

Univerzita Hradec Králové

Pedagogická fakulta

Katedra techniky

NÁVRH POHONU JEDNODUCHÉHO MECHANIZMU STIRLINGOVÝM MOTOREM JAKO STUDENTSKÝ PROJEKT NA SŠ

Bakalářská práce

Autor:	Jan Hobza
Studijní program:	Základy techniky se zaměřením na vzdělávání Informatika se zaměřením na vzdělávání
Vedoucí práce:	Mgr. Štěpán Major, Ph.D.
Oponent práce:	prof. RNDr. Štěpán Hubálovský, Ph.D.



Zadání bakalářské práce

Autor: Jan Hobza

Studium: P20P0337

Studijní program: B0114A300056 Základy techniky se zaměřením na vzdělávání

Studijní obor: Informatika se zaměřením na vzdělávání, Základy techniky se zaměřením na vzdělávání

Název bakalářské práce: **Návrh pohonu jednoduchého mechanismu Stirlingovým motorem jako studentský projekt na SŠ**

Název bakalářské práce AJ: Design of a simple mechanism drive by a Stirling engine as a student project at a high school

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Při výuce technických oborů je vhodné využívat metod jako je Design Based Learning nebo projektové vyučování. Studenti SPŠ strojní se při výuce seznamují se základními termodynamickými cykly a tudíž je za účelem upevnění studia vypracovat projekt s touto tématikou. Cílem této práce je provést jednoduchý návrh pohonu Stirlingovým motorem, tak aby bylo možno tento projekt realizovat při výuce na SPŠ. Práce bude obsahovat analýzu Stirlingova cyklu a elementární výpočet z pohledu studenta jenž se seznámí s termodynamikou na střední průmyslové škole strojní. Práce bude dále obsahovat CAD model Stirlingova motoru a model hnaného stroje.

When teaching technical subjects, it is appropriate to use methods such as Design Based Learning or project teaching. The students of SPŠ strojní get acquainted with the basic thermodynamic cycles during the teaching and therefore, in order to consolidate the study, it is necessary to develop a project with this topic. The aim of this work is to make a simple design of a Stirling engine drive so that this project can be implemented in teaching at secondary schools. The work will contain an analysis of the Stirling cycle and an elementary calculation from the point of view of a student who will get acquainted with thermodynamics at the Secondary Industrial School of Mechanical Engineering. The work will also include a CAD model of the Stirling engine and a model of the driven machine.

Macháček, J. Schmidtova teorie Stirlingova motoru - obecný popis. Energyspectrum. 2004. 1(1). p.1-15. ISSN 1214-7044.

Ing. JAN MACHÁČEK:STIRLINGŮV TERMODYNAMICKÝ CYKLUS

D. Liao. *The Working Principles* [online].

Pokorný, P. Výrobní stroje II. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1998. 121 s

Macháček, J., Gregor, J. Provozní vlastnosti modelu Stirlingova motoru. Proceedings of International Scientific Conference. Brno, Lindovský a Psota. 2004. p.73-73. ISBN 80-214-2642-X.

Zadávací pracoviště: Katedra technických předmětů,
Pedagogická fakulta

Vedoucí práce: Mgr. Štěpán Major, Ph.D.

Oponent: prof. RNDr. Štěpán Hubálovský, Ph.D.

Datum zadání závěrečné práce: 26.1.2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Návrh pohonu jednoduchého mechanismu Stirlingovým motorem jako studentský projekt na SŠ vypracoval pod vedením vedoucího závěrečné práce samostatně a uvedl jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Hradci Králové dne: 16.5. 2023

Podpis studenta:

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářská práce je uložena v souladu s rektorským výnosem č. 13/2022 (Řád pro nakládání s bakalářskými, diplomovými, rigorózními, disertačními a habilitačními pracemi na UHK).

Datum: 16.5. 2023

Podpis studenta:

Student: Jan Hobza

Anotace

HOBZA, Jan. Návrh pohonu jednoduchého mechanismu Stirlingovým motorem jako studentský projekt na SŠ. Hradec Králové: pedagogická fakulta Univerzity Hradec Králové, 2023. 51s. Bakalářská práce.

Při výuce technických oborů je vhodné využívat metod jako je Design Based Learning nebo projektové vyučování. Studenti SPŠ strojní se při výuce seznamují se základními termodynamickými cykly, a tudíž je za účelem upevnění studia vypracovat projekt s touto tematikou. Cílem této práce je provést jednoduchý návrh pohonu Stirlingovým motorem, tak aby bylo možno tento projekt realizovat při výuce na SPŠ. Práce bude obsahovat analýzu Stirlingova cyklu a elementární výpočet z pohledu studenta, jenž se seznámí s termodynamikou na střední průmyslové škole strojní. Práce bude dále obsahovat CAD model Stirlingova motoru.

Klíčová slova: cyklus Stirlingova motor, historie Stirlingova motoru, výroba Stirlingova motoru

Anotace

HOBZA, Jan. Design of a simple mechanism drive by a Stirling engine as a student project at a high school. Hradec Králové: Faculty of Education, University of Hradec Králové, 2023. 51s. Bachelor Degree thesis.

When teaching technical subjects, it is appropriate to use methods such as Design Based Learning or project teaching. The students of SPŠ strojní get acquainted with the basic thermodynamic cycles during the teaching and therefore, in order to consolidate the study, it is necessary to develop a project with this topic. The aim of this work is to make a simple design of a Stirling engine drive so that this project can be implemented in teaching at secondary schools. The work will contain an analysis of the Stirling cycle and an elementary calculation from the point of view of a student who will get acquainted with thermodynamics at the Secondary Industrial School of Mechanical Engineering. The work will also include a CAD model of the Stirling engine.

Klíčová slova: cycle of Stirling engine, history of Stirling engine, handcrafted Stirling engine

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Mgr. Štěpánu Majorovi, Ph.D. za jeho podporu, rady, připomínky a odborné poznatky, které mi při psaní bakalářské práce poskytl.

Obsah

Úvod	10
1. Historie a použití Stirlingových motorů	12
1.1. Historie	12
1.2. Současné využití Stirlingových motorů	14
1.2.1. Motory využívající solární energii	14
1.2.2. Kogenerační a mikrokogenerační jednotky	15
1.2.3. Stirlingovy motory pro čerpání vody	16
1.2.4. Stirlingův motor jako pohon ponorek	16
1.3. Budoucnost Stirlingových motorů	17
2. Princip Stirlingova motoru	18
2.1. Cyklus Stirlingova motoru	18
2.2. Popis termodynamických dějů v cyklu Stirlingova motoru	19
2.3. Skutečný cyklus	22
2.3.1. Kontinuální pohyb pístů	23
2.3.2. Neizotermické děje	23
2.3.3. Nedokonalá regenerace	23
2.3.4. Tepelné ztráty	23
2.3.5. Unik plynu a tlakové ztráty	24
2.3.6. Třecí ztráty	24
2.4. Důležité složky Stirlingova motoru	24
2.4.1. Tepelné výměníky	24
2.4.2. Píst	24
2.4.3. Přeháněcí (přemísťovací) píst	24
2.4.4. Setrvačnick	25
2.4.5. Regenerátor	25

2.4.6. Pracovní plyn	25
3. Konstrukční varianty Stirlingova motoru	27
3.1. α – modifikace.....	27
3.2. β – modifikace.....	28
3.3. γ – modifikace	28
3.4. Výhody a nevýhody Stirlingových motorů	29
3.4.1. Výhody Stirlingových motorů:	29
3.4.2. Nevýhody Stirlingových motorů	30
4. Návrh Stirlingova motoru pro výrobu v domácím prostředí	31
4.1. Příklady internetových návodů	32
4.1.1. Stirlingův motor č. 1	32
4.1.2. Stirlingův motor č. 2	32
4.1.3. Stirlingův motor č. 3	33
4.1.4. Stirlingův motor č. 4	34
4.1.5. Stirlingův motor č. 5	34
4.2. 3D návrh vlastního Stirlingova motoru.....	35
5. Výroba Stirlingova motoru v domácím prostředí.....	40
Závěr.....	47
Seznam použité literatury	48
Seznam symbolů a veličin.....	50
Seznam obrázků a ilustrací.....	51

Úvod

Na středních průmyslových školách se ve strojírenských oborech vyučuje mimo jiné i o motorech a generátorech. Klasické vznětové a zážehové motory se společně s elektromotory, které využívají elektrickou energii vyrobenou pomocí generátorů nebo dynam, jež jsou poháněny vodními, parními nebo větrnými turbínami, vyučují poměrně dopodrobna. Jinak tomu není ani u elektrické energie získané ze solárních panelů. Do detailů se vysvětlují principy, na kterých fungují, elementární výpočty, ukazují se p-V a T-s diagramy a nechybí ani seznámení se s jejich historií a dalším vývojem. Se speciálním případem Stirlingových motorů se ale studenti běžně neseznamují, ačkoliv mají z pohledu školské praxe jednu velkou výhodu. Jejich výrobu lze relativně snadno realizovat ve výuce, a to s využitím běžně dostupných materiálů.

Z vlastních zkušeností vím, že se učitelé o Stirlingových motorech pouze zmíní a velmi stručně popíší, jak fungují. Většinou toto téma slouží pouze jako zajímavá vsuvka mezi parními motory a Ottovým cyklem, pokud jsou vůbec zmíněny. Někteří učitelé z různých středních škol se mi i svěřili, že o tomto tématu toho sami ani moc neví a z tohoto důvodu ve svých hodinách Stirlingovy motory pouze zmiňují. Osobně mě toto téma zajímalo už od mala kdy jsem pozoroval starší kamarády, jak vyrábí Stirlingův motor z plechovek a připojují k němu nabíječku na staré Nokie. Později jsem se Stirlingovým motorem pracoval na střední škole v jednom z kroužků. Také jsem s ním na teoretické rovině pracoval i u své maturitní práce.

Stirlingovy motory jsou po celou svoji existenci spíše alternativními zdroji energie, jejichž vývoj probíhal ve chvílích, kdy svět zachvátila energetická krize. V dnešní době se těmito motorům opět otevírají nové příležitosti, a to hlavně v odvětvích jakými jsou kombinovaná výroba elektrické energie a tepla. Firmy mohou Stirlingovy motory využívat zužitkováním odpadního tepla na výrobu elektrické energie, zatím co domácnosti je mohou používat jako kogenerační nebo mikrokogenerační jednotky. Své uplatnění Stirlingovy motory našly ale i ve vojenské a vesmírné technice nebo jako zdroj elektrické energie ve špatně dostupných místech nebo jako záložní generátory elektrické energie rozvojových zemích.

Cílem této bakalářské práce je přiblížení tématu Stirlingových motorů nejen středoškolským učitelům techniky a jejich studentům ale i čtenářům, kteří by o toto téma měli zájem, formou středoškolského projektu.

V této bakalářské práci se zaměříme na princip, na kterém Stirlingův motor funguje, na jeho základní konstrukční varianty a na výhody a nevýhody, které jeho použití přináší. Práce dále obsahuje historické milníky vývoje a používání Stirlingových motorů a jejich používání v současnosti. Součástí bakalářské práce je také obrázkový 3D návrh Stirlingova motoru z běžně dostupných součástí a materiálů, který slouží pouze jako orientační model, podle kterého bude motor vyroben. Poslední částí této práce je vlastní výroba Stirlingova motoru z běžně dostupných materiálů.

