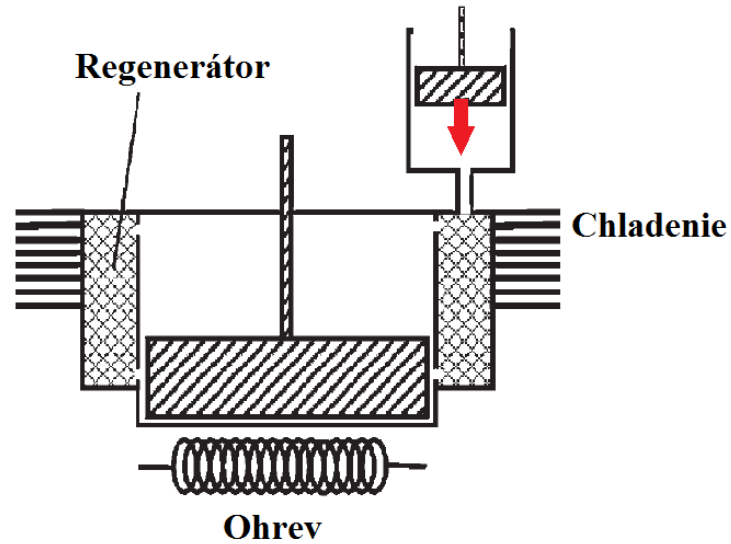
Ideálny Stirlingov cyklus je tvorený dvoma izotermickými a dvoma izochorickými dejmi. Tie budú podrobne popísané v nasledujúcich odstavcoch.

3.1.1 Izotermická kompresia

Izotermická kompresia (stlačenie) nastane potom, ako premiestňovací piest vytlačí všetok pracovný plyn na studenú stranu tepelného výmenníka. Tento stav je v p - V diagrame označený ako bod 1. Počas izotermickej kompresie je pracovný piest poháňaný momentom od zotrvačníku a pohybuje sa smerom nadol. V pohybe mu napomáha aj čiastočné vákuum, ktoré vzniká pri uvoľňovaní tepla z pracovného plynu do okolia. Pracovný piest stláča pracovný plyn, čím sa znižuje jeho objem a tlak vo valci mierne narastá. Keďže ide o dej izotermický, teplota pracovnej látky zostáva počas deju nezmenená. Premiestňovací piest zostáva počas celého deju nehybný v spodnej časti valca [2, 4, 6]. Tento dej je ilustrovaný na obr. 3.1 v p - V diagrame krivkov 1-2. Práca W_C , ktorú pracovný piest vykoná je rovná obsahu pod krivkou 1-2. Teplo Q_C , ktoré pracovný plyn odovzdá do okolia, je rovné obsahu pod krivkou 1-2 v diagrame T - s na obr. 3.1. obr. 3.2 zobrazuje pohybový stav pracovného a premiestňovacieho piestu.



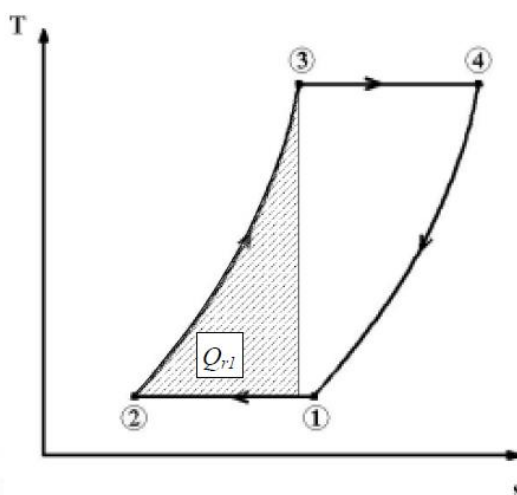
Obr. 3.1 p-V a T-s diagram ideálneho Stirlingovho cyklu pri izotermickej kompresii [2]



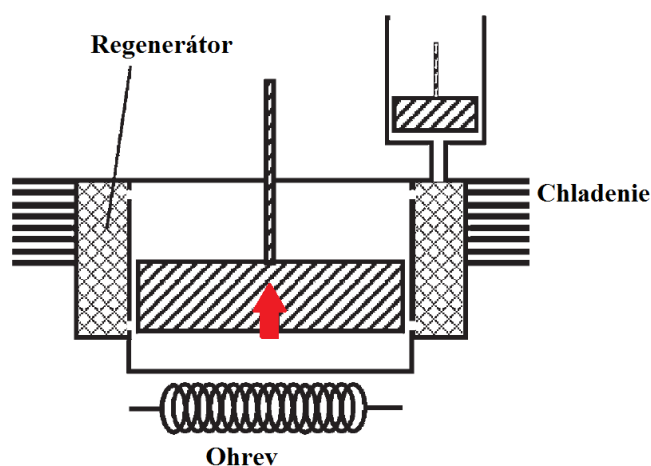
Obr. 3.2 Naznačenie smeru pohybu pracovného piestu pri izotermickej kompresii [4]

3.1.2 Izochorický ohrev

Izochorický ohrev začne prebiehať po dosiahnutí minimálneho objemu cyklu. Pracovný plyn sa zastaví na dolnom konci valca a v tejto polohe pretrvá počas celého následujúceho deju. Keďže pracovný plyn zostáva na mieste, objem systému zostáva bez zmeny a predpoklad izochorického ohrevu je splnený. V teplej časti valca je plyn zahrievaný a vytláča premiestňovací plyn do chladnej časti sústavy. Plyn vytláča studený plyn z hornej časti do regenerátora, ktorý má vyššiu teplotu ako plyn. Pri prechode regenerátorom dochádza k jeho ohrevu a dosiahne teplotu teplej strany sústavy práve v momente, kedy opustí regenerátor a vstúpi do zahrievanej časti. V tomto momente dosiahne premiestňovací plyn svoju krajnú hornú polohu. Práca počas izochorického deju je nulová, pretože prebieha bez zmeny objemu. Teplo, ktoré regenerátor odovzdá do pracovnej látky, je rovné obsahu pod krivkou 2-3 v diagrame T-s zobrazeného na obr. 3.3. Na obrázku obr. 3.4 je zobrazený pohybový stav pracovného a premiestňovacieho piestu [2, 4].



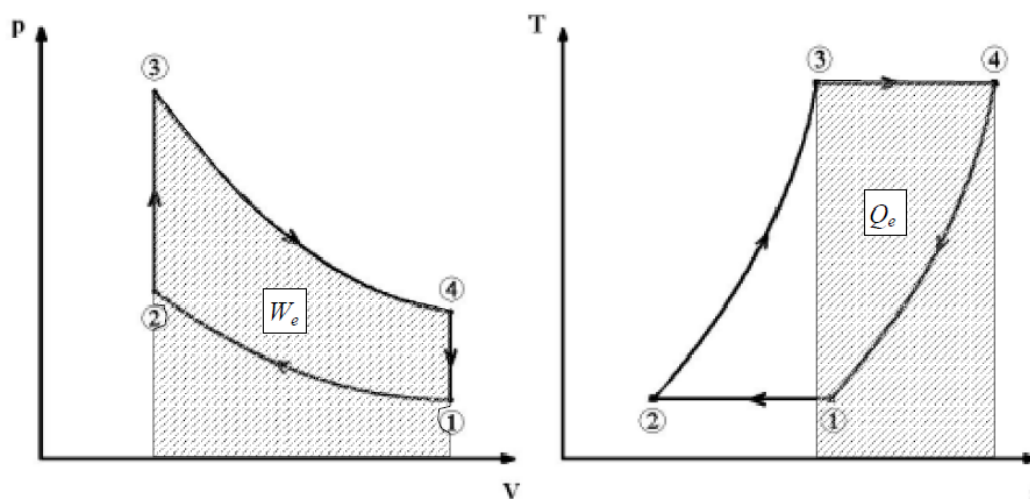
Obr. 3.3 T-s diagram pri izochorickom ohreve [2]



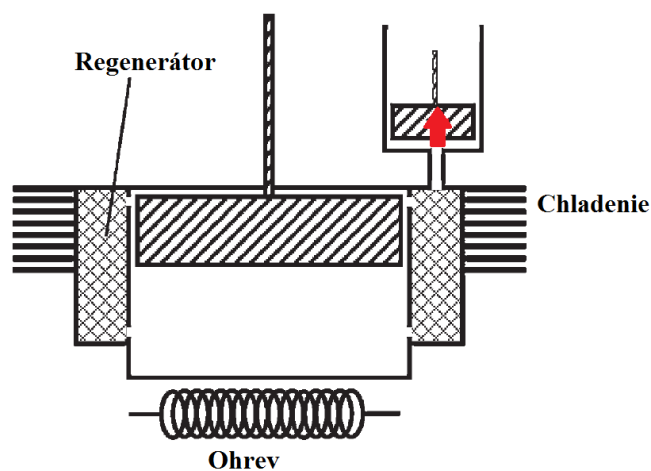
Obr. 3.4 Smer pohybu premiestňovacieho piestu pri izochorickom ohreve [4]

3.1.3 Izotermická expanzia

Izotermická expanzia (rozpínanie) začne v momente, kedy premiestňovací piest dosiahne svoju najvyššiu polohu a všetok plyn sa dostane do spodnej časti sústavy. V tejto chvíli je v systéme maximálna teplota a tlak. Vnútrotný tlak dosiahne hodnoty vyššej, ako je tlak okolia, čo má za následok rozpochybovanie pracovného piestu smerom nahor. Tým sa zväčšuje objem systému. Súčasne dochádza k odovzdávaniu tepla z ohrievača do pracovnej látky v teplej časti, preto teplota v sústave zostáva bez zmeny a je splnený predpoklad izotermickej expanzie. Pohyb pracovného piestu dáva do pohybu zotrvačník, ktorý sa natočí do polohy, v ktorej má vyššiu potenciálnu energiu. Premiestňovací piest pri tomto deji zostáva nehybný vo svojej najvyššej polohe. Práca W_e , ktorú pracovný piest vykoná je rovná obsahu pod krivkov 3-4 v p-V diagrame na obr. 3.5. Množstvo tepla Q_e , ktoré prijme pracovný plyn z okolia je rovný obsahu pod krivkov 3-4 v diagrame T-s na obr. 3.5. Na obr. 3.6 je zobrazený pohybový stav pracovného a premiestňovacieho piestu [2, 4, 6].



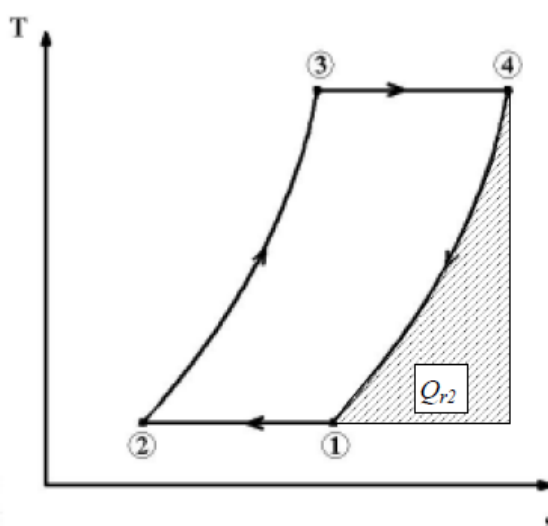
Obr. 3.5 p-V a T-s diagram pri izotermickej expanzii [2]



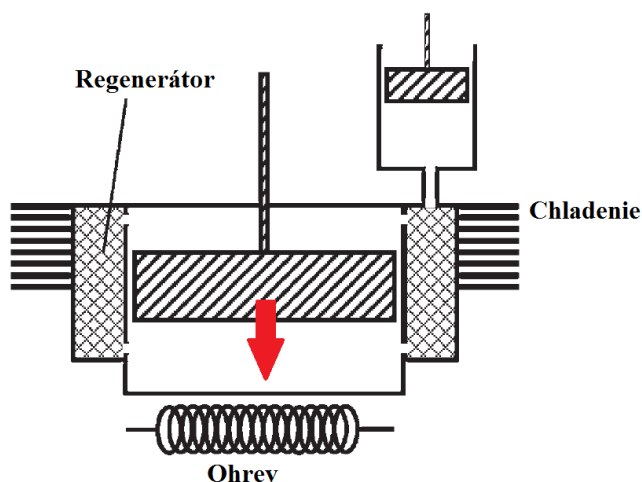
Obr. 3.6 Smer pohybu pracovného piestu pri izotermickej expanzii [4]

3.1.4 Izochorické ochladzovanie

Izochorické ochladzovanie nastáva vo chvíli, keď systém dosiahne najväčší objem. Pracovný piest sa nachádza vo svojej najvyššej polohe a v tejto polohe zotrúva počas celého deju. To znamená, že objem sústavy zostane bez zmeny a je splnený predpoklad izochorického ochladzovania. Premiestňovací piest sa rozpohybuje smerom nadol a vytlačí teplý plyn zo spodnej časti sústavy do regenerátora. Prúdiaci teplý plyn odovzdá časť tepla regenerátoru, čím sa zníži jeho teplota. S klesajúcou teplotou sa znižuje aj tlak. Objem zostáva počas celého deju konštantný, preto je aj hodnota práce vykonaná počas ochladzovania nulová. Teplo, ktoré plyn odovzdá regenerátoru je rovné obsahu pod krivkou 4-1 v diagrame T-s na obr. 3.7 a je zhodné s množstvom tepla, ktoré regenerátor odovzdá do pracovnej látky počas izochorického ohrevu. Na obr. 3.8 je zobrazený pohybový stav pracovného a premiestňovacieho piestu [2, 4].

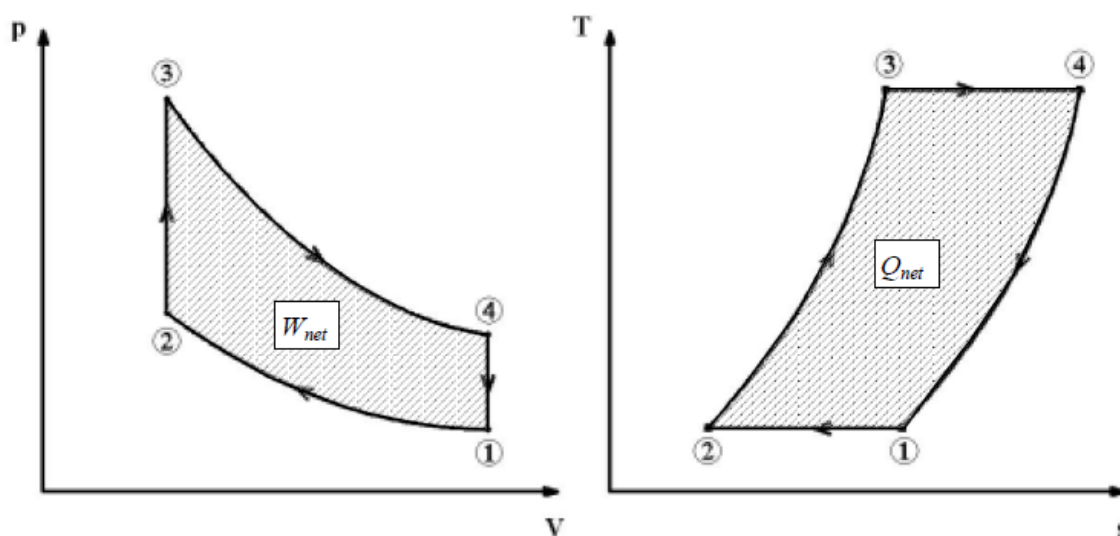


Obr. 3.7 T-s diagram izochorického ochladzovania [2]



Obr. 3.8 Smer pohybu premiestňovacieho piestu pri izochorickom ochladzovaní [4]

Porovnaním p-V diagramu na obr. 3.1 a 3.5 je zřejmé, že práca nutná ku stlačeniu plynu počas izotermickej kompresie W_c je menšia, ako práca W_e , ktorú vykoná rozpínajúci sa plyn počas izotermickej expanzie. To znamená, že časť práce môže byť využitá k rozpochybovaniu klukového hriadeľa. Veľkosť práce je zobrazená ako vyšrafovaná plocha v p-V diagrame na obr. 3.9. Podľa prvého zákona termodynamiky musí byť takto získaná práca rovná teplu dodanému do sústavy. Množstvo tepla dodaného do sústavy z okolia je zobrazené ako vyšrafovaná plocha v diagrame T-s na obr. 3.9.



Obr. 3.9 Množstvo získanej práce W_{net} v jednom cykle a množstvo dodaného tepla Q_{net} z okolia počas jedného cyklu [2]

Množstvo získanej práce počas jedného cyklu môže byť vypočítané nasledujúcim postupom. Najprv je nutné uviesť stavovú rovnicu, ktorá bude viackrát použitá v ďalších krokoch.

$$pV = nRT \text{ [Pa} \cdot \text{m}^3] \quad (3.1)$$

- kde:
- p [Pa] - je tlak vo vnútri sústavy,
 - V [m^3] - je objem sústavy,
 - n [mol] - je látkové množstvo,
 - R [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] - je reálna plynová konštanta,
 - T [K] - je teplota v Kelvinoch.

