

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2017

**ZARBAT
NI**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

Ni Zarbat

Anotační list

Jméno autora:	Zarbat Ni
Název BP:	Výroba elektřiny z odpadního a nízkopotenciálního tepla pomocí Stirlingova motoru
Název práce anglicky:	Stirling Engine for Waste and Low Temperature Heat Recovery
Akademický rok:	2016/2017
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky a procesní techniky/Energetika
Vedoucí BP:	Ing. Václav Novotný
Konzultant:	-
Bibliografické údaje:	Počet stran: 48 Počet obrázků: 43 Počet tabulek: 0 Počet příloh: 0
Klíčová slova	LTD Stirling, solar SOLO, Ross Yoke.
Keywords:	LTD Stirling, solar SOLO, Ross Yoke.
Anotace:	Táto bakalářská práce se zabývá vysvětlením pojmu Stirling a popisem Stirlingova cyklu. Dále v práci jsou popsány typy Stirlingova motorů. Součástí řešení je seznámení se světovými výrobci Stirlingových motorů pro využití odpadního a nízkopotenciálního tepla. V praktické části práce je proveden výpočet termodynamických modelů Stirlingova motorů s různým stupněm idealizace.
Abstract:	This bachelor thesis focuses on description of Stirling definition and Stirling cycle. It also describes Stirling engine types. The theoretical part studies the world suppliers of Stirling engines for using of useless and low potential heat. In scope of the practice part I provide a calculation of thermodynamic model of Stirling engine with different levels of idealisation.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Václavu Novotnému, Ph.D., za vedení mé bakalářské práce, za pomoc, cenné rady, připomínky a ochotu při řešení všech problémů, týkajících se zpracování této práce. Chtěl bych také poděkovat panu Ing. Jakubu Maščuchovi, Ph.D., za pomoc a rady při návrhu Stirlingova motoru.

OBSAH

1. Seznam symbolů	1
2. úvod	2
3. Co je Stirlingův motor?.....	3
4. Stirlingův cyklus	4
4.1. Ideální Stirlingův cyklus	4
4.1.1. Jednotlivé modifikace Stirlingova motoru	6
4.1.2. Konfigurace volného pístu	7
4.1.3. Stirlingův nízkoteplotní motor (Low Temperature Differential (LTD) Engines).....	9
4.2. Termická účinnost γ – modifikace ideálního Stirlingova cyklu.....	9
5. Reálný Stirlingův cyklus.....	12
5.1. Kontinuální pohyb.....	12
5.2. Účinnost regenerátoru	13
5.3. Mrtvý objem.....	13
5.4. Stavová změna neprobíhá izotermicky	13
5.5. Úniky plynu.....	14
5.6. Ztráty prouděním.....	14
5.7. Tepelné ztráty.....	14
5.8. Shuttle ztráta.....	14
5.9. Tepelná vodivost:	14
5.10. Tření	15
6. Výhody a nevýhody Stirlingova motoru.....	15
6.1. Výhody.....	15
6.2. Nevýhody	16
7. Projekty a zařízení ve fázi výzkumu a vývoje.	16

7.1. Biomass CHP plant Oberlech, Austria.....	17
7.2. DISTAL I, II. a EURODisH	18
7.3. SES Inc., Southern California Edison	19
7.4. Netradiční využití Stirlingova motoru.	19
8. komerčně dostupné technologie.....	21
8.1. Stirling Energy Systems, Inc. (SES)	21
8.2. Kogenerační jednotka SOLO Stirling 161	22
8.3. Chladicí jednotka SOLO Stirling	22
8.4. Solar SOLO Stirling 161	22
8.5. BG Group Microgen	24
8.6. Whisper Tech	24
8.6.1. AC WhisperGen micro CHP	24
8.7. Senftův motor.....	25
8.8. Nízkoteplotní Stirlingův motor se solárním pohonem.....	25
8.9. Thermoakustický Stirlingův motor	27
8.10. Nízkoteplotní Stirlingův motor s dvojitým pístem napájeným solárním simulátorem.....	30
8.10.1. Zkouška intenzity	31
8.10.2. Test zdroje tepla	32
8.10.3. Zkouška výkonu	32
9. Návrh mechanismu pro gamma typ Stirlingova motoru	34
9.1. Vypočtová část.....	37
9.1.1. A) Ideální oběh.	37
9.1.2. B) Předpoklad konstantních teplot plynu v teplé a studené komoře.	39
9.1.3. C) Předpoklad konstantních teplot stěn v teplé a studené komoře.....	43
10. Závěr	45

11. Seznam použité literatury	46
-------------------------------------	----

1. SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Definice	Jednotka
F_s	Schmidtův faktor	-
P	Tlak	Pa
V	Objem	m^3
V_c	Objem kompresního prostoru	m^3
V_d	Mrtvý objemový prostor	m^3
V_e	Objem expanzního prostoru	m^3
V_{max}	Maximální objem plynu	m^3
V_{min}	Minimální objem plynu	m^3
V_R	Objemový poměr	-
Δ	Poměr mrtvého prostoru	-
W_0, W_t	Práce	J
T_c	Teplota chladiče	K
T_h	Teplota ohřivače	K
R	Plynová konstanta	J / K.mol
m	Hmotnost plynu	kg
Q_{exp}, Q_{komp}	Teplo	J
η	Termická účinnost	1
Θ	Úhel pootočení	°
s	měrna entropie	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
H	Entalpie	$J \cdot kg^{-1}$
α	Součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
r	měrná plynová konstanta	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
y_e, y_c	Přemíšení pístů	m
A_E, A_C	Plochy pístu	m^2
R	Plynová konstanta	$J \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$
b_1, b_2	Rozměry ramen	m
T_e	Expanzní teplota	K

2. ÚVOD

Na přelomu století hledí lidstvo do budoucnosti s nadějí. Naděje je oprávněná: akademická myšlenka nestojí, naopak nabízí nový a nový vývoj. Zavádí do našich životů inovativní, účinnější a ekologicky šetrné stroje a progresivní technologie.

Toto se týká alternativního motoru a používání takzvaných "nových" alternativních paliv: větru, solárních, vodních a dalších zdrojů energie.

Motory jsou srdcem moderní civilizace. Díky nim člověk získává energii, světlo, teplo, informace. Nejběžnější spalovací motory nyní mají řadu významných nedostatků: jejich práce je doprovázena hlukem, vibracemi, vypouštěním škodlivých výfukových plynů a spotřebují velké množství paliva. Známostou třídou motorů, které životní prostředí poškozují minimálně, jsou tzv. Stirlingovy motory. Pracují v uzavřené smyčce, a to bez průběžných mikro-explozí v pracovních válcích, téměř bez emisí škodlivých plynů, a také potřebují mnohem méně pohonných hmot.

„Stirlingův motor byl vynalezen v Edinburghu 21. září v roce 1816, v hlavním městě Skotska, Robertem Stirlingem. K tomuto došlo asi 80 let před vynalezením diesellového motoru, takže se Stirlingův motor těšil značné oblibě před začátkem dvacátého století“.
[1]

„Stirlingův motor je zařízení převádějící tepelnou energii na mechanickou, stejně tak, jako diesellový motor, ale s výjimkou, že tato tepelná energie vstupuje do procesu z vnějšího prostředí, a není produkována uvnitř, jako je tomu například ve spalovacích motorech. Je to jeho nejvíce unikátní a pozoruhodný rys, kterým se odlišuje od všech ostatních strojů. Užitečná práce se v pracovním cyklu Stirlingova motoru provádí, stejně jako v jiných tepelných strojích, pomocí komprese pracovní kapaliny při nízké teplotě a expanzi po zahřívání při vyšší teplotě“.
[1]

V roce 1816 Stirling získal patent na stroj, který produkoval hnací sílu pomocí horkého vzduchu. V roce 1827 a 1840 získal další dva patenty na vylepšenou verzi svého automobilu. Po dlouhou dobu poté přestali konstruovat Stirlingův motor. V roce 1890 bylo vyrobeno jen několik vzorků vozidel malého výkonu. Od konce 19. století, v souvislosti s úspěchy ve vývoji spalovacích motorů a nedostatkem vhodných konstrukčních materiálů, docházelo do značné míry k pozastavení jeho dalšího rozvoje. Zájem o Stirlingův motor se zcela ztratil, a teprve od roku 1938 začalo jeho oživení. V 50. letech dvacátého století rychlý rozvoj technologie výroby různých materiálů zvýšil zájem o výzkum Stirlingova motoru, ale skutečný rozvoj se oživil až v průběhu takzvané „Energetické krize“.
[1]

3. CO JE STIRLINGŮV MOTOR?

Stirlingův motor je zařízení, které převádí tepelnou energii na mechanickou; je to tepelný motor s uzavřeným regenerativním cyklem, jehož dílo je charakterizováno:

- 1) Vysokou hodnotou průměrného tlaku plynu;
- 2) Bezpalivovým pracovním prostorem;
- 3) Absencí ventilového mechanismu;
- 4) Prostupem tepla stěnou válce nebo tepelným výměníkem;

Jedná se o pístový motor s externím přívodem tepla, které můžeme získat ze spalování libovolného paliva. Ideální Stirlingův termodynamický cyklus má tepelnou účinnost, která se rovná maximální možné teoretické účinnosti tepelného motoru, což je účinnost Carnotova cyklu.

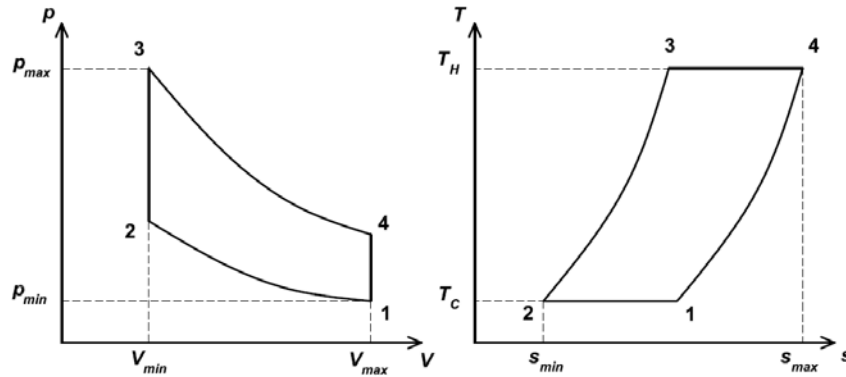
Stirlingův motor může být provozován s vysokou účinností pouze v případě, když bude mít efektivní regenerátor. Užitečná práce se provádí při proměnné kompresi a expanzi dané pracovní tekutiny při různých teplotách. Užitečná práce je téměř přímo úměrná střednímu tlaku cyklu. Při použití jednotky z externího zdroje mechanické energie motor bude pracovat jako chladič. Z hlediska termodynamiky je Stirlingův pracovní cyklus definován jako uzavřený regenerační cyklus. [1]

4. STIRLINGŮV CYKLUS

Podle zdroje [37], Stirlingův motor patří mezi teplovzdušné motory. Je to motor s externím spalováním, zdrojem tepla může být i geotermální nebo sluneční energie. Stirlingův motor pracuje na principu roztažnosti plynu. Když se plyn ohřívá, roztahuje se, když se ochlazuje, svůj objem zmenšuje.

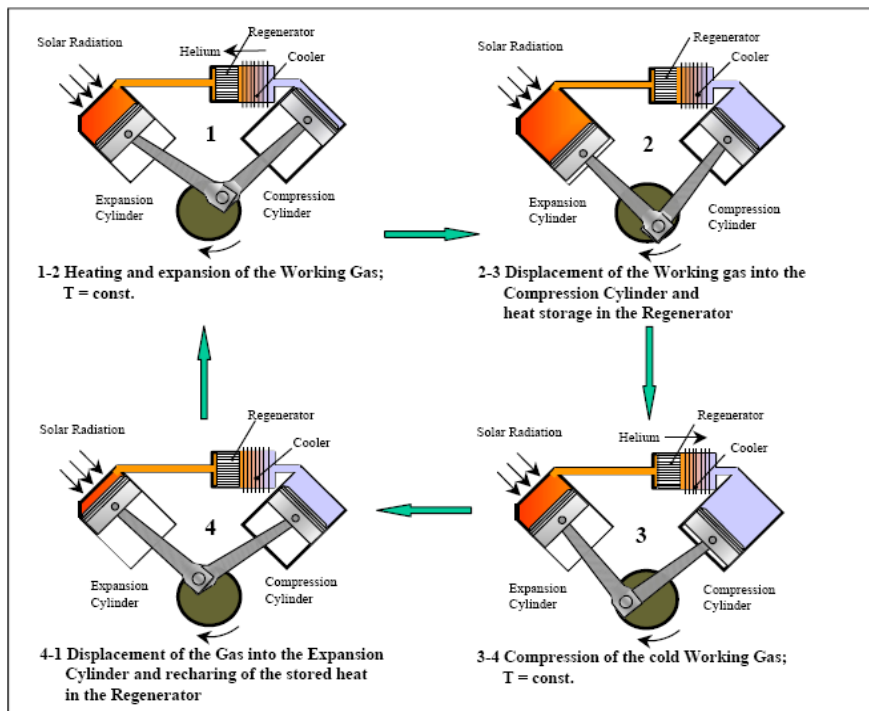
4.1. Ideální Stirlingův cyklus

Ideální Stirlingův cyklus se skládá ze dvou izoterm a dvou izochor. obr. 4.1 ukazuje ideální cyklus Stirlingova motoru v p-v a T-s diagramu.



Obr. 4.1 Ideální p-v a T-s diagram Stirlingova motoru [2]

Stirlingův motor pracuje na základním principu roztažnosti plynů. Na obr.4.2 je znázorněno nejjednodušší uspořádání Stirlingova motoru, tvořené utěsněným systémem s dvěma válci (expanzní (horký) a kompresní (studený)), naplněnými pracovním plynem - buď vzduchem, heliem nebo vodíkem.



Obr. 4.2 α -typ Styrilingova motoru [3]

Cyklus je možné dělit do čtyř fází, jak je znázorněno na obr. 4.2:

1 → 2 Izotermická komprese: Stlačený pracovní plyn je ohříván a expanduje, tlačí kompresní píst dolů. Část takto vzniklé energie se spotřebuje na přetlačení plynu do kompresního válce (2-3).

2 → 3 Izochorický přívod tepla z regenerátoru: Pracovní plyn prochází přes regenerátor, kde je uchována velká část jeho tepla, a chladič, chlazený převážně vodou, kde je dále ochlazován.

3 → 4 Izotermická expanze: Díky setrvačnosti hřídele, začne kompresní píst stlačovat pracovní plyn při nízké teplotě.

4 → 1 Izochorický odvod tepla do regenerátoru: V další fázi je pracovní plyn přetlačován do expanzního válce a znovu prochází přes regenerátor, kde odebírá teplo, které zde odevzdal ve fázi 2-3. [1]

Stejně jako u všech ideálních cyklů se předpokládá, že všechny procesy jsou vratné a dodržují zákony ideálních plynů. Konvenční definice tepelné účinnosti cyklu je vyjádřena následujícím vzorcem:

$$\eta_u = \frac{(Q_S - Q_R)}{Q_S} \quad (1)$$

Kde Q_S - získávaná teplotní energie, a Q_R - odvedená teplotní energie, tedy můžeme provést analýzu Stirlingova cyklu. Je pravděpodobné, že pro ideální Stirlingův cyklus bude tepelná energie, jenž se uvolní v průběhu 4-1, rovna tepelné energii, která je absorbována během průběhu 2-3. V důsledku toho k výměně tepla s okolím dochází pouze v průběhu procesu 1-2 a 3-4. Pro tyto vratné izotermické procesy dostáváme:

$$\begin{aligned} Q_R = Q_{12} &= m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln r_v \\ Q_S = Q_{34} &= m \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln r_v \end{aligned} \quad (2)$$

Kde $r_v = \frac{V_4}{V_3} = V_1/V_2$ – stupeň stlačení cyklu. V tomto případě:

$$\eta_u = 1 - \frac{m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln r_v}{m \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln r_v} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (3)$$

Teploty T_1 a T_3 – jsou v tomto pořadí minimální a maximální teplota cyklu, a proto je vztah shodný s účinností Carnotova cyklu, ve stejném rozsahu teplot. [1]

Termická účinnost ideálního Stirlingova cyklu je shodná jako účinnost Carnotova cyklu:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (4)$$

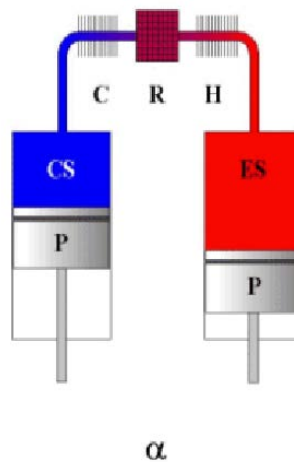
4.1.1. Jednotlivé modifikace Stirlingova motoru

Klasifikace podle druhého prvku zahrnuje klasifikaci navrhovanou dříve Kerckem a Walkerem. [4] Tento způsob klasifikace identifikuje metodu rozložení páru pístů vytlačovacím pístem směrem k pracovním dutinám proměnného objemu. Existují tři typy připojení válců:

- Alfa
- Beta
- Gamma

α – modifikace

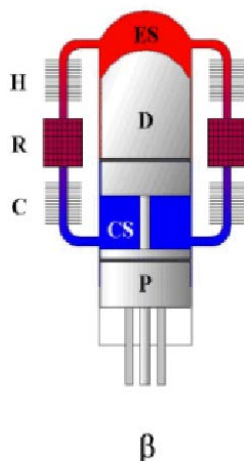
První typ se nazývá alfa Stirling po prvním písmenu Řecké abecedy, jako první z vymyšlených. Tento typ motoru se skládá ze dvou samostatných pístů, které jsou v různých válcích. V souladu s tím, je jeden horký a druhý studený. Poměr výkonu alfa Stirlingu k jeho objemu je poměrně velký, ale vzhledem k tomu, že teplota u teplého pístu je poměrně velká, může docházet k technickým problémům. [5]



Obr. 4.3 α – modifikace Stirlingova motoru [6]

β – modifikace

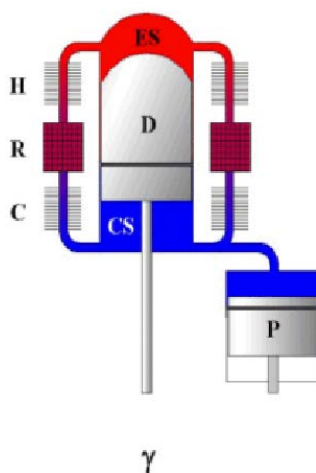
Ve snaze vyřešit tyto komplikace, byla tato modifikace nahrazena beta Stirlingem. Válec tohoto typu je pouze jeden, jeho teplota je regulována na jednom konci, kde je studená část a na konci druhém je část horká. Uvnitř, stejně tak, jako v klasickém schématu Stirlinga, je pracovní a vytlačovací píst, které se pohybují – čerpají horký vzduch do studené oblasti válce pomocí regenerátoru. [7]



Obr. 4.4 β – modifikace Stirlingova motoru [6]

γ – modifikace

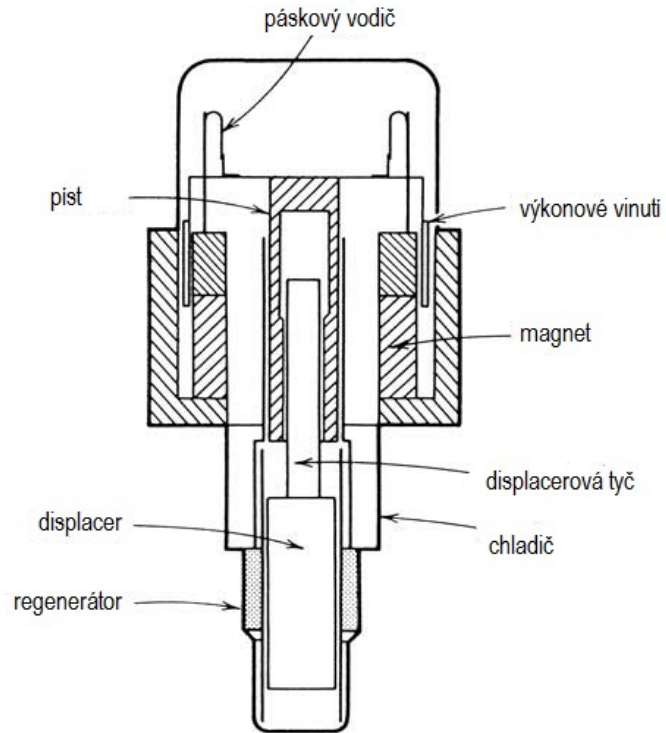
Gamma modifikace je podobná typu beta, ale pracovní píst není souosý s přetlačovačem. Toto uspořádání dosahuje menšího kompresního poměru, ale je jednodušší z mechanického pohledu, a proto je často používané pro víceválcové Stirlingovy stroje. Tato konfigurace má nižší kompresní poměr, ale je mechanicky jednodušší. [7]



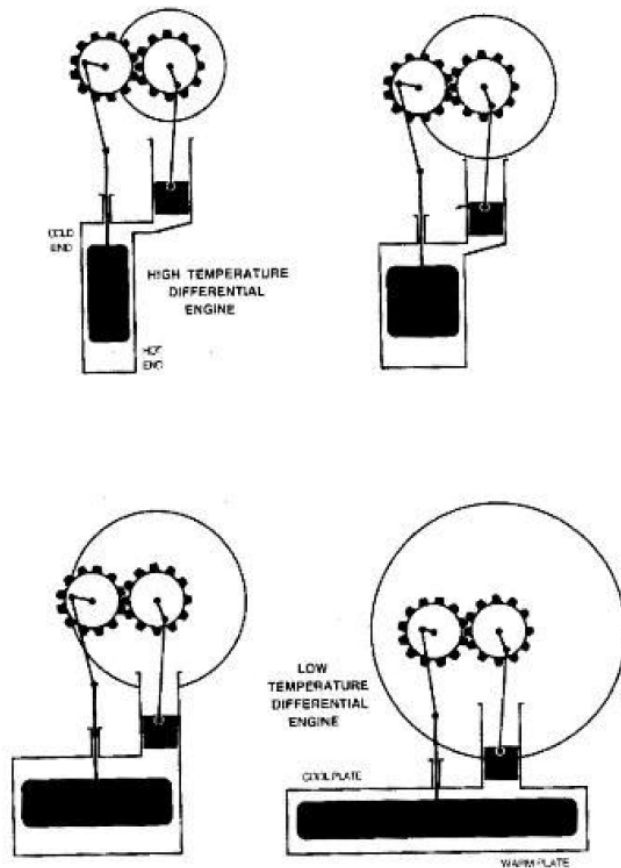
Obr. 4.5 γ – modifikace Stirlingova motoru [6]

4.1.2. Konfigurace volného pístu

Vynález volného pístového Stirlingova motoru je obecně přičítán W. T. Bealovi, který ho jako první konstruoval v roce 1960 jako řešení pro překonání problémů s mazacím klikovým hřídelem tradičního motoru. [8]



Obr. 4.6 modifikace s volným pístem [8]



Obr. 4.7 ilustrace ovlivnění geometrie teplotním rozdílem [8]

Energie se obvykle extrahuje z motoru pomocí lineárního alternátoru, ačkoli někdy se pohyb pístu používá přímo v čerpacích aplikacích. Výhody volného pístového motoru jsou méně pohyblivé díly, což znamená větší spolehlivost a jednoduchost, což také snižuje výrobní náklady. Součásti mohou být také kompaktní a lehké ve srovnání s tradičními vzory. Využití inertního plynu a plošné pružiny může uvést tření téměř na nulovou hodnotu v těchto vzorech. [8]

4.1.3. Stirlingův nízkoteplotní motor (Low Temperature Differential (LTD) Engines)

Neexistuje žádná striktní definice toho, co tvoří motor LTD, ale může být považován za stroj běžící na rozdílu teplot pod 100 °C. Cokoli, co běží na těchto hodnotách teplot, musí typicky použít zdroj tepla jiný než jakýkoliv druh spalování, které se obvykle realizuje při teplotě několika stovek stupňů celsií. [8]

Obrázek 4.7 poskytuje užitečný pohled na to, jak teplotní rozdíl ovlivňuje geometrii a proporce Stirlingova motoru. S tím rozdílem, že vysoká teplota je nutná pro udržení relativně velkého teplotního rozdílu mezi teplým a studeným koncem, aby se zabránilo nadměrné ztrátě tepla přes krátké drátové cesty, zatímco vytápění a chlazení povrchu ploch je méně kritické. LTD motory na druhé straně vyžadují velké plochy pro přenos tepla, aby bylo možné dosáhnout odpovídajícího vytápění a chlazení plynu při takto nízkých teplotách. K dispozici je také menší vedení tepla z horkého konce na studený konec, takže vzdálenost zde může být kratší. [8]

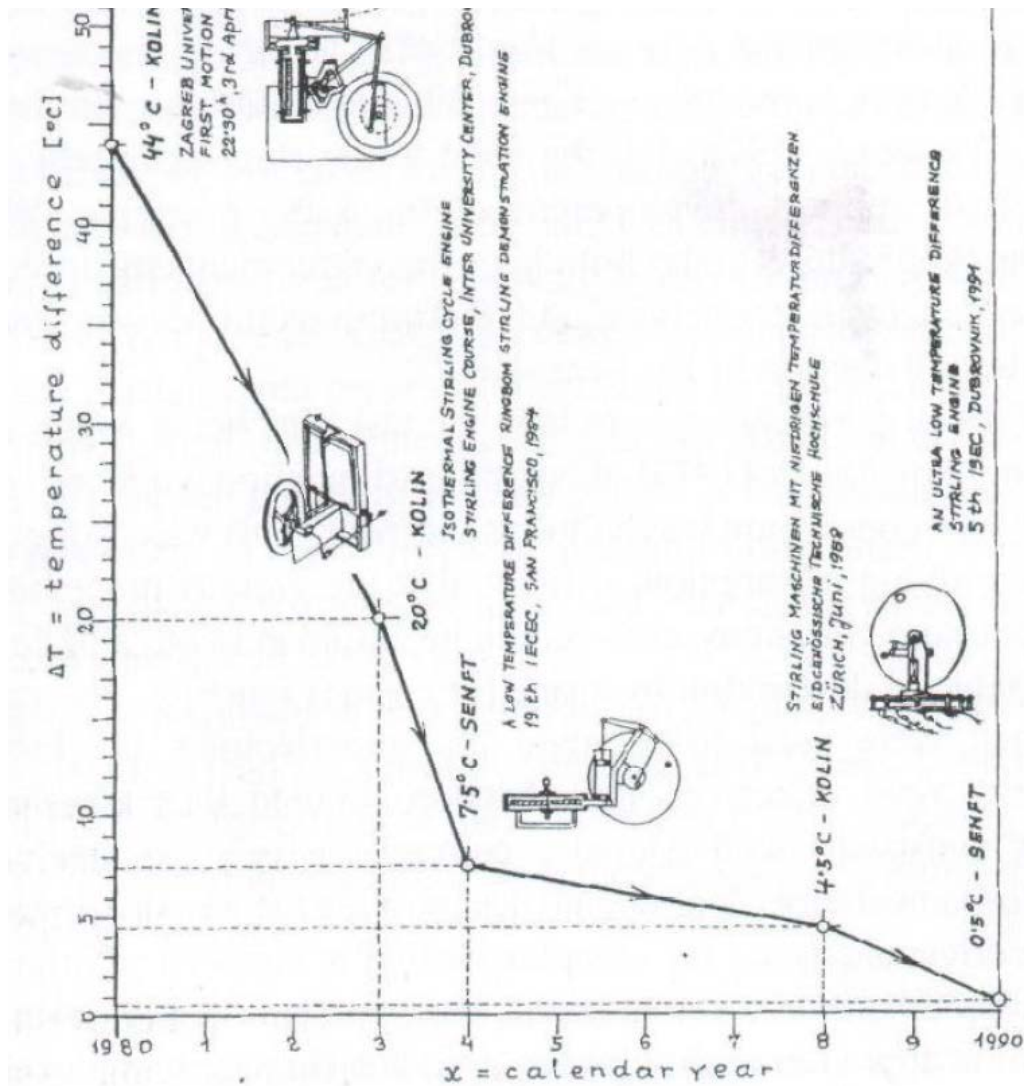
Obrázek 4.8 znázorňuje vývoj požadovaného rozdílu teplot, nutných pro provoz motoru LTD v průběhu deseti let vývoje pod vedením Ivo Kolína a Jamesa Senfta, dvou průkopníků tohoto typu motoru. Zde je zobrazen rozdíl 10 let výzkumu a vývoje, jež vedly k posunu od 44 ° C až do 0,5 ° C. [8]

4.2. Termická účinnost γ – modifikace ideálního Stirlingova cyklu

V této práci jsem se zaměřil hlavně na Stirlingův nízkoteplotní motor, přesněji γ – typ Stirlingova motoru. Jeho pracovní válec se nachází na studené straně. Ve 3. fázi ideálního Stirlingova cyklu (při izotermické expanzi) nemůže teplota plynu v každém místě dosáhnout teploty horké strany, protože je v pracovním válci stále ještě plyn s nízkou teplotou chladné strany. U typického ideálního Stirlingova cyklu zůstává teplota plynu v této fázi konstantní a odpovídá teplotě horkého konce.

Proto se bude termická účinnost η γ – modifikace ideálního Stirlingova cyklu a termická účinnost Carnotova cyklu odlišovat [7]. Získaná práce u popsaného kruhového děje se vypočítá dle obr. 4.1 jako:

$$W_o = \int_1^2 p \cdot dV + \int_3^4 p \cdot dV \quad (5)$$



Obr. 4.8 Graf pokroku v LTD Motorech od roku 1980 do roku 1990 [7]

Přivedené teplo definujeme:

$$Q_{in} = \int_1^2 p \cdot dV \quad (6)$$

Tlak plynu při 3. fázi se vypočte jako:

$$p \cdot \left(\frac{V_{min}}{T_H} + \frac{V - V_{min}}{T_C} \right) = m \cdot R \quad (7)$$

tedy přivedená energie ve formě tepla a energie z cyklu získaná lze vypočítat následovně:

$$\begin{aligned}
Q_{in} &= \int_{V_{min}}^{V_{max}} \frac{m \cdot R}{\frac{V_{min}}{T_H} + \frac{V - V_{min}}{T_C}} \cdot dV = \\
&= m \cdot R \cdot T_C \int_{V_{min}}^{V_{max}} \frac{dV}{V - V_{min}} \cdot \frac{T_H - T_C}{T_H} = \\
&= m \cdot R \cdot T_C \cdot \ln \frac{\varepsilon - \eta_t}{1 - \eta_t}
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
W_O &= Q_{in} + \int_{V_{max}}^{V_{min}} \frac{m \cdot R \cdot T_C}{V} \cdot dV = \\
&= m \cdot R \cdot T_C \cdot \ln \frac{\varepsilon - \eta_t}{1 - \eta_t} - m \cdot R \cdot T_C \cdot \ln \varepsilon
\end{aligned} \tag{9}$$

Kde $\varepsilon = V_{max}/V_{min}$.

Termická účinnost $\eta_{t,\gamma}$ – modifikace ideálního Stirlingova cyklu se vypočítá jako podíl získané (odvedené) a přivedené energie:

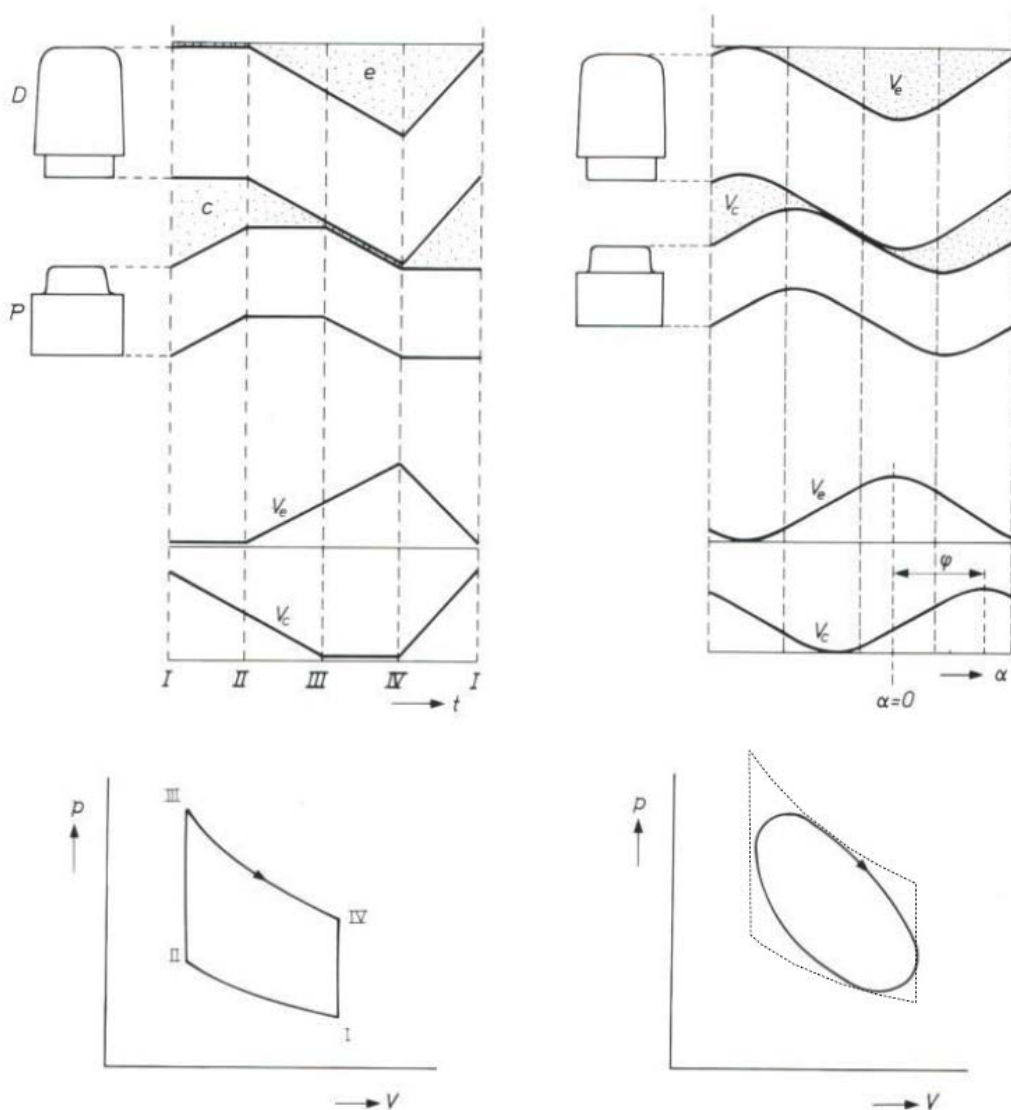
$$\eta_{t,\gamma} = \frac{W_O}{Q_{in}} = 1 - \frac{\ln \varepsilon}{\ln \cdot \frac{\varepsilon - \eta_t}{1 - \eta_t}} \tag{10}$$

5. REÁLNÝ STIRLINGŮV CYKLUS

Ideální Stirlingův cyklus nikdy ještě nebyl realizován. Uskutečněné cykly Stirlingových motorů se od ideálního cyklu odlišují. Tři hlavní neideální podmínky : nedokonalá regenerace, non-sinusový pohyb pístu a mrtvý objem prostoru budou analyzovány podrobněji dále.