1. Historie a použití Stirlingových motorů

1.1. Historie

Teplovzdušný motor jako první navrhl a nakreslil britský konstruktér George Cayley (*1773 – †1857) v roce 1807. Tento teplovzdušný motor nazval jako „caloric machine“, nicméně se tomuto tématu dále už nevěnoval. Jako první si jej nechal patentovat skotský pastor Robert Stirling (*1790 – †1878) dne 27. 9. 1816 ve skotském Edinburghu. Patent se zabýval tepelným výměníkem, který byl nazvaný jako „Ekonomizér“, v dnešní době dobře známý pod pojmem regenerátor. Patent obsahuje také návrh horkovzdušného motoru s uzavřeným oběhem. V roce 1818 Stirling postavil velký motor o výkonu 2 hp. Motor sloužil k čerpání vody z kamenolomu Ayrshire ve Skotsku. Za pomoci svého bratra Jamese Stirlinga získal v letech 1827 a 1840 ještě další dva patenty, které obsahovaly zdokonalené varianty motoru. (1) (2)

Mezi další průkopníky teplovzdušných motorů se řadí i známý švédský vynálezce John Ericsson (*1803 – †1889). Ericsson se zabýval teplovzdušnými motory podstatnou část svého života. První teplovzdušný motor vytvořil v roce 1833 o výkonu 5 hp. V roce 1853 jeho motory poháněly loď pojmenovanou po vynálezci, nicméně se motory pro námořní účely neuchytily. Ericsson byl jedním z prvních vynálezců, kteří se zabývali využíváním energie ze Slunce a v roce 1868 sestrojil první teplovzdušný solární motor. John Ericsson postavil mnoho teplovzdušných motorů a jeho konstrukce, které byly limitovány obzvláště metalurgickými znalostmi, předběhly svou dobu.

Stirlingovi motory se ukázaly jako levnější a bezpečnější alternativa k motorům parním, které se však kolem roku 1860 staly bezpečnějšími a mnohem výkonnějšími než jejich předchůdci. Další ranou pro Stirlingovi motory byl také rok 1897, ve kterém německý konstruktér a vynálezce Rudolf Diesel zkonstruoval první vznětový motor. V této době byl také velký zájem o elektromotory a tím se nezájem o Stirlingovi motory ještě více prohloubil. Během 19. století a na počátku 20. století Stirlingovi motory pumpovaly vodu v dolech nebo pro statky a dobytek na západě Spojených států amerických. Používaly se od hraček, šicích strojů až po větší navijáky v závislosti na konstrukci stroje a použitého paliva. (3) (4) (5)

S rozmachem radiopřijímačů a rádiové komunikace obecně se však zájem o Stirlingovi motory opět probudil. V roce 1938 firma N.V. Philips hledala způsob, jak prodávat své výrobky i do částí světa, kde nebyl zaveden elektrický proud. Nakonec byl zvolen jako generátor Stirlingův motor, který byl zvolen díky faktům, že nevytváří při

své činnosti žádné rušení, má velmi tichý chod a schopnost pracovat s různými zdroji tepla, jako byl lampový olej. Společnost také viděla, díky novým technologiím a modernějším materiálům, potenciál na výrazná zlepšení. V roce 1951 se společnosti povedlo sestrojít motor o výkonu 200 W, nicméně se svou cenou nemohl rovnat novým tranzistorovým přijímačům a jejich nízké spotřebě a některé vyrobené kusy se prodaly univerzitám. Společnost se však věnovala i Stirlingovým motorům pro větší škálu použití a s vývojem pokračovala až do konce 70. let. Přestože se žádného většího úspěchu společnost nedočkala, dosáhla mnoha patentů a zjistila mnoho důležitých informací, které se využívají zvláště v dnešní době (například, že plyny s nižší molekulovou hmotností, dosahují vyšších výkonů než vzduch).

V 50. letech 20. století se rychle začala rozvíjet metalurgie a technologie výroby materiálů. To otevřelo i nové možnosti pro Stirlingovi motory. V roce 1968 se několik švédských firem spojilo do nového joint venture se jménem United Stirling. Jeden z hlavních důvodů návratu myšlenky používání Stirlingova motoru byla blížící se ropná krize. Už roce 1968 United Stirling začala spolupracovat mimo jiné i se společností Philips a v roce 1971 se jim společně povedlo navrhnout motor o výkonu 200 hp, který měl být montován do ponorek nebo městských autobusů. V roce 1973 byl motor namontován na člun a do městského autobusu. Při testování motoru bylo ale zjištěno, že při vysokém tlaku (22 MPa) motor nebude mít vysokou životnost. United Stirling se proto rozhodlo vyvinout nový motor s označením 4 - 65, který stejného výkonu dosahoval už při tlaku 15 MPa. Tento nový motor se společně s Philips snažili upravovat tak, aby snížili jeho výrobní cenu, nicméně cena motoru byla i tak 2krát až 3krát větší než cena klasického vznětového motoru. Tato verze motoru byla později upravena tak, aby mohla pohánět osobní automobil a byla dále vylepšována. V roce 1974 byl modifikovaný motor V4X2 vestavěn do osobního automobilu Ford Pinto s automatickou převodovkou. Vůz byl velmi komfortní a tichý, ale sériové výroby se nedočkal. Vývoj motoru však pokračoval dále až do verze V4X35, ta byla vestavěna do automobilu Ford Taurus, který disponoval manuální převodovkou. Ta vyžadovala oproti automatické převodovce rychlou změnu výkonu, což je jedna z nevýhod Stirlingova motoru. Díky těmto problémům bylo funkční spojení Stirlingova motoru s manuální převodovkou velmi převratné. Přestože Ford Taurus bez problému prošel všemi jízdními zkouškami a splnil veškeré požadavky, nebyl nikdy zařazen do sériové výroby z důvodu příliš vysoké ceny pohonné jednotky a systému regulace výkonu. (3) (6)

Počátkem roku 1983 chorvatský vynálezce Ivo Kolin (*1924 – †2007) předvedl publiku první nízkoteplotní diferenciální (LTD) Stirlingův motor. Tento motor fungoval na rozdílu teplot 100 °C, přičemž se rozeběhl během krátké chvíle. Motor běžel po docela dlouhou dobu a zastavil se až po tom, co rozdíl teplot klesl pod 20 °C. Motor využíval místo přeháněcího pístu pryžovou membránu.

Na přelomu 80. a 90. let se myšlenkou nízkoteplotních Stirlingových motorů začal zabývat James Senft, který spolupracoval s Ivo Kolinem. V roce 1992 byl požádán NASA, aby navrhl a postavil nízkoteplotní diferenciální motor, který byl nazván N-92. Tento motor dokáže pracovat s teplotním rozdílem pouhých 6 °C. (2) (7)

1.2. Současné využití Stirlingových motorů

V současné době se Stirlingův motor používá především ve strojích určených ke kombinované výrobě tepelné a elektrické energie. Obecně platí, že vývoj Stirlingových motorů probíhal v dobách, kdy byla poptávka po alternativních pohonech. V dnešní době se ve světě Stirlingovy motory opět dočkaly nových příležitostí, které jim přinesly ekologické požadavky dnešní doby. Neustále vracející se energetické krize zájem o využívání těchto motorů ještě zvyšují.

1.2.1. Motory využívající solární energii

Jedním z odvětví, kde se Stirlingovy motory velmi pečlivě zkoumaly, je přeměna solární energie na energii elektrickou. Mezi prvními na světě, kdo vytvořil komerční solární Stirlingův motor, který byl zapojen do sítě, byla společnost Plataforma Solar de Almería s projekty DISTAL I zahájený s roce 1992. Jednalo se o koncentrátor s parabolickými zrcadly, která koncentrovala sluneční záření do ohniska – Stirlingova motoru. Koncentrátor měl průměr 7,5 m, v ohnisku zajišťoval příkon 40kW a motor dodával 9 kW. DISTAL II měl oproti svému předchůdci lepší tvar parabolických zrcadel, vylepšený motor a mnohem lepší poměr ceny k vyrobené kW. Projekt DISTAL II byl proveden v letech 1996 až 1997. Oproti svému předchůdci měl průměr zvětšený na 8,5 m a dodával příkon o 50 kW. Motor produkoval 10 kW elektrické energie.

Následoval německo-španělský projekt EUROdish, který v roce 2000 nahradil do té doby spuštěný DISTAL I. EUROdish měl za úkol hlavně:

- Vylepšit motor tak, aby dokázal využít více dodávané energie
- Snížit cenu celého systému použitím standartně vyráběných součástí
- Zjednodušit výrobu a montáž
- Připojit ovládání a kontrolu systému k internetu

V roce 2006 byl projekt oficiálně ukončen z důvodů vysokých nákladů na výrobu a údržbu systému. (8) (9)

Další společností, která vyvíjela parabolické koncentrátoři se Stirlingovým motorem byla Stirling Energy Systems (SES). SES v Kalifornii v roce 2006 začala uskutečňovat projekt Solar 1. Solar 1 je první solární elektrárnou se Stirlingovým motorem na světě a provozní doba byla naplánována na 20 let. Jednotka dostala název SES Dish Stirling system, můžeme ji ale nalézt i pod pojmem Suncatcher. Parabolický koncentrátor se skládal z 89 zrcadel a měl v průměru 9,14 metrů. Tento parabolický koncentrátor poskytoval v ohnisku přibližně 75 kW tepelného příkonu. Motor byl vyvinut ve Švédsku společnostmi United Stirling, Kockums a Volvo. Tento čtyřválcový motor dosahuje 1800 ot/min, jako pracovní plyn přitom používá vodík a jeho maximální tlak je 20 MPa. Generátor disponuje výkonem o 25 kW a výstupním napětím 480V. Po projektu Solar 1 následovaly ještě projekty Solar 2 a Maricopa. (8) (10) (11)

1.2.2. Kogenerační a mikrokogenerační jednotky

V dnešní době již existuje mnoho typů kogeneračních jednotek používající Stirlingův motor. Jedná se o nejrozšířenější způsob využívání Stirlingových motorů v současnosti. Mezi prvními byly jednotky AC WhisperGen a DC WhisperGen vyrobené společností Whisper Tech. Jednotky byly vyvinuty hlavně pro domácí používání. Tyto kogenerační jednotky umožňují ohřev vody, vytápění i výrobu elektrické energie. AC WhisperGen micro CHP produkuje 1,2 kW elektrického výkonu o napětí 230 V a 8 kW tepelného výkonu. Za palivo je schopná použít LPG, naftu, petrolej nebo i zemní plyn. (8)

Další z největších zástupců je společnost Combined Energy Technology. Mikrokogenerační jednotka mCHP Generator používá jako palivo zemní plyn (popřípadě methan) nebo propan. Tato jednotka dokáže vyrobit 1kW elektrického výkonu při střídavém napětí 230 V a 6 kW tepelné energie. Výrobce tvrdí, že jednotka má 95% účinnost a její životnost je 50 000 hodin (přibližně 5,7 roku) při nepřetržitém provozu.

Jejich dalším produktem je kogenerační jednotka BioGen a používá biomasu jako palivo. Jednotka vyrábí 1 kW elektrické energie při střídavém napětí 230V a 8,5 kW tepelné energie. Spálí přitom 2,8 kilogramu biomasy za hodinu. Na rozdíl od používání plyných paliv však požaduje pravidelné čištění popela a odebírání biouhlů, které může sloužit například jako hnojivo. (12)

1.2.3. Stirlingovy motory pro čerpání vody

Jedním z motorů určeným pro čerpání kapalných látek je ST-5, který byl vyroben společností Stirling Technology. Tento motor pracuje při 5ti barech pomocí vestavěného vzduchového kompresoru. ST-5 je vhodný zejména při potřebě dlouhodobého a nepřetržitého provozu. Motor má výkon 5 hp a může běžet na nečistý zemní plyn, surovou ropu nebo biomasu. Toto čerpadlo je navrženo pro použití v oblastech, ve kterých není k dispozici elektrický proud. (7)

1.2.4. Stirlingův motor jako pohon ponorek

V roce 1988 jedna ze společností United Stirling Kockums implementovala motor V4-275R do testovací švédské ponorky HMS Näcken. Motor byl následně vsazen do ponorek třídy Gotland. První ponorka třídy Gotland se dvěma diesel-elektrickými a dvěma Stirlingovými motory byla vyrobena v roce 1992. Ponorka HMS Gotland na námořních cvičeních v roce 2005 byla schopna „potopit“ americkou letadlovou loď USS Ronald Reagan a nezpozorována zase odplout. Po tomto cvičení byla označena za „stealth“ ponorku. Díky Stirlingovu motoru je tišší a hůře odhalitelná než klasické nejaderné i moderní jaderné ponorky. Třída Gotland používá Stirlingův motor i jako součást svého systému nezávislého na vzduchu (AIP – air-independent propulsion), který prodlužuje jejich vytrvalost pod vodou z několika dnů na týdny, což je mnohonásobně déle, než zvládají jiné nejaderné ponorky. Motor se tak osvědčil, že jej v rámci modernizace přidali i do dalších 4 ponorek starších tříd. Z těchto důvodů bude Stirlingovými motory vybavena i nová třída ponorek Blekinge, jejíž první dva kusy jsou momentálně ve výrobě. (13)

V roce 2007 byla vyrobena první japonská ponorka třídy Sórjú. Ponorky obsahují 2 diesel-elektrické a 4 Stirlingovy motory Kockums V4-275R. Poslední z 12ti ponorek třídy Sórjú byla zařazena do služby v roce 2021. Tyto ponorky mají díky těmto motorům stejné výhody jak švédské ponorky třídy Gotland. Poslední dva vyrobené kusy však vyměnily své olověné baterie a Stirlingovy motory za Lithium-iontové baterie. (14)

1.3. Budoucnost Stirlingových motorů

Budoucnost Stirlingových motorů je, stejně jako v celé době jejich existence, velmi nejistá. V nejbližší době lze předpokládat, že bude pokračovat jejich používání a vývoj v oblasti kogeneračních a mikrokogeneračních jednotek. Tomuto tvrzení napovídá i stálá emisní politika Evropské unie.