Práca potrebná pre stlačenie pracovnej látky počas izotermickej kompresie je rovná obsahu pod krivkou 1-2 v diagrame p-V. Platí teda vzťah:

$$W_c = \int_1^2 p dv \quad [J] \quad (3.2)$$

kde: W_c [J] - je práca spotrebovaná počas izotermickej kompresie,
 p [Pa] - je tlak vo vnútri sústavy,
 dv [m³] - je zmena objemu počas izotermickej kompresie.

Výraz (3.2) je možné upraviť dosadením vzťahu (3.1).

$$W_c = nRT_c \int_1^2 \frac{dv}{V} \quad [J] \quad (3.3)$$

Po integrácii vzťahu (3.3):

$$W_c = nRT_c \ln \frac{V_1}{V_2} \quad [J] \quad (3.4)$$

kde: W_c [J] - je práca spotrebovaná počas izotermickej kompresie,
 n [mol] - je látkové množstvo,
 R [J·mol⁻¹·K⁻¹]- je reálna plynová konštanta,
 T_c [K] - je teplota v Kelvinoch počas izotermickej kompresie,
 V_1 [m³] - je objem na začiatku izotermickej kompresie,
 V_2 [m³] - je objem na konci izotermickej kompresie.

Práca vykonaná pri rozpínaní plynu počas izotermickej expanzie je rovná obsahu pod krivkou 3-4 a môže byť spočítaná analogicky s postupom pre výpočet práce W_c .

$$W_e = \int_3^4 p dv = nRT_h \ln \frac{V_3}{V_4} \quad [J] \quad (3.5)$$

kde: W_e [J] - je práca vykonaná počas izotermickej expanzie,
 n [mol] - je látkové množstvo,
 R [J·mol⁻¹·K⁻¹]- je reálna plynová konštanta,
 T_h [K] - je teplota v Kelvinoch počas izotermickej expanzie,
 V_3 [m³] - je objem na začiatku izotermickej expanzie,
 V_4 [m³] - je objem na konci izotermickej expanzie.

V ideálnom cykle sú zanedbané akékoľvek straty. Preto platí, že práca spotrebovaná počas izotermickej kompresie je rovná teplu, ktoré odovzdá pracovný plyn do okolia [2].

$$Q_c = W_c = nRT_c \ln \frac{V_1}{V_2} [J] \quad (3.6)$$

A takisto platí, že práca, ktorú pracovný piest vykoná, je rovná teplu dodanému do pracovného plynu:

$$Q_e = W_e = nRT_h \ln \frac{V_3}{V_4} [J] \quad (3.7)$$

Získaná energia v cykle W_{net} je algebraickým súčtom práce vykonanej pri stlačovaní plynu a pri jeho následnom rozpínaní.

$$W_{net} = W_e + W_c = \int_3^4 p dv + \int_1^2 p dv = nRT_h \ln \frac{V_3}{V_4} + nRT_c \ln \frac{V_1}{V_2} [J] \quad (3.8)$$

Z p-V diagramu Stirlingovho cyklu je zrejmé, že prechod z bodu 2 do bodu 3 je izochorický, preto platí, že objem V_2 je zhodný s objemom V_3 . To isté platí aj pre objemy V_1 a V_4 . Využitím tohoto poznatku je možné vzťah (3.8) upraviť do tvaru:

$$W_{net} = nR (T_h - T_c) \ln \frac{V_3}{V_4} [J] \quad (3.9)$$

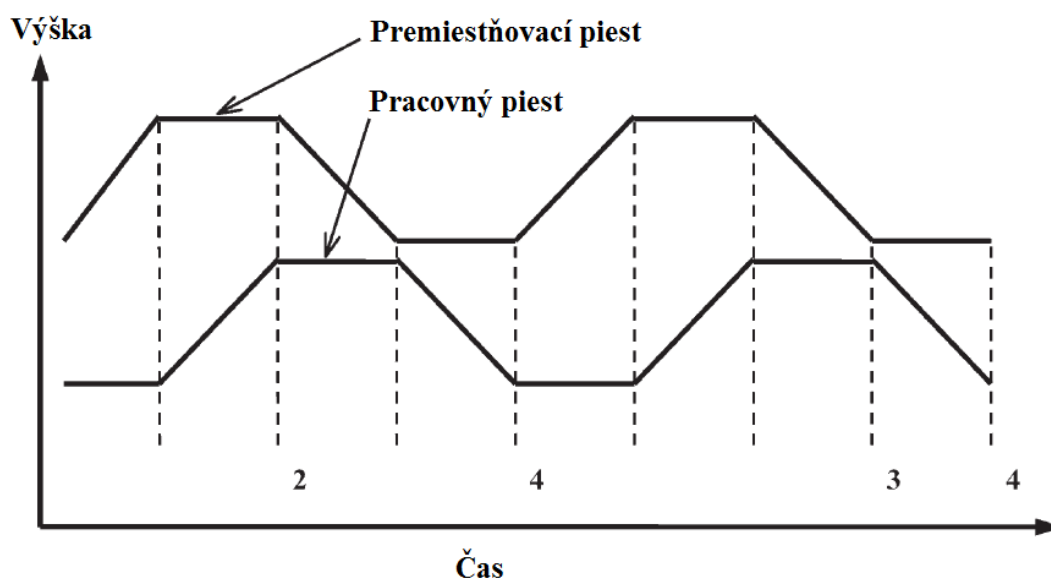
Ďalším dôležitým parametrom každého termodynamického cyklu je jeho účinnosť η . Tú je možné vypočítať vydelením získanej práce množstvom dodaného tepla v jednom cykle.

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_e} [-] \quad (3.10)$$

Dosadením vzťahu (3.7) a (3.9) do vzťahu (3.10):

$$\eta = \frac{nR (T_h - T_c) \ln \frac{V_3}{V_4}}{nRT_h \ln \frac{V_3}{V_4}} = \frac{(T_h - T_c)}{T_h} = \eta_{carnot} [-] \quad (3.11)$$

Vzťah (11) dokazuje, že účinnosť ideálneho Stirlingovho cyklu sa rovná teoretickej účinnosti Carnotovho cyklu [2]. Tento výsledok bol získaný za predpokladu, že boli splnené všetky podmienky uvedené na začiatku podkapitoly 2.1. Mnohé z nich nie sú reálne uskutočniteľné a preto účinnosť reálneho cyklu bude vždy nižšia ako účinnosť Carnotovho cyklu. Pohyby pracovného a premiestňovacieho piestu v priebehu ideálneho cyklu sú graficky znázornené v pohybovom diagrame na obr. 3.10 Fázový rozdiel medzi pohybmi piestov je 90° , pričom pohyb premiestňovacieho piestu predbieha pohyb pracovného piestu. Funkciou premiestňovacieho piestu je premiestňovať pracovnú látku z jedného konca valca na druhý. Pracovný piest slúži k prenosu získanej práce na kľukový hriadeľ počas izotermickej expanzie a k prenosu kinetickej energie z pohybu zotrvačníku na pracovnú látku počas izotermickej kompresie [4].



Obr. 3.10 Pohybový diagram premiestňovacieho a pracovného piestu [4]

3.2 Termická účinnosť ideálneho Stirlingovho cyklu modifikácie γ

V praktickej časti práce bola navrhnutá a zostavená konfigurácia motora γ , preto je v nasledujúcich riadkoch odvodená teoretická účinnosť tejto konfigurácie. Pre typ γ obecné platí, že sa pracovný valec nachádza na studenej strane valca, v ktorom sa pohybuje premiestňovací piest. Počas izotermickej expanzie nemôže teplota plynu v každom mieste dosiahnuť teploty horkej strany, pretože v pracovnom valci zostáva po izochorickom ohreve časť nezohriateho plynu. Obyčajne sa predpokladá, že teplota plynu v pracovnom valci je v tomto momente rovná teplote studenej strany motora [5]. Z tohto dôvodu sa bude teoretická účinnosť modifikácie γ odlišovať od výsledkov získaných v predchádzajúcej podkapitole a bude nižšia, ako teoretická účinnosť Carnotovho cyklu.

Pre celkový objem pracovného plynu platí:

$$V_{celk} = V_{zohriaty} + V_{chladny} \text{ [m}^3\text{]} \quad (3.12)$$

kde: V_{celk} [m³] - je celkový objem pracovného plynu
 $V_{zohriaty}$ [m³] - je objem zohriateho pracovného plynu
 $V_{chladny}$ [m³] - je objem nezohriateho pracovného plynu

Pre celkové látkové množstvo platí:

$$n_{celk} = n_{zohriaty} + n_{chladny} \text{ [mol]} \quad (3.13)$$

kde: n_{celk} [mol] - je celkové látkové množstvo pracovného plynu
 $n_{zohriaty}$ [mol] - je látkové množstvo zohriateho pracovného plynu
 $n_{chladny}$ [mol] - je látkové množstvo nezohriateho pracovného plynu

Stavová rovnica pre zohriaty pracovný plyn v bode 3 p-V diagramu zobrazeného na obr. 3.5 má tvar:

$$n_{zohriaty} = \frac{pV_{zohriaty}}{RT_h} \text{ [mol]} \quad (3.14)$$

A pre studený pracovný plyn nachádzajúci sa v pracovnom valci platí v bode 3 stavová rovnica:

$$n_{chladny} = \frac{pV_{chladny}}{RT_c} = \frac{p(V_{celk} - V_{zohriaty})}{RT_c} \text{ [mol]} \quad (3.15)$$

Dosadením rovníc (3.14) a (3.15) do rovnice (3.13) vznikne stavová rovnica pre všetok pracovný plyn v sústave:

$$n_{celk} = \frac{pV_{zohriaty}}{RT_h} + \frac{p(V_{celk} - V_{zohriaty})}{RT_c} \text{ [mol]} \quad (3.16)$$

Jednoduchou úpravou sa rovnica zmení na:

$$p \left(\frac{V_{zohriaty}}{T_h} + \frac{(V_{celk} - V_{zohriaty})}{T_c} \right) = n_{celk}R \quad (3.17)$$

Z T-s diagramu izotermickej expanzie zobrazeného na obr. 3.5 je zrejmé že pre teplo dodané do sústavy platí:

$$Q_e = \int_3^4 p dv \text{ [J]} \quad (3.18)$$

Dosadením rovnice (3.17) do (3.18) vznikne:

$$\begin{aligned} Q_e &= \int_3^4 \frac{n_{celk}R}{\frac{V_{zohriaty}}{T_h} + \frac{(V_{celk} - V_{zohriaty})}{T_c}} dv = \\ &= n_{celk}RT_c \int_3^4 \frac{dv}{V_{celk} - V_{zohriaty} \left(\frac{T_h - T_c}{T_h} \right)} \text{ [J]} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Kompresný pomer motora ε je podiel maximálneho a minimálneho objemu cyklu. V tomto prípade

$$\varepsilon = \frac{V_4}{V_3} \text{ [-]} \quad (3.20)$$

Po integrácii vzťahu (19) a využití vzťahu pre kompresný pomer (20) vznikne konečný vzťah pre výpočet dodaného tepla do sústavy počas izotermickej expanzie:

$$Q_e = n_{celk}RT_c \ln \frac{\varepsilon - \eta_{carnot}}{1 - \eta_{carnot}} [J] \quad (3.21)$$

Medzi dodaným teplom a vykonanou prácou pri izotermickej expanzii platí závislosť (7).

Použitím vzťahov (3.3), (3.7), (3.8), (3.21) vznikne vzťah pre prácu získanú počas jedného cyklu:

$$W_{net} = Q_e + \int_1^2 \frac{n_{celk}RT_c}{V} dV = n_{celk}RT_c \ln \frac{\varepsilon - \eta_{carnot}}{1 - \eta_{carnot}} - n_{celk}RT_c \ln \varepsilon [J] \quad (3.22)$$

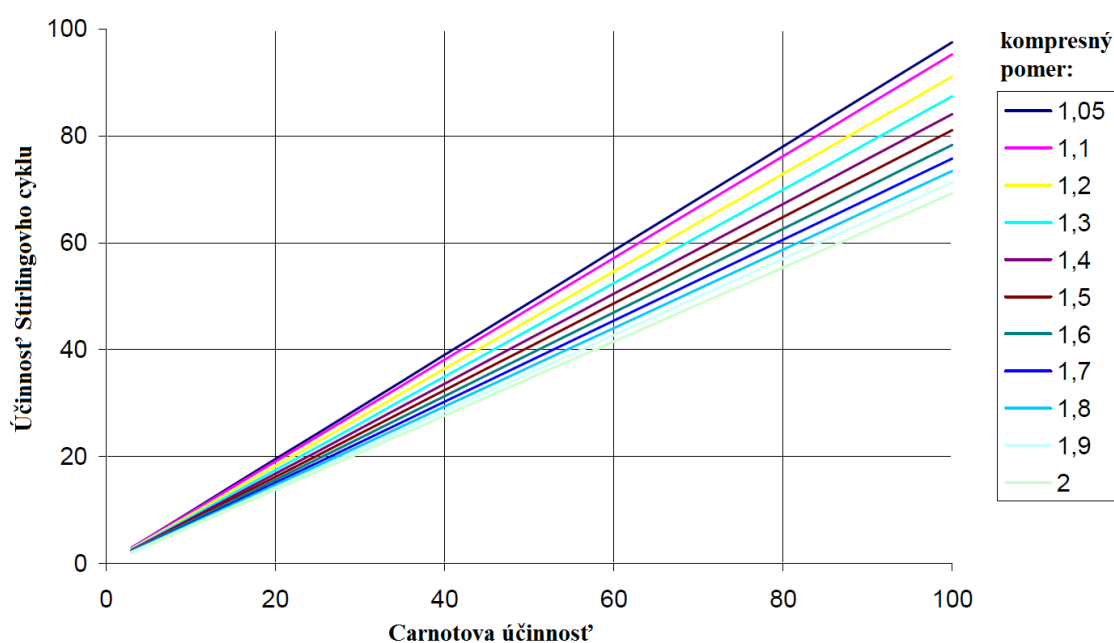
Termická účinnosť ideálneho Stirlingovho cyklu pre modifikáciu γ $\eta_{t,\gamma}$ sa vypočíta dosadením vzťahu (3.21) a (3.22) do vzťahu pre výpočet účinnosti (3.10).

$$\eta_{t,\gamma} = \frac{n_{celk}RT_c \ln \frac{\varepsilon - \eta_{carnot}}{1 - \eta_{carnot}} - n_{celk}RT_c \ln \varepsilon}{n_{celk}RT_c \ln \frac{\varepsilon - \eta_{carnot}}{1 - \eta_{carnot}}} [-] \quad (3.23)$$

po zjednodušení:

$$\eta_{t,\gamma} = 1 - \frac{\ln \varepsilon}{\ln \left(\frac{\varepsilon - \eta_{carnot}}{1 - \eta_{carnot}} \right)} [-] \quad (3.24)$$

Obr. 3.11 porovnáva termickú účinnosť Stirlingovho motora modifikácie γ a účinnosť Carnotovho cyklu pri rôznych kompresných pomeroch ε podľa rovnice (3.24).



Obr. 3.11 Porovnanie termickej účinnosti Stirlingovho motora a Carnotovej účinnosti pri rôznych kompresných pomeroch [5]

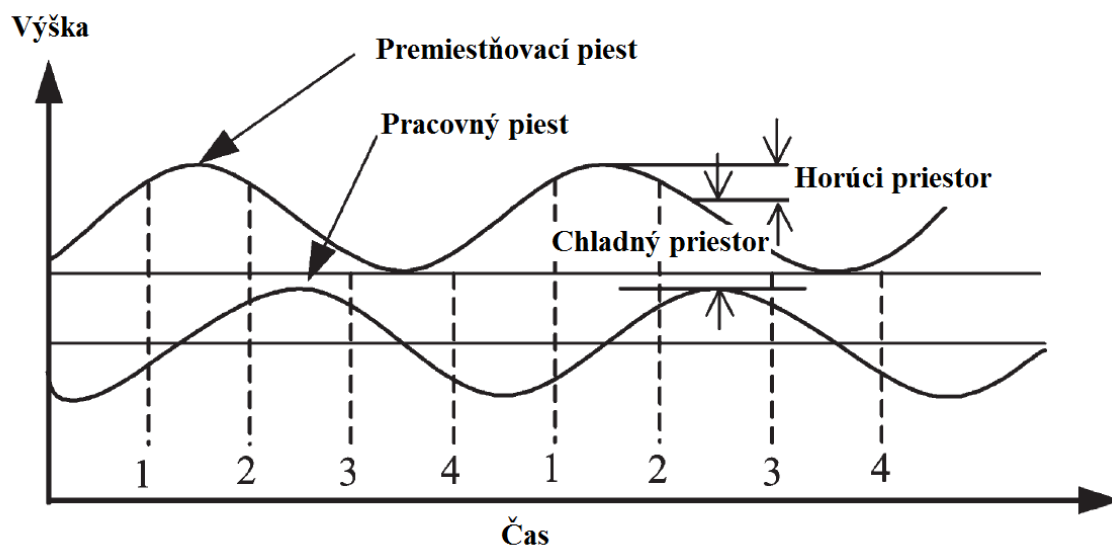
3.3 Reálny Stirlingov cyklus

Táto podkapitola zohľadňuje odlišnosti reálneho cyklu konfigurácie γ od ideálneho cyklu. Mnohé poznatky sú platné aj pre zvyšné konfigurácie motora.

