

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Koncepční návrh solárního Stirlingova motoru pro nízké teploty
Conceptual Design for Solar Low Temperature Stirling Engine

Student:

Vedoucí bakalářské práce:

Vít Plesník

doc. Ing. Jiří Míka, CSc.

Ostrava 2017

Zadání bakalářské práce

Student: **Vít Plesník**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Koncepční návrh solárního Stirlingova motoru pro nízké teploty**
Conceptual Design for Solar Low Temperature Stirling Engine
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh koncepce solárního Stirlingova motoru pro nízké teploty pro rodinný dům.

Práce bude obsahovat:

Přehled současných aplikací Stirlingova motoru.
Návrh rozměrů nízkoteplotního solárního Stirlingova motoru.
Rozbor využitelnosti pro rodinný dům.

Seznam doporučené odborné literatury:

Organ, J., A. Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine, Cambridge University Press 2010, ISBN-10: 0521131790.

Míka, J. Teplovzdušné motory - motory budoucnosti. Text vypracovaný v rámci projektu CZ.1.07/1.1.00/08.0010, Ostrava 2013.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

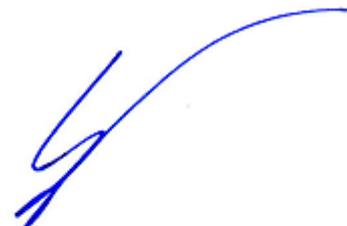
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Míka, CSc.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ STUDENTA

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

V Ostravě 15.5. 2017

..... 

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15.5. 2017



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Vít Plesník

Adresa trvalého pobytu autora práce: Svornosti 2308/19, Ostrava – Zábřeh, 700 30

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval v první řadě panu doc. Ing. Jiřímu Míkovi, CSc. za řadu cenných rad a odborné vedení při vypracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Mojžíru Vrtkovi, Ph.D. za vysvětlení problematiky spojené s výpočtem solárních kolektorů.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PLESNÍK, V. *Koncepční návrh solárního Stirlingova motoru pro nízké teploty: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2017, 47 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Míka, J. CSc.

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat koncepční návrh Stirlingova motoru určeného jakožto sekundární zdroj tepla a elektrické energie pro rodinný dům za využití sluneční energie. Na úvod práce pojednává o kombinované výrobě energie, která je v současné době úzce spojována právě s využitím Stirlingova motoru. Další část práce je věnována motoru samotnému, jeho historii a aplikacím v současné době, jednotlivým typům provedení a základním částem, které jsou pro motor charakteristické. Hlavní částí je rozměrový návrh motoru, na jehož základě je vypočtena účinnost a výkon zařízení. Na samotný závěr celé práce je řešen způsob využití solární energie pro Stirlingův motor a její co možná nejefektivnější využití v rámci domácnosti.

BACHELOR THESIS ANNOTATION

PLESNÍK, V. *Conceptual Design for Solar Low Temperature Stirling Engine: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2017, 47 p. Thesis head: doc. Ing. Míka, J. CSc.

The aim of this bachelor thesis was to develop a conceptual design of a Stirling engine designed as a secondary source of heat and electric energy for a family house by using solar energy. The opening of the thesis speaks about combined energy production which is currently closely connected with the use of a Stirling engine. Another part of the thesis is devoted to the engine itself, its history and current applications, the individual types of design and the basic parts which are characteristic for the engine. The main part is focused on dimensional design of the engine according to which the efficiency and power of the device is calculated. At the end of the whole thesis the use of the solar energy in combination with Stirling engine is solved as well as its most effective use in a case of a household.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1. ÚVOD	11
2. KOGENERACE	12
2.1 Kogenerace obecně	12
2.2 Kogenerace v ČR	12
2.3 Rozdělení kogenerační výroby	13
2.3.1 Kogenerace s využitím pístových spalovacích motorů.....	14
2.3.2 Kogenerace s využitím parní turbíny.....	14
2.3.3 Kogenerace s využitím spalovací turbíny	15
2.4 Uplatnění kogenerace	15
3. MIKROKOGENERACE	17
4. TRIGENERACE	17
5. STIRLINGŮV MOTOR	19
5.1 Obecně.....	19
5.2 Historie a vývoj	20
5.2.1 Postupný vývoj a využití.....	20
5.2.2 Současnost a vyhlídky do budoucna	22
5.3 Části Stirlingova motoru a jejich funkce.....	23
5.3.1 Regenerátor	23
5.3.2 Ohřívač.....	24
5.3.3 Chladič	25
5.3.4 Přeháněcí píst	26
5.4 Typy a modifikace.....	26
5.4.1 Typ Alfa.....	26
5.4.2 Typ Beta.....	27
5.4.3 Typ Gama	27
5.4.4 Další provedení	28