5.1. Kontinuální pohyb

Sinusový kontinuální pohyb pístu je za pomoci konvenčního klikového převodu velmi snadno realizovatelný. Umožňuje také relativně klidný chod motoru při vysokých otáčkách. Z toho důvodu je v praxi takto také kontinuální pohyb pístu realizován. Na obr. 5.1 je zobrazen důsledek takového sinusového pohybu - vlevo diskontinuální pohyb, vpravo sinusový pohyb. [8]



Obr. 5.1 Pístový a displacerový pohyb, nespojitý (vlevo) a sinusové (vpravo) a výsledná p-V diagramy [8]

5.2. Účinnost regenerátoru

Samozřejmě je nemožné, aby regenerátor pracovní médium ohřál nebo ochladil aniž by došlo ke změně jeho vlastní teploty. Kromě toho vzniká také teplotní rozdíl mezi pracovním plynem a jednotlivými body v materiálu regenerátoru. To vše znamená, že u regenerátoru není možné dosáhnout stoprocentní účinnosti. V praxi je realizovatelná účinnost regenerátoru přibližně 95%. [8]

5.3. Mrtvý objem

Reálné Stirlingovy motory mají mrtvý objem, který se během jednoho cyklu nemění. Vzniká většinou díky přenašeči tepla (ohříváč, chladič) a regenerátoru. Kromě toho tu zůstává mezera v kompresním a expanzním prostoru motoru, která nemůže být pístem překryta. Mrtvý objem snižuje kompresní poměr ε a tím poměr tlaků P_{\max}/P_{\min} . Dopadem toho je samozřejmě také úbytek výkonu motoru. Mrtvý objem prostoru, V_s , je definován jako objem plynu, který se neúčastní cyklu. Což je objem ze všeho "volného prostoru" v regenerátoru, výměníků tepla a vůlí a propojovacích potrubí. Účinek mrtvého objemu prostoru snižuje práci v jednom cyklu v téměř lineárním poměru k procentu mrtvého objemu v cyklu. Za tímto účelem je vhodné stanovit mrtvý prostorový poměr δ :

$$\delta = \frac{V_d}{V_{sw}} \quad (11)$$

Kde V_d je celkový objem mrtvého prostoru v motoru a V_{sw} je celkový zdvihový objem motoru - to znamená celkový objem plynu zdvihnutého přemisťovacími písty. Poměr mrtvého prostoru může být použit k nalezení Schmidtova faktoru, F_s , který předpovídá snížení výkonu v porovnání s ideální situací bez mrtvého prostoru. Schmidtvův faktor je ekvivalentní poměru skutečné plochy mezi p-V diagramu na oblast ideálního diagramu, jinými slovy oblast oválu ve schématu p-V na obrázku 5.1 dělená plochou lichoběžníku. Schmidtvův faktor je dán následujícím empirickým vzorcem:

$$F_s = 0,74 - 0,68 \cdot \delta \quad (12)$$

Vynásobením Schmidtova faktoru s výpočty síly podle ideálního případu lze dobře odhadnout skutečnou energii vyrobenou. Faktor 0,74 pochází ze snížení plochy spojené se sinusovým pohybem. Jestliže se použije diskontinuální pohyb, tento faktor může být zvýšen v souladu podle potřeby stupně diskontinuity zavedené. [8]

5.4. Stavová změna neprobíhá izotermicky

Přestup tepla z pracovního plynu na chladicí médium nebo ze zdroje tepla na pracovní plyn probíhá ve výměnících tepla. Protože je pro přenos tepla k dispozici jen velmi krátká doba, dochází k expanzi, respektive kompresi, téměř adiabaticky, což výkon motoru rovněž snižuje.

5.5. Úniky plynu

Kvůli únikům plynu v motoru se snižuje poměr tlaků p_{\max} a p_{\min} a tím, bohužel, zároveň dochází k výraznému snížení výkonu motoru.

5.6. Ztráty prouděním

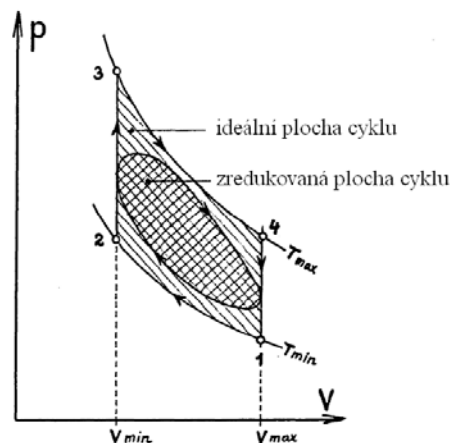
Když pracovní plyn proudí výměníkem tepla a regenerátorem, vznikají ztráty prouděním. Tím je tlak plynu v každém pracovním prostoru rozdílný. Poněvadž má například solární Stirlingův motor velmi velký přemístovací píst, vzniká u něj velký odpor.

5.7. Tepelné ztráty

V reálném motoru dochází k vedení tepla podél stěn válce a pístu, což vede k tepelným ztrátám. Tepelné ztráty jsou ztráty, které budou mít za následek další dodání tepla, nezbytného pro udržení stejného výstupu.

5.8. Shuttle ztráta

Ztráta Shuttle je způsobena vytlačovačem pohybujícím se v teplotním gradientu, tak, že se absorbuje teplo, kde je obsazen horký prostor a teplo se ztrácí do studeného prostoru na druhém konci jeho cyklu. Je obtížné vypočítat skutečnou ztrátu, ale logika a intuice poslouží k pochopení konceptu. Ztráty se sníží zvýšením vzdálenosti mezi vytlačovačem a válcem nebo delším přesazením (výsledkem je méně strmý teplotní gradient), či prostřednictvím redukce průměru válce, nebo s použitím méně tepelně vodivého plynu.



Obr. 5.2 Reálný Stirlingův cyklus [10]

5.9. Tepelná vodivost:

Představuje všechny cesty tepla v motoru mezi teplým a studeným prostorem. Teplo je většinou provedeno pomocí pevného, tepelně vodivého materiálu (tj. Kovu), ale také prostřednictvím konduktivity plynu. Tyto cesty se liší konstrukcí motorů. Typicky jsou větší v menších motorech, kde drátové cesty jsou kratší. Teplo je také vedeno od

horkého místa a to nejen do chladného prostoru, ale také do okolního prostoru (prostředí vně motoru). Opět platí, že logicky je vedení tepla přímo úměrné rozdílu teploty a vodivosti, a nepřímo úměrné délce dráhy vedení.

5.10. Tření

Třecí ztráty jsou způsobeny všemi kontaktními místy v motoru, a to: ložisky, těsněním a pístními kroužky. [8]

Důsledek všech výše jmenovaných ztrát vůči ideálnímu procesu je zobrazen na obr. 5.2

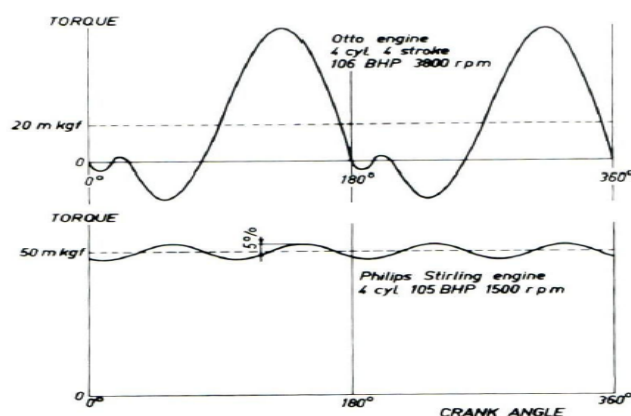
6. VÝHODY A NEVÝHODY STIRLINGOVA MOTORU

6.1. Výhody

Výhodou je především jeho schopnost být spuštěn na libovolném palivu nebo i jejich směsi. Toto je výhodné několika způsoby – znamená to, že motory používané v aplikacích jako je solární stanice, je stále možné použít při výrobě elektrické energie, i v době, kdy slunce nesvítí, za předpokladu, že se přivádí teplo z alternativních zdrojů. To znamená větší příjmy nově vzniklých závodů v daném čase a sníženou dobu návratnosti pro operátory. Možnost přepínání paliv, aniž by se měnil motor, také znamená, že provozovatelé Stirlingových motorů jsou méně náchylní k růstu cen pohonných hmot nebo jejich nedostatku.

Reverzibilní provoz - v případě, že hřídel Stirlingova motoru je poháněn motorem, poté Stirlingův motor může být použit jako tepelné čerpadlo, přesouvá teplo ze studené strany na horkou. [9]

Výhodou jsou také čistší emise, i když jde o spalování fosilních paliv pro výrobu tepla. Je to proto, že spalování je vně motoru a kontinuální, což znamená, že může probíhat za optimálních spalovacích podmínek, zatímco spalovací motor spaluje palivo přerušovaně, což je méně efektivní.



Obr. 6.1 Srovnání točivého momentu oproti úhlu kliky mezi čtyřválcovým benzínovým motorem a čtyřválcovým Stirlingovým motorem [8]

Tichý chod v důsledku jakéhokoliv spalování probíhá vně motoru, spíše než plyn expandující do atmosféry. [9]

Nízké vibrace díky typicky snadnému designu a nízké provozní rychlosti.

Nízké nároky na údržbu. Mají méně pohyblivých částí, než motory s vnitřním spalováním, a pokud jsou dobře navrženy, tak je zajištěna jejich životnost a není nutná servisní služba a generální opravy. Kromě toho mají obvykle pomalejší otáčení a méně vibrací než spalovací motor, který rovněž přispívá k menšímu opotřebení. Typicky, nejslabší články, podléhající opotřebení, jsou pístní kroužky, ložiska a jakékoliv jiné těsnění, které jsou charakteristické pro konkrétní design.

Hladký točivý moment - jak je znázorněno na obrázku 6.1, okamžitý točivý moment čtyřválcového Stirlingova motoru se mění jen mírně ve srovnání se čtyřválcovým spalovacím motorem. [9]

6.2. Nevýhody

Cena - Stirlingovy motory nejsou vyráběny ve velkém měřítku, a proto jsou poměrně drahé. Velká část nákladů na jakýkoli Stirlingův motor pochází z výměníků tepla, pro který je třeba použít drahé materiály, s cílem převést požadovanou teplotu bez koroze nebo deformace způsobené teplem a tlakem. [9]

Dlouhý čas rozběhu ze studeného stavu. Chvilu trvá, než se dostane ohříváč na provozní teplotu – motor nemůže podávat špičkový výkon, dokud nedosáhne požadované provozní teploty. [9]

Velikost a hmotnost - typicky pro daný výkon ve srovnání s ostatními typy motorů, Stirlingův motor je poměrně velký a těžký. To je často způsobeno tím, že motor je vnitřně pod tlakem, což vyžaduje robustní konstrukci. To také zvyšuje celkové náklady na motor. [9]

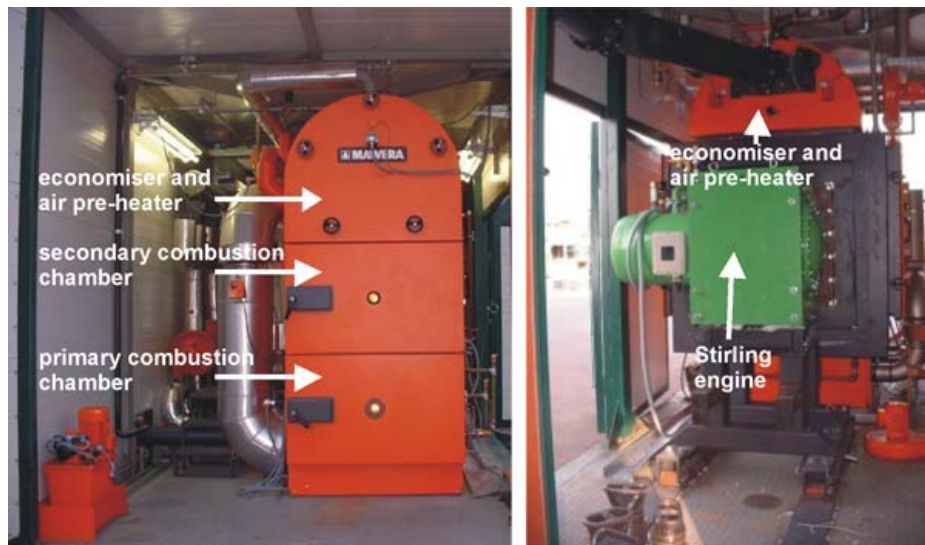
7. PROJEKTY A ZAŘIZENÍ VE FÁZI VÝZKUMU A VÝVOJE.

Stirlingův motor může být použit ve všech oblastech, které vyžadují přeměnu tepelné energie na mechanickou. Ve skutečnosti téměř nelze říci, v jaké oblasti ještě nebyl Stirlingův motor odzkoušen. Neexistuje oblast, ve které by byl Stirlingův motor unikátní pro jeden konkrétní účel, protože ve všech odvětvích existují alternativní zdroje mechanické energie pro podobné účely. Podle výkonu a vhodnosti alternativních zdrojů může být jejich energie přivedena do Stirlingova motoru, ale Stirlingův motor není jediným vhodným zdrojem mechanické energie pro danou aplikaci. Toto by bylo obtížné, například zavedením parní turbíny nebo diesellového motoru, jako hnací jednotky. Vývoj motorů Stirlinga, jakož i jiných zdrojů mechanické energie, byl stimulován v době technických a sociálně-ekonomických potřeb. Možnost využití Stirlingova motoru na autě není nijak zvláštní myšlenka. Zájem o něj vzrostl například když se společnost

začala obávat znečištění životního prostředí, během energetické krize, jejíž dopad je cítit i nyní. [9]

7.1. Biomass CHP plant Oberlech, Austria

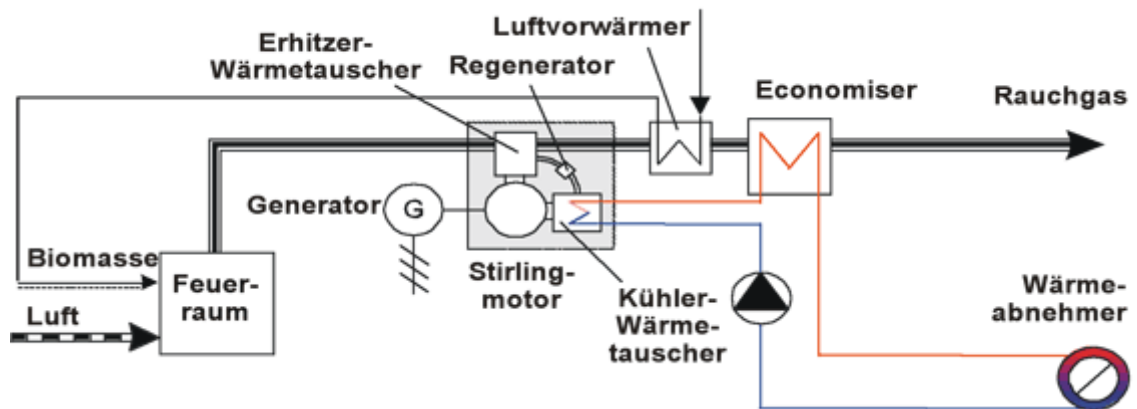
Projekt společností Austrian Bioenergy Centre , Technical University of Denmark, a BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Soustředili se na realizaci výroby pro spalování biomasy s využitím technologie Stirlingových motorů. Jmenovitý tepelný výkon zařízení 350 kW (kotel na biomasu s vysokotlakým ohřevem vody) a dále jmenovitý elektrický výkon (generátor poháněný čtyřválcovým Stirlingovým motorem) 35 kW. Tento projekt byl odstartován na přelomu roku 2002 a 2003. [11]



Obr. 7.1 Spalování biomas [11]

Stirlingův motor použitý v tomto projektu má čtyři válce vzájemně propojené a umístěné ve čtverci. Pracovním plynem je helium při maximálním středním tlaku 4,5 MPa. Každý válec motoru má svůj tepelný výměník, navržený jako panel obsahující čtvercovou spalovací komoru, která předává teplo přímo sáláním. Teplota horkého tepelného výměníku je 750°C. Motor je hermeticky uzavřen, spojen s asynchronním generátorem, který slouží také jako rozběhový motor, šesti pólům generátoru odpovídá přibližně 1000 ot/min. [11]

Principiální schéma kogenerační výroby s využitím Stirlingových motorů znázorňuje obrázek 7.2.