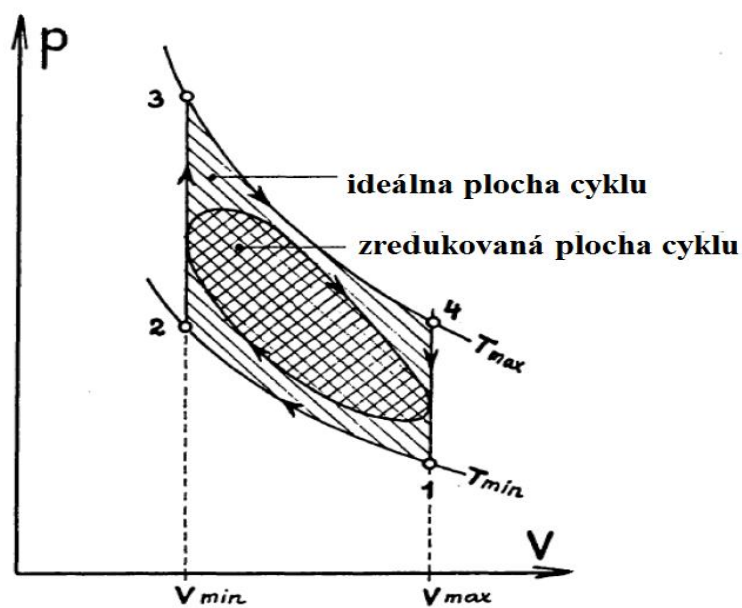
Reálny motor pracuje za nasledujúcich podmienok:

- pohyb pracovného a premiestňovacieho piestu je spojitý- tvar pohybového diagramu reálneho cyklu sa značne líši od tvaru zobrazeného na obr. 3.10. Pohyb pracovného piestu pripomína sínusoidu, pričom rýchlosť stúpania je rovnaká ako rýchlosť klesania. Pohyb premiestňovacieho piestu je odlišný a ťažšie slovné opísateľný. Na obr. 3.12 je pohybový diagram oboch piestov reálneho motora [2, 4, 5],
- účinnosť regenerátoru nikdy nedosiahne hodnoty 100%, v skutočnosti nie je možné, aby regenerátor ohrial alebo ochladil pracovnú látku bez toho, aby došlo ku zmene jeho vlastnej teploty. Navyše medzi pracovným plynom a jednotlivými bodmi regenerátoru vzniká teplotný rozdiel. V praxi je realizovateľná účinnosť regenerátoru približne 95% [5],
- žiadnou konštrukciou nie je možné dosiahnuť nulového mŕtveho objemu. Ten sa nachádza predovšetkým vo voľných priestoroch regenerátoru, medzi krajnými polohami priemestňovacieho piestu a povrchu výmenníkov tepla a medzi stenami pemiestňovacieho piestu a valca, v ktorom je piest uložený. Mŕtvy objem znižuje prácu získanú v cykle a celkový výkon motora [2, 5],
- stlačovanie a rozpínanie neprebiehajú izotermicky- prestup tepla z pracovného plynu do okolia a zo zdroja tepla na pracovný plyn prebieha v tepelných výmenníkoch. Prenos tepla vždy prebieha len počas veľmi krátkej doby, preto expanzia a kompresia neprebiehajú izotermicky, ale približujú sa skôr dejom adiabatickým [5],
- počas operácie motora dochádza k úniku pracovnej látky- sústava nikdy nie je perfektne tesná a vždy dochádza k malým únikom pracovného plynu. Tým sa znižuje pomer maximálneho a minimálneho tlaku vo valci, čo má vplyv na výkon motora [5],
- pri premiestňovaní pracovnej látky po objeme valca dochádza ku stratám prúdením- pri chode motora pracovný plyn prúdi cez regenerátor a oba výmenníky tepla. Pri prúdení vznikajú straty, ktoré sú príčinou rozdielnych tlakov v rôznych miestach valca. Pre modifikáciu γ platí, že priemer premiestňovacieho piestu je veľký, preto vzniká pri prúdení plynu veľký odpor [2, 4, 5],
- tepelné straty nie sú zanedbateľné- straty vznikajú vedením tepla medzi stenou valca a stenou premiestňovacieho piestu, ako aj medzi piestom a pracovným plynom [2, 5],
- počas chodu motora dochádza ku mechanickému treniu medzi rôznymi časťami mechanizmu, ako sú pohyblivé spoje, ložiská alebo piesty [2, 5].

Dôsledkom všetkých vymenovaných odlišností od ideálneho cyklu vzniká výrazný rozdiel medzi obehom ideálnym a reálnym. Rozdiel je názorne ilustrovaný v p-V diagrame na obr. 3.13.



Obr. 3.3 Pohybový diagram premiestňovacieho a pracovného piestu reálneho Stirlingovho cyklu [4]



Obr. 3.13 Porovnanie ideálneho a reálneho Stirlingovho cyklu v p-V diagrame [5]

4 VARIANTY STIRLINGOVHO MOTORA

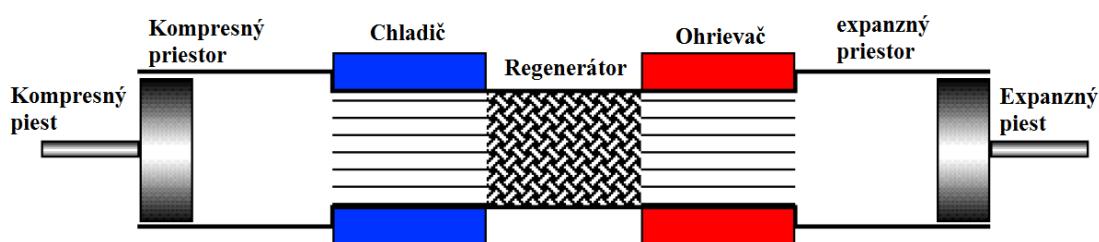
Jednotlivé časti Stirlingovho motora boli popísané v kapitole 2 a všetky do dnešného dňa vyvinuté varianty využívajú pre svoju funkciu rovnaké súčasti. Odlišuje sa len ich usporiadanie a tvar. Hlavnou funkciou celej zostavy je zabezpečiť plynulý pohyb plynu vo valci.

4.1 Konfigurácia Alfa (α)

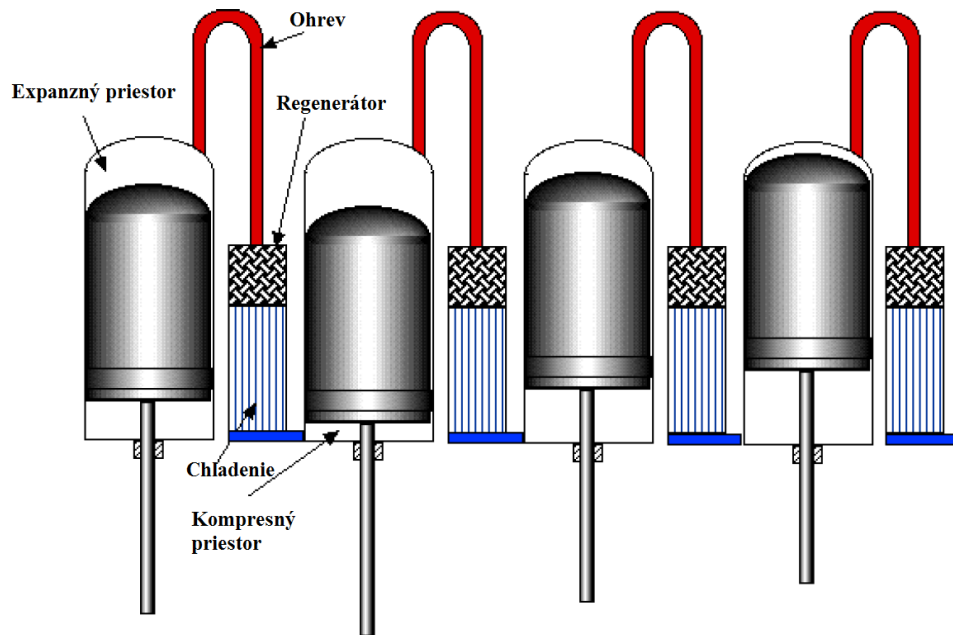
Konfigurácia alfa má dva piesty uložené v oddelených valcoch, ktoré sú spojené do série spoločne s ohrievačom, regenerátorom a chladičom. Jeden z piestov sa pohybuje v horúcom valci a druhý vo valci studenom (Niekedy sa valce označujú aj ako kompresný a expanzný, názvoslovie nie je do dnešného dňa ustálené). Z mechanického hľadiska ide o najjednoduchšiu zostavu, ktorá vyniká vysokým pomerom získaného výkonu na objem motora. Nevýhodou konfigurácie je to, že oba piesty musia byť utesnené voči úniku pracovného plynu, čo je náročnou požiadavkou najmä v prípade piestu pracujúceho v horúcej časti zariadenia.

Na obr. 4.1 je schéma motora s protiahlymi piestami, ktorý vyniká malým mŕtvym objemom, ale aj svojou dĺžkou a náročným spojením piestu s kľukovým hriadeľom.

Zaujímavou vlastnosťou konfigurácie je možnosť vytvoriť dvojčinnú variantu, ktorá využíva štyri piesty uložené v príslušných valcoch. Priestor nad piestami je ohrievaný a priestor pod nimi je ochladzovaný, pričom studený priestor je prepojený s horúcim priestrom nasledujúceho valca. Toto prevedenie výrazne znižuje hmotnosť na jednotku výkonu, a preto je najrozšírenejšou konštrukčnou variantou Stirlingovho motora. Jeho skúmaniu sa intenzívne venovala spoločnosť Philips od 40. do 60. rokov 20. storočia. Schéma ja na obr. 4.2 [2, 3, 5, 6].



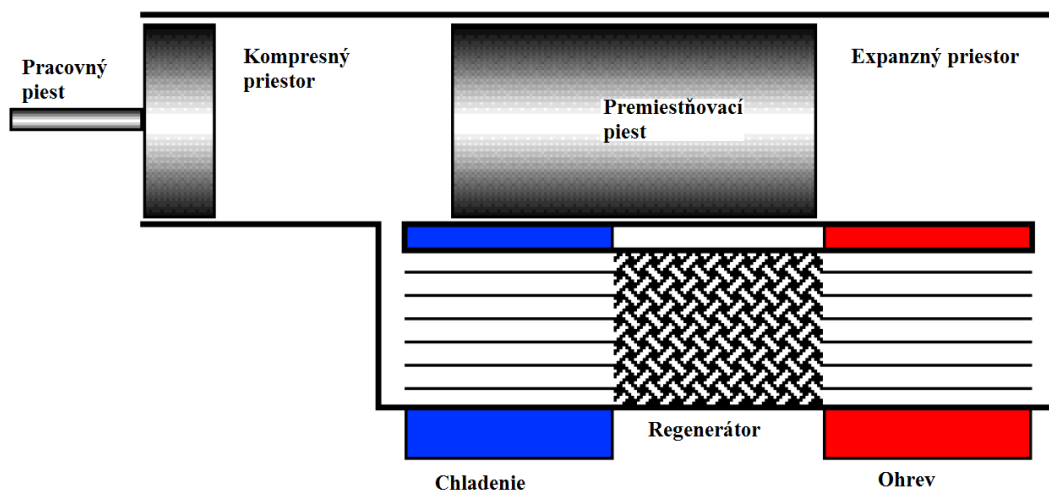
Obr. 4.1 Stirlingov motor modifikácie Alfa [2]



Obr. 4.2 Dvojčinná verzia Stirlingovho motora modifikácie Alfa [2]

4.2 Konfigurácia Beta (β)

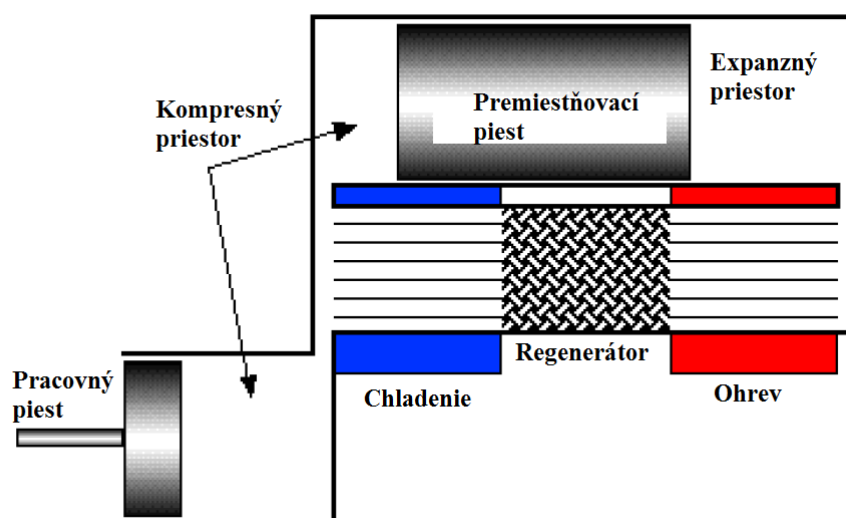
Konfigurácia Beta sa skladá z pracovného a premiestňovacieho piestu, ktoré sú uložené v spoločnom valci. Vďaka tomu sa jedná o pomerne kompaktný dizajn, ktorý má obyčajne veľmi malý mŕtvy objem. Z mechanického hľadiska ide o jednoduchú zostavu, keďže sú oba piesty pripojené k spoločnému bodu na kľukovom hriadeľi. Jedinou komplikáciou je, že ťahadlo spájajúce premiestňovací piest s hriadeľom musí prechádzať skrz pracovný piest. Preto musí byť uloženie ťahadla dômyselne navrhnuté a utesnené tak, aby nedochádzalo k úniku plynu. Schéma modifikácie β je na obr. 4.3 [2, 3, 5, 6].



Obr. 4.3 Stirlingov motor modifikácie Beta [2]

4.3 Konfigurácia Gamma (γ)

Konfigurácia Gamma a Beta sú si podobné, jediným rozdielom je to, že v konfigurácii Gamma je pracovný piest umiestnený v inom valci ako premiestňovací piest. To rieši problémy s utesnením ťahadla, ktoré spája premiestňovací piest s kľukovým hriadeľom. Nevýhodou je, že ani teoreticky nemôže nastať situácia, kedy je objem chladného priestoru nulový, čo má za následok zväčšenie mŕtveho objemu. Táto modifikácia je vhodná len pre veľmi malé motory do výkonu rádovo stoviek Wattov. Je však najjednoduchšie zostrojiteľným variantom v prípade použitia lacných materiálov a jednoduchých obrábacích nástrojov. Schéma Gamma konfigurácie Stirlingovho motora je na obr. 4.4 [2, 3, 5, 6].

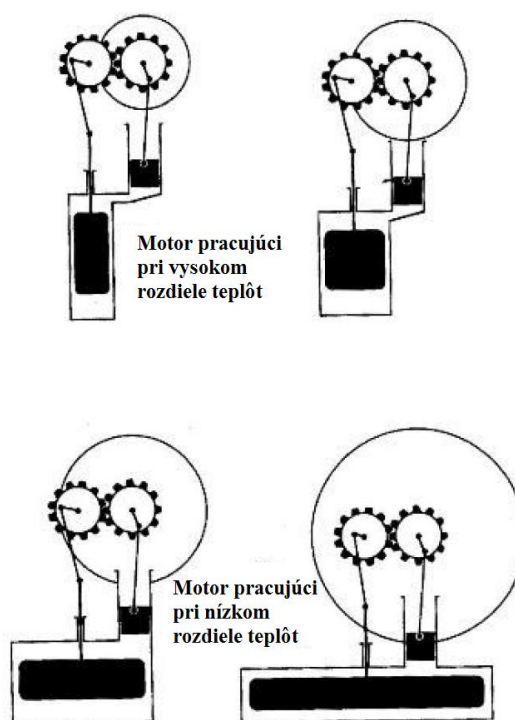


Obr. 4.4 Stirlingov motor modifikácie Gamma [2]

4.4. Stirlingove motory pracujúce pri nízkom rozdielne teplôt

Motory pracujúce pri nízkom rozdielne teplôt sa nevyznačujú žiadnou špecifickou črtou v zmysle usporiadania jeho častí, ale vzhľadom k tomu, že je práca zameraná práve na tento typ motora, bude v ďalšom texte bližšie špecifikovaný aj tento druh.