5.5	Srovnání Stirlingova motoru s motory s vnitřním spalováním	28
5.6	Hlavní výhody a nevýhody Stirlingova motoru	30
6.	VÝPOČET MOTORU	30
6.1	Schmidtova teorie.....	31
6.2	Výpočet celkového okamžitého objemu pracovního válce:.....	32
6.2.1	Výpočet okamžitých objemů expanzního a kompresního prostoru:.....	32
6.2.2	Výpočet objemu regenerátoru:.....	34
6.3	Výpočet hmotnosti plynu pro okamžitý tlak a okamžitý objem:	34
6.4	Výpočet okamžitého tlaku v motoru:.....	35
6.5	Výpočet teoretické vnitřní práce cyklu	37
6.6	Výpočet teoretického vnitřního výkonu motoru:	38
6.7	Výpočet teoretické účinnosti motoru:	38
7.	NÁVRH SOLÁRNÍHO SYSTÉMU.....	39
7.1	Volba teplotnosného média	40
7.2	Volba solárního kolektoru.....	40
7.3	Výpočet teploty oleje na výstupu z kolektoru.....	40
7.3.1	Výpočet účinnosti kolektoru:.....	41
7.3.2	Výpočet stagnační teploty kolektoru:	41
7.3.3	Výpočet tepelného zisku daného kolektoru:.....	42
7.3.4	Výpočet výstupní teploty oleje:	42
8.	ZÁVĚR.....	43
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	45
	SEZNAM OBRÁZKŮ	47
	SEZNAM TABULEK.....	47
	SEZNAM GRAFŮ	47

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Seznam použitých symbolů

A	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$	redukovaný teplotní rozdíl
a_1, a_2	$[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}]$	konstanty křivky účinnosti solárního kolektoru
a_C	[J]	teoretická vnitřní práce cyklu
a_E	[J]	expanzní práce cyklu
c	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita pro olej
D_{PP}	[m]	průměr přemísťovacího pístu
D_{ZE}	[m]	průměr expanzního prostoru
D_{ZK}	[m]	průměr kompresního prostoru
dt_{real}	[°C]	změna velikosti teploty
dT_{stagn}	[K]	teplotní rozdíl při výpočtu stagnační teploty
G	$[W/m^2]$	intenzita slunečního záření
l_{PP}	[m]	výška přemísťovacího pístu
l_{ZE}	[m]	zdvih expanzního pístu
l_{ZK}	[m]	zdvih kompresního pístu
m	[kg]	hmotnost plynu v motoru
\dot{m}	$[kg \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	hmotnostní tok oleje kolektorem
n	[ot./min]	pracovní otáčky
P	[W]	teoretický vnitřní výkon motoru
p	[Pa]	okamžitý tlak v motoru
Q_k	[W]	tepelný zisk kolektoru
q_k	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný zisk kolektoru
r	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	plynová konstanta pro vzduch
S	$[m^2]$	plocha apertury
T_E	[K]	teplota v expanzním prostoru
T_K	[K]	teplota v kompresním prostoru
T_R	[K]	teplota v regenerátoru
T_{stagn}	[K]	stagnační teplota
t_e	[°C]	venkovní teplota
t_s	[°C]	průměrná teplota kapaliny v kolektoru

t_{so}	[°C]	teplota studeného oleje
t_{vyst}	[°C]	výstupní teplota oleje z kolektoru
V_C	[m ³]	okamžitý objem pracovního válce
V_E	[m ³]	okamžitý objem expanzního prostoru
V_K	[m ³]	okamžitý objem kompresního prostoru
V_R	[m ³]	objem regenerátoru
$V_{\text{ŠE}}$	[m ³]	objem škodlivého expanzního prostoru
$V_{\text{ŠK}}$	[m ³]	objem škodlivého kompresního prostoru
V_{ZE}	[m ³]	zdvihový objem expanzního prostoru
V_{ZK}	[m ³]	zdvihový objem kompresního prostoru
α	[°]	úhel natočení kliky
η	[%]	teoretická účinnost motoru
η_0	[-]	konstanta křivky účinnosti solárního kolektoru
η_K	[%]	účinnost kolektoru
φ	[°]	fázový posuv pístu

Seznam použitých zkratk

atd.	a tak dále
ČR	Česká republika
č.	číslo
KVET	kombinovaná výroba elektřiny a tepla
Obr.	obrázek
Tab.	tabulka
tzv.	takzvaný

1. ÚVOD

V rámci této bakalářské práce bylo mým úkolem zpracovat téma Koncepčního návrhu Stirlingova motoru pro nízké teploty. Toto téma bylo vybráno s ohledem na rostoucí zájem o kombinovaný způsob výroby energie, který již není pouze dominantou velkých průmyslových zařízení, ba naopak si nachází cestu i do běžných domácností.