Obr. 7.2 Schéma kogenerační výroby [11]

7.2. DISTAL I, II. a EURODish

Projekt **DISTAL I**, zahájený v roce 1992, byl v evropském testovacím středisku pro solární energii Plataforma Solar de Almería instalovány celkem 3 parabolické koncentrátory o průměru 7,5 m zajišťující 40 kW tepelnou energii v jejich ohnisku, kde jsou umístěny jednotky SOLO V160 9 kW se Stirlingovým motorem. Koncentrátory byly vyrobeny pomocí technologií napjaté reflexní membrány, jejíž parabolický tvar zajišťuje malá vakuová pumpa. Odrazová schopnost těchto koncentrátorů je 94% a koncentrují sluneční záření do ohniskové vzdálenosti 4,5 m. Také je možné natáčení koncentrátoru podle polohy slunce. V roce 2000 byly 2 jednotky DISTAL I. demontovány a nahrazeny třetí generací jednotek EURODish. [12]



A DISTAL I dish in operation



DISTAL II Unit

Obr. 7.3 EURODish solární koncentrátory [12]

DISTAL II byl dalším krokem o systém s lepším vzhledem, tvarem a příznivější cenou za kW vyrobené energie. Tři nové membránové koncentrátory byly instalovány a spuštěny do provozu v letech 1996 a 1997. Jejich mírně větší průměr 8,5 m dodává Stirlingovu motoru 50 kW tepelné energie do ohniskové vzdálenosti 4,1m.

Dalším pokusem zlepšení této technologie po ekonomické stránce je Španělsko-Německý projekt **EURODish**. V rámci projektu byly navrženy a spuštěny dvě nové prototypy s následujícím cílem [13]:

- Snížení ceny komponent využitím standardních průmyslových prvků
- Vývoj nového systému koncentrátorů, tvořených kompozitními materiály
- Vylepšení Stirlingova motoru SOLO 161, speciálně částí v absorpční dutině
- Vývoj a optimalizace montážních procedur
- Dálkové ovládání a monitoring přes web [12]

7.3. SES Inc., Southern California Edison

Mezi společnostmi Southern California Edison a Stirling Energy Systems Inc. v roce 2005 byla uzavřena smlouva na výstavbu velké solární stanice s technologií Stirling Solar Dish v jižní části Kalifornii (viz obr. 7.4) s výrobní kapacitou 500 MW. Projekt by měl být dokončen během příštích dvaceti let. [14]

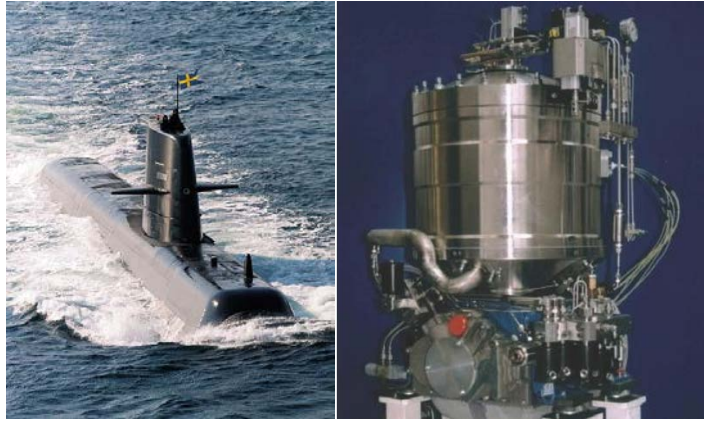


Obr. 7.4 Solární stanice [15]

V rámci tohoto projektu byla vybudována SES Inc. nejprve 1MW testovací stanice, která tvořená 40 výrobními jednotkami o výkonu 25 kW. Doposud SES Inc. provozuje a testuje celkem 6 prototypů Solar Dish na báze Stirlingova motoru v Sandia National Laboratories. [14]

7.4. Netradiční využití Stirlingova motoru.

Na obr. 7.5 je znázorněna nenukleární ponorka se Stirlingovým pohonem, kterou staví Švédské námořnictvo. Firma Kockums ve Švédsku, staví lodě a největší nenukleární ponorky světa. Stirlingův motor se také používá jako chladič stroj ke chlazení senzorů v termokamerách nebo ke zkapalňování vzduchu. [8]

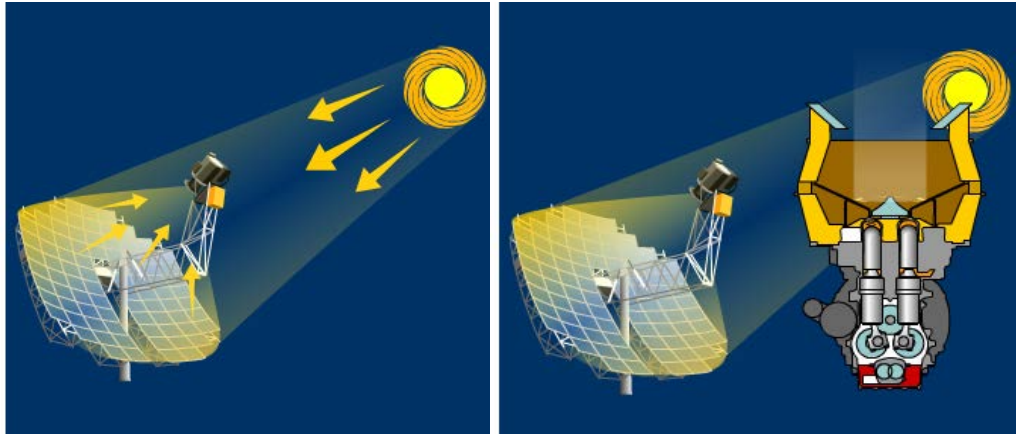


Obr. 7.5 Ponorka třídy Gotland firmy Kockums [16]

8. KOMERČNĚ DOSTUPNÉ TECHNOLOGIE.

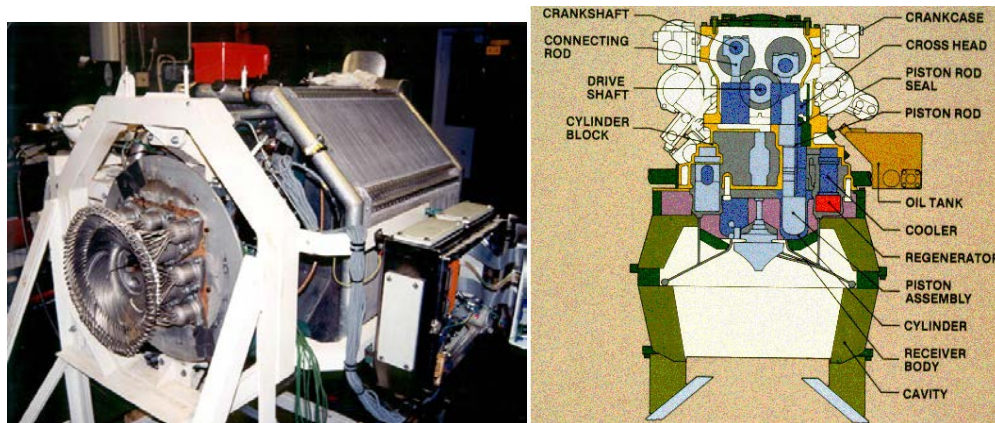
8.1. Stirling Energy Systems, Inc. (SES)

Společnost Stirling Energy Systems, Inc. vyvinula technologii pro výrobu elektrické energie na bázi Stirlingova motoru, využívající solární energii, tzv. SES Dish Stirling system, která se skládá ze dvou hlavních komponentů: solárního koncentrátoru a výrobní jednotky PCU (power conversion unit). Velký parabolický solární koncentrátor, tvořený ze 89 zrcadel má dva motory, které umožňují změnu azimutu a sklonu koncentrátoru, podle pohybu slunce během dne. [14]



Obr. 8.1 Využití sluneční energie [17]

Jednotka PCU – Power Conversion Unit, byla vyvinutá ve Švédsku společnostmi Volvo, United Stirling a Kockums. Tato jednotka pracuje se 4-válcovým Stirlingovým motorem. Pracovní plyn je vodík, maximální tlak je 20 MPa, poháněné písty jsou ve dvojici vzájemně posunuty o 90°. Může pohánět generátor rychlostí do 1800 ot/min. Výstupní napětí generátoru je 480 V a maximalní výkon je 25 kW. [14]



Obr. 8.2 Výrobní jednotka [18]

8.2. Kogenerační jednotka SOLO Stirling 161

Tato kogenerační jednotka může být upravena pro elektrický výkon 2 kW – 26 kW a odpovídající tepelný výkon 8 kW – 26 kW. Nejčastějším zdrojem energie této jednotky je zemní plyn, nebo odpadní teplo z průmyslu. [19]

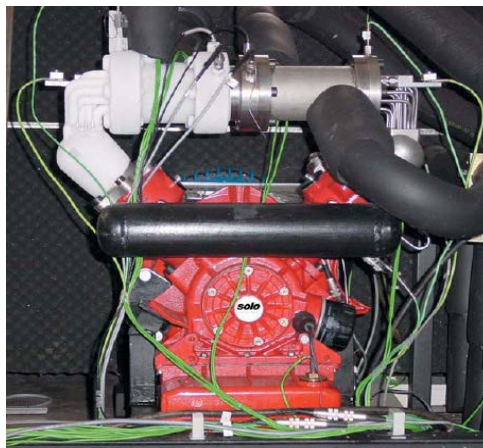


Obr. 8.3 SOLO Stirling 161 [20]

8.3. Chladicí jednotka SOLO Stirling

Ve spolupráci s institutem Univerzity Essen, byl Stirlingův motor společnosti SOLO předělán na chladicí zařízení, dosahující ochlazování k teplotám blízkým 200 °C. [14]

Maximální chladicí výkon jednotky SOLO Stirling: ~4 kW na -120°C / ~8 kW na -50°C.



Obr. 8.4 Chladicí zařízení SOLO Stirling [21]

8.4. Solar SOLO Stirling 161

Solar Solo je jednotka se Stirlingovým motorem (viz obr. 8.5), využívající pro ohřev pracovního plynu solární energii s těmito parametry:

Typ:	Jednoakční
Objem:	160 cm ³
Celkový výkon:	9,8 kW

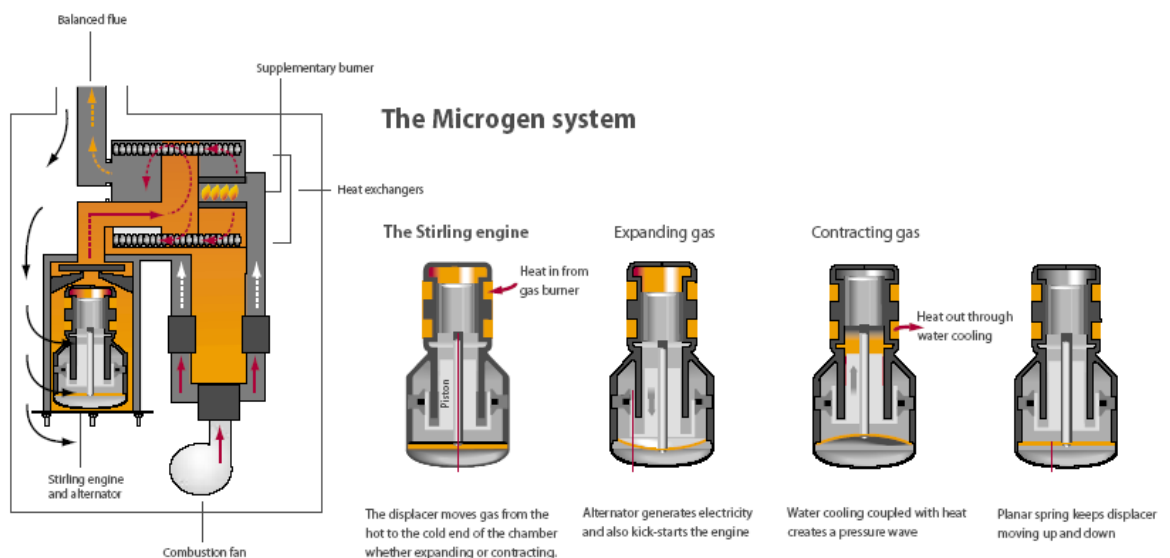
Elektrický výkon:	9,2 kW
Výstupní napětí:	400 V, 50 Hz, 3 fáze
Pracovní teplota plynu:	650 °C
Pracovní plyn:	Helium
Tlak plynu:	20 - 150 bar



Obr. 8.5 Jednotka se Stirlingovým motorem [22]

Koncentrátor pro tuto výrobní jednotku má následující parametry [20]:

Průměr:	8,5 m
Plocha:	56,7 m ²
Ohnisková vzdálenost:	4,5 m
Odráživost:	94 %



Obr. 8.6 Náhrada boileru [23]

8.5. BG Group Microgen

Společnost Microgen je částí skupiny BG Group, je dalším výrobcem micro CHP jednotek na bázi Stirlingova motoru. Jsou navrženy pro spalování zemního plynu. Elektrický výkon těchto jednotek je 1,1 kW a tepelný výkon v rozsahu 15 kW až 36 kW. U všech typů jednotek výrobce zaručuje regulaci tepelného výkonu do 5 kW. [24]

Na Obr.8.6 jsou ukázány jednotky které navržené pro použití v domácnostech jako náhrada za klasické boilery. Tyto jednotky mohou svým tepelným výkonem plně nahradit, a zároveň zajistit částečné pokrytí spotřeby elektrické energie. Celková účinnost zařízení může dosáhnout přes 90 %, a to vede ve výsledku k výraznému snížení emisí oxidů uhlíku v přepočtu na domácnost za celý rok. [24]

8.6. Whisper Tech

Novozélandská firma Whisper Tech, která byla založená v roce 1995, a zabývá se vývojem a realizací AC Micro Combined Heat and Power (micro CHP) a DC Marine/Rempote Power systém.

Whisper Tech vyvinula dva kogenerační systémy, pracující na principu Stirlingova motoru, AC WhisperGen a DC WhisperGen.

V současnosti jsou největším výrobcem malých kogeneračních jednotek pro domácí použití, o čemž svědčí smlouva mezi Whisper Tech a E.ON UK na dodávku 80 tisíc jednotek AC WhisperGen pro následujících 5 let. Společnost E.ON UK začala nabízet svým zákazníkům instalaci těchto kogeneračních jednotek, které zajistí vytápění, ohřev vody a výrobu elektrické energii pro domácí spotřebu, s předpokládanou úsporou peněz a snížením emisí v průměru o 1,5 tuny za rok, tedy o cca 20 %. [25]

8.6.1. AC WhisperGen micro CHP

Na obr.8.7 je znázorněná kogenerační jednotka, pracující na bázi malého čtyřválcového Stirlingova motoru a určená pro ohřev vody a výrobu elektrické energie pomocí inovačního systému Wobble Yoke, který pohání generátor. [25]



Obr. 8.7 Micro CHP [26]

Jednotka o rozměrech podobných domácí myčce nádobí, produkuje až 8 kW tepelného výkonu, a při max. 1,2 kW elektrického výkonu s výstupním napětím 230 V

AC. Dodávku potřebného tepla pro Stirlingův motor zajišťuje jednobodový hořák, navržený speciálně pro WhisperGen, který v různých modifikacích umožňuje použití různých paliv, jako jsou nafta, zemní plyn, LPG nebo petrolej. [25]

8.7. Senftův motor

Existuje ještě jeden velmi zajímavý model Stirlingova motoru. Tento model se nazývá Senftův motor a pracuje při teplotním rozdílu 0,5 K. Je určen pouze pro demonstrační účely a může produkovat výkon menší než 1 W. [27]



Obr. 8.8 Senftův motor [28]

8.8. Nízkoteplotní Stirlingův motor se solárním pohonem

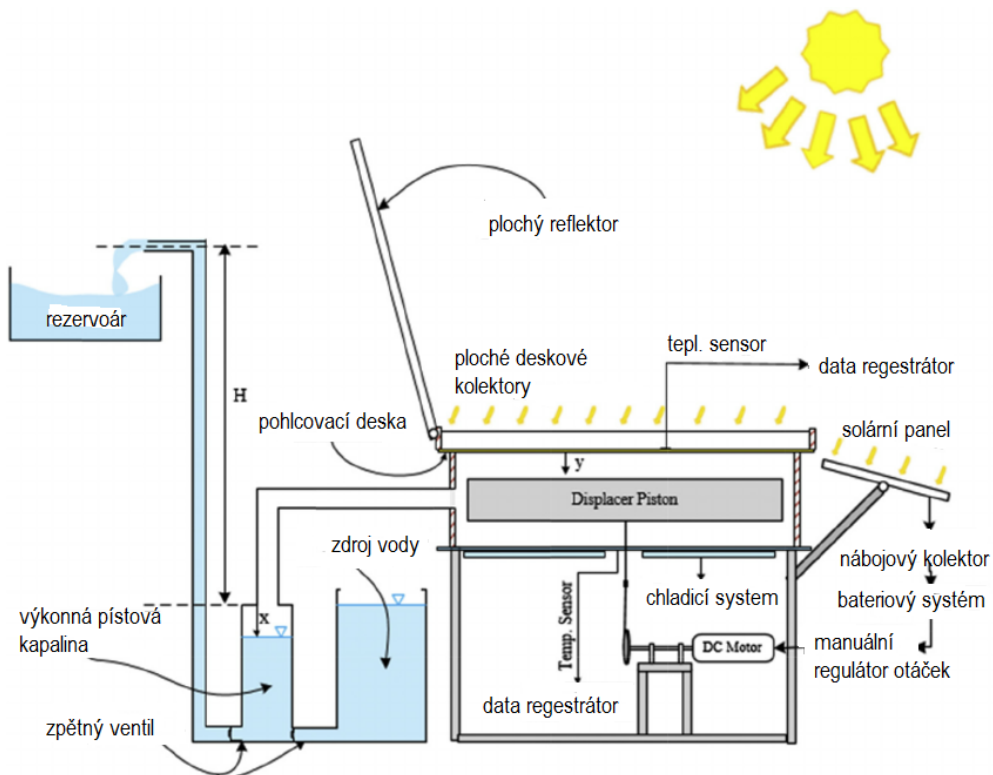
Motor Fluidyne je druh Stirlingova motorů, kde sloupec vody hraje roli pístů. Poprvé byl vynalezen v laboratoři Harwell Spojeného království pro ústav atomové energie v roce 1969, a první stroje jsou provozovány v roce 1970 [29]. V těchto převodnicích se tepelná energie nejprve převede na hydraulickou energii oscilujícího vodního sloupce, a poté by mohla být převedena na mechanickou nebo elektrickou sílu. Fangsuwannarak [30] studoval vliv aplikace regenerátoru v motoru Fluidyne. Výsledky ukázaly, že Fluidyne motor vybavený regenerátorem by mohl působit i na nižších teplotách.