Dalším ze zájemců o využívání Stirlingových motorů je NASA, která je dlouho a pečlivě testuje. V roce 2020 NASA po 14ti letech ukončila další ze svých Stirlingových projektů a vyhodnotila ho jako úspěšný. NASA oceňuje hlavně jeho dlouhodobý bezúdržbový chod a jeho účinnost, která je několikanásobně vyšší než u jiných způsobů získávání elektrické energie z tepla samovolně rozpadajícího se plutonia 238. Další výhodou oproti jiným způsobům je, že se časem nesnižuje jeho efektivita a ani po 14ti letech nepřerušovaného provozu nedošlo k žádnému opotřebení. Z těchto důvodů NASA uvažuje o Stirlingově motoru, jako o způsobu, jakým bude pohánět své budoucí dlouhodobé projekty. (15)

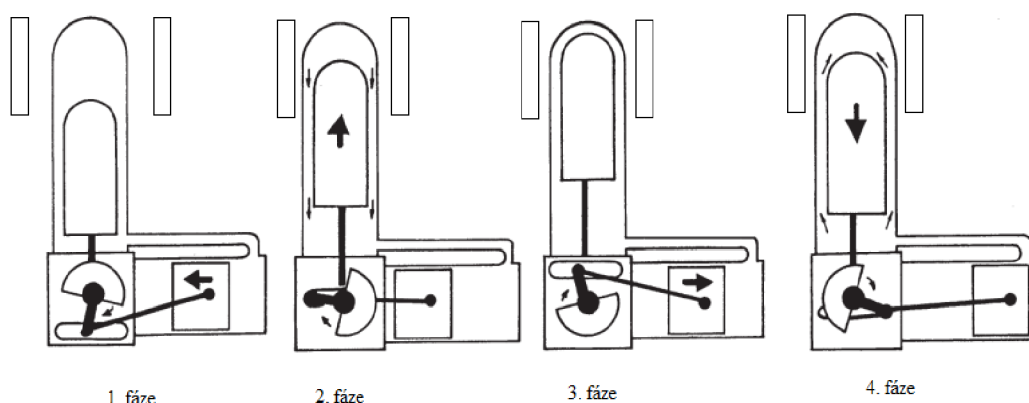
2. Princip Stirlingova motoru

Stirlingův motor je teplovzdušný, většinou pístový, motor s vnějším spalováním a uzavřeným pracovním prostorem. Protože motor disponuje vnějším přívodem tepla, může využívat jakýkoliv zdroj tepelné energie. Mezi jeho charakteristické vlastnosti patří tichý chod s velmi nízkými rázy, spolehlivost a vysoká životnost spojená s nízkými nároky na údržbu.

Protože Stirlingův motor má uzavřený pracovní prostor, disponuje stálým množstvím pracovní látky. Přeměňuje tepelnou energii na energii mechanickou skrze kompresi pracovní látky o nízké teplotě a následnou expanzi o teplotě vyšší. Práce, která je při kompresi pracovní látky pístem spotřebována, je nižší než práce, kterou při její expanzi může píst odevzdat jako požadovanou mechanickou energii. (1)

2.1. Cyklus Stirlingova motoru

1. fáze: Pracovní plyn se nachází v horním válci, kde se ohřívá – probíhá zde izotermická expanze, jejímž vlivem v propojeném pravém válci plyn koná práci tím, že posouvá pracovní píst do své dolní úvratě. Parametry plynu se mění následovně: $T_1 = \text{konst.}$, $V_1 \rightarrow V_2$, $p_1 \rightarrow p_2$
2. fáze: Přeháněcí (přemísťovací) píst se v horním válci pohybuje do horní úvratě a tím přehání plyn do válce pravého, kde má za úkol se ochladit. Cestou ještě předává část své tepelné energie přeháněcímu pístu, který však nepřiléhá na stěny válce, a proto může plyn proudit kolem něj a putuje do pravého válce, kde se ochlazuje. Plyn tuto tepelnou energii později opět využije. Toto uložení tepla se nazývá regenerace. Nastává izochorické ochlazení plynu: $T_1 \rightarrow T_2$, $p_2 \rightarrow p_3$, $V_2 = \text{konst.}$
3. fáze: Pracovní píst v pravém válci se díky dodané práci pohybuje do své horní úvratě a tím stlačuje ochlazený plyn. Dochází k izotermické kompresi plynu: $V_2 \rightarrow V_1$, $p_3 \rightarrow p_4$, $T_2 = \text{konst.}$
4. fáze: Plyn putuje zpět do ohřivaného horního válce. Cestou se opět ohřívá od přeháněcího pístu, který byl ohřát během 2. fáze. Přeháněcí píst se posouvá do své dolní úvratě a tím vytváří prostor pro pracovní plyn. Zde se jedná o izochorické ohřátí: $T_2 \rightarrow T_1$, $p_4 \rightarrow p_1$, $V_1 = \text{konst.}$ (16)



Obr. 1: Teoretický cyklus Stirlingova motoru (16)

Díky používání regenerace není nutné k rozpínání pracovního plynu přivádět velké množství tepelné energie a naopak při stlačování pracovního plynu tolik tepelné energie odvádět. Tepelná energie se totiž do regenerátoru akumuluje již při teplotě nižší než je teplota dodávaná, ale teplotě vyšší než je teplota odváděná. Použití regenerace zvyšuje účinnost systému a tím se přibližuje k účinnosti Carnotova cyklu.

Ideální Stirlingův cyklus je cyklus, který se skládá z Izoterm a Izochor. Jedná se o vratný cyklus, jehož pracovní látky mají plynné skupenství a nedochází k jeho změně, ale dochází pouze k výměně tepla s okolním prostředím. (3)

2.2. Popis termodynamických dějů v cyklu Stirlingova motoru

Všechny čtyři zkoumané fáze mají své charakteristické vlastnosti a funkce popisující jejich stav. Proto zavedeme i poměry teplot a objemů.

$$\tau = \frac{T_K}{T_E} \quad (2.1)$$

$$\nu = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (2.2)$$

Ideální Stirlingův cyklus pracuje s ideálním plynem. Pro ideální plyn platí stavová rovnice. (17)

$$p \cdot v = r \cdot T = \text{konst.} \quad (2.3)$$

Můžeme tedy stanovit výchozí tlak v bodě 1:

$$p_1 = \frac{m \cdot r \cdot T_1}{V_1} = p_{max} \quad (2.4)$$

V první fázi cyklu probíhá izotermická expanze. Expandující plyn vyvolává tlak na pracovní píst, ten přes klikovou hřídel roztáčí setrvačnick a tím do něj ukládá vykonanou práci. V této fázi je teplota T_1 v cyklu teplotou maximální T_E a zůstává konstantní díky průběžnému zahřívání. Konstantní a vnitřní energie pracovní látky se nemění. Izotermické změny se řídí Boyle-Mariotteovým zákonem:

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{V_2}, T_1 = T_2 = konst. \quad (2.5)$$

Přijatá práce W je rovna přijatému teplu

$$W_E = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (2.6)$$

Změna entropie v této fázi cyklu je rovna:

$$s_2 - s_1 = R \cdot \ln v \quad (2.7)$$

V druhé fázi cyklu probíhá izochorické chlazení. Pracovní plyn procházel kolem regenerátoru a nyní se ochlazuje v chladícím pístu, kde se plynu odebírá zbytek tepla. Teplota T_E klesá na teplotu T_3 . Teplota T_3 je zároveň i minimální teplotou cyklu T_K . Klesá zároveň i hodnota tlaku p_2 na hodnotu p_3 . V tomto ději se žádná práce nevyrábí ani neodebírání. Děj můžeme vyjádřit rovnicí:

$$p_3 = \frac{p_2 \cdot T_2}{T_3}, V_2 = V_3 = konst. \quad (2.8)$$

Množství tepla, které bylo odebráno, můžeme spočítat jako:

$$Q = c_v \cdot (T_2 - T_3) \quad (2.9)$$

Změna entropie v této fázi cyklu se spočítá:

$$s_3 - s_2 = c_v \cdot \ln(\tau) \quad (2.10)$$

Třetí fázi cyklu je izotermická komprese. V této fázi je skrze pracovní píst konána práce. Pracovní píst komprimuje při konstantní teplotě $T_3 = T_4 = T_K$ ochlazený plyn. Protože se jedná o izotermický děj, tak počáteční teplota je stejná s teplotou koncovou, respektive teplotou minimální. Práce dodaná pracovním pístem se odvádí průběžně odvodem tepla Q_2 , tímto je zajištěna i izotermie v této fázi cyklu. Pro konečný tlak v této fázi platí:

$$p_4 = \frac{p_3 \cdot V_3}{V_4}, T_3 = T_4 = konst. \quad (2.11)$$

Odváděné teplo Q je rovno práci, kterou musel píst při kompresy vykonat.

$$Q = \int_{V_{\max}}^{V_{\min}} p \cdot dv = W \quad (2.12)$$

Po integraci výrazu (2.12) dostáváme:

$$W_K = p_3 \cdot V_3 \cdot \ln \frac{V_4}{V_3} = R \cdot T_3 \cdot \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (2.13)$$

Změna entropie:

$$s_4 - s_3 = R \cdot \ln \left(\frac{1}{v} \right) \quad (2.14)$$

Poslední fází je izochorický ohřev. Probíhá zde přísun tepla za konstantního objemu. Stlačený plyn se při stále konstantním objemu ohřívá a tím mu je předávána tepelná energie. Teplota pracovního plynu se z T_K zvýší na teplotu T_E a tlak se zvýší z hodnoty p_4 na hodnotu p_1 . V této fázi se nevyrábí, ani neodebírání žádná práce. Platí vztah:

$$p_1 = \frac{p_4 \cdot T_4}{T_1}, V_4 = V_1 = konst. \quad (3.15)$$

Množství tepla, které je látkou přijato:

$$Q = c_v \cdot (T_1 - T_4) \quad (3.16)$$

Změna entropie:

$$s_1 - s_4 = c_v \cdot \ln \left(\frac{1}{v} \right) \quad (3.17)$$

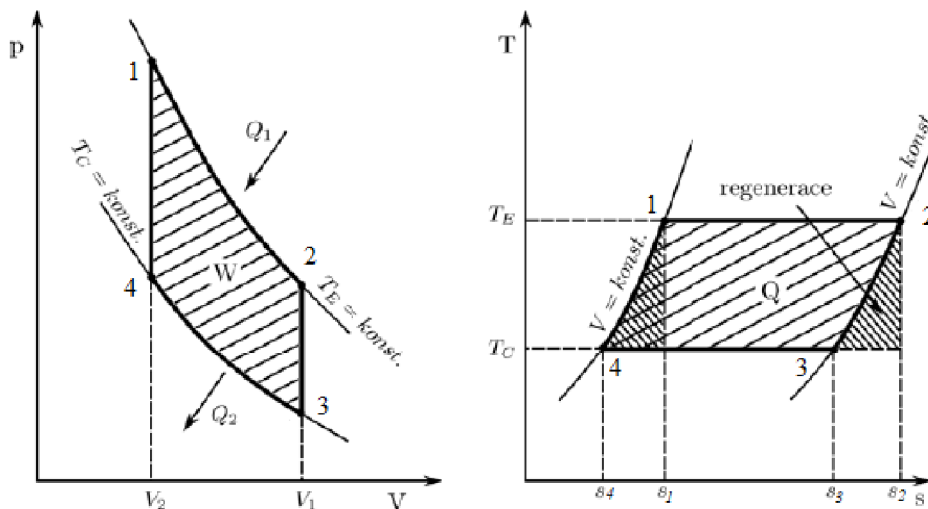
V ideálním Stirlingovu cyklu můžeme tvrdit, že množství tepla, které bylo v první a třetí fázi předáváno, je stejné. Výměna tepla mezi pracovním plynem a okolím se tedy odehrává při teplotách T_E a T_K . Díky tomu se účinnost Stirlingova ideálního termodynamického cyklu rovná účinnosti Carnotova cyklu. Můžeme ji teda spočítat touto rovnicí:

$$\eta_T = \frac{T_E - T_K}{T_E} \quad (3.18)$$

Výslednou práci ideálního Stirlingova cyklu je tedy rozdíl mezi prací získanou v první fázi cyklu a prací spotřebovanou ve fázi třetí. Množství práce, které bylo spotřebováno na kompresi pracovního plynu při teplotě T_K , je menší než množství práce, které bylo získáno expanzí pracovního plynu při teplotě T_E . Ve výsledku získáváme požadovanou mechanickou práci. Výslednou indikovanou energii (práci) jednoho ideálního Stirlingova cyklu spočítáme jako součet indikované energie expanzní a indikované kompresní energie:

$$W_I = W_E + W_K \quad (3.19)$$

$$W_I = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} - p_3 \cdot V_3 \cdot \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (3.20)$$