Za nízkotepelné Stirlingove motory sú obyčajne považované také zariadenia, ktoré sú schopné pracovať pri rozdielne teplôt nižšom ako 100°C . Akýkoľvek prístroj fungujúci pri takto nízkom rozdielne teplôt musí byť zahrievaný iným zdrojom tepla, ako je horenie, pretože pri horení bežne teplota dosahuje výšky až niekoľko stoviek stupňov. Z obr. 4.5 je zrejмый rozdiel v geometrii a rozmeroch častí motora pracujúceho pri nízkom a vysokom rozdielne teplôt. V prípade motora pracujúceho pri vysokých teplotách je nutné zabezpečiť relatívne veľký priestor medzi horúcim a studeným koncom za účelkom zníženia tepelých strát vplyvom tepelného vedenia. Veľkosť ohrievanej a ochladzovanej plochy v tomto prípade nie je obzvlášť podstatná. Naopak v prípade motora pracujúceho pri nízkom rozdielne teplôt je veľkosť plochy ohrevu a ochladzovania dôležitá, pretože musí byť zabezpečený dostatočný ohrev a ochladenie pracovnej látky aj za relatívne nízkych teplôt. Vzďialenosť medzi horúcou a studenou stranou nemusí byť veľká, keďže nedochádza k vysokým stratám vedením [2].



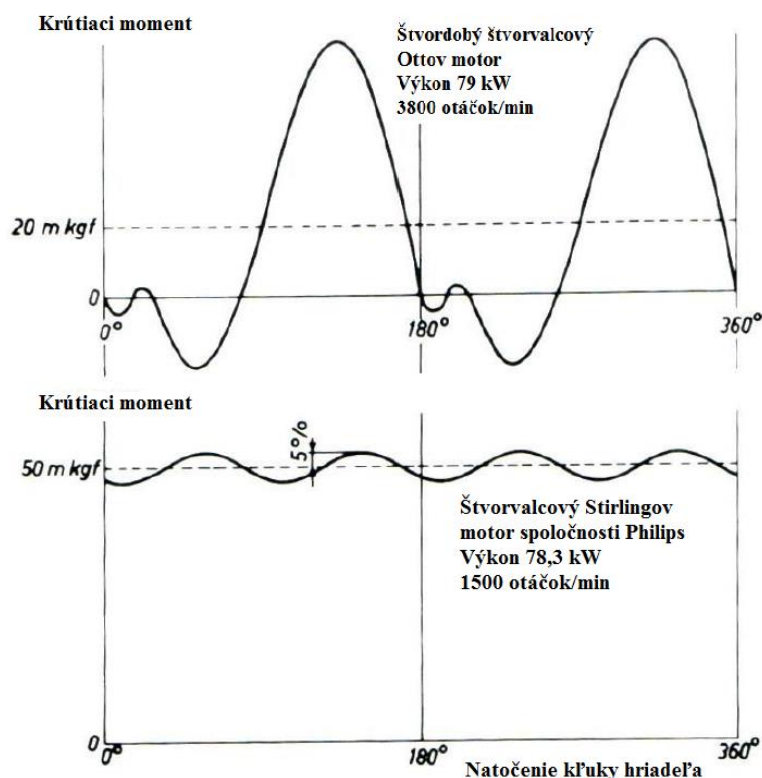
Obr. 4.5 Geometria Stirlingovho motora pracujúceho pri vysokom a nízkom rozdielne teplôt [2]

5 VÝHODY A NEVÝHODY STIRLINGOVÝCH MOTOROV V POROVNANÍ SO SPAĽOVACÍMI MOTORMI

Ako bolo spomenuté v kapitole 1, spaľovací motor v mnohých ohľadoch predčil Stirlingove motory. Neskôr sa objavovali mnohé pokusy nahradiť spaľovací motor Stirlingovým, ale takmer vždy sa skončili neúspechom. Napriek tomu nachádza Stirlingov motor využitie v špeciálnych aplikáciach, z ktorých bolo zopár vybraných a popísaných v závere kapitoly 1. Vhodnosť použitia práve tohto motora je daná jeho prednosťami. Tie budú vymenované v nasledujúcich riadkoch práce. Doplnené budú aj o vymenovanie nedostatkov motora.

5.1. Výhody Stirlingovho motora v porovnaní s klasickým spaľovacím motorom

- Vysoká termodynamická účinnosť ideálneho cyklu, ktorá je limitovaná až účinnosťou Carnotovho cyklu. V skutočnosti môže Stirlingov motor dosiahnuť účinnosti do 40%. Stirling Energy Systems vyvinulo motor, ktorý je schopný premeniť až 31,25% slnečnej energie na elektrinu [2, 3].
- Možnosť využitia akéhokoľvek paliva (plynného, kvapalného a tuhého), čo prináša veľkú výhodu pri výrobe elektriny zo slnečnej energie. Motory sú vďaka tomu schopné generovať elektrický prúd aj v prípade nepriaznivého počasia, alebo tmy. Táto vlastnosť navyše chráni motor pred prípadným zvyšovaním ceny niektorého z rôznych druhov palív. Takisto je možné využiť ako palivo odpadové teplo z technologických procesov alebo geotermálnu energiu [2, 3].
- Schopnosť pracovať v obrátenom cykle, kedy je premiestňovací piest poháňaný prídavným motorom a systém pracuje ako tepelné čerpadlo. Týmto spôsobom je možné dosiahnuť na chladnej strane veľmi nízkych, až kryogénnych teplôt [2].
- Nižšia hodnota emisií, ktorá je dosiahnutá vďaka vonkajšiemu spaľovaniu. Spaľovanie paliva mimo tela motora je pri správnej konštrukcii spaľovacieho systému dokonalejšie ako v prípade vnútorného, ktoré je bežne využívané v spaľovacích motoroch [2, 3].
- Veľmi nízka hlučnosť, dosiahnutá pozvoľnou zmenou tlaku v priebehu cyklu a neprítomnosťou cyklických zážihov a vznetov [2, 3].
- Nízke vibrácie, ktoré je možné dosiahnuť vďaka nenáročnému vyladeniu motora a nízkym otáčkam [2, 3].
- Výrazne nižšie servisné náklady dané dlhými servisnými intervalmi, ktoré sa bežne pohybujú v rozmedzí 5 000 až 10 000 hodín. Dlhá životnosť je daná nízkym počtom pohybujúcich sa častí, nízkymi otáčkami a malými vibráciami. Jedinými súčasťami motora, ktoré podliehajú opotrebovaniu sú piestne krúžky a ložiská [2, 3].
- Nulová spotreba oleja [2].
- Vyvážený krútiaci moment, čo je zrejmé z obr. 5.1, ktorý porovnáva závislosť krútiaceho momentu na natočení kľuky hriadeľa štvorvalcového Stirlingovho motora a štvorvalcového motora s vnútorným spaľovaním [3].



Obr. 5.1 Porovnanie závislosti krútiaceho momentu na natočení kľuky hriadeľa [2]

5.2 Nevýhody Stirlingovho motora v porovnaní s klasickým spaľovacím motorom

- Vyššia cena z dôvodu malej sériovosti, náročnej montáže a nutnosti použitia špeciálnych materiálov, ktoré sú nenahraditeľné predovšetkým v častiach motora vystavených vysokým teplotám a tlaku. Pri výrobe takýchto zariadení sa navyše často využívajú technológie nevhodné pre sériovú výrobu [2, 3].
- Pomalá regulácia výkonu. Stirlingove motory sú schopné efektívnej prevádzky len v relatívne úzkom rozsahu rýchlostí. Zvyšovanie rýchlosti a výkonu vyžaduje zvýšenie prívodu tepla, pri ktorom vzniká určité oneskorenie spôsobené len pozvoľným ohrevom pracovnej látky. Táto vlastnosť bráni využitiu Stirlingových motorov v automobilovom priemysle, neprekáža však pri výrobe elektriny [2, 3].
- Nutnosť nahriať motor pred samotným štartom. Nahriatie plynu, ktorý sa nachádza v blízkosti horúcej strany motora nieje okamžité, ale vyžaduje čas. Navyše motor nedosahuje maximálnych hodnôt výkonu ešte počas ďalších zopár sekúnd od štartu [2, 3].
- Veľkosť a vyššia hmotnosť- v porovnaní so spaľovacími motormi rovnakého výkonu sú Stirlingove motory obrovské a ťažké. To je obvyčajne spôsobené tým, že motor pracuje pri vysokom tlaku, ktorému musí byť schopné odolať jeho krytovanie. Táto vlastnosť opäť nieje prekážkou v prípade motorov slúžiacich k výrobe elektriny [2, 3].

6 NÁVRH STIRLINGOVHO MOTORA

Cieľom experimentálnej časti bakalárskej práce bolo navrhnuť model motora využívajúci ku svojmu chodu Stirlingov termodynamický cyklus. Všetky tvarovo zložité diely boli navrhnuté tak, aby bola možná ich výroba technológiou Fused Deposition Modeling (ďalej len FDM). Zvyšné časti bolo možné vyrobiť pomocou jednoduchých priemyselných strojov, alebo zakúpiť v bežných predajniach spojovacieho materiálu. Ide predovšetkým o diely vystavené vyšším teplotám, diely vyžadujúce takú presnosť, aká nie je splniteľná v prípade výroby technológiou FDM a o bežne dostupné normalizované súčiastky ako sú skrutky, matice, podložky, tesnenia, ložiská alebo drôty. Kvôli nízkej odolnosti voči vysokým teplotám ABS (Akrylonitrilbutadiénstyrén) plastu je projekt obmedzený na návrh modelu pracujúceho pri nízkom rozdiel teplot.

Pri návrhu bol kladený dôraz na to, aby bol model ľahko zmontovateľný a jednotlivé časti nahraditeľné v prípade optimalizácie a implementácie ďalších vylepšení. Motor mal slúžiť pre prezentačné a výukové účely, preto bola snaha vytvoriť konštrukciu schopnú odolať aj menej opatrnému zaobchádzaniu. Keďže ide o nízkoteplotný motor, nebol očakávaný vysoký výkon, ani vysoké otáčky.

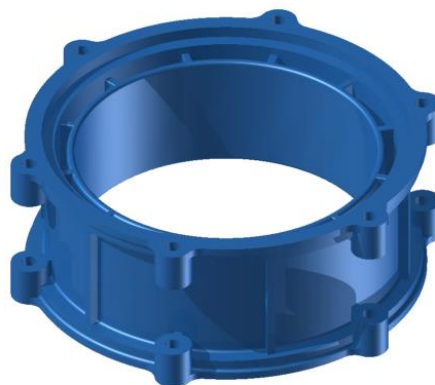
Všetky časti boli navrhnuté v konštručnom programe Autodesk Inventor.

6.1 Návrh dielov určených pre výrobu metódou FDM

Motor bol zložený z 11 častí vyrobených z ABS plastu pomocou technológie FDM. ABS plast má nízku tepelnú vodivosť, čo je v prípade niektorých dielov, akým je napríklad premiestňovací piest a valec, v ktorom je piest uložený, prospešné. Vo zvyšných prípadoch tepelná vodivosť materiálu výrazne neovplyvňuje funkciu motora.

6.1.1 Valec premiestňovacieho piestu

Vizualizácia valca premiestňovacieho piestu je na obr. 6.1. Ide o najväčší a druhý najzložitejší diel modelu. Vnútorý priemer 76 mm je definovaný rozmerom premiestňovacieho piestu, ktorý sa bude pohybovať vo vnútri telesa. Valec má v blízkosti vnútorného priemeru 12 dier, do ktorých budú vložené tenké pliešky s funkciou regenerátora. Valec obsahuje drážky pre uloženie O-kružkov, ktoré zabránia úniku vzduchu z valca. Predchystaných je aj 6 párov dier s priemerom 3,2 mm, ktoré slúžia k priskrutkovaniu tepelných výmenníkov k valcu. Návrh dier umožňuje priskrutkovanie teplej a studenej strany dvoma rôznymi sadami skrutiek, čím sa zabráni zbytočnému prenosu tepla medzi jednotlivými stranami výmenníka vedením tepla po tele skrutiek.

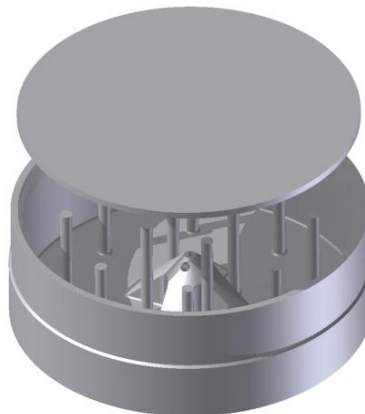


Obr. 6.1 Valec premiestňovacieho piestu [8]

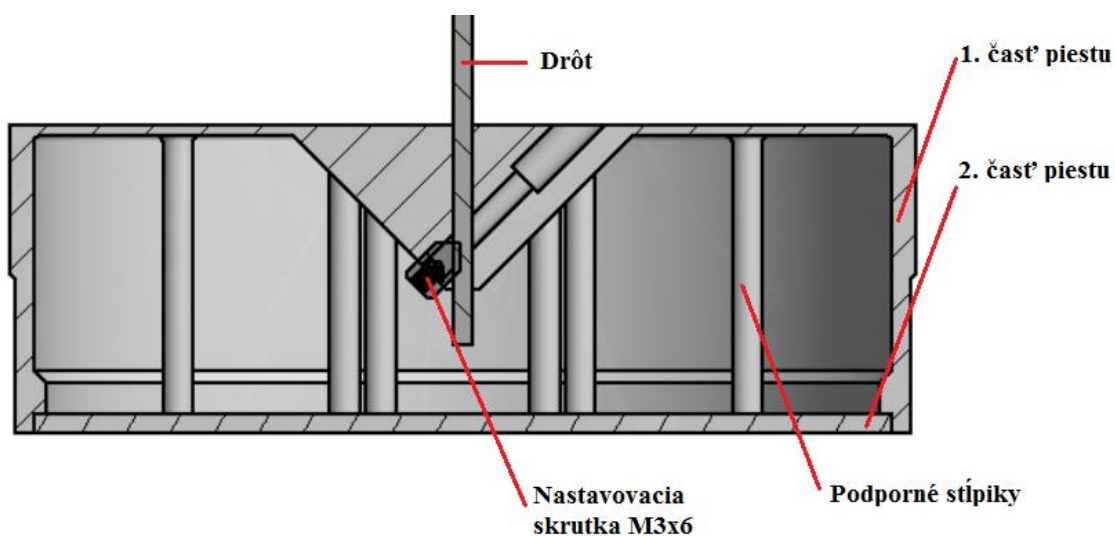
6.1.2 Premiestňovací piest

Premiestňovací piest musí byť vo valci uložený tak, aby svojím pohybom vytlačil čo najväčšie množstvo pracovného plynu do regenerátora. Pri svojom pohybe sa ale nemôže dotýkať stien valca, pretože vznikajúce trenie by bránilo v plynulom chode motora. Preto musí byť zabezpečené presné uloženie piestu vo valci. Vonkajší priemer piestu je 74 mm, medzi vonkajšou stenou piestu a vnútornou stenou valca je teda medzera 1 mm. Piest sa skladá z dvoch častí, ktoré boli pri montáži spojené lepeným spojmom tak, aby bol vzduch uzavretý vo vnútri a nemal možnosť úniku. Únik vzduchu by výrazne ovplyvnil funkciu motora. Tenké stĺpiky vo vnútri slúžia ako podpora hornej a dolnej steny piestu a zabraňujú prihybom stien počas chodu. V pieste sú dve diery, jedna s priemerom 1,8 mm pre uloženie drôtu prepojeného s ťahadlom, druhá o priemere 2,8 mm pre našroubovanie nastavovacej skrutky. Obe diery budú vytlačené s menším priemerom a ich rozmer bude upravený na priemyselnej vŕtačke. V diere pre nastavovaciu skrutku bude navyše navŕtaný závit M3.

Dve hlavné časti premiestňovacieho piestu sú na obr. 6.2. Na obr. 6.3 je rez celou zostavou piestu.



Obr. 6.2 Dve hlavné časti premiestňovacieho piestu [8]



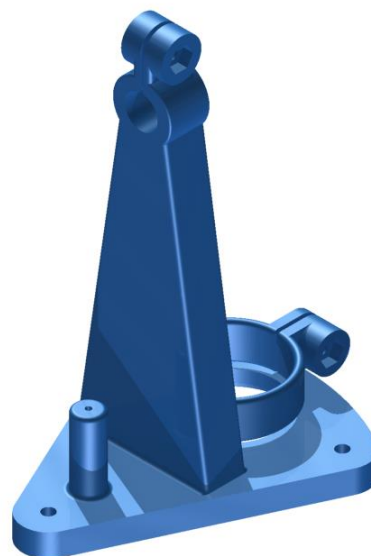
Obr. 6.3 Rez premiestňovacím piestom [8]

6.1.3 Podpora

Podpora je najkomplikovanejším dielom celej zostavy a spĺňa radu rôznych funkcií. Diel slúži na uchytenie valca pracovného piestu, ako držiak zotrvačníka a prakticky celej vrchnej časti motora, sú v nej uložené ložiská a je vedením pre ťahadlo spájajúce premiestňovací piest s kľukovým hriadeľom. V podpore sú 3 diery s priemerom 3 mm určené pre spojenie so studenou stranou výmenníka tepla. Aby sa predišlo vŕtaniu závitov, ktoré by vzhľadom k použitému materiálu neboli kvalitné a mohlo by dôjsť k ich strhnutiu, sú v podpore nachystané šesťhranné drážky pre vloženie matíc. Na spodnej časti sú pripravené drážky pre vloženie tesnenia, ktoré zabráni úniku plynu z pracovného valca do okolia. Drážky sú viditeľné na obr. 6.4. Vizualizácia podpory je na obr. 6.5.