Sluneční energie je jedním z nejčistších a nejhojnějších typů energie z obnovitelných zdrojů, která lze použít jako zdroj energie po celém světě. Někteří výzkumníci usilovali o vývoj tepelných čerpadel s využitím solární energie a strojů pracujících podle Stirlingova cyklu. Reader a Hooper navrhli sluncem poháněný Stirlingův motor pro čerpaní vody v roce 1908. Walker a Senft uvedli obecný popis solárního Fluidyne čerpadla. Orda a Mahkamov projevili nadšení LTD solárních vodních čerpadel pro použití v rozvojových zemích pomocí Stirling motoru a ploché deskové sluneční kolektory. [31]

Obr. 8.9 demonstruje navrhované solární aktivní LTD (low temperature differential) Stirlingovo čerpadlo. V podstatě se skládalo z hlavní komory, pevného vytlačovacího pístu, kapalné síly pístu, který poskytuje účinné těsnění mezi napájecím

pístem a odpovídajícím válcem, ploché desky slunečního kolektoru (jako zdroj tepla), systému chladící vody (jako tepelná jímka), čtyř kinematických mechanismů, spojených s regulovatelným stejnosměrným proudem (DC), převodového motoru a čerpací komory. [31]

V této práci byl vzduch o pokojové teplotě a atmosférickém tlaku uvažován jako pracovní tekutina v hlavní komoře. Nicméně, pod tlakem je hélium vhodnější než vzduch - má lepší výkon. V tomto provedení je pohyb pracovního pístu nezávislý na pohybu kapalinového pístu z energetického hlediska kinematiky. Pouze tlaková dynamika mohla spojit pohybové rovnice pístů. Kromě toho, že pohyb pracovního pístu byl řízen malým stejnosměrným motorem s převodovkou, jak je znázorněno na obr. 8.9. [31]



Obr. 8.9 Schématické znázornění navrhovaného aktivního Stirling konvertoru [31]

V tomto výzkumu byla uvažována plocha solárních panelů mnohem menší, než je plocha s plochou deskou solárního kolektoru. To může být dále diskutováno z ekonomického hlediska. Fotovoltaické solární panely jsou obvykle dražší než termické kolektory se stejnými rozměry. Na druhé straně, ploché tepelné kolektory mají dlouhou životnost a mohou být jednoduše nahrazeny, např. pokrývajícím sklem, což je levný způsob. [31] Výsledkem je, že kombinování malého fotovoltaického solárního panelu s tepelným kolektorem lze dosáhnout větších výhod podle ekonomického hlediska.

Obr. 8.10 (a-d) ilustruje principy fungování navrženého solárního konvertoru:

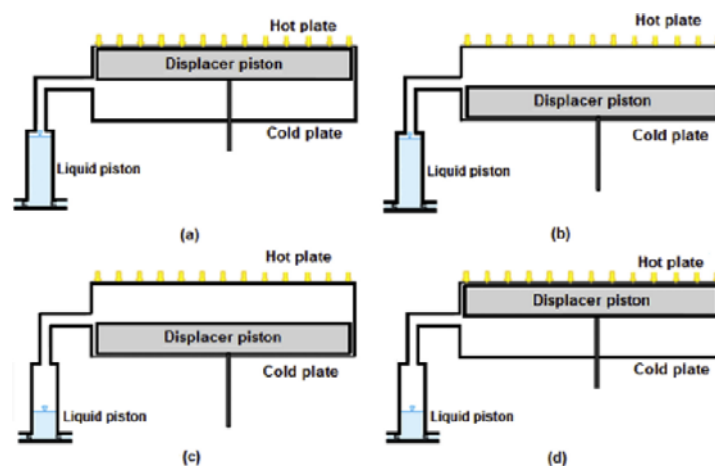
Stav (a): Pevný přemísťovací píst je v horní úvratí a plynné pracovní médium je v kompresním prostoru v blízkosti výměníku chladu (viz obr. 8.10 a). V důsledku toho

dochází k poklesu tlaku v hlavní komoře a napájení kapalinového pístu se začne pohybovat směrem nahoru v izotermickém stlačovacím procesu (proces d-a), což vede k sacímu stavu.

Stav (b): Přemísťovací píst je náhle přesunut do dolní úvrati, zatímco síla kapalinového pístu je zafixovaná. Objem plynu je konstantní na minimální hodnotě a plynná pracovní tekutina se převede do expanzního prostoru v blízkosti horké desky (solárního pohlcovače) v konstantním objemu (proces a-b). V důsledku toho je tlak plynu zvýšen na jeho maximální hodnotu.

Stav (c): V závislosti na nárůstu tlaku plynu, síla kapalinového pístu se začne pohybovat směrem dolů a v důsledku toho je objem plynu v izotermickém procesu (proces b-c) zvýšen. V tomto procesu je generována práce a voda se odvádí do zásobníku.

Stav (d): Přemísťovací píst je náhle přesunut do horní úvrati, zatímco síla kapalinového pístu je zafixovaná. Objem plynu je konstantní na maximální hodnotě, a to se přeneso do kompresního prostoru, v neustálém procesu svazku (proces c-d). V důsledku toho se tlak plynu se prudce sníží na minimální hodnotu.



Obr. 8.10 schématické znázornění navrhovaného aktivního Stirling konvertoru [31]

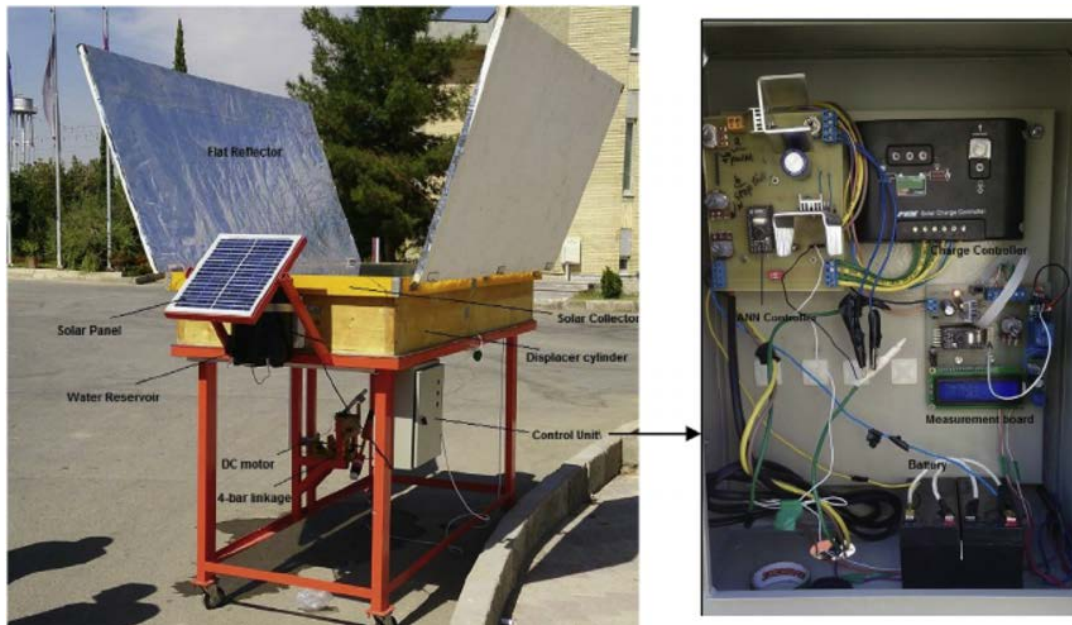
Experimentální výsledky jasně ukázaly proveditelnost čerpání vody převodníkem LTD. Kromě toho, experimentální výsledky byly v dobré shodě s částí výsledků simulace, jimiž bylo potvrzeno platnost režimu simulace. V neposlední řadě je důležité si uvědomit, že navrhovaný měnič může být použit s účinným regenerátorem a stlačenou plynnou pracovní tekutinou (například heliem), což vede k podstatně vyššímu výkonu a účinnosti. [31]

Na obr. 8.11 je ukázan experimentální model.

8.9. Thermoakustický Stirlingův motor

V roce 1979 Ceperley uznává, že fázování mezi tlakem a rychlostí pracovního plynu v regenerátoru systému Stirling, je stejný jako v putujících akustických vlnách, tj.

téměř na nulu.[32]. Navrhl použití zvukových vln, spíše než pohybujících pístů pro poskytnutí kontroly pohybu plynu a tlaku plynu pro Stirlingův cyklus, a představil nejranější koncepty thermoakustických Stirling motorů. Thermoakustický Stirlingův motor je také známý jako motor s thermoakustickými pohyblivými vlnami.



Obr. 8.11 Experimentální model. [31]

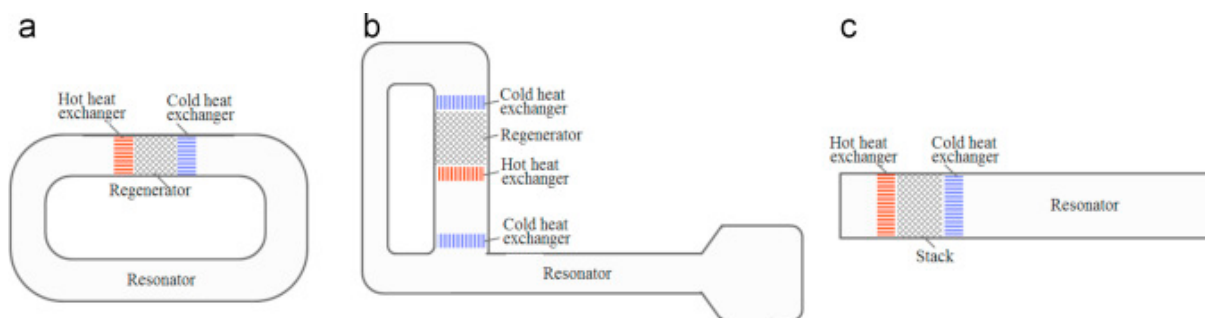
Prakticky thermoakustický Stirlingův motor byl poprvé realizován Yazakim [49], ale měl velmi nízkou účinnost. Backhaus a Swift [50] učinili průlom ve vývoji thermoakustického Stirlingova motoru v roce 1999. Motor byl schopen přeměnit tepelnou energii v akustický výkon s účinností ve výši 30 % až do 41 % Carnotové účinnosti. Až do současnosti dosáhl termo-akustický Stirlingův motor nejvyšší účinnosti až 49 % z Carnot účinnosti a akustického výkonu až do desítek kilowatt. [32]

Nejdříve byl thermoakustický Stirlingův motor vyvinut Yazakim et al. [51], jednalo se o smyčkový typ, ale měl nízkou efektivitu. Znárodněn je na obr. 4.9 (a). Je také nazýván jako motor čistě cestovácí thermoakustické vlny. Jeho součástí je smyčková trubice s thermoakustickým jádrem, umístěným uvnitř. Thermoakustické jádro obsahuje horký výměník tepla, regenerátor, a studený výměník tepla. Typ thermoakustická smyčka Stirlingova motoru měla velmi omezený výkon, hlavně kvůli velkým viskózním ztrátám, způsobeným vysokou rychlostí proudění v regenerátoru. [32]

Dalším typem thermoakustického Stirlingova motoru, který byl vynalezený Backhausem a Swiftem, je znázorněn na obr. 8.12 (b). Pohyblivá vlnová smyčka je umístěna v blízkosti uzlu rychlosti nepohyblivé vlny rezonátoru, což vede k účinnému snížení viskózních ztrát v regenerátoru a velkému zlepšení výkonu. Proto je také nazýván traveling-standing hybrid vlny thermoakustického motoru. Akustická energie proudí ze studené strany do horké strany regenerátoru a dostane zesílení podle přeměny energie

účinku Stirlingova cyklu. Část zesilovaného akustického výkonu přivádí zpět do regenerátoru smyčkou trubky, zatímco zbytek jde do rezonátoru. [32]

Kromě výše uvedených termoakustických Stirlingových motorů na základě pohyblivé vlny, existuje ještě termoakustický motor fázovací, který je založen na stojatých vlnách a jejich fázování v blízkosti 90° má mnohem jednodušší strukturu, což je znázorněno na obr. 8.12 (c).[32]



Obr. 8.12 Základní typy thermoakustických motorů.[32]

Hlavní rysy thermoakustických motorů jsou uváděny následovně:

Jsou bez mechanických pohyblivých součástí na okolních teplotách. Je zapotřebí pouze trubky a několik výměníků tepla pro výrobu motoru. Není zapotřebí žádná přesná výroba a montáž komponent.

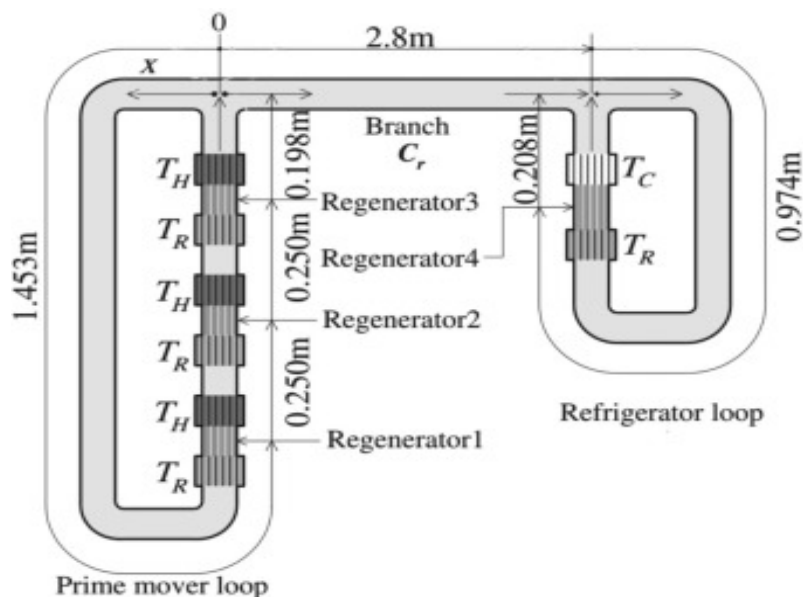
Problémy jako mazání a znečištění olejem, které trápí konvenční Stirlingův motor, neexistují v thermoakustických motorech.

Mají velmi vysokou spolehlivost a nízké náklady, vzhledem k absenci pohyblivých součástí.

Frekvenční kmitání je určeno hlavně geometrií motoru a akustickou rychlostí pracovního plynu.

Teplota náporu thermoakustického motoru je typicky kolem 100 až 300 °C. Některé thermoakustické motory mohou dokonce začít pracovat při teplotě až desítek stupňů Celsia. Proto se považují za slibnou technologii s nízkými náklady a vysokou spolehlivostí. Většina z časných prototypů byla navržena tak, aby pracovala při relativně vysokých teplotách v rozmezí 400-700 °C. V poslední době bylo úsilí zaměřeno na vývoj thermoakustických motorů pro zdroje tepla s nízkou teplotou. [32]

Hasegawa [33] provedl numerický výpočet pro termoakustické chladiče, poháněné třemi jádry thermoakustického Stirlingova motoru, jak je znázorněno na obr. 8.13. Cílem této práce bylo navrhnout uspořádání, které umožňuje nízké teploty s vysokou účinností. Jejich výsledky ukázaly, že tento systém začal pracovat s teplotním rozdílem 110,8 °C. Maximální účinnost celého systému může dosáhnout více než 21 % účinnosti Carnotova, kde rozdíl teplot byl 217,4 °C, což odpovídá úrovni, které se obvykle nacházejí v průmyslovém odpadním teple. [32]



Obr. 8.13 Thermoakustická lednička [32]

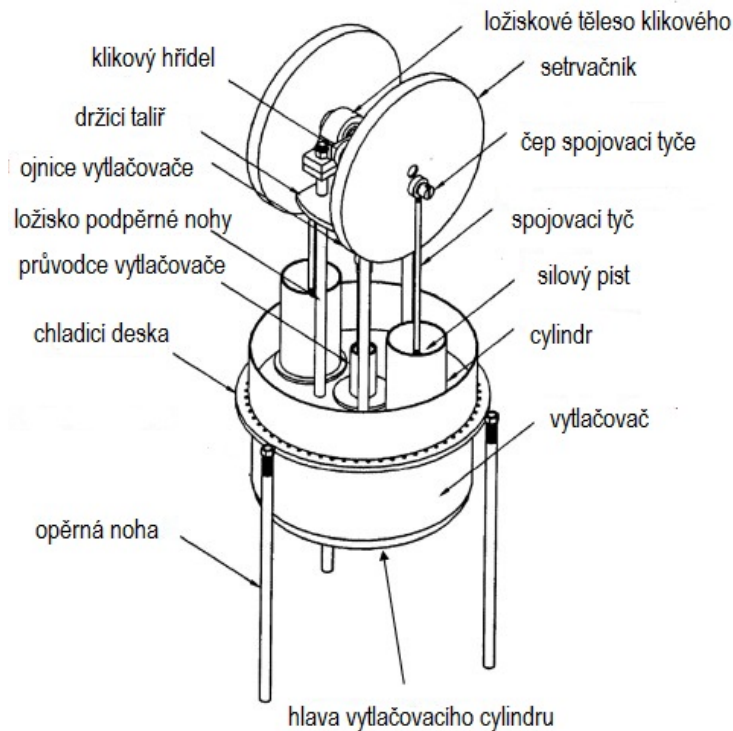
Ve srovnání s mechanickým Stirlingovým motorem jsou thermoakustické systémy mnohem jednodušší konstrukce, spolehlivější a levnější. V thermoakustických motorech pro nízkou a střední teplotu tepelných navrácení bude velmi slibný směr pro thermoakustické pole. Další úsilí je třeba provést s cílem zlepšit účinnost a výkon výstupy, a prozkoumat účinnější způsoby získávání generovaného akustického výkonu. [32]

8.10. Nízkoteplotní Stirlingův motor s dvojitým pístem napájeným solárním simulátorem

Ve srovnání s vysokým teplotním diferenciálem (HTD) Stirlingova motoru, LTD Stirling motor je lepší v jeho schopnosti účinně fungovat jak s vysokými, tak i s nízkými teplotami.