Obr. 2: Teoretický p-V a T-s diagram ideálního Stirlingova cyklu (3)

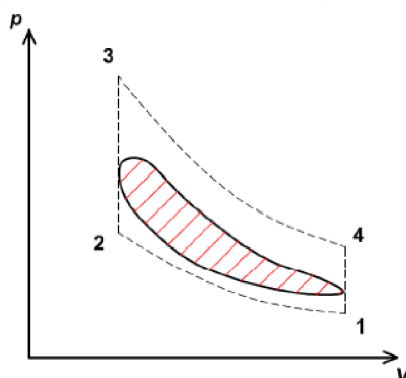
Poměrem indikované energie jednoho cyklu a indikované energie expanzní W_E , kterou můžeme považovat za energii vstupní, můžeme vyjádřit i tepelnou účinnost ideálního Stirlingova cyklu:

$$\eta = \frac{W_I}{W_E} \quad (3.21)$$

Z rovnice je patrné, že tato účinnost je totožná s účinností Carnotova cyklu. (2) (3) (16) (17) (18)

2.3. Skutečný cyklus

Při popisování ideálního cyklu zanedbáváme mechanické i termodynamické faktory a ztráty, které způsobují odchylky od výsledné práce ideálního cyklu.



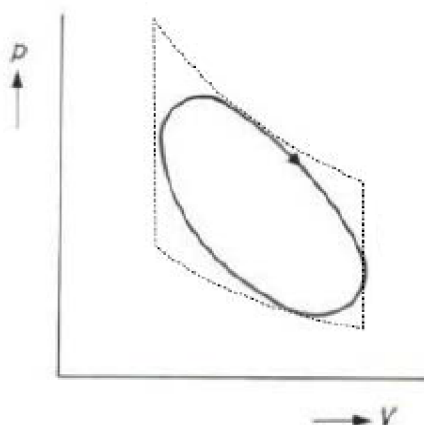
Obr. 3: Znázornění odlišnosti teoretického a skutečného Stirlingova cyklu (18)

2.3.1. Kontinuální pohyb pístů

Největším rozdílem skutečného cyklu od cyklu teoretického je spojitý pohyb pístů. Pohyb pístu totiž bývá většinou určen jednoduchým klikovým mechanismem z důvodu snadné realizace a jeho poměrně klidného chodu při vyšších otáčkách. Toto mechanické omezení však ale není příznivé pro jednotlivé termodynamické cykly. Expanze neprobíhá pouze v části zahřívání a komprese neprobíhá pouze v části chlazení. Tento sinusový pohyb pístů zmenšuje uzavřenou plochu p-V diagramu a tím snižuje i výslednou užitečnou práci. (3) (8) (18)

2.3.2. Neizotermické děje

Izotermická expanze i izotermická komprese vlivem krátkého času, zapříčiněným spojitým sinusovým pohybem, se ve skutečnosti přibližuje spíše k adiabatickým dějům než k dějům izotermickým. Během expanze nedochází k dostatečně rychlému ohřevu pracovního plynu a během komprese naopak nedochází k dostatečně rychlému ochlazení. Vlivem toho dochází k nežádoucím změnám teploty a tlaku a tím i ke snížení výkonu motoru. (8) (18)



Obr. 4: Vliv spojitého sinusového pohybu pístu v p-V diagramu (8)

2.3.3. Nedokonalá regenerace

Dalším nepříznivým faktorem je nedokonalá regenerace. Během regenerace se mění teplota samotného regenerátoru, a proto regenerátor nedokáže předat takové množství tepla, které dříve přijal, a teplo musí být přijato od jiného zdroje tepla. Ve skutečnosti regenerátor pracuje s účinností kolem 95%. (8) (18)

2.3.4. Tepelné ztráty

Stirlingův motor také disponuje tepelnými ztrátami. Tyto ztráty se projevují v celém systému a k jejich vyvážení je zapotřebí opět zvýšit množství dodaného tepla.

Nejvíce se projevují prostřednictvím přeháněcího pístu, který svým pohybem k ochlazovací části ztrácí teplo přijaté v ohřívané části. Největší vliv to má u varianty β , u které přeháněcí píst často plní funkci regenerátoru. (8) (18)

2.3.5. Unik plynu a tlakové ztráty

Vlivem nedokonalého těsnění, převážně pístních kroužků, z celého systému uniká pracovní plyn. U některých lehkých plynů, jako je vodík, dochází také k úniku přes stěny samotného motoru. Unik pracovního plynu má vliv i na tlakové ztráty. Pokles tlaku je také způsoben prouděním plynu mezi ohřívanou a chlazenou částí a regenerátorem. Vlivem těchto příčin, není tlak v celém systému v daný okamžik konstantní. Protože výkon motoru závisí i na hodnotě středního tlaku pracovního plynu, dochází k jeho snížení. Za nepříznivé považujeme i turbulentní proudění pracovního plynu. (8) (18)

2.3.6. Třecí ztráty

Ke ztrátám také dochází vlivem mechanického tření. Ke tření dochází zejména u těsnících pístních kroužků, ložisek a dalšího těsnění. (8) (18)

2.4. Důležité složky Stirlingova motoru

2.4.1. Tepelné výměníky

K přívodu tepla ohřívajícího pracovní plyn z externího zdroje slouží ohříváč. Při konstrukci Stirlingových motorů se snažíme, aby ohříváč tvořil většinu mrtvého objemu teplé strany motoru. Ohříváči je neustále dodáváno teplo externím zdrojem tepla a jeho teplota zůstává neustále téměř neměnná.

K odebírání tepla z ohřátého pracovního plynu slouží chladič. Obdobně jako u ohříváče se snažíme, aby chladič tvořil většinu mrtvého objemu chladné strany motoru. Teplo se obvykle odvádí pomocí okolního vzduchu nebo chladicí kapaliny. (18)

2.4.2. Píst

Píst je posuvná součást, která se pohybuje mezi spodní a horní úvratí uvnitř válce. Písty ve Stirlingových motorech jsou v podstatě stejné jako písty, které můžeme nalézt v motorech spalovacích.

2.4.3. Přeháněcí (přemíst'ovací) píst

Přeháněcí píst je posuvná součást podobná normálnímu pístu. Na rozdíl od normálního pístu má přeháněcí píst mezi sebou a stěnou válce vůli. Díky této vůli může snadno pracovní plyn proudit kolem přeháněcího pístu, tudíž pracovní plyn nestlačuje,

ani jinak nemění jeho objem. Přeháněcí písty většinou bývají duté, aby mohly lépe podpořit funkci regenerace. (2)

2.4.4. Setrvačnick

Setrvačnick je součást, na kterou působí píst při expanzi a tím ho roztáčí. Píst tímto ukládá svou energii do rotační energie setrvačnicku. Při kompresi si píst naopak část energie ze setrvačnicku opět odebere. Protože je uložená energie v setrvačnicku v rámci jednoho cyklu vyšší než energie, která je z něj odebrána, tak setrvačnick časem nabírá svou rychlost. Setrvačnick slouží ke snížení kolísavosti otáček motoru a jeho prostřednictvím je možno použít výkon motoru na připojený mechanismus. (2) (8)

2.4.5. Regenerátor

Regenerátor je důležitou součástí Stirlingových motorů. Ve své podstatě se jedná o takový interní zásobník tepla. Regenerátor je většinou tvořen tkanou sítí kovových (nejčastěji měděných) velmi tenkých drátků. Tato forma regenerátoru má výhodu v tom, že napomáhá oddělit teplou stranu motoru od té studené. Nejjednodušším regenerátorem může být i přeháněcí píst. (2)

2.4.6. Pracovní plyn

Za vhodné pracovní plyny považujeme ty, které se vyznačují nízkou tepelnou kapacitou, která umožňuje rychlejší změny teploty. Další požadovanou vlastností je nízká viskozita. Při vyšší viskozitě je zapotřebí dodat více energie k tomu, aby se pracovní plyn přesunul ze studené části motoru do té teplé. Nejčastěji se jako pracovní plyn ve Stirlingově motoru používá helium, vzduch, dusík a vodík.

Vodík je, co se týče výkonu motoru, na tom nejlépe. Výhodou vodíku je nízká viskozita a vysoká tepelná vodivost. Nicméně se v praxi moc nepoužívá, protože se potýká s nemalým únikem z pracovního prostoru, je velmi náchylný k explozím a může docházet k chemickým reakcím.

Častým průmyslovým pracovním plynem Stirlingových motorů je helium. Výhodou helia je jeho nízká měrná tepelná kapacita, a protože se jedná o inertní plyn, nehrozí žádná chemická reakce ani riziko explozí.

Pro svou dostupnost je však nejčastěji používaným pracovním plynem vzduch. Ani vlastnostmi na tom vzduch není špatně. Stirlingovy motory pracující se vzduchem obvykle pracují při tlacích, které jsou blízké atmosférickému tlaku a díky tomu odpadají problémy s utěsněním. To ale zároveň snižuje jeho výkonnost motoru a tím i možnost

jeho komerčního použití. Lepších výsledků dosahuje nahrazení vzduchu dusíkem. (2)
(18)

Výzkum Allana Organa ale došel k výsledku, že pokud je Stirlingův motor využívající vzduch navržen dobře, tak se se svou účinností teoreticky dokáže vyrovnat motorům, které používají helium. (1)

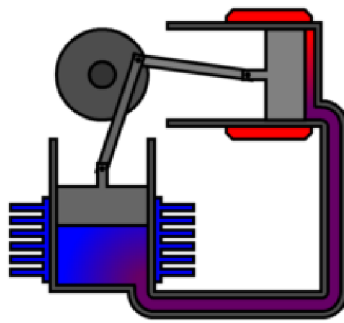
3. Konstrukční varianty Stirlingova motoru

Stirlingovy motory rozdělujeme do tří základních variant. Tyto varianty se liší vzájemnou polohou pístů a tím i celkovým konstrukčním provedením. Žádná z variant v porovnání však neposkytuje žádnou větší výhodu z hlediska výkonů. V praxi často dochází ke kombinacím jednotlivých variant a uplatňování víceválcového uspořádání.

Kromě těchto základních variant existují například i Stirlingovy motory membránové, s tekutými písty (tzv. free piston) nebo rotační. (1) (3) (18)

3.1. α – modifikace

Jedná se o nejjednodušší konstrukci Stirlingova motoru. Skládá se ze dvou pracovních pístů a dvou válců, které jsou navzájem propojeny potrubím, které v sobě obsahuje regenerátor. Oba písty jsou přichyceny k setrvačníku (popřípadě ke klikové hřídeli se setrvačníkem) a obvykle jsou od sebe posunuty o 90° .