Cílem samotné práce je zjistit, zda je možné efektivně využít Stirlingova motoru ve spojení se slunečním zářením k výrobě tepla a energie pro běžné rodinné domy. Jako výhodu tohoto řešení vidím možnost akumulace energie v podobě média ohřívaného prostřednictvím solárních kolektorů a jeho následné využití k pohonu jednotky v případě potřeby.

Dle mého se jedná o velice zajímavý návrh řešení, kdy je umožněno jednotlivým domácnostem stát se do jisté míry nezávislymi na dodávkách energie a tepla z okolních elektráren a tepláren. Pokud by se tento způsob výroby tepla a energie osvědčil, ve větším měřítku by tak mohlo dojít k decentralizaci výroby elektrické a tepelné energie. Výroba na místě spotřeby by znamenala značnou úlevu pro přenosovou soustavu a dalo by se tak předejít případné hrozbě blackoutu. Při rozhodování o takových záležitostech je však vždy rozhodující cena.

Součástí této práce je vedle výpočtů týkajících se samotného motoru i teoretická část, kde je věnována pozornost problematice kogenerace (kombinovaná výroba elektřiny a tepelné energie) a trigenerace (kombinovaná výroba elektřiny, tepla a chladu) a jejich využití v současné době. V další části je rozebrána stavba a princip fungování Stirlingova motoru, jeho základní konfigurace, historický vývoj, oblasti využití a nakonec obecné zhodnocení výhod a nevýhod spojených s tímto motorem. Výstup celé této práce tvoří obecný závěr, kde jsou vyhodnoceny veškeré dosažené výsledky a poznatky získané v průběhu tvorby této práce.

2. KOGENERACE

2.1 Kogenerace obecně

Jedná se o kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (KVET). Ve výsledku jsme tedy schopni efektivněji využít energii, která je uložena v palivu. Lze takto ušetřit asi 1/3 paliva oproti oddělené výrobě

Běžná účinnost tepelných elektráren na uhlovodíková paliva se pohybuje někde okolo 35%, tedy pouze 35% z celkového množství energie vázaného uvnitř paliva je přeměněno na energii elektrickou. Nejnižších účinností (do 12%) dosahují parní stroje, u běžných benzínových a dieselových motorů je přeměněno na mechanickou práci okolo 25% energie paliva. Většina energie odchází ve formě tepla v podobě výfukových plynů nebo je odváděna ze zařízení z důvodu bezpečného chodu (chlazení zařízení).

Takto vzniklé odpadní teplo bohužel už nemůžeme využít k opětovné výrobě mechanické energie nebo elektřiny. V kogeneračních jednotkách jsme však schopni dále teplo použít např. k ohřevu vody, vytápění objektů atd. Tím, že využijeme energii uloženou v palivu k výrobě více druhů energií zároveň, dosáhneme mnohem větší míry zužitkování energetického potenciálu paliva a tedy i větší celkové účinnosti. Zároveň tak dochází k šetření životního prostředí snížením produkce emisí znečišťujících látek (oxidy dusíku a síry, prach) a emisí skleníkových plynů (především oxidu uhličitého). [7, 9, 19]

2.2 Kogenerace v ČR

KVET pokrývá skoro 2/3 výroby tepla pro soustavy zásobování teplem v ČR. Produkci elektrické energie a tepla zároveň jsou teplárny schopny pokrýt vlastní spotřebu a zbytek dodávat do sítě, popřípadě dodávat pouze do sítě. Záleží na tom, co je aktuálně výhodnější. V ČR je kogenerace podporována i ze zákona a to formou tzv. zelených bonusů, jejich výše je každoročně stanovena Energetickým regulačním úřadem.