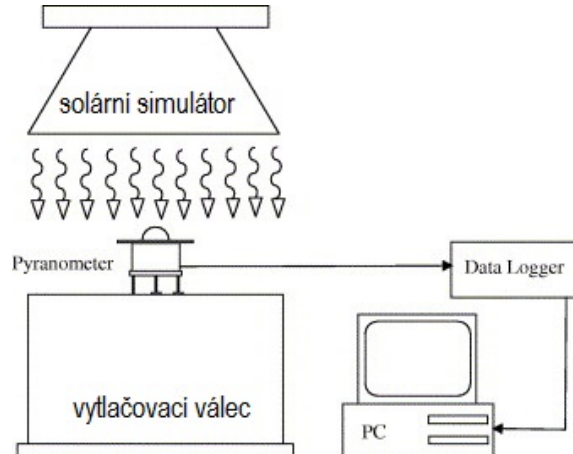
Schématický diagram zkušebního motoru je znázorněn na obr. 8.14. Je navržen jako jednočinný, s konfigurací gama a s dvojitým pístem. Dva silové válce jsou připojeny přímo k desce chladiče, aby se minimalizoval studený prostor a mrtvý objem. Vodní pánve chlazení je součástí chladiče desky. [34]

Tato konstrukce motoru je založena na principu multifunkční schopnosti dílů. V důsledku toho, že vyžaduje nižší výrobní náklady a má jednodušší konstrukci motoru. Protože LTD Stirlingův motor může pracovat při nízké teplotě, je možno použít jednoduché koncentrátory, jako je axicon nebo s kónickým reflektorem, jehož konstrukce je jednodušší než konstrukce u parabolického koncentrátoru. Proto jsou výrobní náklady této části také nižší. [34]



Obr. 8.14 Stirlingův motor s dvojitým pístem [34]

Schématické diagramy experimentálního zařízení jsou znázorněny na obr. 8.15.

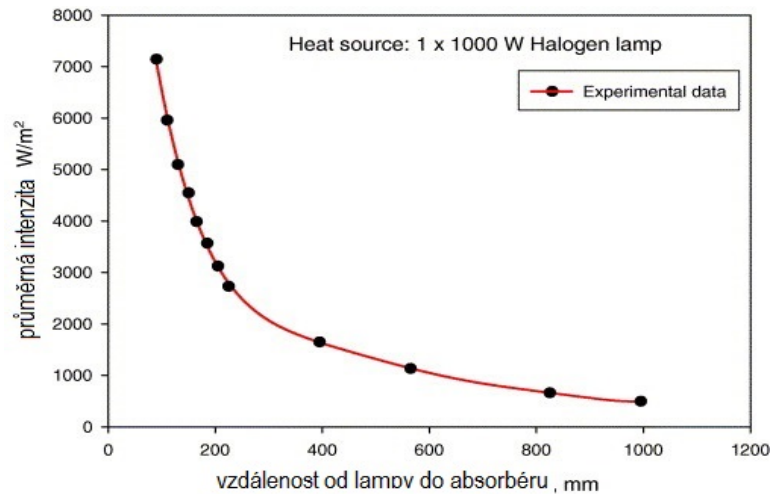


Obr. 8.15 Schématické znázornění testu simulovaného intenzitě slunečního světla. [34]

8.10.1. Zkouška intenzity

Experiment ke stanovení skutečné intenzity na absorbéru motoru v různých vzdálenostech od halogenové lampy do absorbéru byl proveden jako první. Pyranometr poskytuje údaj, který používá pro měření intenzity na hlavě vytláčovacího pístu, která působí jako absorpční deska. Datový logger a osobní počítač slouží ke sběru dat z pyranometru. Pyranometr se umístí na absorpční desky na sedmi pozicích. Jedna pozice je ve středu absorbéru. Dalších šest pozic je v polovině poloměru a 60° od sebe.

Pyranometr je připojen k datovému přijemci a počítači. Následně bude zapnuta halogenová lampa a ta sebere intenzitu v této poloze a pyranometr bude umístěn na jinou pozici. Testování se může opakovat pro jiné intenzity změnou vzdálenosti mezi lampou a tlumičem. Výsledky testů z těchto dvanácti vzdáleností jsou uvedeny na obr. 8.16. [34]



Obr. 8.16 Průměrná intenzita absorberu desky proti vzdálenosti od lampy do absorberu. [34]

8.10.2. Test zdroje tepla

Skutečný nebo užitečný tepelný příkon nelze stanovit přímo, zatímco motor běží, kvůli obtížím způsobeným instrumentací. Proto byl tento experiment proveden před zkouškou výkonnosti, k určení skutečného tepelného příkonu motoru. Postup testování je následující:

Přesazení válců je izolováno 25,4 mm silným izolantem a je kladen na stojan. Pět litrů vody se vloží do vytlačovacího válce. Tato voda se používá k absorbování tepla ze solárního simulátoru. Absorbované teplo se využívá jako tepelný příkon k přesazení válce. Halogenová žárovka je umístěna v požadované vzdálenosti, pod hlavou válců vytlačovače. Počáteční teplota vody je registrována a halogenová lampa je zapnuta. Před dosažením bodu varu jsou všechny teploty měřeny každou 1 min intervalu pomocí datového záznamníku a osobního počítače. [34]

8.10.3. Zkouška výkonu

Na obr. 8.17 je znázorněno jak vypadal experimentální model.

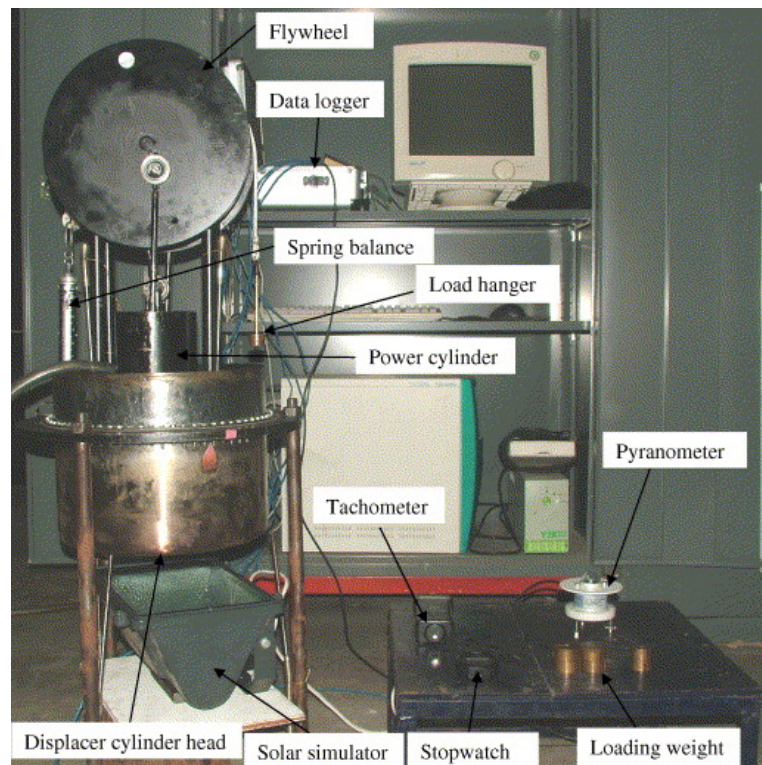
Před nastartováním motoru jsou všechny termoelektrické články spojeny s datovým záznamníkem a počítačem. Tento systém chladící vody je připojen k chlazení motoru pánve. Rychlost chlazení množství vody se upraví tak, aby se udržela hladina vody v pánvi za stálého chlazení. [34]

Halogenová lampa je umístěna pod hlavou vytlačovacího válce (nebo absorpční desky) v dané vzdálenosti. Některé mazací oleje jsou nasáty do elektrických pístů, válce

a vytlačovacího vodícího pouzdra. Spínač halogenové žárovky se zapne. Hlava vytlačovacího válce se zahřívá, dokud nedosáhne provozní teploty. Motor se potom spustí. Motor je vložen přidáním váhy na dynamometr. Poté je čtena rychlost motoru a všechny teploty z termočlánků jsou shromažďovány. Další nakládací hmotnost se přidává k dynamometru až po zastavení motoru. [34]

Zkoušky mohou být opakovány s dalším simulovanou intenzitou změnou vzdálenosti od lampy do absorberu.

V této studii se zkoušky motorů provádí pomocí čtyř vzdáleností od lampy do absorberu. Simulované průměrné intenzity na absorpční desky jsou 4549, 5097, 5961 a 7145 W / m². [34]



Obr. 8.17 Experimentální model. [34]

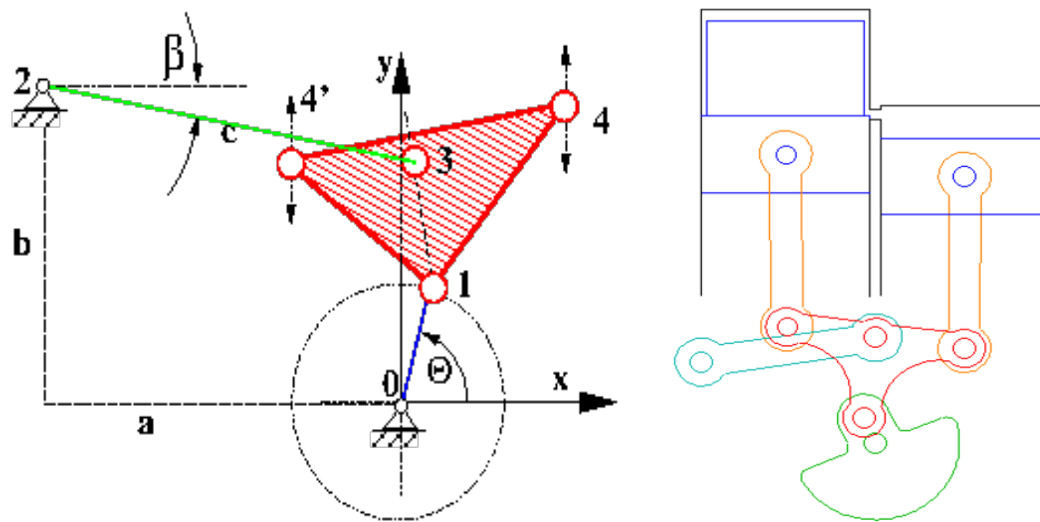
Výsledky této studie ukazují, že se výkon motoru zvyšuje, se zvyšující se simulovanou intenzitou slunečního záření. Točivý moment motoru, výkon na hřídeli, tepelná účinnost brzd, rychlost a teplota topné stěny se rovněž zvyšují, se zvyšující se simulovanou intenzitou záření. [34]

Při maximálním simulované sluneční intenzitě 7145 W / m² nebo tepelném příkonu 261,9 J/s, motor produkoval maximálním točivý moment 0,352 Nm při 23,8 min, maximální výkon hřídele 1,69 W při 52,1 otáčkách za minutu a maximální tepelnou účinností brzd 0,645 % při 52,1 otáčkách za minutu, přibližně, s teplotou topného tělesa o 436 K.[34]

I když tato čísla nejsou tak vysoká, za předpokladu, že solární pohon bude pracovat pomocí Stirlingova motoru, tato studie se pravděpodobně více vyplatí jako výchozí bod pro výzkum levných solárních motorů, vyrobených pro venkovské a vzdálené oblasti. Výkon motoru lze zlepšit zvýšením přesnosti dílů motoru a účinností zdroje tepla. Výkon motoru by mohl být dále zvýšen, pokud pracovní kapalina, např. helium nebo vodík, bude použita namísto vzduchu. [34]

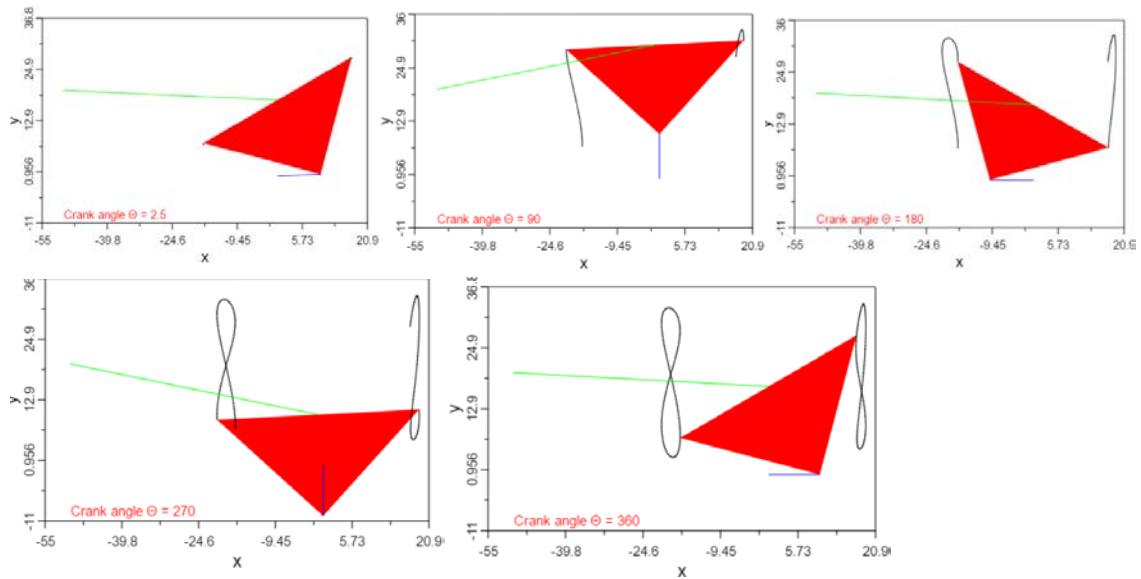
9. NÁVRH MECHANIZMU PRO GAMMA TYP STRILINGOVA MOTORU

Pro návrh gamma typu Stirlingova motou jsem využil Andy Rossuv mechanismus pohybu pístu [35]. Tento mechanismus je aplikovatelný na souběžně umístěné válce a je schématicky znázorněn na obr.9.1 [36]. Symetrický Rossův převodový mechanismus sestává z kliky (0-1), která je spojena s pevným trojúhelníkem (1-4'-3-4). Pohyb trojúhelníku, který vede k rotaci kliky kolem středu 0, je omezen kyvným ramenem (2-3). Jestliže jsou rozměry jednotlivých částí mechanismu vhodně zvoleny, pohybují se body 4 a 4' nahoru a dolů pouze s malým bočním vychýlením a mohou tak sloužit k připojení ojnic pístů. [36]



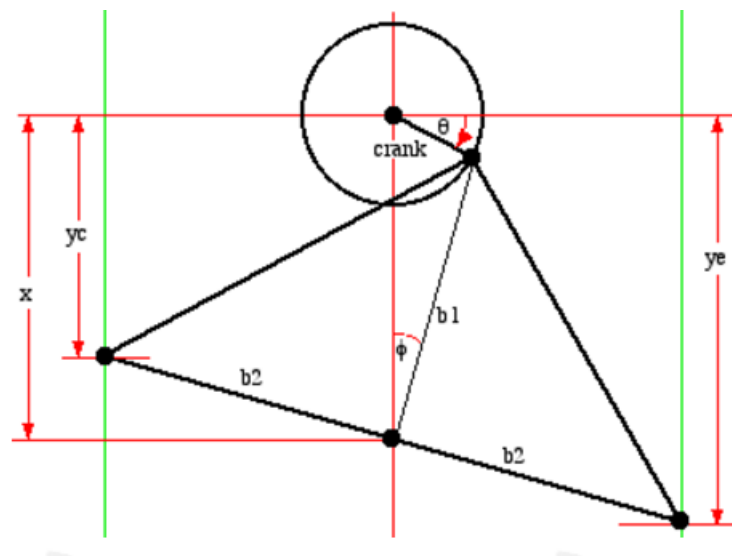
Obr.9.1 Kinematické schéma a příklad použití. [36]

Na obr.9.2 je znázorněn ideální pohyb mechanismu v různých stupních natočení. [36]



Obr.9.2 Ideální pohyb mechanismu [36]

Na výpočet objemu jsem přišel přes základní vzorce kinematického pohybu pístů pro Rossův model Stirlinga.[36] Na obr.9.3 jsou znázorněné potřebné rozměry pro výpočet tohoto mechanismu. [36]