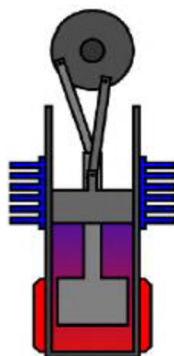


Obr. 5: α – modifikace Stirlingova motoru (5)

Tato modifikace má dobrý poměr výkonu a objemu, problémem je ale utěsnění pístu na teplé straně válce při vyšších teplotách. (3) (8) (18)

3.2. β – modifikace

Tuto konstrukci původně použil Robert Stirling. Skládá se z jednoho pracovního pístu, jednoho přeháněcího pístu a jednoho válce. Oba písty jsou tedy umístěny v jednom válci na jedné společné ose, jsou přichyceny k setrvačnicku a jsou od sebe posunuty o 90° . Umístění regenerátoru závisí na konstrukčním provedení, popřípadě ho nahrazuje přeháněcí píst.

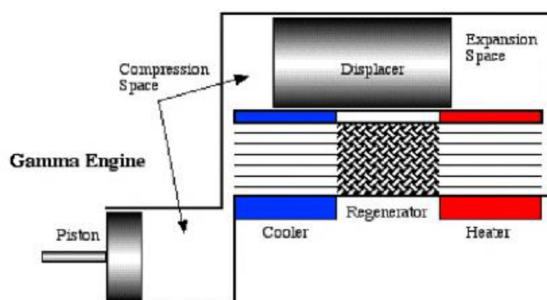


Obr. 6: β – modifikace Stirlingova motoru (2)

Tato varianta je konstrukčně složitější, zejména kvůli těsnění mezi pracovním a přeháněcím pístem. V této modifikaci odpadají větší problémy s těsněním pracovního prostoru, protože pracovní píst ve studené straně válce není v kontaktu s horkým plynem, který tyto problémy způsoboval. (3) (8) (18)

3.3. γ – modifikace

Tato modifikace je podobná modifikaci beta. Pracovní a přeháněcí písty se nachází v různých válcích, které jsou většinou rovnoběžné a nedaleko od sebe. Regenerátorem může být opět přeháněcí píst, nebo se může nacházet v propojovacím kanálku. Tímto však mírně narůstá škodlivý objem.



Obr. 7: γ – modifikace Stirlingova motoru (2)

Modifikace nabízí zjednodušení celého mechanismu ale za cenu nižší účinnosti. (2) (3) (18)

3.4. Výhody a nevýhody Stirlingových motorů

3.4.1. Výhody Stirlingových motorů:

1. Jednou z největších výhod Stirlingova motoru je jeho schopnost fungovat z libovolného zdroje tepla a díky tomu je možné použít jakýkoliv zdroj paliva. Ze stejného důvodu je schopný využívat geotermální, solární i jadernou energii nebo například využívat i odpadní teplo.
2. Motor disponuje uzavřeným pracovním cyklem a díky tomu je pracovní plyn homogenní a není znečištěný. Tento faktor také zvyšuje životnost motoru, protože netrpí korozí a problémy, které koroze způsobuje. Uzavřený cyklus má výhodu i v absenci ventilů a dalších souvisejících mechanismů a tím je mnohem jednodušší než jiné spalovací motory.
3. Za předpokladu, že motor pohání teplo z hořícího paliva, můžeme říci, že vypouští oproti spalovacím motorům méně spalin. Spalovací motory mají vnitřní přerušované spalování, zatímco Stirlingův motor disponuje kontinuálním spalováním paliva. Protože nejvíce kouře produkuje rozhořívání ohně, tak může Stirlingův motor při svém stálém hoření dosahovat nižších emisí než spalovací motory. Stirlingovy motory, které jsou poháněny například solárním zdrojem tepla, žádné emise nevypouštějí.
4. Absence ventilů a výfukových plynů jsou důvodem, proč jsou Stirlingovy motory velmi tiché. Kontinuální hoření paliva poskytuje Stirlingovým motorům další velkou výhodu, a tou jsou velmi nízké vibrace.
5. Protože pracují při poměrně nízkých tlacích a nedochází k žádným fázovým ani chemickým změnám pracovního plynu. Proto je motor ohromně bezpečný a nehrozí žádné nebezpečí výbuchu. Z těchto důvodů je umožněna i lehčí konstrukce válců.
6. Stirlingovy motory lze snadno zmenšit, a to i na velmi malé velikosti.
7. Vysoká teoretická účinnost motoru.
8. Ohromná flexibilita a variabilita použití. Může být použit k výrobě elektrické energie, nebo být použit jako chladicí či tepelná jednotka.
9. Protože obsahují méně pohyblivých částí než jiné spalovací motory a v porovnání s klasickými spalovacími motory nemají téměř žádné vibrace, disponují dlouhým bezúdržbovým chodem, vysokou životností a spolehlivostí při chodu.

10. Stirlingovy motory také v porovnání s ostatními solárními technologiemi dosahují nejvyšší účinnosti v přeměně tepelné energie na energii elektrickou. (1) (2) (3)

3.4.2. Nevýhody Stirlingových motorů

1. Stirlingovy motory mají poměrně nízký specifický výkon, to znamená, že produkují menší výkon ve srovnání se spalovacím motorem stejné velikosti. To je důvod pro upřednostňování spalovacích motorů před Stirlingovými motory.
2. Největším problémem Stirlingových motorů je jejich vysoká cena. Vysoká cena je způsobená drahými materiály a technologiemi. Cenu zvyšuje i nesériová výroba a nákladný návrh účinných tepelných výměníků. Cena Stirlingova motoru se stejným výkonem, jako má klasický motor s vnitřním spalováním, je téměř dvojnásobná. Tento motor by byl i větší a těžší než klasický spalovací motor.
3. Účinnost Stirlingových motorů je velmi závislá na teplotním rozdílu mezi teplou a studenou částí motoru. Na rozdíl od zážehových motorů, které jsou po zvýšení teploty chladicí kapaliny účinnějšími, účinnost Stirlingových motorů klesá s rostoucí teplotou chladicí části motoru, potažmo kapaliny, která tuto část motoru ochlazuje. Dochází ke snížení teplotních rozdílů a tím i ke snížení účinnosti motoru.
4. Další nevýhodou je obtížné utěšňování Stirlingových motorů. Oproti spalovacím motorům, ve kterých je pracovní kapalina vypuzována v každém cyklu, Stirlingovy motory používají stejný pracovní plyn po celou dobu své životnosti. Špatné utěšnění motoru má za následek pokles účinnosti motoru.
5. Stejně jako motory s vnitřním spalováním se Stirlingovy motory nespouštějí samočinně. Je tedy nutné použít při rozběhu nějakého startovacího mechanismu. Stirlingovy motory také potřebují nějaký čas pro zahřátí na pracovní teplotu, než se je pokusíme nastartovat.
6. Problémem Stirlingových motorů je také pomalá regulace otáček. Obvykle se problém řeší měněním zdvihového objemu motoru, změnou úhlu mezi pracovním pístem a pístem přeháněcím nebo regulací tlaku v systému. Tento problém je však pro výrobu tepelné a elektrické energie nepodstatný. (1) (2) (3) (8) (18)

4. Návrh Stirlingova motoru pro výrobu v domácím prostředí

Stirlingův motor už jsem z běžných věcí, které lze najít doma, dělal. V té době jsme s kamarády však jen slepě opisovali podle internetového návodu a nedocházelo nám, jak to vlastně funguje. Později jsme to na střední škole zkusili znovu, ale zajímal nás spíš zbytek projektu, který tento motor měl pohánět a konstrukci motoru jsme vyrobili podle té předchozí. Naposledy jsem se Stirlingovu motoru věnoval na střední škole při své maturitní práci, ve které jsem použil tříválcový Stirlingův motor varianty beta v programu SolidWorks.

V dnešní době se už můžeme podívat na mnoho návodů, které se od sebe liší nejen provedením, ale dokonce i variantou, která byla použita. Nejčastěji můžeme najít variantu γ , která bývá na výrobu nejjednodušší. Často se také objevuje varianta β . V současné době můžeme dokonce najít i návody na nízkoteplotní (LTD) diferenciální motory. Varianta α se v návodech pro výrobu Stirlingových motorů v domácím prostředí příliš často neobjevuje. Příčinou může být složitější, časově náročnější a dražší výroba, než u variant β a γ .

Případá mi důležité upozornit na to, že se na internetu nacházejí i návody, které ve skutečnosti nemohou vůbec fungovat. Narazil jsem na návod po domácku vyrobeného Stirlingova motoru varianty beta, který měl pouze jednu „ojnici“ a chyběl v něm přeháněcí píst. Dalším příkladem, který mohu uvést byla absence jakéhokoliv setrvačníku. U obou z těchto příkladů jsem našel komentáře o tom, že se jedná o podvod. Některé návody jsou teoreticky v pořádku, ale jejich tvůrci použili špatné materiály. Může se také stát, že i přes dodržení všech kroků návodu motor nemusí fungovat. Příčinou s největší pravděpodobností bude vysoké tření nebo špatné utěsnění. Dalším důvodem mohou být nedostatečné rozměry „klikové hřídele“. Pokud je používána „membránová“ konstrukce, je možné, že v „membráně“ (častým řešením je nafukovací balónek) se nachází díra, kterou plyn místo konání expanze a komprese uniká z pracovního prostoru ven.

Při promýšlení toho, jaké dostupné věci mám doma, jsem se rozhodl, že použiji klasickou plechovkovou konstrukci, se kterou už mám pár zkušeností, kombinovanou součástkami ze stavebnice Merkur. K inspiraci jsem našel desítky návodů, ve kterých se objevovaly nápady, které jsem při načrtcích sám použil a v několika případech byly tyto motory i velmi podobné.

4.1. Příklady internetových návodů

Z desítek návodů na výrobu domácího Stirlingových motorů jsem jich vybral 5, které jsou podle mě nejlepší. Většina těchto Stirlingových motorů je vyráběna z půllitrových plechovek. Společné mají také to, že místo pracovního pístu používají membránu.

4.1.1. Stirlingův motor č. 1

Tento návod popisuje výrobu Stirlingova motoru varianty γ . Návod je snadno pochopitelný a zaujal mě tím, jak originálně vyřešil uchycení „klikové hřídele“. Autor ukazuje celou výrobu krok po kroku a vždy je na vše hezky vidět. Na návodu oceňuji, že opravdu stačí jen postupovat podle instrukcí. Tento návod byl jeden z mála, kde „kliková hřídel“ je okótovaná. Konstrukce zohledňuje i potřebu chlazení studené strany motoru. Jedinou věcí, kterou bych návodu vytknul, je použití 3D tiskárny. Z tohoto důvodu je pro některé lidi, kteří 3D tiskárnu nemají, nutné improvizovat. (19)



Obr. 8: Stirlingův motor č. 1
(19)

4.1.2. Stirlingův motor č. 2

Další návod je nejlepší návod na výrobu Stirlingova motoru varianty γ , který jsem při svém hledání našel. Je stručný a krátký, ale přitom velmi názorný a jsou z něj jasné pochopitelné kroky, jakými při výrobě postupovat. Na návodu se mi líbí konstrukce samotného motoru i použité díly, kromě toho má nejpevnější uložení „klikové hřídele“ i motoru samotného tak, aby pod něj bylo možné položit zdroj tepla, které jsem v návodech viděl. Největší výtku mám k použitému setrvačníku, kterým byl paměťový disk z rozebraného pevného disku (HDD). Ten může být pro spoustu lidí hůře dostupný.