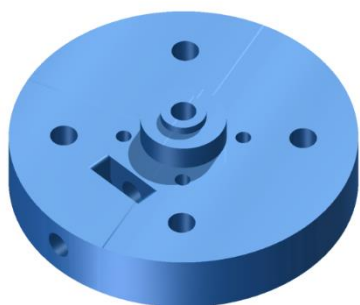
Obr. 6.4 Spodná časť podpory [8]



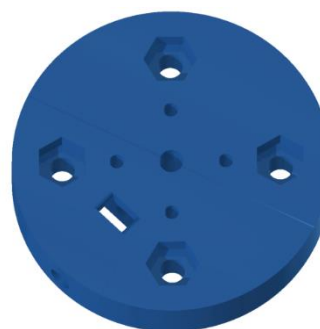
Obr. 6.5 Podpora [8]

6.1.4 Kľukový kotúč

Kľukový kotúč slúži na spojenie zotrvačníka s hriadeľom. Kotúč bude pripevnený k hriadeľu pomocou skrutky vlozenej do diery na jeho bočnej stene. Skrutka bude zaistená maticou vloženou do tvarovo prispôsobenej drážky. V kotúči sú ďalej vytvorené diery s priemerom 3,2 mm, ktoré sú určené k pripojeniu zotrvačníka. Na obr. 6.6 je pohľad na kotúč zo strany ktorou bude priložený k zotrvačníku. Na obr. 6.7 je vidno drážky, do ktorých budú nalysované matice. Rezaniu závitov sa teda aj v tomto prípade podarilo vyhnúť. Štyri malé diery o priemere 1,8 mm slúžia k upevneniu ťahadla na kľukový kotúč. Tieto diery budú vytlačené s priemerom 1,6 mm a následne upravené na požadovaný rozmer na priemyselnej vŕtačke.



Obr. 6.6 Kľukový kotúč zo strany, ktorou bude pripojený k zotrvačníku [8]



Obr. 6.7 Kľukový kotúč- pohľad na drážky určených pre nalysovanie šesťhranných matíc [8]

6.1.5 Vidlica

Diel zobrazený na obr. 6.8 slúži na prepojenie drôtu vedúceho z premiestňovacieho piestu a kratšieho ťahadla. Drôt je vo vidlici zovretý utiahnutím skrutky, ktorá je vložená do diery s priemerom 3,2 mm a zašroubovaná do matice zalisovanej do pripravenej drážky. Drôt by mohol byť zaistený aj nastavovacou skrutkou. Ide však o malý, relatívne lacný diel, čo ho robí vhodným na otestovanie zaistenia pomocou zovretia. Pokiaľ bude spojenie nespoľahlivé, môže byť diel jednoducho upravený a drôt zaistený nastavovacou skrutkou.



Obr. 6.8 Vidlica [8]

6.1.6 Ťahadlo krátke

Krátkym ťahadlom je prepojená vidlica s kľukovým kotúčom. Jeho úlohou je prenášať rotačný pohyb kľukového hriadeľa na translačný pohyb premiestňovacieho piestu. Pre pripojenie nadväzujúcich častí sú na ťahadle navrhnuté dva páry dier s priemerom 1,8 mm, do ktorých bude vložený čap. Ťahadlo je na obr. 6.9.



Obr. 6.9 Ťahadlo krátke [8]

6.1.7 Ťahadlo dlhé

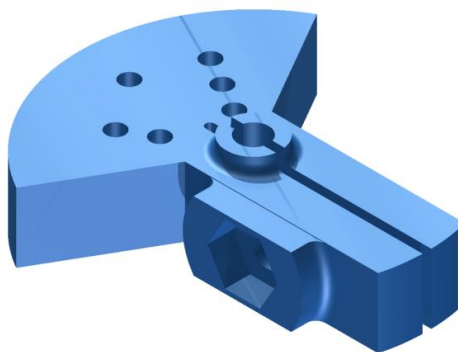
Dlhé ťahadlo je zobrazené na obr. 6.10. Jeho funkciou je prenášať translačný pohyb pracovného piestu na rotačný pohyb Kľuky hriadeľa. Spojenie ťahadla s dvoma nadväzujúcimi časťami je zabezpečené čapmi uloženými v dierach s priemerom 1,8 mm.



Obr. 6.10 Ťahadlo dlhé [8]

6.1.8 Kľuka hriadeľa

Diel je k hriadeľu pripevnený pomocou skrutkového spoja. Ďalej obsahuje 6 dier pre pripojenie dlhšieho ťahadla, ktorým je kľuka spojená s pracovným piestom. Viacero dier rozmiestnených v rôznych vzdialenostiach od osi hriadeľa umožňujú zmenu kompresného pomeru motora. Pri nízkom rozdieli teploty je potrebné, aby bol kompresný pomer nízky a motor pracoval s minimálnym výkonom. V tomto prípade bude ťahadlo spojené s kľukou cez čap uložený v diere najbližšie k osi hriadeľa. Pre vyššie rozdiely teplôt je možné ťahadlo pripojiť cez čap k vzdialenejším dieram a sledovať vplyv kompresného pomeru na chod motora. Kľuka je na obr. 6.11.



Obr. 6.11 Kľuka hriadeľa [8]

6.1.9 Vložka pracovného piestu

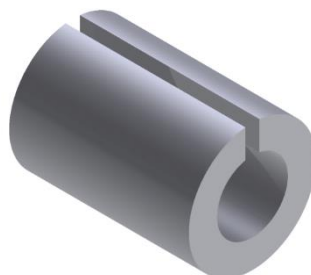
Vložka pracovného piestu je na obr. 6.12. Drážka v dolnej časti dielu je určená pre navlečenie O-kružku. Ten po nalysovaní dielu do hliníkového piestu zabezpečuje tlakové spojenie a zamedzuje axiálny pohyb vložky v pieste. V hornej časti vložky sú dve diery s priemerom 1,8 mm pre vloženie čapu, ktorým je vložka pripojená k dlhému ťahadlu.



Obr. 6.12 Vložka pracovného piestu [8]

6.1.10 Vložka pre uloženie ložísk

Diel zabezpečuje tesné uloženie ložísk v podpore. Drážka v hornej časti vložky umožňuje stiahnutie valčeka utiahnutím skrutky, ktorá sa nachádza navrchu podpory. Tým sa zabezpečí pevné zovretie ložísk v žiadanej polohe. Vložka je na obr. 6.13.



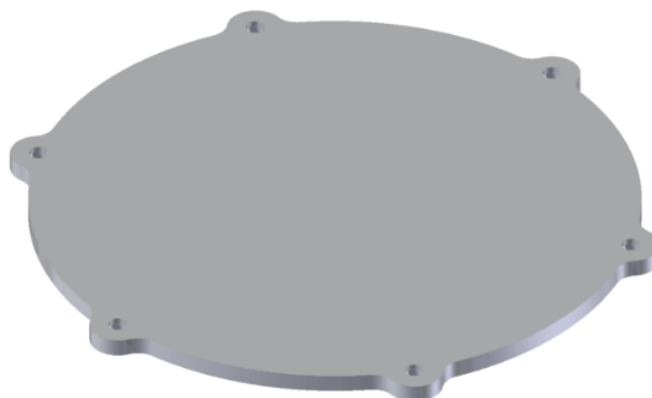
Obr. 6.13 Vložka pre uloženie ložísk [8]

6.2 Diely vyrobené konvenčnými metódami obrábania

Časti, ktoré kvôli svojej funkcii nebolo možné vyrobiť z ABS plastu boli navrhnuté tak, aby sa dali vyrobiť technológiami ako je pálenie plechov, vrtanie a sústruženie.

6.2.1 Teplá strana výmenníka tepla

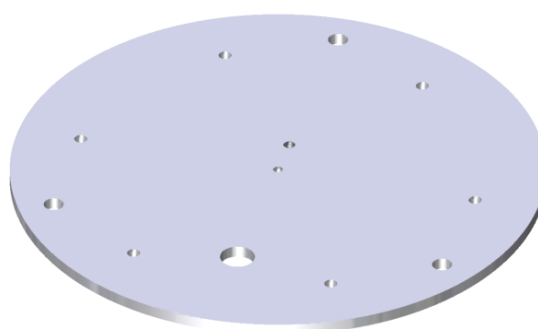
Diel bude vyrobený z hliníkového plechu hrúbky 2,5 mm. Bude mať šesť dier, ktoré slúžia k pripevneniu výmenníka k valcu premiestňovacieho piestu. Hliník bol zvolený kvôli dobrej tepelnej vodivosti, korozivzdornosti a relatívne nízkej cene. Zvolená hrúbka plechu 2,5 mm je dostatočná aby zabránila jeho prehybaniu počas chodu motora. Diel je na obr. 6.14.



Obr. 6.14 Teplá strana výmenníka tepla [8]

6.2.2 Chladná strana výmenníka tepla

Diel bude vyrobený opäť z hliníkového plechu hrúbky 2,5 mm. V diere, ktorá sa nachádza v strede výmenníka, sa bude pohybovať drôt spájajúci premiestňovací piest s ťahadlom. Jej priemer je 1,9 mm. Okrem šiestich dier určených pre spojenie výmenníka s valcom premiestňovacieho piestu bude mať ďalšie tri diery s priemerom 6 mm, do ktorých budú môcť byť namontované závitové tyče. Tie budú slúžiť na zabezpečenie motora v pozícii "hlavou nadol". To umožní natočenie horúcej strany výmenníka tepla smerom k Slnku, ktorého žiarenie bude slúžiť ako zdroj tepelnej energie. Výmenník ďalej obsahuje veľkú diery s priemerom 9 mm, ktorou počas chodu motora bude prúdiť pracovný plyn z jedného valca do druhého a späť. Do diery, ktorá sa nachádza v blízkosti stredu výmenníka bude vyrezaný závit. Spolu s dvoma krajnými dierami bude slúžiť k spojeniu dielu s podporou. Závit je nutný, pretože zabezpečí menší únik pracovného plynu z valca. Vizualizácia dielu je na obr. 6.15.



Obr. 6.15 Studená strana výmenníka tepla [8]

6.2.3 Pracovní piest

Pracovní piest spoločne s valcom, v ktorom sa pohybuje sú diely vyžadujúce najvyššiu výrobnú presnosť. Uloženie piestu vo valci musí byť dostatočne tesné na to, aby uspokojivo utesnilo pracovný plyn v tele motora, ale zároveň dostatočne voľné na to, aby sa vo valci mohol piest pohybovať s minimálnou hodnotou trenia. Vonkajšia stena pracovného piestu bude preto obrobená na sústruhu tak, aby bol vonkajší priemer piestu 22 mm. Tolerancia vonkajšieho priemeru piestu a vnútorného priemeru valca bola zvolená tak, aby sa medzera medzi stenami dielov pohybovala v rozmedzí od 0,01 mm do 0,03 mm. Pracovní piest bude vyrobený z hliníku, ktorý zabezpečí nízku hmotnosť dielu. Piest je na obr. 6.16.



Obr. 6.16 Pracovní piest [8]

6.2.4 Valec pracovného piestu

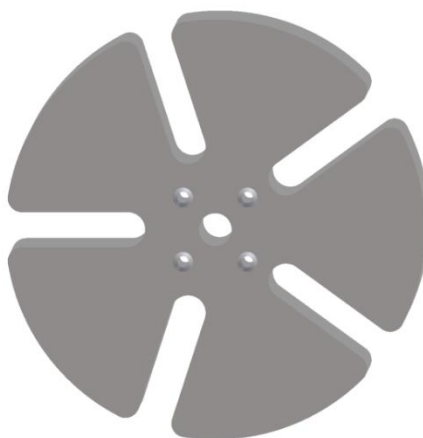
Pre výrobu valca pracovného piestu bola zvolená mosadz. Tento materiál bol zvolený, pretože z dostupných materiálov vykazuje v interakcii s rôznymi materiálmi najnižšiu hodnotu dynamického koeficientu trenia. Hodnota koeficientu je napríklad pre kombináciu mosadzi a šedej liatiny 0,3; pre kombináciu mosadzi a oceli 0,44 [8]. Koeficient trenia medzi mosadzou a hliníkom sa nepodarilo zistiť. Uloženie pracovného piestu vo valci je popísané v predchádzajúcej podkapitole. Valec je zobrazený na obr. 6.17.



Obr. 6.17 Valec pracovného piestu [8]

6.2.5 Zotrvačník

Funkcia zotrvačníka bola popísaná v kapitole 2.5.2. Súčasť bude vypálená z hliníkového plechu hrúbky 2,5 mm. Predpokladaná váha je 75 gramov. Keďže je výkon motora v tejto fáze práce neznámy, nedá sa posúdiť, či je váha adekvátne. Súčasť bude musieť byť otestovaná a prípadne vhodne upravená. Štyri diery s priemerom 3,2 mm rozmiestnené okolo stredu súčasti slúžia k pripojeniu zotrvačníka ku kľukovému kotúču. Súčasť je na obr. 6.18.



Obr. 6.18 Zotrvačník [8]

6.3 Normalizované diely

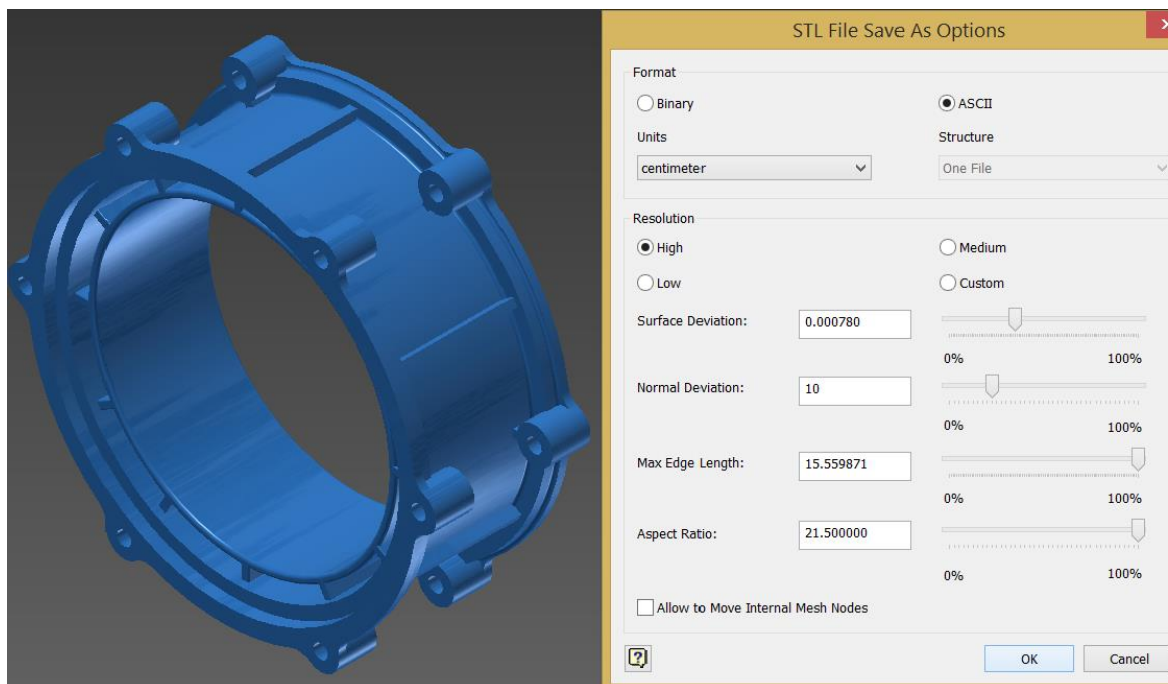
Zvyšné časti sú normalizované a dostupné v bežných predajniach pre domácich kutilov. Jedná sa hlavne o sadu skrutiek M3 s rôznymi dĺžkami, matice a podložky. Ďalej sadu tesnení, ktoré sú potrebné pre utesnenie pracovného plynu v tele motora, drôtu, ložísk a hriadeľa.