Obr.9.3 Potřebné rozměry [36]

$$x = crank \sin \theta + b1 \cos \varphi \quad (13)$$

$$b1 \sin \varphi = crank \cos \theta \quad (14)$$

$$b1 \cos \varphi = \sqrt{b1^2 - crank^2 \cos^2 \theta} \quad (15)$$

$$\text{Let } b\theta = \sqrt{b1^2 - \text{crank}^2 \cos^2 \theta} \quad (16)$$

$$x = \text{crank} \sin \theta + b1\theta \quad (17)$$

$$ye = x + b2 \sin \varphi = x + \text{crank} \left(\frac{b2}{b1} \right) \cos \theta \quad (18)$$

$$ye(\theta) = \text{crank} \left(\sin \theta + \left(\frac{b2}{b1} \right) \cos \theta \right) + b\theta \quad (19)$$

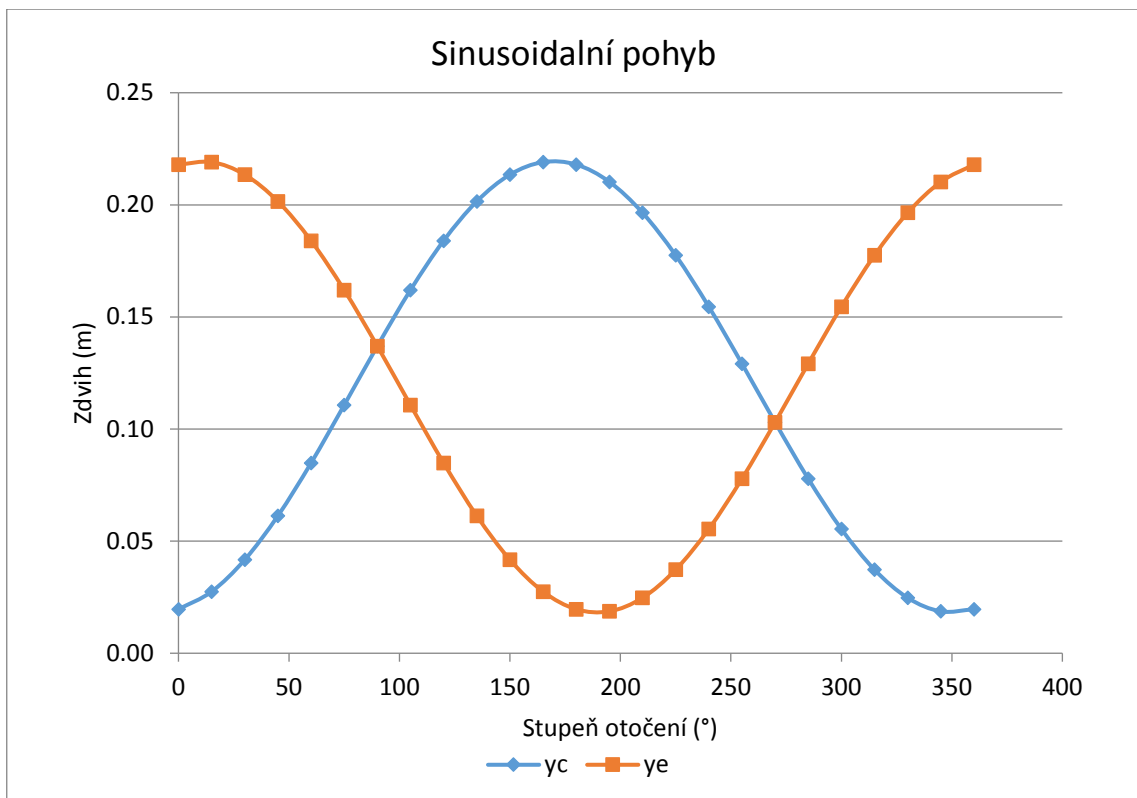
$$yc(\theta) = \text{crank} \left(\sin \theta - \left(\frac{b2}{b1} \right) \cos \theta \right) + b\theta \quad (20)$$

$$ymin = \sqrt{(\text{yoke} - \text{crank})^2 - b2^2} \quad (21)$$

$$Ve = Vcle + Ae(ye - ymin) \quad (22)$$

$$Vc = Vcle + Ae(yc - ymin) \quad (23)$$

Na obr.9.4 je ukázán sinusoidální pohyb pístu, který můžeme popsat pomoci rovnic (19) a (20). [36]



Obr.9.4 Sinusoidální pohyb pístu závislý na stupeňe otočení

Zvolené rozměry pro tuto konfigurace Stirlingova motou:

$$\text{Crank} = 0.017 \text{ m}$$

$$b1 = 0.12 \text{ m}$$

$$b2 = 0.7 \text{ m}$$

$$A_c = 0.065 \text{ m}^2$$

$$A_e = 0.09 \text{ m}^2$$

Pracovní plyn - vzduch

$$T_e = 420 \text{ K}$$

$$T_c = 288 \text{ K}$$

$$n = 70 \text{ ot/min}$$

9.1. Vypočtová část

V rámci vypočtové části byli provedené různé stupně idealizace Stirlingova oběhu se zdrojem tepla na zvolené teplotní hladině.

9.1.1. A) Ideální oběh.

Ideální Stirlingův cyklus pracuje s ideálním plynem, pro který platí stavové rovnice

$$p \cdot v = r \cdot T = \text{konst} \quad (24)$$

Každý ze zkoumaných procesů je charakterisický svými parametry a funkcemi stavu. Mužeme zavest vzorce poměrů teplot a objemů

$$v = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (25)$$

$$\tau = \frac{T_C}{T_E} \quad (26)$$

1) Izotermická komprese (1-2). Podle obr.4.1, v této fáze pohybuje pracovní píst. Při konstantních teplotách se stlačuje ochlazený a následně přehřátý plyn. Z toho rovnice přejde na tvar

$$p \cdot v = \text{konst} \quad (27)$$

Pro tlak na konci tohoto děje bude platit rovnice

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{V_2} = P_1 \cdot v \quad (28)$$

Odvedené teplo Q bude se rovnat práci a je rovno ploše křivek 1-2.

$$Q = \int_{V_{max}}^{V_{min}} P \cdot dv = W \quad (29)$$

Z integraci dostaneme výraz

$$P_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{V_{min}}{V_{max}}\right) = R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_{min}}{V_{max}}\right) \quad (30)$$

Změna entropie bude rovnat následujícímu vztahu

$$s_2 - s_1 = R \cdot \ln\left(\frac{V_{min}}{V_{max}}\right) \quad (31)$$

2) Izochorický ohřev (2-3). Teplota plynu vzroste z T_C na teplotu T_E a taky tlak y hodnoty p_2 na p_3 . Práce bude se rovnat nule. Bude vzrůstat vnitřní energie a entropie pracovní látky. Platí vztah

$$P_3 = \frac{P_2 \cdot T_3}{T_2} = \frac{P_2}{\tau} \quad (32)$$

$$V_3 = V_2 \quad (33)$$

Množství tepla přijaté pracovní látkou bude

$$Q = C_v \cdot (T_3 - T_2) \quad (34)$$

Vynaložená práce je rovna nule

$$W = 0 \quad (35)$$

Změna entropie

$$s_2 - s_1 = C_v \cdot \ln\left(\frac{V_{min}}{V_{max}}\right) \quad (36)$$

3) Izotermická expanze (3-4). Plyn začne proudit skrz regenerátor, kterému bude odevzdávat část tepla a bude expandovat. Teplota T_E je konstantní. Vnitřní energie látky se nemění a entropie roste. Dál můžeme napsat

$$P_4 = \frac{P_3 \cdot V_3}{V_4} = \frac{P_3}{v} \quad (37)$$

Přijaté teplo bude se rovnat přijaté práci W

$$W = P_3 V_3 \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) = R \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \quad (38)$$

Změna entropie bude

$$s_4 - s_3 = R \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \quad (39)$$

4) Izochorické chlazení (4-1). Plyn je přemístěn do chladné části válce, kde bude odebran zbytek tepla. Teplota T_E bude klesat na teplotu T_C a tlak z hodnoty P_4 na P_1 . Práce v tomto ději bude se rovnat nule, vnitřní energie a entropie pracovní látky se zmenšují. Můžeme tento děj vyjádřit následovně

$$P_1 = \frac{P_4 \cdot T_4}{T_1} = P_1 \cdot \tau \quad (40)$$

$$V_1 = V_4 \quad (41)$$

Množství předaného tepla

$$Q = C_v \cdot (T_1 - T_4) \quad (42)$$

Změna entropie

$$s_1 - s_4 = C_v \cdot \ln \tau \quad (43)$$

V regenerativních dějích se teplo předané od regenerátoru pracovní látce v ději 2-3 navrací z pracovní látky do regenerátoru v průběhu děje 4-1. Teplo přivedené při T_E

$$Q_E = R \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \quad (44)$$

Teplo přivedené při T_C

$$Q_C = R \cdot T_1 \cdot \frac{1}{\tau} \quad (45)$$

Můžeme tedy napsat vztah pro tepelnou účinnost η

$$\eta = \frac{Q_E \cdot Q_C}{Q_E} = 1 - \tau \quad (46)$$

Pak také účinnost Stirlingova termodynamického cyklu je stejná jako účinnost cyklu Carnotova. Pro výpočet byly zvolené teploty v rozmezí 15 – 150 °C jako typické teploty pro odpadní teplo, které se používá pro vytápění nebo k přeměně na jiný druh energie, např. na elektrickou.

$$\eta = \frac{T_E - T_C}{T_E} = \frac{420 - 288}{420} = 0,31 = 31\% \quad (47)$$

9.1.2. B) Předpoklad konstantních teplot plynu v teplé a studené komoře.

Teplota expanzního prostoru $T_E = 420 \text{ K}$ a kompresního $T_C = 288 \text{ K}$. Za pracovní látku jsem považoval vzduch jako ideální plyn, regenerace tepla je ideální a tepelných ztrát. Na

začátku cyklu jsem považoval tlak $P = 100 \text{ kPa}$, který v průběhu cyklu se měnil. Začal jsem výpočet tohoto modelu ze stavové rovnice

$$p \cdot v = r \cdot T \quad (48)$$

Objem kompresní a expanzní komory jsem spočítal přes kinematické vzorce podle navrženého mechanismu Rossa, kde $y_e(\theta)$ je pohyb expanzního pístu vzhledem k úhlu natočení a $y_c(\theta)$ je pohyb kompresního pístu k úhlu natočení.

$$y_e(\theta) = \text{crank} \left(\sin\theta + \left(\frac{b_2}{b_1} \right) \cos\theta \right) + b\theta \quad (49)$$

$$y_c(\theta) = \text{crank} \left(\sin\theta - \left(\frac{b_2}{b_1} \right) \cos\theta \right) + b\theta \quad (50)$$

$$V_E = y_e(\theta) \cdot A_E \quad (51)$$

$$V_C = (y_{e_{max}} - y_e(\theta)) \cdot A_E \quad (52)$$

Kde A_E je plocha expanzního pístu.

Vypočetl jsem hmotnost přes stavové rovnice kde tlak pro obě komory je stejný, protože jsou propojeny mezi sebou

$$P \cdot V_1 = r \cdot T_{exp} \cdot m_{exp} \quad (53)$$

$$P \cdot V_2 = r \cdot T_{komp} \cdot m_{komp} \quad (54)$$

Počáteční podmínka je při 0° tlak je roven 100 kPa . Celá jedna otáčka se dělí na 24 elementy po krocích 15° . Celková hmotnost m_{celk} bude se rovnat

$$m_{celk} = m_{exp} + m_{komp} = 0.0189 \text{ kg} \quad (55)$$

Rovnice entalpie

$$H_{exp} = c_p \cdot m_{exp} \cdot T_{exp} \quad (56)$$

$$H_{komp} = c_p \cdot m_{komp} \cdot T_{komp} \quad (57)$$

Pak rovnice pro technickou práci $W_{tech.exp}$ a pro $W_{tech.ekomp}$ za celý cyklus se rovná

$$W_{tech.exp} = \left(\frac{V_{1exp} + V_{2exp}}{2} \right) \cdot dP = 0.00406 \text{ J} \quad (58)$$

$$W_{tech.komp} = \left(\frac{V_{1komp} + V_{2komp}}{2} \right) \cdot dP = -0.00134 \text{ J} \quad (59)$$

Pak za celková $W_{tech.celk}$ práce se rovna

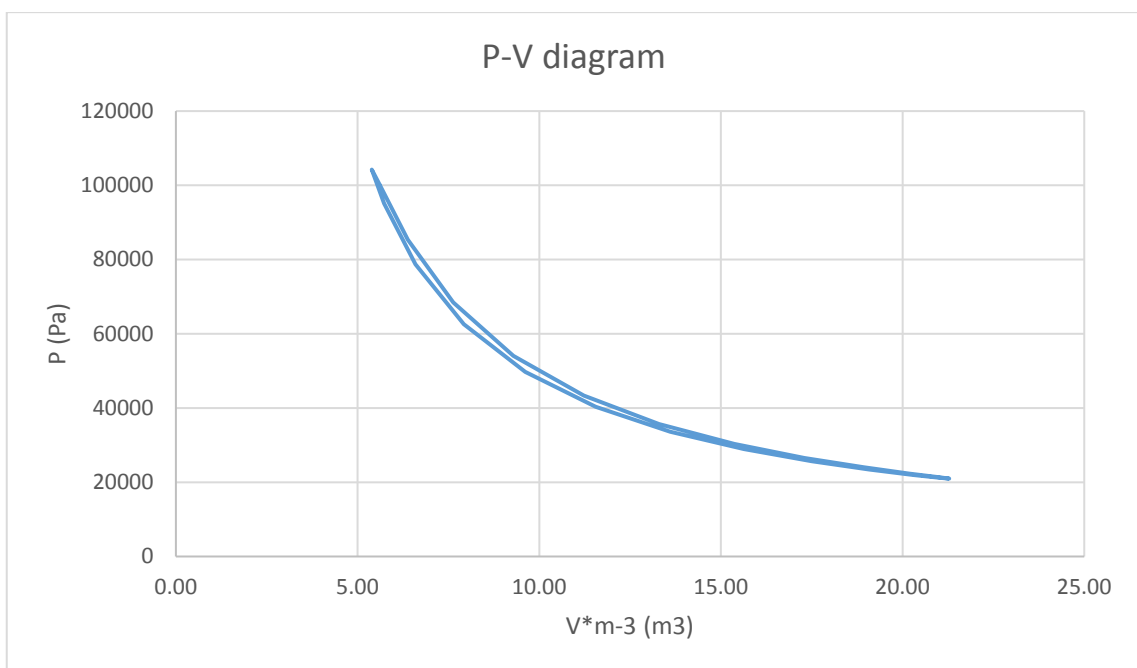
$$W_{tech.celk} = W_{tech.exp} + W_{tech.komp} = 0.00271 \text{ J} \quad (60)$$

Dále teplo Q_{exp} předané a teplo Q_{komp} odebrané za celý cyklus bude

$$Q_{exp} = dH_{exp} + W_{tech.exp} = 0.00406 \text{ J} \quad (61)$$

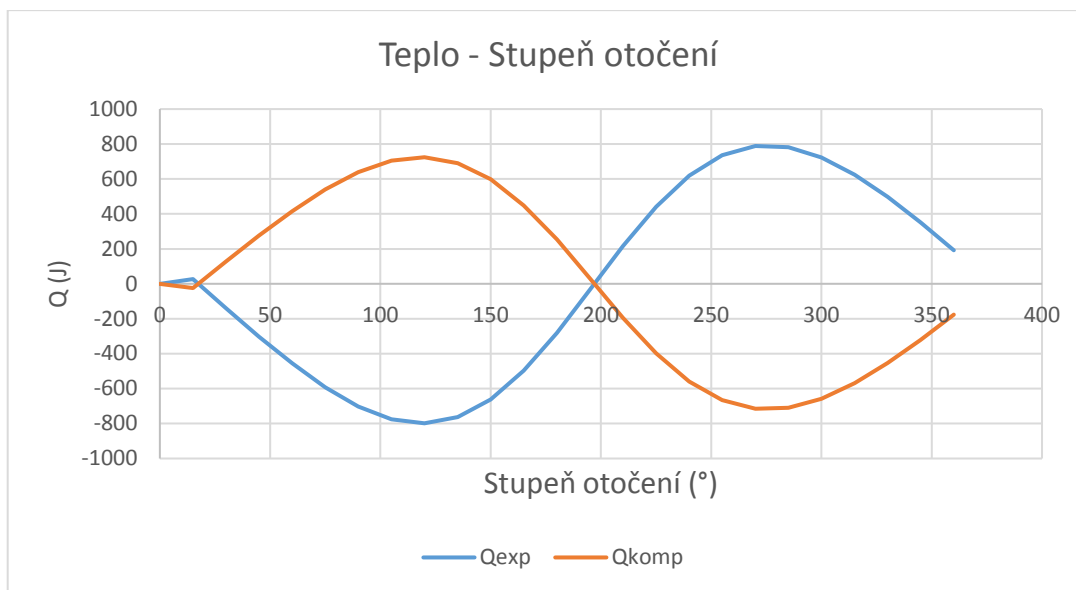
$$Q_{komp} = dH_{komp} + W_{tech.komp} = -0.00134 \text{ J} \quad (62)$$

Na obr.9.5 je P-V diagram celého cyklu, který znázorňuje průběh tlaku a objemu za předpokladu konstantních teplot plynu v expanzní a kompresní části prostorů, ideální regenerace tepla a bez uvažování mrtvého objemu.