Příkladem takto fungujících zařízení jsou například: jaderná elektrárna Temelín, která napájí teplem Týn nad Vltavou, tepelná elektrárna Mělník napájející sever Prahy, elektrárna Opatovice nad Labem napájející Hradec Králové, Chrudim a Pardubice, tepelná

elektrárna Prunéřov vedoucí teplo do Klášterce nad Ohří, Chomutova a Jirkova. V Ostravě je jedním z dodavatelů teplárna Třebovice, která funguje primárně jako teplárna. [19]

2.3 Rozdělení kogenerační výroby

V zásadě máme několik možností, jak můžeme dělit kogenerační výrobu. Mezi hlavní kritéria patří rozdělení dle dosažitelného elektrického výkonu, rozdělení podle účelu a sféry využití a rozdělení dle použité technologie. [8]

1. Podle výkonu

- a) Mikro-kogenerace – do 50 kW_e
- b) Mini-kogenerace – do 500 kW_e
- c) Kogenerace malého výkonu do 1 MW_e
- d) Kogenerace středního výkonu do 50 MW_e
- e) Kogenerace velkého výkonu nad 50 MW_e

2. Dělení podle účelu využití

- a) Základní
- b) Špičkové
- c) Záložní
- d) Rezervní
- e) Specifické

3. Dělení podle sféry využití

- a) Centralizované zásobování tepla
- b) Průmyslová kogenerace
- c) Kogenerace pro komerční sféru
- d) Kogenerace pro komunální sféru
- e) Kogenerace pro bytovou sféru

4. Dělení podle technologie

- a) Kombinovaný cyklus s rekuperací tepla
- b) Parní turbína
- c) Kondenzační turbína s odběrem páry
- d) Plynová turbína s rekuperací tepla

- e) Motor s vnitřním spalováním
- f) Mikroturbíny
- g) Stirlingův motor
- h) Palivové články

2.3.1 Kogenerace s využitím pístových spalovacích motorů

Jedná se o klasické pístové motory podobné těm automobilovým a stejně jako u aut je můžeme rozdělit na motory zážehové a vznětové. Pokud má být spalovací motor využit pro kogeneraci, je nezbytné ho rekonstruovat pro spalování zemního plynu. Chemická energie uložená v palivu je prostřednictvím motoru přeměněna na energii mechanickou a tepelnou. Zatímco mechanická energie pohání elektrický generátor, teplo ze spalin a motoru je odváděno soustavou tepelných výměníků. Pomocí výměníků dostáváme optimální teplotu vody, která je dále zužitkována.

Výhodou pístových spalovacích motorů je jejich poměrně nízká pořizovací cena. Nevýhodou jsou však naopak vyšší nároky na údržbu a vyšší hlučnost. Hlavní dodavatelé těchto jednotek u nás jsou společnosti TEDOM a Motorgas. [6]

2.3.2 Kogenerace s využitím parní turbíny.

Řešení používané nejčastěji u velkých elektrárenských zdrojů. Pára o vysokém tlaku je přiváděna z kotle na lopatky turbíny, kde koná mechanickou práci a samotná turbína následně pohání elektrický alternátor. Na výstupu z turbíny dostáváme nízkopotenciální páru, kterou je dále možno využít jako zdroj tepla. Hnací turbína může být protitlaká nebo kondenzační. K produkci páry v parních kotlích mohou sloužit pevná paliva (uhlí, biomasa), kapalná paliva (topné oleje) nebo plynná paliva (zemní plyn, bioplyn).

Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady takového systému, a jak už bylo zmíněno, jedná se o řešení používané především pro dosažení vysokých výkonů, které tedy značně převyšují potřeby klasického rodinného domku. [6, 9]

2.3.3 Kogenerace s využitím spalovací turbíny

Spalovací turbíny se tradičně skládají z kompresoru, spalovací komory a plynové turbíny. Vzduch přiváděný do spalovací turbíny je stlačován kompresorem a veden do spalovací komory, kde vlivem vstřikování paliva dochází ke vzniku spalin o vysokém tlaku a teplotě. Spaliny následně expandují na lopatkách turbíny a pohání tak elektrický alternátor a vzduchový kompresor. Teplota spalin vystupujících z turbíny se pohybuje okolo 500 °C, nabízí se tedy jejich další využití pro technologické nebo teplárenské účely. Jako palivo nejčastěji slouží zemní plyn. Spalovací turbíny se používají nejčastěji v rozpětí výkonů mezi 3 MW a 300 MW, pro menší výkony se stávají ekonomicky nevýhodnými z důvodu vysokých vstupních investic. [6]

Je tedy zřejmé, že ani jedna z dostupných technologií není příliš vhodná pro pohon kogenerační jednotky, která by byla postačující pro obyčejný rodinný dům. V případě parních a spalovacích turbín se jedná o velmi drahé jednotky, které svým výkonem několikanásobně převyšují energetické požadavky průměrného rodinného domu. Naopak využití pístových spalovacích motorů by se mohlo zdát být z pohledu dosahovaných výkonů ideální, ale to pouze za předpokladu, že bychom měli stálý odběr pro výkon, který by jednotka dokázala vyprodukovat.