7 VÝROBA MODELU

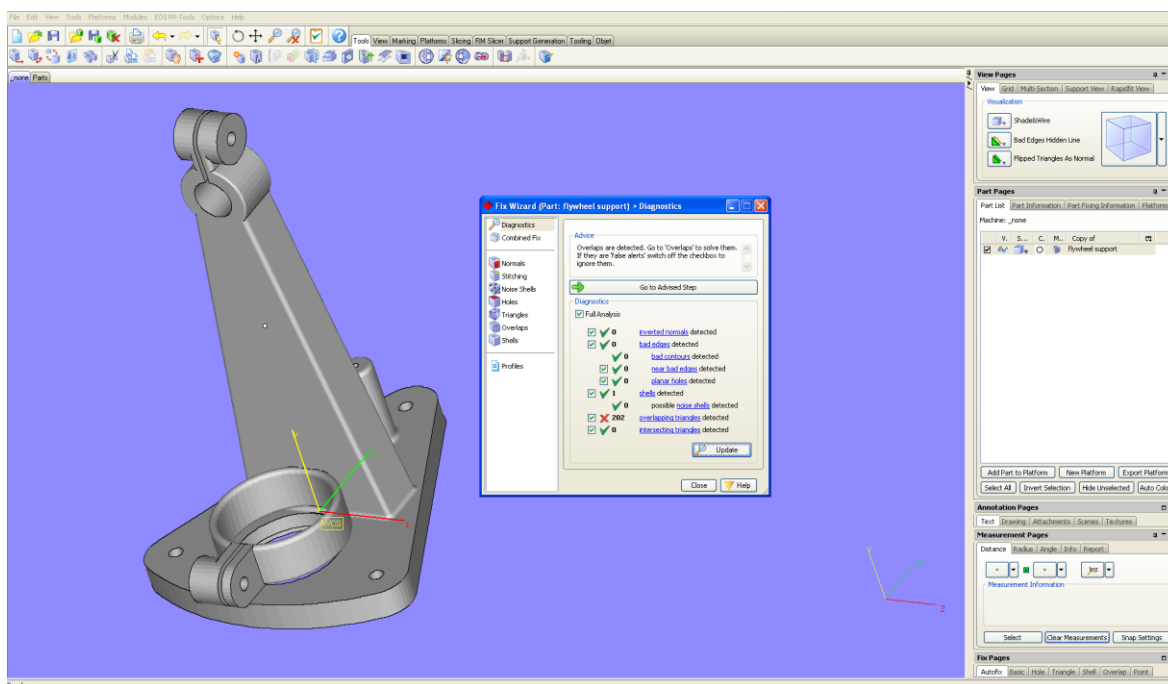
Pre výrobu jednotlivých častí modelu bola zvolená kombinácia metódy Rapid Prototyping (RP) s konvenčnými metódami obrábania. Prvá časť kapitoly popisuje postup výroby technológiou FDM, druhá časť je venovaná 4 dielom vyrobených z hliníku a mosadzi, ktoré pre výrobu vyžadovali použitie sústruhu, priemyselnej vŕtačky a technológie pálenia plechov. Na záver je popísaný postup použitý pri montáži motora.

7.1 Príprava modelu pre tlač

Po vytvorení digitálneho modelu dielov určených pre tlač boli jednotlivé časti exportované do formátu STL, ktorý sa v technológii Rapid prototypingu (ďalej len RP) považuje za štandard. Export pracovného valca do formátu STL je na obr. 7.1. Objem modelu uloženého vo formáte STL je tvorený neusporiadanou sieťou trojuholníkových plôch. Poloha každého trojuholníka je daná súradnicami X, Y a Z pre každý z jeho vrcholov a smerovým vektorom normály plochy, ktorú vytvára. Normála určuje stranu trojuholníka, ktorá je natočená von z telesa. Súbor STL je odvodený od presného modelu vytvoreného CAD modelárom. Preto vyexportovaný model nie je na 100% identický s vymodelovaným telesom, ale je jeho aproximáciou. Pri exporte dielov môže vzniknúť veľké množstvo chýb v geometrii, ako sú prevrátené trojuholníky, chybné hrany, chybné kontúry, blízke chybné hrany, rovinné diery, škrupiny a prekrývajúce sa alebo pretínajúce sa trojuholníky [10]. Chyby, ktoré vznikli pri exporte dielov motora do formátu STL boli úspešne opravené pomocou softvéru MiniMagics. Na obr. 7.2 je zobrazené prostredie programu pri otvorení súboru „podpora“ po oprave chýb. V prípade tvarovo zložitých súčastí (ktorou je aj podpora) neboli odstránené chyby typu prekrývajúce sa trojuholníky. Tie však nemajú vplyv na výslednú kvalitu hotovej súčiastky a nie je nutné im venovať veľkú pozornosť. V prípade tvarovo jednoduchých dielov boli odstránené všetky chyby, vrátane prekrývajúcich sa trojuholníkov. Pre porovnanie je na obr. 7.3 výsledná tabuľka po oprave podpory, ktorá aj naďalej obsahuje prekrývajúce sa trojuholníky a výsledná tabuľka vložky pracovného piestu, v ktorej sa podarilo odstrániť všetky druhy chýb. Obe tabuľky boli získané pomocou softvéru MiniMagics.



Obr. 7.1 Export valca pracovného piestu do formátu STL v programe Autodesk Inventor [8]



Obr. 7.2 Prostredie softvéru MiniMagics zobrazujúce hlásenie o počte chýb na súčasti „podpora“ [11]

The image displays two side-by-side diagnostic panels from the CatalystEX software. Each panel has an 'Advice' section at the top and a 'Diagnostics' section below. A 'Go to Advised Step' button is located between the two panels.

Left Panel (Successful Part):

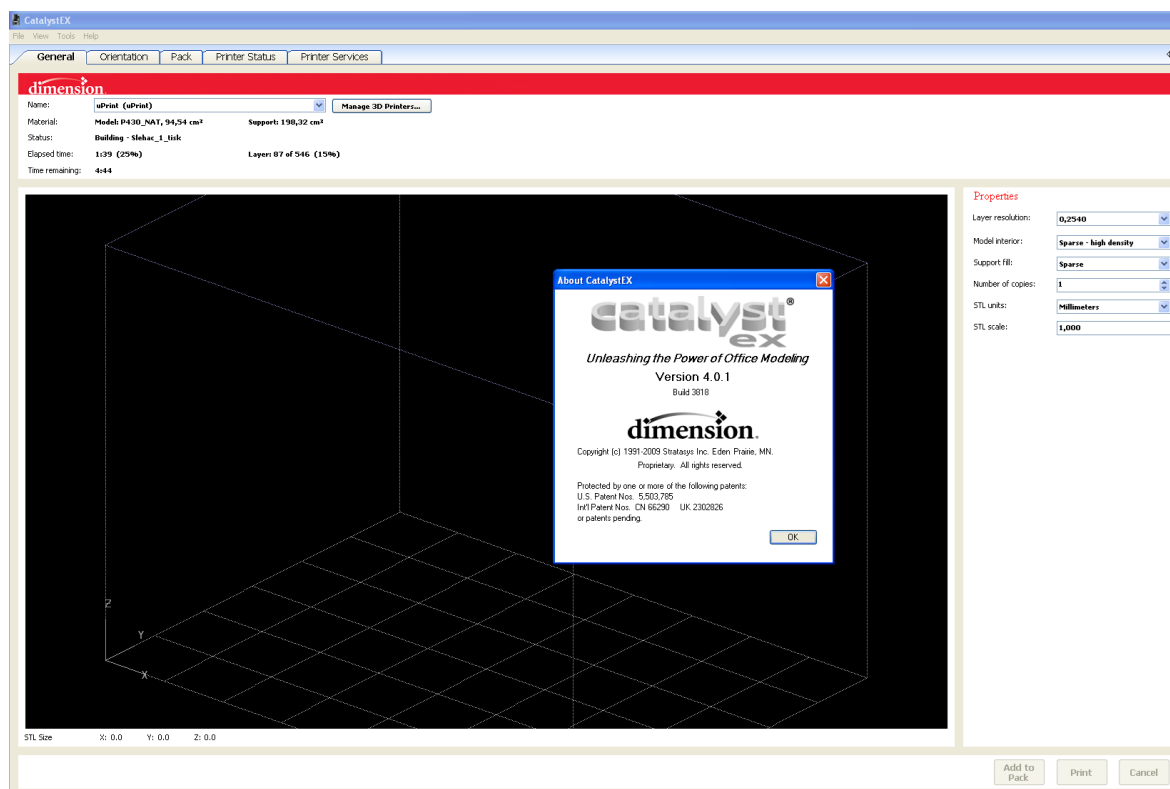
- Advice:** No more errors are detected. It seems that the part is ok.
- Diagnostics:** Full Analysis is checked. All error categories show 0 detections:
 - inverted normals detected (0)
 - bad edges detected (0)
 - bad contours detected (0)
 - near bad edges detected (0)
 - planar holes detected (0)
 - shells detected (1)
 - possible noise shells detected (0)
 - overlapping triangles detected (0)
 - intersecting triangles detected (0)

Right Panel (Part with Errors):

- Advice:** Overlaps are detected. Go to 'Overlaps' to solve them. If they are 'false alerts' switch off the checkbox to ignore them.
- Diagnostics:** Full Analysis is checked. Error categories show:
 - inverted normals detected (0)
 - bad edges detected (0)
 - bad contours detected (0)
 - near bad edges detected (0)
 - planar holes detected (0)
 - shells detected (1)
 - possible noise shells detected (0)
 - overlapping triangles detected (202)
 - intersecting triangles detected (0)

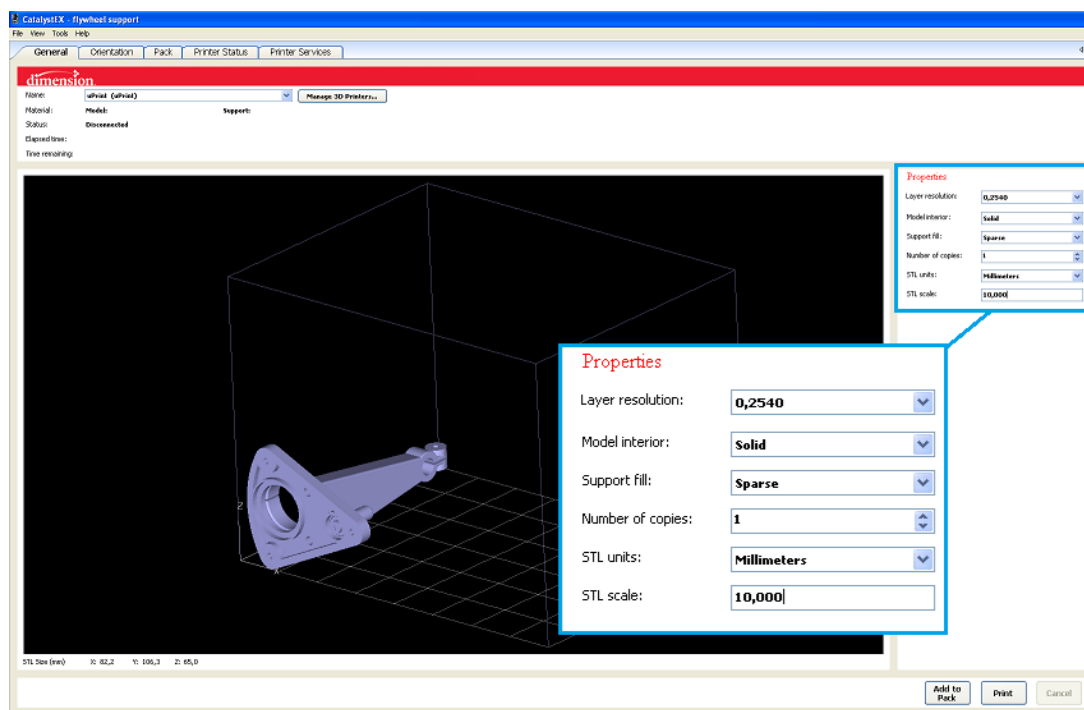
Obr. 7.3 Porovnanie hlásení o počte chýb po oprave dielov. Naľavo tabuľka pre vložku pracovného piestu, napravo pre podporu [11]

Po odstránení nebezpečných porúch na všetkých dieloch určených pre výrobu pomocou technológie FDM boli diely postupne otvorené v programe CatalystEX. CatalystEX je softvér vytvorený pre komunikáciu so všetkými verziami 3D tlačiarň Dimension. Umožňuje rýchlo a jednoducho prispôbiť digitálne modely pre výrobu pomocou FDM. Medzi typické operácie patrí umiestnenie dielov do pracovnej komory tlačiarne, uloženie na žiadané miesto na podložke a pridanie potrebných podpôr, ktoré zabraňujú odtrhnutiu dielu od podložky a chránia model pred zrútením počas jeho výroby. Prostredie softvéru je na obr. 7.4.



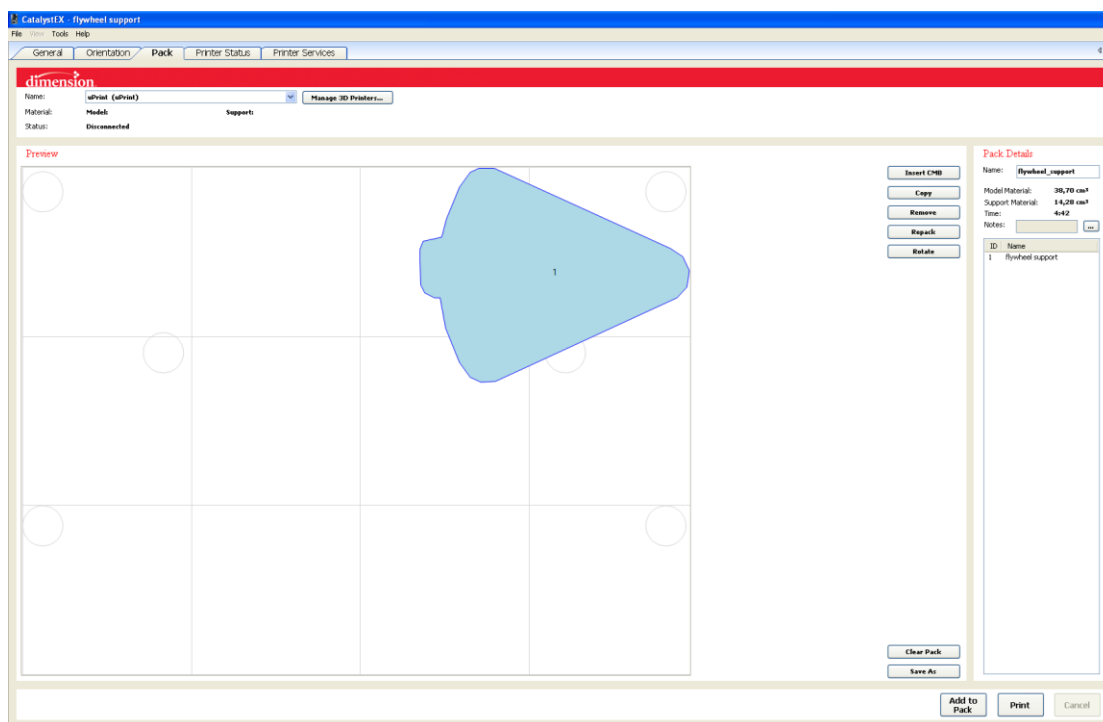
Obr. 7.4 Pracovné prostredie softvéru CatalystEX [12]

Následne bol do pracovného prostredia vložený digitálny model podpory. Táto operácia je na obr. 7.5. Pri exporte dielu bola v programe Inventor zvolená jednotka centimeter, zatiaľ čo pre úpravu modelu v programe CatalystEX je na výber len jednotka milimeter alebo palec. Preto bola zvolená jednotka milimeter a všetky rozmery súčasti boli zväčšené 10 krát. To bolo dosiahnuté zmenou hodnoty v kolonke „STL scale“ (STL mierka) z pôvodnej hodnoty 1 na hodnotu 10. Správnosť rozmerov je možné overiť porovnaním súradnic X, Y, Z, ktoré sú uvedené v spodnej lište programu. Ďalej bola zvolená hrúbka vrstvy (Layer resolution) 0,254 mm, spôsob vyplnenia pevný (Solid), spôsob vyplnenia podpory riedky (Sparse) a počet kópií 1.



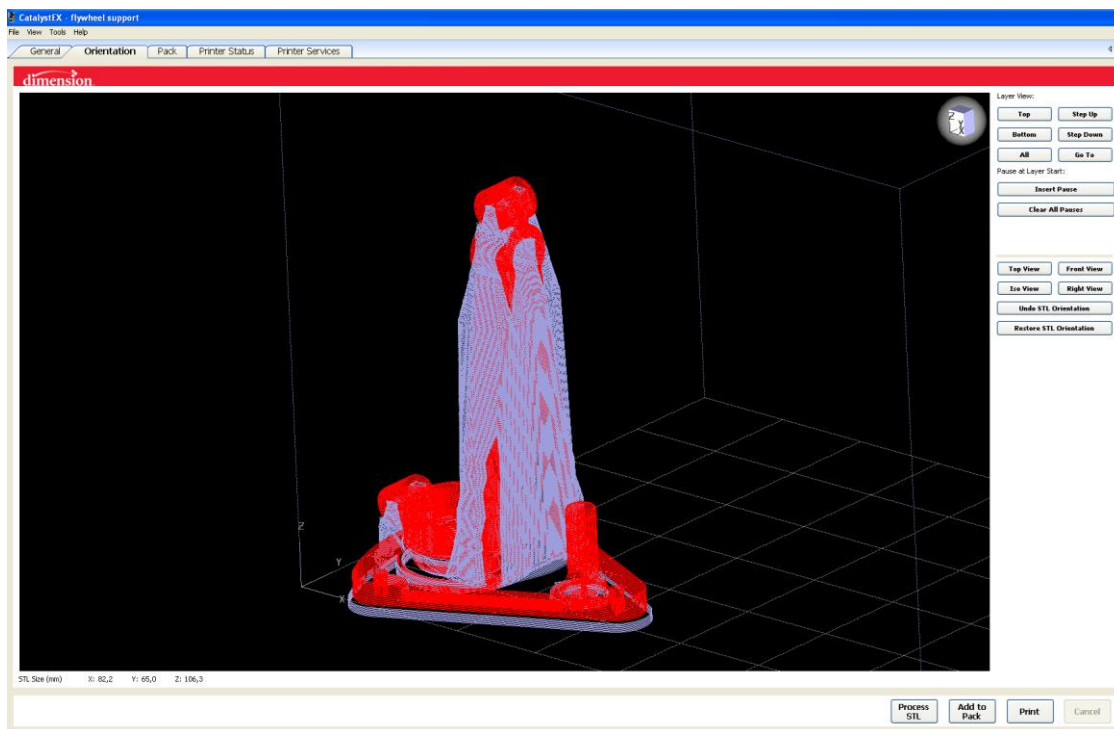
Obr. 7.5 Vloženie dielu Podpora do pracovného prostredia [12]

V ďalšom kroku bol diel vhodne natočený a ustavený na vhodné miesto na podložke. Táto operácia je na obr. 7.6. Kruhy na podložke označujú miesta, v ktorých je kontrolovaná rovinnosť podložky. Pri nedostatočnej rovinnosti by program hlásil chybovú hlášku.