Výhodou oproti návodu č. 1 není jen jednodušší konstrukce, ale i to že žádná z použitých součástí nebyla vyrobena pomocí 3D tiskárny. (20)



Obr. 9: Stirlingův motor č. 2 (20)

4.1.3. Stirlingův motor č. 3

Třetí návod stejně jako oba předchozí popisuje výrobu Stirlingova motoru varianty γ . I přesto, že působí jako levnější kopie návodu č. 2, tak se mi svojí konstrukcí a použitými nápady líbil. Návod vše detailně ukazuje, je pochopitelný a motor lze podle něj vyrobit. Uložení „klikové hřídele“ je vyřešeno poměrně jednoduchým způsobem, který na mě působí dojmem, že si chtěl autor ušetřit čas. Oproti návodu č. 2 se mi propojovací potrubí líbí méně. I když bych i v tomto případě řešil trochu jinak, oceňuji, jak si autor poradil s díly, které měl k dispozici. Stejně jak v předchozím případě mám výhrady i k použití paměťového disku jako setrvačnicku. (21)



Obr. 10: Stirlingův motor č.3 (21)

4.1.4. Stirlingův motor č. 4

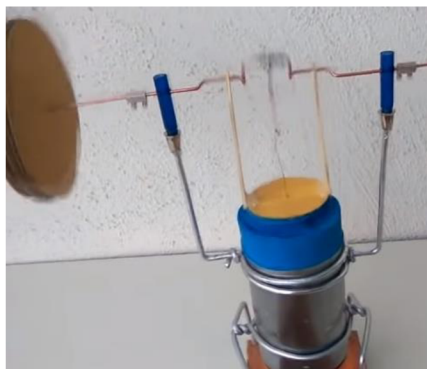
Jedná se o návod výroby Stirlingova motoru varianty β . U tohoto návodu si nejsem stoprocentně jistý, zda se nejedná o podvod. Důvodem mých pochyb je velmi slabý drát, který vede od „klikové hřídele“ k přeháněcímu pístu. Jde o to, že takto slabý drát nemůže sám o sobě zajistit pohyb přeháněcího pístu do své dolní úvratě a spoléhá na to, že tento pohyb způsobí gravitace. Nicméně při použití silnějšího drátu by tento návod měl být funkční. Návod samotný se mi však líbí. Je snadný na pochopení a je zde vidět kompletní výroba motoru s použitím dostupných dílů. Jako setrvačnick je zde použito několik CD přilepených k sobě. (22)



Obr. 11: Stirlingův motor č. 4 (22)

4.1.5. Stirlingův motor č. 5

Poslední z návodů se týká výroby Stirlingova motoru varianty β . Stejně jako předchozí návod mi připadá, že drát vedoucí „klikovou hřídel“ k přeháněcímu pístu je slabší, v tomto případě je ale kroucený, a to mu dodává větší tuhost. Oba návody jsou pojaty v podobném duchu, ale tento návod mi připadá o něco jednodušší. Setrvačnick zde byl originálně použit jako slepenec kartonových kol. Výhrady však mám u uchycení



Obr. 12: Stirlingův motor č. 5 (23)

„klikové hřídele“ k motoru, které se mi nezdá tolik univerzální jako u předchozích příkladů. (23)

4.2. 3D návrh vlastního Stirlingova motoru

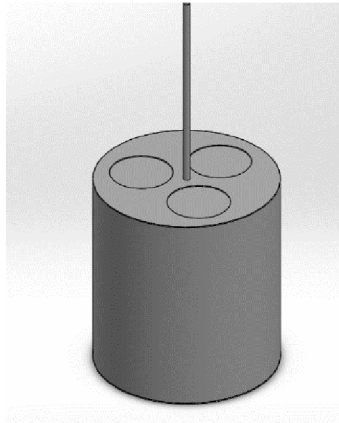
Jak už jsem říkal po procházení si dostupných součástí, které doma mám k dispozici, jsem se rozhodl pro konstrukci z plechovek. Po nesčetném množství náčrtků jsem došel k názoru, že budu navrhovat variantu β . Základní rozměry, které budu používat, se odvíjejí od naměřených rozměrů jednotlivých dílčích součástí. Z tohoto důvodů jsou uvedené vymodelované součásti a díly jsou pouze orientační a jejich účelem je symbolické znázornění vyráběného modelu sloužící k bližšímu promýšlení detailů celkové konstrukce.

Jako první jsem se zamýšlel nad přeháněcím pístem, protože délka přeháněcího pístu spolu s klikovou hřídelí ovlivňuje i výšku válce, ve kterém celý děj probíhá. Nejdříve jsem si napsal na papír, k čemu tento píst slouží a jaké by ideálně měl mít vlastnosti – přehánět co nejlépe pracovní plyn, být lehký a zajišťovat regeneraci. Při zvažování toho, jaké mám materiálové možnosti a jakým způsobem přeháněcí píst navrhnu, jsem nakonec skončil se čtyřmi nápady:

1. Přeháněcí píst sloužící pouze k přehánění pracovního plynu bez regenerace. Píst by se skládal polystyrenové výplně dna plechovky po obou stranách. Výhodou tohoto návrhu je lehká a pevná konstrukce bez regenerativních účinků.
2. Přeháněcí píst sloužící k přehánění pracovního plynu s malou regenerací. Konstrukce pístu je po svém obvodu tvořena z hliníkové stěny plechovky. Čela pístu by opět zastoupily dna plechovek. Tento píst by měl být ze všech nejlehčí, protože nemá žádnou výplň. Regenerační účinky spočívají ve výměně tepla mezi pracovním plynem samotného motoru a ohřátým vzduchem (plynem) uvnitř dutého pístu.
3. Přeháněcí píst sloužící k přehánění pracovního plynu a s regenerací. Konstrukce tohoto přeháněcího pístu je tvořena z provrtaných „víček“ plechovek na čelech pístu a ocelovou vlnou jako výplní. Na rozdíl od dvou předchozích konstrukcí plyn přeháněcí píst neobíhá, ale proudí skrze něj. Ocelová vlna je dostatečně lehká na to, aby se konstrukce

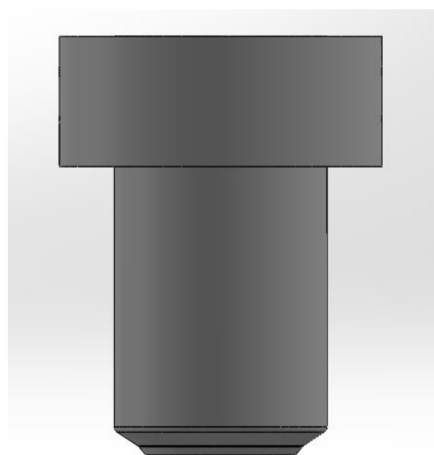
- hmotnostně rovnala konstrukci první, a protože se jedná o tkaninu z velmi tenkých kovových vláken, je ideální pro použití jako regenerátor.
4. Přeháněcí píst sloužící k přehánění pracovního plynu a s regenerací. Píst se skládá pouze z ocelové vlny. Píst má stejné výhody jako předchozí případ, ale měl by být nepatrně lehčí.

Při navrhování 3D modelu jsem použil třetí konstrukci, která se mi díky regeneraci a konstrukci jeví jako nejlepší. Oproti čtvrtému nápadu má lépe zajištěný tvar. Délku této konstrukce jsem stanovil na osm centimetrů.



Obr. 13: 3D model přeháněcího pístu

Po přeháněcím pístu jsem pokračoval k návrhování válce a jeho chlazení. Maximální objem plynu, který se ohřívá (tzn. když je přeháněcí píst ve své horní úvrati), by měl být stejný jako maximální objem plynu, který se ochlazuje (když je přeháněcí píst v dolní úvrati). Délku přeháněcího pístu jsem stanovil na osm centimetrů

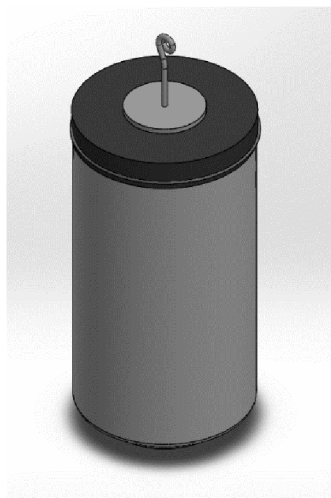


Obr. 14: 3D model válce s chladičí nádobou

a při svých úvahách jsem počítal se čtyřmi centimetry mezi horní a dolní úvratí.

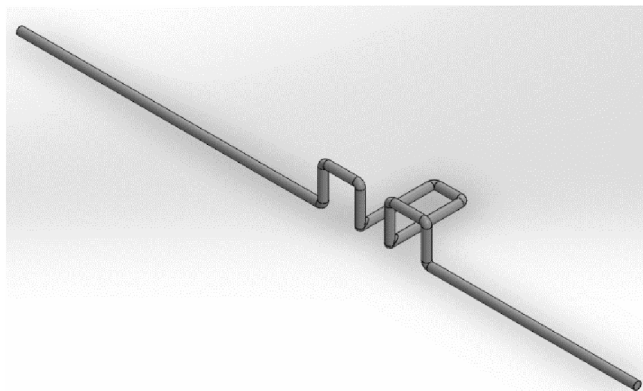
Jednoduchou matematikou jsem došel k tomu, že výška válce by měla být dvanáct centimetrů. Nakonec jsem se však rozhodl pro délku třináct centimetrů, důvodem pro toto rozhodnutí je konkávní dno, které plechovka má. V posledních čtyřech centimetrech je k válci přichycena i chladicí nádoba, do které se pro zvýšení teplotního rozdílu mezi teplou a studenou stranou válce bude nalévat chladicí kapalina.

Dalším krokem je pracovní píst. Místo klasického pracovního pístu jsem se pro získávání práce rozhodl použít „membránový“ způsob. Díky použití membrány mi odpadají starosti s těštěním klasického pracovního pístu. Membrána je přetažená přes válec a disponuje pevnou ploškou sloužící k uchycení ojnic.



Obr. 15: 3D model přichycené membrány k válci

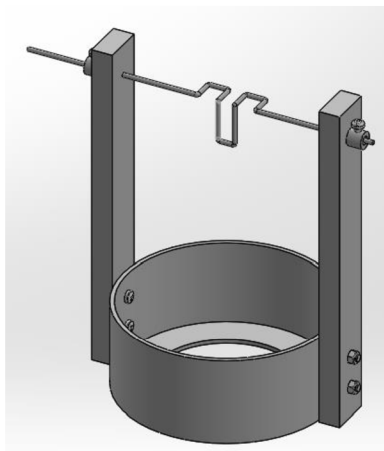
Klikovou hřídel jsem navrhoval od prostřední části, která zajišťuje chod přeháněcího pístu. Jak jsem uvedl dříve, horní a dolní úvrať přeháněcího pístu jsem navrhl čtyři centimetry od sebe. To znamená, že klikový čep při své rotaci kolem hlavní osy klikové hřídele udělá kruh o průměru čtyři centimetry. Klikový čep přeháněcího pístu tedy bude dva centimetry od hlavní osy klikové hřídele. Hned na tento klikový čep



Obr. 16: 3D model klikové hřídele

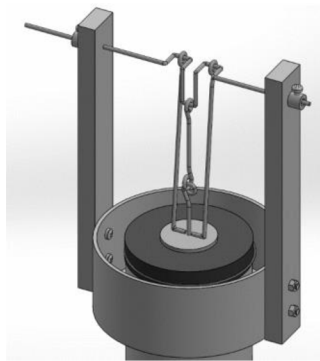
navazují klikové čepy pracovního pístu, který v tomto případě představuje membrána. Pro pracovní píst jsem navrhl vzdálenost horní úvratě od té dolní dva centimetry daleko od sebe. To znamená, že klikové čepy pracovního pístu budou 1 centimetr od hlavní osy klikového hřídele. Je důležité mít na paměti, že klikové čepy přeháněcího a pracovního pístu musí být navzájem odsazeny o 90 °.

Důležitou částí je také způsob uchycení klikové hřídele tak, aby její poloha byla vůči celému systému stabilně zafixovaná. Tento úkol zajistí dvě dřevěné latě přidělané k chladicí nádobě. Klikovou hřídel je také třeba zajistit proti posuvnému pohybu tak, aby z těchto uchycovačů nespadla. K tomu použijeme zarážky.