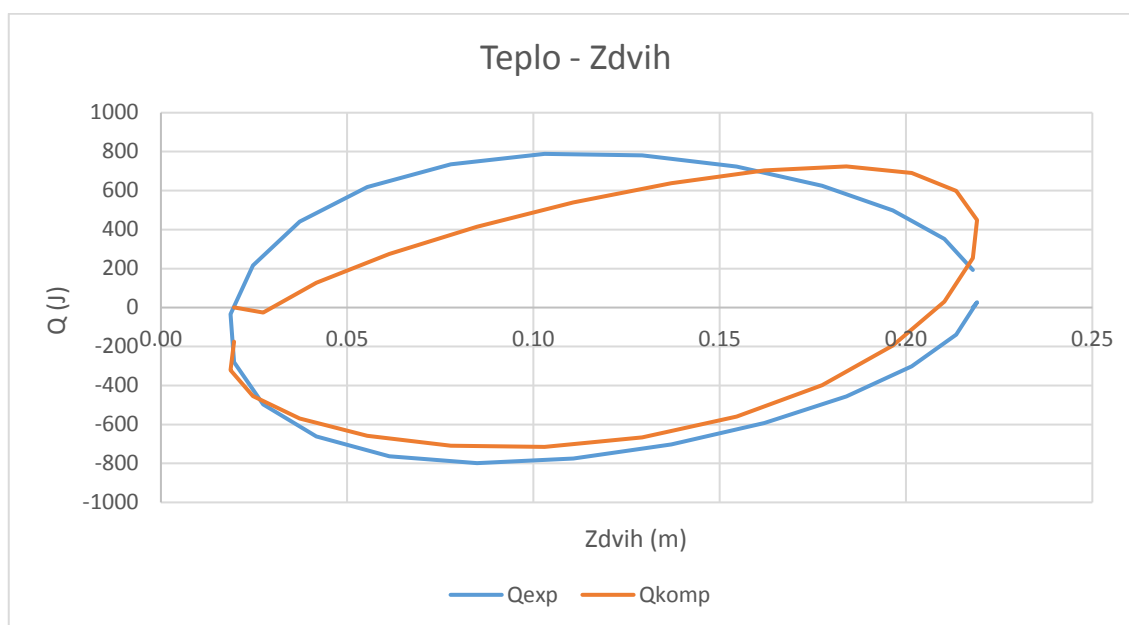
Obr.9.5 P-V diagram celého cyklu

Obr. 9.6 je znázorněn diagram průběhu přidaného a odevzdaného tepla podle úhlu otočení. Při daném navrženém typu modelu Strilingova motoru se teplo v teplé a studené komoře předává v absolutní hodnotě tam i zpět.



Obr.9.6 Průběh tepla vzhledem k otočení

Pak může být znázorněn průběh přivedeného a odvedeného tepla podle zdvihu klikového mechanismu viz. Obr. 9.7



Obr.9.7 Přivedené a odvedené teplo v závislosti na zdvihu

Podle Obr. 9.8 je vidět že maximálních hodnot tlaku může dosáhnout motor na uhlu pootočení klikového mechanismu, který je roven 180°. Toto chování tlaku je také ovlivněno zvláštností navrženého mechanismu Rossa.



Obr. 9.8 Závislost tlaku na úhlu pootočení kliky

9.1.3. C) Předpoklad konstantních teplot stěn v teplé a studené komoře

Při tomto případě bylo předpokládáno že se jedná o ideální plyn, v čase $t = 0$ s, byl tlak $P = 100 \text{ kPa}$, teplota horké stěny válce bude $T_{SE} = 420 \text{ K}$ a chladné stěny válce $T_{SK} = 290 \text{ K}$. Teplota plynu horkého prostoru bude $T_E = 390 \text{ K}$ a chladného $T_K = 300 \text{ K}$. Otáčky motoru byly zvolené jako $n = 70 \text{ ot/min}$. Podle navržených otáček byl spočítan čas, za který se mechanismus otočí o 15 stupňů.

$$t = \left(\frac{\theta}{360}\right) \cdot \left(\frac{60}{n}\right) \quad (63)$$

Kde θ je stupeň otočení kliky a n je otáčky za minutu. Pro výpočet předaného a odevzdaného tepla byly použity následující vzorce

$$Q_E = A_E \cdot \alpha \cdot (T_{SE} - T_E) \cdot dt \quad (64)$$

$$Q_K = A_K \cdot \alpha \cdot (T_{SK} - T_K) \cdot dt \quad (65)$$

Entalpie pro ideální plyn se vypočítala přes vzorec

$$H_E = C_p \cdot T_E \quad (66)$$

$$H_K = C_p \cdot T_K \quad (67)$$

A entalpie při nulových otáčkách a nulových přetocích plynu mezi komorami pro další krok bude vyjádřena jako

$$H_{E+1} = H_E + Q_E \quad (68)$$

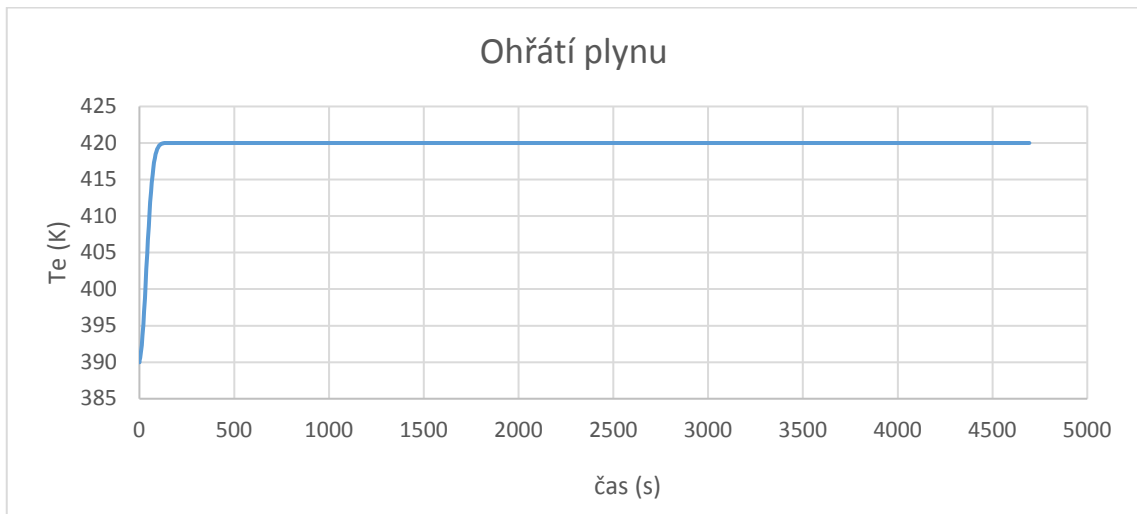
$$H_{E+1} = H_E + Q_E \quad (69)$$

Dálší krok kde teplo plynu na horké části bude se ohřívat a na chladné bude se ochlazovat, můžeme popsat jako

$$T_{E+1} = \left(\frac{H_{E+1}}{C_p} \right) \quad (70)$$

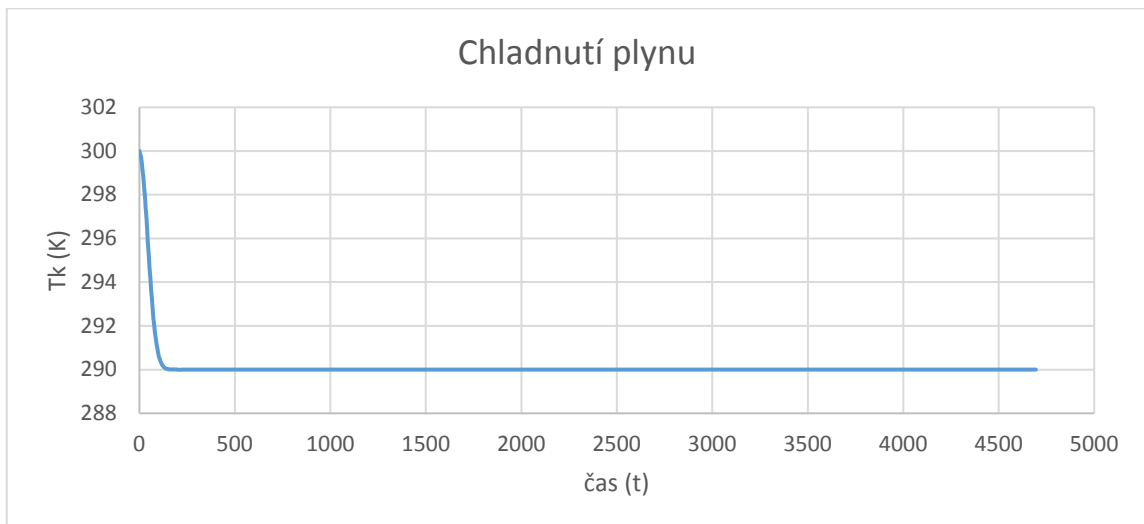
$$T_{K+1} = \left(\frac{H_{K+1}}{C_p} \right) \quad (71)$$

Obr. 9.9 ukazuje se za jaký čas se ohřeje plyn o teplotě $T_E = 390 \text{ K}$ na teplotu stěny $T_{SE} = 420 \text{ K}$.



Obr.9.9 Ustálení teplot expanzní částí motoru

Na Obr.9.10 ukazuje se za jaký čas se ochladí plyn z teploty $T_K = 300 \text{ K}$ na teplotu stěny $T_{SK} = 290 \text{ K}$.



Obr.9.10 Ustálení teplot kompresní částí motoru

10. ZÁVĚR

Cílem práce bylo základní seznámení s vývojem Stirlingova motoru a možnostmi jeho využití. Práce postupně seznamuje čtenáře se základními typy Stirlingova motorů a popisuje možnosti použití této technologie pro nízkoteplotní aplikace z technické i ekonomické strany pro výrobu elektrické energie. Dále v rešeršní části byly prozkoumány světové výrobce v této oblasti. Zvýšená pozornost byla věnována gamma typu Stirlingova motoru na bázi Rossova mechanismu. Poté již následuje samotný výpočet termodynamických modelů Stirlingova oběhu s různými stupni idealizace. Na základě dosažených výsledků jsem zjistil že mechanismus Rossa byl by vhodnější pro alpha typ Stirlingova motoru.

11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1.] Kolin, Ivo. *Stirling Motor - History, Theory, Practice*. Dubrovnik : Zagreb University Publications, Ltd., 1991.
- [2.] JAKUB HAZDA. Analýza Stirlingova oběhu. VUT Brno 2015 Vutbr. [online] Vutbr. [vid.2016-08-14], Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103417
- [3.] α -typ Stirlingova motoru. In: reuk.co.uk. [Online] © 2006-2016 REUK. [vid.2016-08-14], Dostupné z: <http://www.reuk.co.uk/Stirling-Engine-Solar-Power.htm>
- [4.] WALKER,G Stirling and Hot Air Engine Home Page: [Online]
[vid.2016-08-14] <http://www.twirpx.com/file/341784/> .
- [5.] DARLINGTON, Roy; STRONG, Keith. *Stirling and Hot Air Engines, Designing and Building Experimental Model Steliny Engines*. 1st ed. Wiltshire: Crowood Press Ltd., 2005. 240 p. ISBN 1-86126-688-X.
- [6.] Modifikace Stirlingova motoru. In: physicstoys.narod [Online] [vid.2016-08-14], Dostupné z: <http://physicstoys.narod.ru/page/vvedenie.html>
- [7.] WALKER, G. *Dvigateli stirlinga*. Moskva: Mašinstrojenije, 1985.
- [8.] CALEB C. LLOYD. A LOW TEMPERATURE DIFFERENTIAL STIRLING ENGINE FOR POWER GENERATION. University of Canterbury.Ltd.,2009.
- [9.] G.RIDER, C.CHOOPER. *Stirling engines*. Moskva.1986.
- [10.] Reálný Stirlingův cyklus.[Online] [vid..2016-08-14], Dostupné z: <http://mash-xxl.info/info/21166/>
- [11.] JOHN VOS. In: Biomass Energy for Heating and Hot Water Supply in Belarus [Online] energoeffekt [vid..2016-08-14], Dostupné z:
http://energoeffekt.gov.by/bioenergy/htdocs/en/trainings_report1.htm#_BIOMASS_HEATING_PLANT_bouzov
- [12.] JAMES AYRE Cleantechnica. [Online] 2016 Sustainable Enterprise Media [vid..2016-08-30], Dostupné z: <http://cleantechnica.com>
- [13.] EURODisH solární koncentratory.[Online] Plataforma Solar de Almería [vid..2016-08-14],Dostupné z: <http://www.psa.es/en/instalaciones/discos/distal1.php>
- [14.] stirlingmotor [Online]. 2010-2016. stirlingmotor [vid..2016-08-30], Dostupné z : <http://stirlingmotor.cz/>
- [15.] Solární stanice [Online] Thegreenwombat [vid..2016-08-30], Dostupné z: <http://thegreenwombat.com/2008/07/10/putting-the-big-in-big-solar/>

- [16] Ponorka třídy Gotland firmy Kockums. In: Valka. [Online] Radek Havelka [vid.2016-08-30], Dostupné z: : <http://www.valka.cz/14090-Ponorky-tridy-Gotland-Evoluce-svedskeho-pohonu-AIP>
- [17.] Využití slunečné energie. In:Peswiki [Online] Andrew Munsey [vid..2016-08-30], Dostupné z: :<http://peswiki.com/directory:stirling-engines>
- [18.] Výrobní jednotka. In: gasandsteamturbines [Online] gasandsteamturbines [vid.2016-08-30], Dostupné z: <http://gasandsteamturbines.blogspot.cz/>
- [19.] ŠKORPÍK, Jiří. Stirlingův motor, *Transformační technologie*, 2009-06, [last updated 2013-03]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html>. English version: Stirling engine. Web: http://www.transformacni-technologie.cz/en_stirlinguv-motor.html .
- [20.] SOLO Stirling 161. In: ProEcoPolyNet[Online] Buildup [vid..2016-08-30],Dostupnéz:<http://www.buildup.eu/sites/default/files/content/SOLO%20Stirling%20161.pdf>
- [21.] Chladicí zařízení SOLO Stirling. In: ProEcoPolyNet [Online] technicka-ekologie [vid..2016-08-30], Dostupné z: <http://www.technicka-ekologie.zcu.cz/bie1.pdf>
- [22.] Jednotka se Stirlingovo motorem [Online] © 2008-2016 researchgate.net. [vid.2016-08-30], Dostupné z:https://www.researchgate.net/figure/282858977_fig3_Fig-8-SOLO-161-solar-Stirling-left-vacuum-brazed-receiver-right
- [23.] In: Náhrada boileru. [Online] Okofene [vid..2016-08-30], Dostupné z: http://www.okofen-e.com/fr/principe_moteur_stirling/
- [24.]. BG Group Microgen. [Online] energieverbraucher [vid..2016-08-30], Dostupné z: https://www.energieverbraucher.de/files_db/dl_mg_1085669013.pdf
- [25.] Whisper Tech. [Online] [vid.2016-08-30], Dostupné z: www.whispergen.com
- [26.] Micro CHP [Online] Bill Fairney [vid.2016-08-30], Dostupné z: <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/unusualICeng/axial-ICeng/axial-IC.htm>
- [27.] Gamma Type Stirling Engines [Online] [vid.2016-08-30], Dostupné z: <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/gamma.html>
- [28.] wikipedia In: Senřův motor. [Online] wikipedia [vid.2016-08-30], Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Applications_of_the_Stirling_engine#cite_note-41
- [29.] Van de Ven J, Gaffuri P, Mies B, Cole G. Developments towards a liquid piston Stirling engine. Cleveland, Ohio: International Energy Conversion Engineering Conference; 2008.
- [30.] Fangsuwannarak K. In: A study of regenerator used in fluidyne Engine in a

case of tuning column configuration with merged cylinders in the proceeding of the 17th conference of the mechanical Engineering Network of Thailand; 2003

[31.] JOKAR, H. a A.R. TAVAKOLPOUR-SALEH. A novel solar-powered active low temperature differential Stirling pump. *Renewable Energy*[online]. 2015, **81**, 319-337 [vid. 2016-08-30]. DOI: 10.1016/j.renene.2015.03.041. ISSN 09601481. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148115002232>

[32.] WANG, Kai, Seth R. SANDERS, Swapnil DUBEY, Fook Hoong CHOO a Fei DUAN. Stirling cycle engines for recovering low and moderate temperature heat: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **62**, 89-108 [cit. 2016-08-30]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.04.031. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211630048X>

[33.] HASEGAWA.S, YAMAGUCHI.T a OSHINOYA.Y.A thermo acoustic refrigerator driven by a lowtemperature-differential,high-efficiency multi stage thermo acoustic engine. *ApplThermEng*2013;58(1–2):394–9. [Online] Hasegawa.S,Yamaguchi.T,Oshinoya.Y [vid..2016-08-30],Dostupné z: [sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

[34.] KONGTRAGOOL, Bancha a Somchai WONGWISES. Performance of a twin power piston low temperature differential Stirling engine powered by a solar simulator. *Solar Energy* [online]. 2007, **81**(7), 884-895 [cit. 2016-08-30]. DOI: 10.1016/j.solener.2006.11.004. ISSN 0038092x. Dostupné z : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X06002854>

[35.] ROSS, Andy. Making Stirling Engines. 1993.

[36.] Ross yoke [online] [vid.2017-04-4], Dostupné z : <http://zigherzog.net/stirling/drives/RossYoke/index.html>

[37.] Princip Stirlingova motoru [online] [vid.2017-03-15], Dostupné z : <http://stirlingmotor.cz/princip.html>