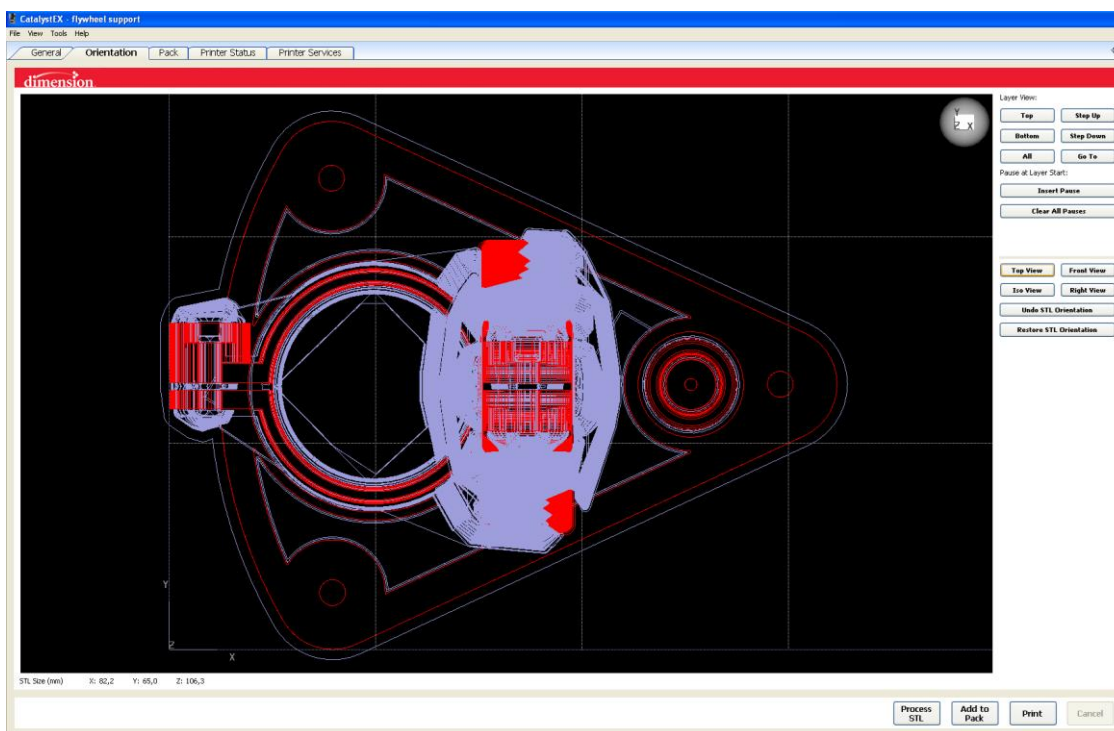


Obr. 7.6 Natočenie a uloženie modelu na vhodné miesto na podložke [12]

Nakoniec bol objem modelu rozrezaný na vrstvy a boli pridané podpory. Táto operácia bola vďaka sofistikovanosti softvéru jednoduchá a trvala len pár sekúnd. Návrh podpôr je na obr. 7.7 a obr. 7.8.

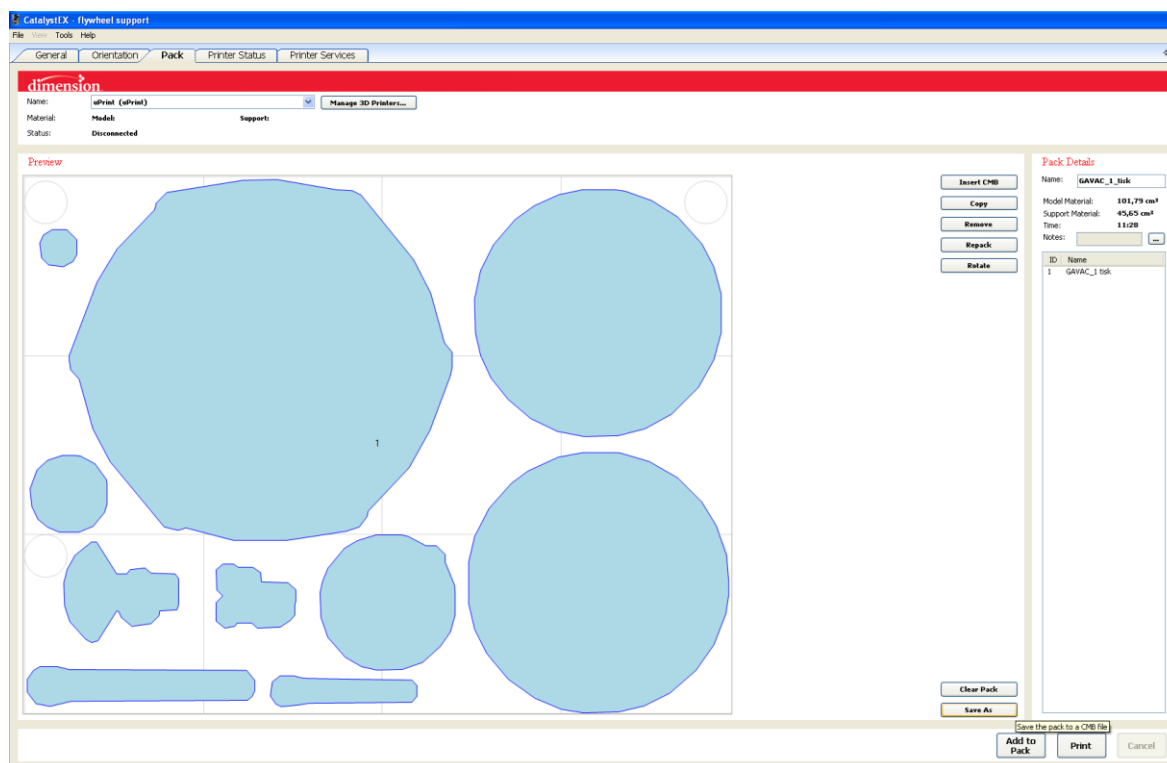


Obr. 7.7 Pridanie podpôr pohľad ISO [12]



Obr. 7.8 Pridanie podpôr, pohľad zhora [12]

Podpora bola tvarovo najzložitejším telesom projektu, preto bola tlačená samostatne. Zvyšné diely boli vytlačené na jednej podložke. Uloženie dielov na podložke je na obr. 7.9.



Obr. 7.9 Uloženie zvyšných dielov na podložku [12]

7.2. Tlač modelu

Po pripravení všetkých súčastí boli súbory odoslané do tlačiarne Dimension uPrint. Táto tlačiareň využíva technológiu FDM. Metóda je založená na relatívne nízkej teplote tavenia stavebného materiálu (ABS plast), ktorý je v tvare drôtu navinutý na cievke a pri samotnej tlači je tavený v špeciálne navrhnutéj hlave do polotekutého stavu a pretláčaný cez dýzu. Každé zariadenie ďalej obsahuje kazetu s podporným materiálom, ktorý je vytlačovaný cez dýzu striedavo so stavebným materiálom. Po vytlačení materiálu z dýzy je materiál chladený vzduchom prítomným v stavebnej komore a tuhne. Hlava sa pohybuje v rovine X, Y, pokiaľ nedokončí celú jednu vrstvu. Následne sa celá hlava posunie o výšku jednej vrstvy, v prípade tlačiarne Dimension uPrint je táto hodnota nastavená na 0,254 mm, v ose Z smerom nahor a prebieha tlač ďalšej vrstvy. Týmto spôsobom sa celý process opakuje, až do úspešného dokončenia všetkých dielov [10, 13].

Tlač dielov bola rozdelená na dva kroky. V prvom boli vytlačené všetky časti projektu s výnimkou dielu podpora. Tento krok trval 11 hodín 28 minút, spotreboval $101,79 \text{ cm}^3$ stavebného materiálu a $45,65 \text{ cm}^3$ materiálu podpory. Na obr. 7.10 je zobrazený stav počas tlače a na obr. 7.11 sú diely po úspešnom dokončení tlače pred odstránením podporného materiálu.

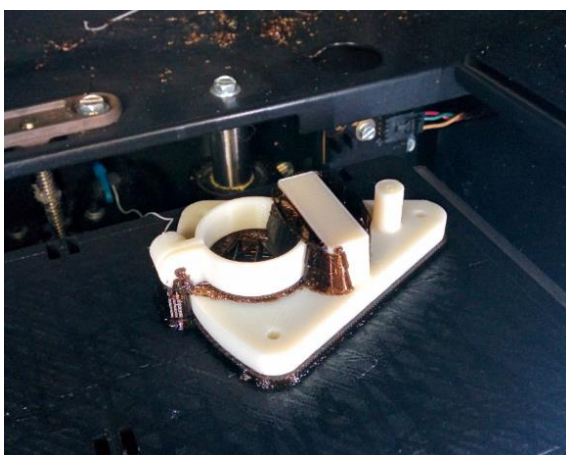


Obr. 7.10 Stav dielov počas tlače [14]



Obr. 7.11 Stav dielov po dokončení tlače [14]

V ďalšom kroku bola vytlačená súčasť podpora. Tento krok trval 4 hodiny 42 minút, bolo použitých $38,7 \text{ cm}^3$ stavebného materiálu a $14,42 \text{ cm}^3$ materiálu podpory. Na obr. 7.12 je stav dielu počas tlače a na obr. 7.13 je diel po jeho dokončení.



Obr. 7.12 Stav dielu Podpora počas tlače [14]



Obr. 7.13 Stav dielu podpora po dokončení tlače [14]

7.3. Postprocessing

Po vytlačení všetkých častí modelu boli jeho jednotlivé časti mechanicky oddelené od podložky pomocou skrutkovača. Následne boli všetky časti modelu vložené do ultrazvukovej pračky VGT1990QT. Účinnou látkou čističky bol roztok pripravený zmiešaním vody s koncentrátom WaterWorks Soluble Concentrate P400SC od firmy Stratasys. Povrch dielov po odstránení podpôr bol uspokojivý, preto boli na dieloch uskutočnené len tie dokončovacie operácie, s ktorými sa počítalo už vo fáze návrhu a boli nutné pre správnu funkciu motora. Išlo predovšetkým o rozšírenie diery na správny rozmer priemyselnou vráčkou. Pre vyhladenie povrchu diery určenej pre nalysovanie ložísk bol použitý brúsny papier so zrnitosťou P400 a P600. Úprava diery je na obr. 7.14. Brúsny papier bol použitý aj pre vyhladenie všetkých plôch určených pre uloženie O-krúžkov, bočnej steny

premiestňovacieho piestu a vnútornej steny valca, v ktorom je premiestňovací piest uložený. Na steny piestu a valca bol v dvoch vrstvách aplikovaný rýchloschnúci akrylový tmel určený pre vyplňanie malých nerovností povrchov. Výsledný povrch stien bol uspokojivý a pri správnom uložení sa mohol piest vo valci pohybovať bez toho, aby sa tieto dve plochy stýkali.



Obr. 7.14 Úprava diery pre nalysovanie ložísk

7.4. Výroba neplastových dielov

Oba výmenníky tepla boli vypálené z hliníkového plechu hrúbky 2,5 mm. Vypálená bola aj diera s priemerom 9 mm na chladnej strane piestu. Stredy menších dier boli počas pálenia vygravírované, čím sa odstránila nutnosť ručného zameriavania stredov pred samotným vŕtaním dier. Tie boli neskôr vyvŕtané pomocou priemyselnej vŕtačky. Proces vŕtania je na obr. 7.15.



Obr. 7.15 Vŕtanie dier do chladnej strany výmenníka tepla

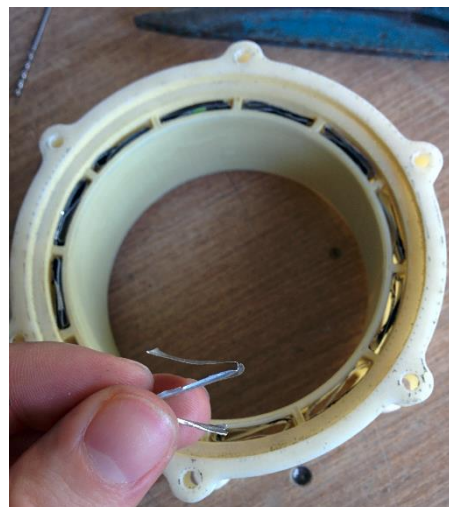
Pracovný piest a valec určený pre vloženie piestu boli vyrobené na bežnom sústruhu. Výsledné uloženie piestu vo valci sa zdalo byť z počiatku príliš tesné, ale po aplikácii maziva WD-40, rozpochybovaní piestu, jeho vytiahnutí, vysušení oboch dielov a opätovným vložení piestu do valca sa ukázalo ako adekvátne.

7.5. Montáž modelu

Pred začatím samotnej montáže boli do všetkých šesťhranných drážok nalysované matice a bol zostavený premiestňovací piest, ktorý sa pôvodne skladal z dvoch častí. Pred ich spojením bol k piestu nastavovacou skrutkou pripevnený drôt. Pri jej skrútkovaní došlo k vyklznutiu skrutkovača z drážky skrutky a tri podporné stĺpiky boli zlomené. Vzniknutá škoda je na obr. 7.16. Stĺpiky boli prilepené sekundovým lepidlom. Pevnosť lepeného spoja bola postačujúca. Po úspešnom zaskrutkovaní nastavovacej skrutky a upevnení drôtu v pieste bola sekundovým lepidlom pripevnená druhá časť piestu. Lep bol nanesený na vrchné plošky podporných stĺpikov a na dosadaciu plochu. Pre zabezpečenie lepšieho utesnenia bol po vyschnutí lepidla spoj potretý veľmi tenkou vrstvou riedidla, čo spôsobilo ľahké naleptanie oboch častí a po odparení látky zaistilo ich dokonalé spojenie. Po dokončení piestu boli rozstrihané dve hliníkové plechovky na 24 pásikov o šírke približne 0,5 mm. Pásiky boli následne dvakrát prehnuté, aby ich výsledný tvar pripomínal písmeno Z. Pásiky boli vložené do dier vo valci a fungujú ako regenerátor. Medzi plieškami, ktoré sa nachádzali v rovnakej diere bola ponechaná veľká medzera, aby nedochádzalo k vedeniu tepla regenerátorom z teplej strany výmenníka na studenú. Aj keď sa riešenie môže zdať príliš jednoduché, takto vytvorený regenerátor spĺňa všetky požiadavky uvedené v podkapitole 2.4. Vkladanie plieškov do valca je na obr. 7.17. Ďalej boli do vložky pre uloženie ložísk nalysované ložiská a vložka bola vsunutá do podpory. Do ložísk bol nalysovaný hriadel, na ktorý bola pripevnená kľuka a kotúč. Ku kotúču bol pripevnený skrutkami zotrvačník a čapom kratšie ťahadlo. Na kľuku bolo čapom pripevnené dlhšie ťahadlo. Na dlhšie ťahadlo bol nadpojený pracovný piest vložený do valca pracovného piestu umiestneného v podpore. Na kratšie ťahadlo bol pripojený cez vidlicu drôt pripevnený k premiestňovaciemu piestu, na ktorý bol vopred navlečený plech chladného výmenníka tepla a podpora. Na záver bol premiestňovací piest vložený do príslušného valca a k nemu priložený plech teplej strany výmenníka. Tým sa každý diel zostavy dostal na svoje miesto a celá zostava bola zaistená utiahnutím skrutiek vložených do príslušných dier. Zostavený model je na obr. 7.18 a na obr. 7.19 je pre porovnanie zobrazená jeho vizualizácia.