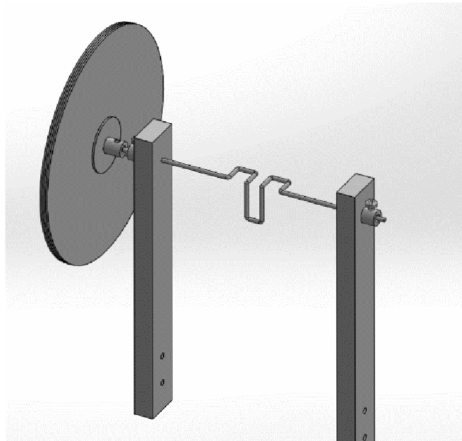
Obr. 17: 3D model uchycení klikové hřídele

Dalším krokem bylo navržení ojníc, které budou připojeny k setrvačníku přes klikovou hřídel. Ojnice pracovního pístu jsou připevněny k pevné plošce na membráně. Protože se klikový čep přeháněcího pístu nachází uprostřed klikové hřídele, máme klikové čepy (a tím i ojnice) pracovního pístu dva, tím si zajišťujeme rovnovážné stlačení celé membrány. Přeháněcí píst je ke klikové hřídeli připevněn pomocí dvou ojníc, které se svým spojení zajišťují přímočarý pohyb přeháněcího pístu a rozbijí tím sílu, která by ho hnala proti stěnám válce.



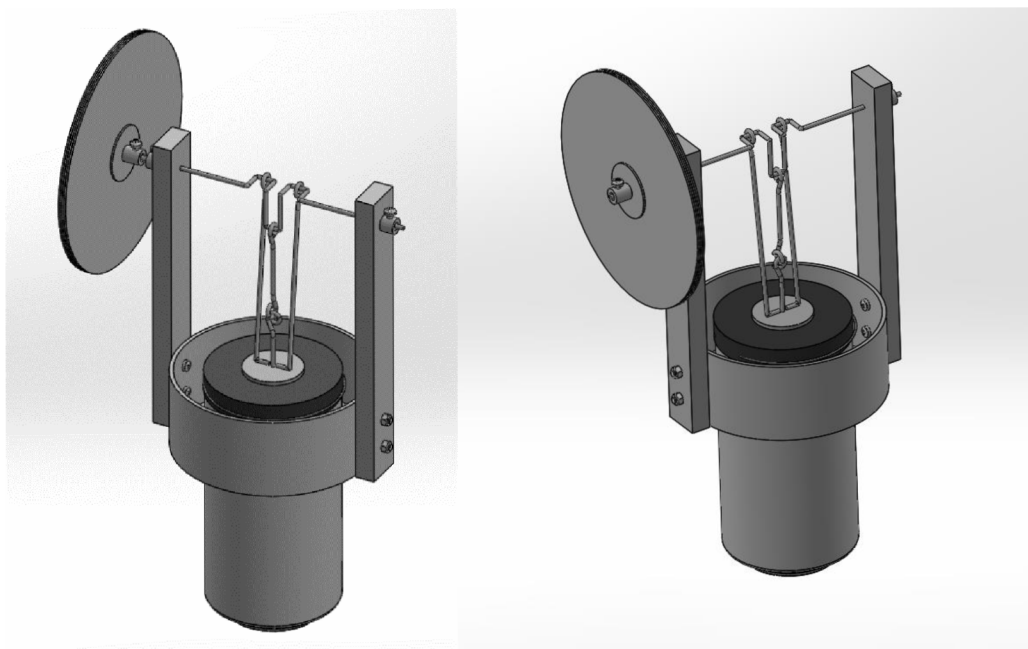
Obr. 18: 3D model ojníc a jejich přichycení

Poslední součástí je setrvačnick. Je nezbytnou součástí celého motoru. Setvačnick je umístěn na klikové hřídeli a musí být zajištěn proti přímočarému i rotačnímu pohybu – musí být k hřídeli zaxifovaný.



Obr. 19: 3D model setrvačnicku uchyceného k hřídeli

Po sestavení všech nezbytných částí a mnoha úpravách jsem sestavil 3D model Stirlingova motoru, podle kterého budu postupovat i při výrobě.



Obr. 20: 3D model po domácku vyrobeného Stirlingova motoru varianty β

5. Výroba Stirlingova motoru v domácím prostředí

Při samotném procesu výroby Stirlingova motoru mě doprovázelo několik problémů. Prvního problému jsem si všiml při stříhání plechovky. Všiml jsem si, že se plechovka hodně láme a její stěny nejsou moc tuhé. Proto jsem zkusil umístit membránu na válec už v této ranné fázi výroby a zjistil jsem, že si válec nedokáže udržet svůj tvar. Díky tomu jsem na tuto hliníkovou plechovku zanevřel a jako válec jsem použil tužší plechovku od sprejové barvy. V průběhu výroby se mi povedlo sehnat i lepší materiál pro výrobu „klikové hřídele“ a „ojnic“, kterým jsem nahradil již hotové části. V neposlední řadě jsem řešil problém, kde sehnat ocelovou vlnu, která se v našem meště neprodává.

Jako první jsem začal s výrobou přeháněcího pístu. Postupval jsem podle návrhu, který jsem vymodeloval. Od plechovek jsem za pomoci brusného papíru oddělil víčka, která jsem provrtal. Jediná změna oproti modelu je v tom, že jsem do víček vyvrtal více



Obr. 21: Provrtaná víčka od plechovek

děr pro usnadnění proudění pracovního plynu, který prochází přes přeháněcí píst. Skrze malé vyvrtané dírky uprostřed víček jsem protáhl drát a omotal jej ocelovou vlnou. Za pomoci slabých měděných drátků jsem zajistil požadovaný rozměr 8 centimetrů, ke kterému jsem došel při navrhování. Následně jsem tyto drátky překryl další ocelovou vlnou a doplnil s ní slabší místa.



Obr. 22: Přeháněcí píst

Druhým krokem výroby byl válec. Na rozdíl od 3D modelu, ve kterém jsem znázorňoval klasickou hliníkovou plechovku, jsem použil tužší plechovku od sprejové barvy. Protože i tato plechovka má konkávní dno zanechal jsem rozměr 13 centimetrů a plechovku v této výšce uřízl. Po zbroušení ostrých hran jsem vnitřek plechovky vyčistil a zbytek nečistot vypálil plynovým hořákem. Následně jsem plechovku ještě jednou vypláchl a nechal usušit.



Obr. 23: Válec Stirlingova motoru z plechovky

Poté jsem se přesunul k chladicí nádobě. Jako tělo chladicí nádoby jsem použil konzervu, které jsem vyřízl dno a vyvrtal díry pro uchycení držadel klikové hřídele. Zbytek nerovností jsem protlačil směrem ven. Na rozdíl od 3D modelu jsem se ale



Obr. 24: Chladicí nádoba

rozhodl, že zanechám její původní výšku a nebudu ji zkracovat.

V tuto chvíli jsem měl připravený válec i chladicí nádobu. Proto dalším krokem bylo spojení těchto dvou prvků vysokoteplotním silikonem, který vykonává funkci těsnění a do značné části i pevné spojení chladicí nádoby a válce motoru.



Obr. 25: Válec s chladicí komorou.

Jako další krok byla výroba držadel pro uchycení klikové hřídele ke konstrukci motoru. Použil jsem dvě dřevěné latě, do kterých jsem vyvrtal díry pro uchycení k chladicí nádobě a klikové hřídele. Na rozdíl od 3D modelu jsem jim ale na spodní straně ponechal přesah z důvodu větší budoucí stability u umísťování celého motoru nad plamen. Tyto latě jsem přidělal za pomoci šroubků, maticek a těsnících podložek ze stavebnice Merkur.



Obr. 26: Držadla připevněná k chladicí nádobě.

Dále jsem pokračoval výrobou „klikové hřídele“. Při ohýbání drátu jsem se snažil dodržet rozměry, které jsem navrhl v 3D modelu. Toto však dostupný a používaný materiál nedovoloval a klikové čepy jsem byl nucen udělat větší. Shodou okolností se mi ale následující den povedlo sehnat vlastnostmi mnohem lepší materiál. Díky tomuto novému materiálu se mi povedlo přiblížit mnohem více k původně navrženým rozměrům.



Obr. 27: Kliková hřídel

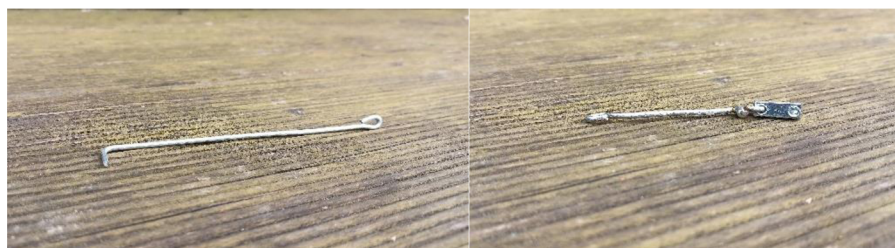
Klikovou hřídel jsem umístil do držadel. Díky tomu, že tento materiál byl i lehčí než jeho předchůdce, tak jsem se rozhodl, že jim nahradím i materiál použitý u přeháněcího pístu.

Následně jsem se pustil do výroby membrány, kterou použiji místo pracovního pístu. Použil jsem k tomu 2 víčka od PET lahví, kterým jsem odstranil boční stěny, a nafukovací balónek, kterému jsem odstříhl konec. Do středu balónku jsem nalepil jedno z upravených víček a po převrácení balónku naruby jsem proces opakoval. Následně jsem to ve středu celé provrtal. Membránu jsem umístil na válec a zajistil ji gumičkami.



Obr. 28: Pracovní membrána

Nyní jsem už mohl začít s výrobou „ojnic“. Délku drátu jsem si změřil položením drátu k membráně a klikové hřídeli a přidal jsem navíc pár centimetrů. U ojnic, které vedou k membráně, jsem na jedné straně drátu udělal očko a po umístění na klikovou hřídel v požadované vzdálenosti ohnul druhý konec drátu a trochu ho zkrátil. Ojnici vedoucí k pracovnímu pístu jsem udělal očka na obou stranách. V jednom z oček jsem umístil jednu elektronickou svorkovnici, která slouží jako koleno. Toto koleno má za úkol do značné míry rozbít sílu, která by hnala přeháněcí píst na stěny válce.



Obr. 29: Ojnice vedoucí k membráně a k přeháněcímu pístu

Následně jsem umístil ojnice na klikovou hřídel. Ojnice vedoucí k membráně jsem pomocí tavné pistole přilepil k plastovému víčku a přeháněcí píst jsem pomocí svorkovnice připevnil ke zbývající ojnici.

Jako poslední jsem vyráběl setrvačnick. Setrvačnick jsem udělal ze 4 CD a 2 dílů ze stavebnice Merkur, které se pomocí šroubků dají upevnit ke hřídeli. CD jsem k sobě přilepil tavné pistolí a k nim z obou stran pomocí Chemoprenu Merkurové součástky.

Poté jsem přidělal setrvačnick na klikovou hřídel a zajistil i druhou stranu klikové hřídele proti pohybu.



Obr. 30: Setrvačnick

Po přidělení a složení všech komponent jsem se rozhodl pro uskutečnění prvního testu. Motor jsem vložil do provrtané plechovky od ovocného kompotu, chladicí nádobu vyplnil vodou a vložil pod něj zapálené čajové svíčky. Tento test však dopadl neúspěšně. Motor se ani po mnoha pokusech dát mu počáteční impulz, bez kterého Stirlingův motor nenaběhne, nedokázal rozběhnout, a to i za použití plynového hořáku. Chvilí jsem přemýšlel, proč motor nefunguje a došel jsem k názoru, že musím zmenšit silné tření mezi drátem přeháněcího pístu a membránou. Po převrtání a opětovném složení motoru, jsem přešel k druhému testu. Ani druhý test však nebyl úspěšný a stále bez jakéhokoliv náznaku toho, že jsem touto úpravou motoru jakkoliv pomohl. Nyní už vím, že hlavním problémem byl přeháněcí píst, který byl příliš úzký a těžký na to, aby motor mohl fungovat. Dalším důvodem mohla být tuhá membrána, kterou jsem také upravil.

Po dlouhém uvažování jsem se rozhodl, že přeháněcí píst udělám znovu. Nyní jsem se však rozhodl pro čtvrtou variantu a místo dosavadního drátu, jsem se rozhodl pro tenký kroucený měděný drát. Přeháněcí píst jsem po druhé udělal větší a zároveň i lehčí, než byl předtím. Kvůli snaze udělat přeháněcí píst ještě lehčí, jsem předělal i ojnici, která k němu vede a nahradil jsem ji trochu tlustším krouceným měděným drátem, který stále obsahoval po obou koncích 2 očka. Přeháněcí píst jsem k němu přivázal.

Při vyrábění nové verze membrány jsem balónek několikrát nafoukl, aby se trochu roztahal. Toto se také ukázalo jako užitečné, protože později jeho stlačování a tahání bylo mnohem jednodušší než u jeho předchůdce. Změnil jsem i upevnění balónku. Místo víček z PET lahvi jsem z obou stran nalepil tvrdý papír o větším průměru, než měla plastová víčka. Protože bylo tření mezi první částí ojnice přeháněcího pístu a membránou moc velké, jsem musel díru v membráně zvětšit za pomoci malého vrtáku. Kvůli tomu, že se tenčí měděný drátek u přeháněcího pístu při pohybu do dolní úvratí nepříjemně ohýbal

do strany, jsem na horní stranu membrány přilepil z plastové trubičky vodící tunel. Po tomto vylepšení, už se tenký měděný drát tolik neohýbal.



Obr. 31: Stirlingův motor s novou membránou a přeháněcím pístem s výškovým uchycením motoru

Po těchto úpravách jsem provedl třetí test. Při třetím testování jsem byl také neúspěšný, ale bylo zde cítit výrazné zlepšení. Motor udělal více otáček, než když jsem to zkoušel naprázdno. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl pro třetí test za použití plynového hořáku, který by zvýšil teplotní rozdíl na teplé a studené části motoru. Tento test už byl úspěšný a motor okamžitě hned po prvním počátečním impulzu rozběhl.

Dalšího výrazného zlepšení bych také mohl dosáhnout předěláním držadel klikové hřídele, které se mi kvůli mnoha úpravám zkřivila a „vychodila“. Z tohoto důvodu se zkřivila i „kliková hřídel“. Kvůli velikosti dostupného nejmenšího vrtáku při vrtání membrány došlo ke špatnému utěsnění pracovního plynu. Tím vznikly další výkonové ztráty, které vedou k potřebě většího teplotního rozdílu mezi teplou a studenou částí motoru.



Obr. 32: Stirlingův motor varianty β

V průběhu procesu výroby jsem se od orientačního 3D návrhu odchýlil. Změny finálního vyrobeného motoru oproti 3D návrhu se týkaly jak použitých materiálů, tak i variantami provedení jednotlivých součástí motoru. Musel jsem změnit materiál válce, typ přeháněcího pístu i ojnice, které k němu vedou. Dalšími změnami byla úprava druhé membrány a spodní přesah u držadel klikové hřídele.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit čtenáře, budoucí nebo i stávající učitele technických předmětů a tím i jejich žáky se Stirlingovými motory. Práce čtenáři přibližuje vývoj, současné využívání v praxi i pravděpodobné budoucí aplikace Stirlingova motoru. Dále se v ní čtenář seznamuje s principem a termodynamickými ději, na kterých Stirlingův motor funguje, s nejvýraznějšími ztrátovými činiteli a základními konstrukčními variantami Stirlingových motorů.

Součástí přiblížení tématu byl také orientační 3D návrh Stirlingova motoru, podle kterého byla volně realizována i jeho výroba z běžně dostupných materiálů. Vyrobený model byl oproti návrhu upravený zejména použitým materiálem těla válce a konstrukční variantou přeháněcího pístu a jeho ojníc. I přesto, že je vyrobený model funkční, má stále několik nedostatků. Kvůli početným úpravám se držadla „klikové hřídele“ uvolnila a následkem toho se mimo jiné i zakřivila „kliková hřídel“. Dalším nedostatkem je špatné utěsnění mezi membránou a ojnící přeháněcího pístu. Odstranění těchto nedostatků by vedlo ke zvýšení účinnosti motoru a mělo by pozitivní vliv na jeho plynulý chod.

Díky spolehlivosti, dlouhodobému bezúdržbovému chodu, který ani po desítkách let neztrácí na své účinnosti, je budoucnost pro Stirlingovy motory světlá v oblasti cestování kosmických sond, satelitů i oběžných stanic. Dalším odvětvím, kde mohou mít Stirlingovy motory budoucnost, je díky dlouhodobé emisní politice Evropské unie, kombinovaná výroba elektrické energie a tepla pro maloodběratele potažmo domácnosti.

Věřím, že vývoj Stirlingových motorů ještě není ani zdaleka u konce a jejich největší příležitost ještě přijde. Nejen z těchto důvodů si myslím, že by se mělo podvědomí o Stirlingových motorech rozšířit a toto téma by se mělo na středních průmyslových školách se strojírenskými obory vyučovat více.

Seznam použité literatury

1. ORGAN, Allan. *The Air Engine: Stirling Cycle Power for a Sustainable Future*. New York : CRC press, 2007. ISBN 978-0791801710.
2. VINNETH, C S. *Striling engienes: A beginners guide*. Thiruvananthapuram : autor neznámý, 2012.
3. MACHÁČEK, Jan. *STIRLINGŮV TERMODYNAMICKÝ CYKLUS*. Brno : Vysoké učení technické, 2009.
4. Hot Air Engines. [Online] 2018. [Citace: 17. 2 2023.] Dostupné z: hotairengines.org.
5. Stirlingův motor. *CzWiki*. [Online] 2020. [Citace: 17. 2 2023.] Dostupné z: https://czwiki.cz/Lexikon/Stirling%C5%AFv_motor.
6. Stirling Engines. [Online] 1999. [Citace: 2023. 2 20.] Dostupné z: <https://www.beyonddiscovery.org/stirling-engines/>.
7. *Stirling and Hot air engine*. [Online] 2002. [Citace: 20. 2 2023.] Dostupné z: <https://www.stirlingengine.co.uk/default.asp>.
8. ZARBAT, Ni. *Výroba elektřiny z odpadního a nízkopotenciálního tepla pomocí Strilingova motoru*. Praha : ČVUT fakulta Strojní, 2017.
9. *The Plataforma Solar de Almería*. [Online] 6 2020. [Citace: 26. 3 2023.] Dostupné z: <http://www.psa.es/en>.
10. The Maricopa Solar Plant Project. *Power Technology*. [Online] 2 2011. [Citace: 26. 3 2023.] Dostupné z: <https://www.power-technology.com/projects/maricopasolarplantar/>.
11. *SES Stirling Energy Systems*. [Online] 2008. [Citace: 26. 3 2023.] Dostupné z: <http://www.stirlingenergy.com/projects/solar-one.html>.
12. *Combined Energy Technology*. [Online] 2018. [Citace: 31. 3 2023.] Dostupné z: <http://stirling-tech.com/>.
13. SAAB. [Online] 1995. [Citace: 24. 2 2023.] Dostupné z: <https://www.saab.com/products/oceanic>.
14. Naval Technology. [Online] 2023. [Citace: 31. 3 2023.] Dostupné z: <https://www.naval-technology.com/projects/ssoryuclasssubmarin/>.
15. Stirling Convertor Sets 14-Year Continuous Operation Milestone. *NASA*. [Online] 2022. [Citace: 31. 3 2023.] Dostupné z:

<https://www.nasa.gov/feature/glenn/2020/stirling-converto-sets-14-year-continuous-operation-milestone>.

16. BOUŘ, P., JANDÍK, L., ŠEBEK, M. *Stirlingův motor*. Praha : FJFI ČVUT, 2012.

17. GRUBER, J. *Mechanika VI - termomenanika*. Plzeň : SPŠS a SOŠ prof. Švejcara, 2014.

18. HAZDA, Jakub. *Analýza stirlingova oběhu*. Brno : Vysoké učení technické, 2015.

19. How to make Stirling engine. *Youtube*. [Online] 11. 3 2022. [Citace: 1. 4 2023.] Dostupné z:

https://www.youtube.com/watch?v=bisTGXoOxr0&t=721s&ab_channel=ZAFER_YILDIZ. Kanál uživatele: ZAFER YILDIZ.

20. Stirling engine made with Coca Cola. *Youtube*. [Online] 15. 6 2022. [Citace: 2. 4 2023.] Dostupné z:

https://www.youtube.com/watch?v=gYfrKMgy_Pg&ab_channel=BigWR_%E6%B0%B8%E6%81%92%E8%B7%B3%E5%8A%A8%E7%9A%84%E7%81%AB%E7%84%B0. Kanál uživatele: BigWR_永恒跳动的火焰.

21. How to make a simple Striling engine. *Youtube*. [Online] 2. 11 2022. [Citace: 2. 4 2023.] Dostupné z:

https://www.youtube.com/watch?v=_yWeYdgApUA&ab_channel=Mr.Yang. Kanál uživatele: Mr. Yang.

22. How To Make Engine (DIY Beta Stirling Engine). *Yuotube*. [Online] 4. 7 2021. [Citace: 2. 4 2023.] Dostupné z:

https://www.youtube.com/watch?v=RqhiMVcESHs&t=496s&ab_channel=Persian Tech. Kanál uživatele: Persian Tech.

23. How to make STIRLING Engine | Amazing Science Project | Homemade | DIY. *Youtube*. [Online] 11. 3 2017. [Citace: 2. 4 2023.] Dospupné z:

https://www.youtube.com/watch?v=8d53jgDf3Kg&ab_channel=CreativeSkillz. Kanál uživatele: Creative Skillz.

Seznam symbolů a veličin

Symbol	Veličina	Jednotky
c_v	měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
m	hmotnost	kg
p	tlak	Pa
Q	teplo	J
r	měrná plynová konstanta	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
R	molární plynová konstanta	$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
s	měrná entropie	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
T	teplota	K
T_E	teplota expanze	K
T_K	teplota komprese	K
V	objem	m^3
W_E	expanzní práce	J
W_i	indikovaná práce	J
W_K	kompresní práce	J
η	účinnost	1
η_t	termodynamická účinnost	1
v	poměr objemů	1
τ	poměr teplot	1

Seznam obrázků a ilustrací

Obr. 1: Teoretický cyklus Stirlingova motoru (16)	19
Obr. 2: Teoretický p-V a T-s diagram ideálního Stirlingova cyklu (3)	22
Obr. 3: Znázornění odlišností teoretického a skutečného Stirlingova cyklu (18)	22
Obr. 4: Vliv spojitého sinusového pohybu pístu v p-V diagramu (8).....	23
Obr. 5: α – modifikace Stirlingova motoru (5)	27
Obr. 6: β – modifikace Stirlingova motoru (2)	28
Obr. 7: γ – modifikace Stirlingova motoru (2)	28
Obr. 8: Stirlingův motor č. 1 (19)	32
Obr. 9: Stirlingův motor č. 2 (20)	33
Obr. 10: Stirlingův motor č.3 (21)	33
Obr. 11: Stirlingův motor č. 4 (22)	34
Obr. 12: Stirlingův motor č. 5 (23)	34
Obr. 13: 3D model přeháněcího pístu	36
Obr. 14: 3D model válce s chladicí nádobou	36
Obr. 15: 3D model přichycené membrány k válci	37
Obr. 16: 3D model klikové hřídele	37
Obr. 17: 3D model uchycení klikové hřídele.....	38
Obr. 18: 3D model ojníc a jejich přichycení	38
Obr. 19: 3D model setrvačnicku uchyceného k hřídeli	39
Obr. 20: 3D model po domácku vyrobeného Stirlingova motoru varianty β	39
Obr. 21: Provrtaná víčka od plechovek	40
Obr. 22: Přeháněcí píst.....	40
Obr. 23: Válec Stirlingova motoru z plechovky	41
Obr. 24: Chladicí nádoba	41
Obr. 25: Válec s chladicí komorou.	41
Obr. 26: Držadla připevněná k chladicí nádobě.	42
Obr. 27: Kliková hřídel	42
Obr. 28: Pracovní membrána	43
Obr. 29: Ojnice vedoucí k membráně a k přeháněcímu pístu.....	43
Obr. 30: Setrvačnick	44
Obr. 31: Stirlingův motor s novou membránou a přeháněcím pístem s výškovým uchycením motoru	45
Obr. 32: Stirlingův motor varianty β	45