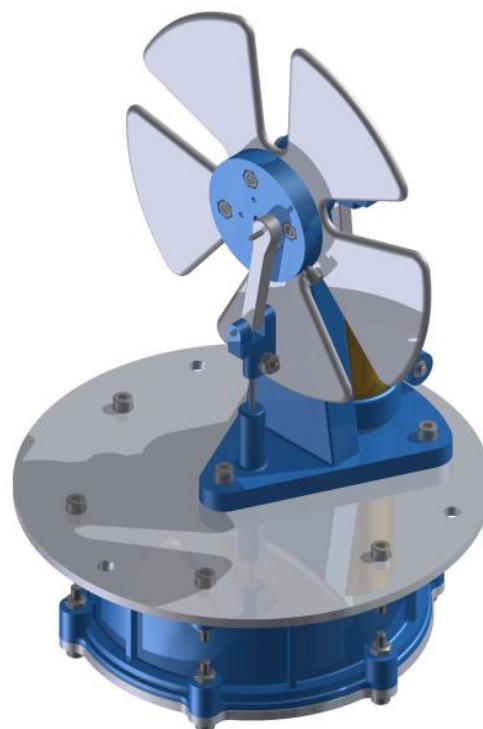
Obr. 7.16 Škoda spôsobená po vyšmiknutí skrutkovača z drážky nastavovacej skrutky



Obr. 7.17 Tvorba regenerátora- vkladanie tenkých hliníkových plieškov do dier valca premiestňovacieho piestu



Obr. 7.18 Fyzický model motora



Obr. 7.19 Digitálny model motora [8]

DISKUSIA

V štádiu vlastného navrhovania modelu nevznikli žiadne významné komplikácie. Rezaníu závitov do plastových dielov sa vo všetkých prípadoch podarilo úspešne vyhnúť vymodelovaním drážiek pre nalysovanie šesťhranných matic. Toto riešenie sa po výrobe modelu ukázalo ako vhodné a efektívne. Pri montáži nedochádzalo k vypadávaniu matic z drážok, šroubové spoje boli pevné a bolo ušetrené veľké množstvo času, pretože v opačnom prípade by museli byť do plastu všetky závity rezané na priemyselnej vrtáčke v postprocessingu.

Po vytlačení vložky pre uloženie ložísk sa ukázalo, že povrch súčasti po vyrobení metódou FDM je lepší, než sa pôvodne očakávalo. Navyše ho bolo možné veľmi ľahko ďalej upravovať obrusovaním. Preto by mohla byť v budúcnosti táto súčasť pri výrobe modelu vynechaná a ložiská by mohli byť zalysované priamo do podpory.

Pre spojenie viacerých dielov bol použitý zvierací mechanizmus. Ten sa po vyrobení modelu osvedčil. Problém nastal len v prípade obruče podpory, v ktorej je uchytený valec pracovného piestu. Pri nadmernom utiahnutí mechanizmu došlo k vytvoreniu a šíreniu trhliny v súčasti podpora. Po zalepení trhliny sekundovým lepidlom už mechanizmus fungoval uspokojivo. V budúcnosti by bolo vhodné zväčšiť hrúbku steny obruče a pred utiahnutím spoja jej povrch obrúsiť a nalakovať, čím by sa povrch zacelil a boli by odstránené vrstvy vzniknuté pri tlači, ktoré pôsobili ako koncentrátoory napätia a boli najpravdepodobnejšou príčinou vzniku trhliny.

Po zostavení bol model motor ďalej testovaný. Teplá strana výmenníka tepla bola položená na šálku naplnenú horúcou vodou. Na studenú stranu bol položený ľad, čím bol zabezpečený dostatočný teplotný rozdiel medzi dvoma časťami valca. V tomto stave bol motor ponechaný počas dvoch minút, aby mal pracovný plyn dostatok času na prevzatie tepla z horúcej vody. Potom bol motor naštartovaný ľahkým roztočením zotrvačníka. Ten urobil zopár otáčiek, ale postupne spomaľoval a nakoniec sa zastavil. Pri teste bol odpozorovaný príliš hlasný chod spôsobený trením jednotlivých častí. Preto bol model rozobraný a bolo odpozorované, že dôvodom zvýšeného trenia je pokryvený drát, ktorý spája vidlicu s premiestňovacím piestom a ktorý sa obtieral o podporu. Preto bol drát narovnaný a zľahka prebrúsený. Takisto bola otestovaná vzduchotesnosť lepeného spoja medzi dvoma časťami premiestňovacieho piestu ponorením súčasti pod vodu do hĺbky 20 cm. Neboli spozorované žiadne úniky plynu, preto bola vzduchotesnosť piestu vyhodnotená ako dostatočná. Následne bol model opäť zmontovaný a pripravený na druhý test.

Počas druhého testu bol motor výrazne tichší, ale aj napriek tomu sa nepodarilo zabezpečiť jeho plynulý chod. Za dôvod neúspechu bola určená vysoká hmotnosť hliníkového zotrvačníka, preto bol diel nahradený zlepením 3 kompaktných diskov, ktoré dokopy vážili 45 gramov, teda v porovnaní s pôvodnou hliníkovou súčasťou bol tento typ zotrvačníka o 40% ľahší.

V treťom teste bol najprv zotrvačník roztočený pred nahriatím a následne po nahriatí. Bolo odpozorované, že po nahriatí spraví motor viac otáčiek, ako nenahriaty motor. Tento rozdiel nebol pozorovaný v prípade hliníkového zotrvačníka. Bolo teda zistené, že váha zotrvačníka výrazne vplýva na funkciu motora a že váha 45 gramov je vhodnejšia ako 75 gramov.

Po treťom teste bolo krátke ťahadlo odpojené od kľukového kotúča a dlhé ťahadlo od kľuky hriadel'a. Následne bola otestovaná celková vzduchotesnosť vo vnútri motora. Test bol

uskutočnený zdvihnutím pracovného piestu do jeho najvyššej polohy a jeho voľným spustením. Po spustení piest rovnomernou rýchlosťou klesal až do svojej najnižšej polohy. Tento process bol opakovaný 10 krát a bol nameraný priemerný čas klesania 0,98 sekundy. Očakávaný čas v prípade dobrého utesnenia bol okolo štyroch sekúnd. Z merania je teda zrejmé, že vnútro motora nebolo dostatočne utesnené. Pre ďalšie meranie bol odmontovaný a odstránený premiestňovací piest a diera v podpore, v ktorej bol umiestnený drát bola upchatá. Test s pracovným piestom bol uskutočnený aj pre tento prípad. Pri druhom meraní bol priemerný čas klesania piestu 1,32 s. Znamená to, že k úniku pracovného plynu dochádzalo aj v iných častiach motora. Keďže všetky spoje na valci vyrobenom z ABS plastu sú tesnené O-krúžkami, únik plynu je v týchto miestach zanedbateľný. K podstatným únikom plynu dochádzalo v priestore medzi pracovným piestom a valcom, v ktorom je uložený. Po premeraní týchto dvoch súčastí posuvným meradlom bolo zistené, že počas predošlých testov došlo k abrazívnemu opotrebovaniu vonkajšej steny pracovného piestu a k zmenšeniu jeho rozmeru do takej miery, že medzi piestom a valcom vznikla medzera dostatočne veľká na to, aby mal vzduch možnosť v tomto mieste unikať. Abrazívnemu opotrebovaniu došlo kvôli zlému vycentrovaniu piestu vo valci.

Po rozobraní motora a podrobnom preskúmaní povrchu steny premiestňovacieho piestu bolo zistené, že aj v tomto prípade došlo k abrazívnemu opotrebovaniu. Trenie medzi premiestňovacím piestom a stenou valca takisto bránilo dosiahnutiu plynulého behu motora.

Model pozostáva z viacerých častí vyrobených rôznymi technológiami. To autorovi štúdie umožnilo zamyslieť sa nad vhodnosťou použitia jednotlivých metód pre tvorbu každej zo súčastí z ekonomického aj technologického pohľadu. Po ukončení práce sú zrejmé výhody využitia metód RP pre tvorbu prototypov. Súčasti navrhnuté pre výrobu metódou FDM boli tvarovo najzložitejšie, ich výroba však bola rýchla a do veľkej miery automatizovaná. Cena 11 dielov bola vyčíslená na 3200 českých korún. Technológia pálenia plechov laserom nebola pre výrobu modelu vhodným riešením. Bolo síce dosiahnutých požadovaných výsledkov, ale výrobné náklady troch dielov boli 22 euro (601,26 českých korún), čím sa celý model zbytočne predražil. Vhodnejšie by bolo navrhnuť jednoduchší tvar plechových dielov tak, aby ich bolo možné z plechu vystrihnúť. Pre pracovný valec a pracovný piest bolo sústruženie najlepšou a vhodne zvolenou technológiou, keďže sa podarilo dosiahnuť požadovaných tolerancií a cena za súčiastku bola adekvátne. Cena sústruženia bola za oba kusy 8 euro (218,64 korún). V prípade sústruženia a pálenia bola najdrahším procesom príprava materiálu a nastavenie obrábacieho stroja. To znamená, že cena za kus by v týchto prípadoch rapidne klesala pri vyššom počte vyrobených kusov. Na druhej strane cena za kus v prípade výroby technológiou FDM sa s narastajúcim počtom kusov výrazne nemení. Preto je vhodná len v prípade výroby atypických súčastí, prototypov a modelov určených k výrobe foriem na odlievanie. Hriadeľ a ložiská boli zakúpené v obchode špecializovanom na predaj súčastí pre RC modely. Cena hriadeľa bola 189 korún a cena jedného ložiska 125 korún. Ostatné náklady, ktoré zahŕňajú cenu použitých brúsnych papierov, spojovacieho materiálu, tesnení a laku sa vyšplhali na hodnotu 200 korún. Celková cena modelu je 4 658,9 korún.

ZÁVER

Ani po viacerých úpravách modelu sa nepodarilo dosiahnuť ustáleného chodu motora. Medzi hlavné faktory, ktoré bránia funkcii sú:

- počas behu motora vzniká trenie medzi premiestňovacím piestom a valcom, v ktorom je uložený,
- medzi pracovným piestom a stenou valca, v ktorom je uložený došlo počas chodu k abrazívnemu opotrebovaniu,
- utesnenie pracovného plynu vo vnútri motora je nedostatočné,
- hmotnosť pôvodného hliníkového zotrvačnika je príliš veľká.

Napriek tomu je model vhodný pre ďalšie úpravy a vylepšenia, ktoré by mali viesť k odstráneniu chýb objavených po výrobe prvého prototypu. Po dosiahnutí ustáleného chodu bude model predovšetkým vhodný na realizáciu pokusov s rôznymi typmi regenerátora, pretože do pripravených drážok je možné vložiť akýkoľvek materiál ľubovoľného tvaru. Zaujímavé výsledky sú očakávané predovšetkým pri porovaní regenerátora popísaného v kapitole 7.5 a regenerátora, ktorý bude vytvorený tak, že do každej drážky bude vložený len jeden pliešok, ktorý by ju vyplnil po celej výške valca.

V ďalšej štúdiu by mohol byť premiestňovací piest vyrezaný z ľahkého materiálu, akým je napr. polyuretán. Zníženie hmotnosti dielu by mohlo viesť k zlepšeniu funkcie motora. Nevýhodou súčasného piestu je to, že po zlepení dvoch častí, z ktorých sa skladá a naleptaní spoja je piest nerozoberateľný. To čiastočne obmedzuje jeho budúcu optimalizáciu. Tento typ piestu bol zvolený preto, lebo bola snaha vyrobiť čo najväčší počet dielov metódou FDM.

Zvolené technológie výroby väčšiny súčastí boli adekvátne. Jediným nevhodným rozhodnutím bolo zvolenie metódy laserového pálenia v prípade výroby hliníkových plechov. Táto technológia je vhodná pre výrobu viacerých kusov, nie pre výrobu prototypu. Vhodnejšie by bolo zvoliť jednoduchší tvar a súčasti z plechu vystrihnúť.

Aj napriek tomu, že sa nepodarilo zostrojiť funkčný model motora, projekt predstavuje dobrý základ pre spoznanie princípu funkcie Stirlingovho cyklu a uvedomenie si významu tohto málo známeho zariadenia.

Z vyššie uvedeného vyplýva, že všetky ciele bakalárskej práce boli splnené.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. Výroba elektřiny v ČR: Nejvíce energie stále získáváme z uhelných elektráren. *Elektrina.cz* [online]. 2014 [cit. 2.5.2015]. Dostupné z: <http://www.elektrina.cz/vyroba-elektřiny-v-cr-nejvic-energie-stale-ziskavame-z-uhelných-elektřaren>.
2. LLOYD, Caleb. *A low temperature differential Stirling engine for power generation*. Canterbury, 2009. Diplomová práce. University of Canterbury. Department of Electrical and Computer. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10092/2916>.
3. HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory*. 1. vyd. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011, 151s. ISBN 978-80-213-2168-7.
4. KONGTRAGOOL, Bancha a Somchai WONGWISES. A review of solar- powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2003, **7**(2): 131-154 [cit. 22.3.2015]. DOI: 10.1016/s1364-0321(02)00053-9. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032102000539>.
5. BLAHA, Josef. *Stirlingův motor*. [s.l.], 2008. 80 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk KAPLAN, CSc.
6. THOMBARE, D.G. a S.K. VERMA. Technological development in the Stirling cycle engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2008, **12**(1): 1-38 [cit. 22.3.2015]. DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.001. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032106000906>.
7. SALA, Fernando a Costante M. INVERNIZZI. Low temperature Stirling engines pressurised with real gas effects. *Energy* [online]. 2014, **75**(1): 225-236 [cit. 22.3.2015]. DOI: doi:10.1016/j.energy.2014.07.057. ISSN 03605442. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544214008792>.
8. Autodesk Inc. ©2015, 3D CAD Software: Inventor 3D CAD, *Autodesk: 3D Design, Engineering & Entertainment Software, 2015*. [Online]. [cit.: 22.04.2015]. Dostupné z: <http://www.autodesk.com/products/inventor/overview>.
9. RAMSDALE, Rob. *Mechanical Engineering Design Guide- Engineer's handbook* [online]. [cit. 19.4.2015]. Dostupné z: <http://www.engineershandbook.com/Tables/frictioncoefficients.htm>.
10. C. Chua, K. Leong a C. Lim, *Rapid prototyping: principles and applications*, 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010, p. Xxv, 512 s.
11. Materialise NV, ©2012. *Software for Additive Manufacturing*. [online]. [cit. 22.4.2015]. MiniMagics – Software Rapid Prototyping. Dostupné z: <http://www.materialise.com/MiniMagics>.
12. CatalystEX 4.0.1 ®, ©2010 *Stratalsys Inc. Eden Prairie, MN. Všechna práva vyhrazena* [online]. [cit. 22.4.2015]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/solutions/rapid-prototyping>.

13. M. Piška, *Speciální technologie obrábění*, Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, p. 247 s.
14. MCAE SYSTEMS, spol. S.r.o., Kuřim, ČR. *Dimension uPrint* [online]. [cit. 22.4.2015]. Dostupné z <http://www.mcae.cz/dimension-uprint>.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka	Jednotka	Popis
3D	[-]	slinutý karbid
ABS	[-]	Akrylonitrilbutadiénstyrén
FDM	[-]	Physical Vapour Deposition
RP	[-]	Rapid Prototyping
STL	[-]	Stereolitografia
RC	[-]	Radio Control
napr.	[-]	napríklad

Symbol	Jednotka	Popis
A	[m ²]	Obsah
P	[W]	Výkon
Q_c	[J]	Teplo, ktoré pracovný plyn odovzdá do okolia
Q_e	[J]	Teplo, ktoré prijme pracovný plyn z okolia
R	[J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹]	Reálna plynová konštanta
T	[K]	Teplota v Kelvinoch
T_c	[K]	Teplota v Kelvinoch počas izotermickej kompresie
T_h	[K]	Teplota v Kelvinoch počas izotermickej expanzie
V	[m ³]	Objem
V₁	[m ³]	Objem na začiatku izotermickej kompresie
V₂	[m ³]	Objem na konci izotermickej kompresie
V₃	[m ³]	Objem na začiatku izotermickej expanzie
V₄	[m ³]	Objem na konci izotermickej expanzie
V_{celk}	[m ³]	Celkový objem pracovného plynu

V_{chladny}	[m ³]	Objem nezohriateho pracovného plynu
V_{zohriaty}	[m ³]	Objem zohriateho pracovného plynu
W_c	[J]	Práca spotrebovaná počas izotermickej kompresie
W_e	[J]	Práca vykonaná počas izotermickej expanzie
l	[m]	Dĺžka
n	[mol]	Látkové množstvo
n_{celk}	[mol]	Celkové látkové množstvo pracovného plynu
n_{chladny}	[mol]	Látkové množstvo nezohriateho pracovného plynu
n_{zohriaty}	[mol]	Látkové množstvo zohriateho pracovného plynu
p	[Pa]	Tlak
s	[J·K ⁻¹]	Entropia
t	[°C]	Teplota v °C
ε	[-]	Kompresný pomer
η	[-]	Účinnosť Styrtingovho cyklu
η_{carnot}	[-]	Účinnosť Carnotovho cyklu
$\eta_{t,\gamma}$	[-]	Účinnosť Styrtingovho cyklu pre modifikáciu γ