2.4 Uplatnění kogenerace

Předpokladem k použití kogenerační jednotky je snaha zužitkovat co největší množství vyrobeného tepla. Její nasazení je výhodné u objektů s celoročními požadavky na odběr tepla nebo chladu. Právě v letních měsících, kdy odpadá potřeba vytápění a naopak se stává žádanou výroba chladu, je možné odpadní teplo využít ke chlazení. V tomto případě se však už nejedná o kogeneraci, ale o tzv. trigeneraci. Tím je zajištěna celoroční využitelnost jednotky.

1. Hotely a penziony

V případě hotelů a penzionů vznikají celoroční náklady ať už na vytápění nebo klimatizaci samotných prostor. Dále je nutné zajistit dodávky teplé užitkové vody po celý rok. Hotel s přidruženým wellness zařízením nebo bazénem může využít odpadní teplo právě k ohřevu bazénové vody. Vyprodukovaná elektrická energie pak

může být využita všude od chodu hotelových zařízení až po pokrytí energie potřebné k osvětlení. K těmto účelům jsou vhodné spíše menší kogenerační jednotky.

2. Nemocnice

K udržení řádného provozu nemocnice jsou kladeny vysoké požadavky na dodávky tepla a elektrické energie, které je nutné dodávat nepřetržitě po celý rok. Poptávka po elektrické energii je v průběhu roku rovnoměrná. Stejně jako u hotelů, tak i u nemocnic je během teplých letních měsíců možné teplo využívat k výrobě chladu v rámci trigenerace. Mimo jiné může kogenerační jednotka sloužit jako rezerva v případě výpadků elektrické energie.

3. Nákupní střediska

V rámci značné celoroční spotřeby tepla pro vytápění nebo klimatizaci se jedná o prostory předurčené k využití kogeneračních jednotek. Vyrobená elektřina může sloužit k zajištění osvětlení, chodu ventilátorů a klimatizace.

4. Bioplynové stanice

Jakožto palivo se využívá bioplyn. Jedná se o produkt spojený s procesem fermentace. Takto vzniklý plyn se spaluje v kogenerační jednotce. Vzniklé teplo se dá využít k ohřevu fermentačních nádrží, vytápění okolních budov nebo dosušování obilí, dřeva atd. Část vyrobené elektřiny může sloužit k pokrytí vlastní spotřeby a zbytek se dá prodávat do sítě.

5. Komunální skládky

V jednotkách se používá jako palivo skládkový plyn, který se uvolňuje ze skládek tlením odpadu. Využití tepla je podobné jako u bioplynových stanic. Elektřina se většinou prodává do sítě.

6. Čistírny odpadních vod

V objektech čistíren odpadních vod se kogenerační jednotky využívají ke spalování tzv. kalového plynu. Jedná se o produkt získaný procesem čištění vody. Teplem se vyhřívají samotné nádrže s kalem, což podporuje tvorbu již zmíněného kalového

plynu. Vyprodukovanou elektřinu je možné spotřebovat v prostorech čističky nebo jí prodávat do sítě.

Dalšími místy, kde se dá uplatnit provoz kogeneračních jednotek, mohou být například prostory vysokých škol, sportovní centra, spalovny komunálního odpadu, doly nebo rodinné domy. [6]

3. MIKROKOGENERACE

Stejně tak jako u klasické kogenerace se jedná o kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. Výkon těchto jednotek se pohybuje do 50 kW_e. Hlavní myšlenka mikrokogenerace spočívá ve spotřebě tepla a elektrické energie v samotném místě výroby, což sebou nese jistá omezení, na druhou stranu však odpadají ztráty vznikající v důsledku přenosu energie na delší vzdálenosti. Pro maximálně efektivní využití je třeba zajistit celoroční odběr tepla a elektřiny. V letních měsících by se tak výroba tepla mohla zdát být zbytečná a nevhodná, naopak v chladnějších měsících lze teplo využít efektivně k vytápění. U elektrické energie tento problém nenastává, jelikož případné přebytky se dají na základě smlouvy s distributorem elektřiny prodávat do sítě.

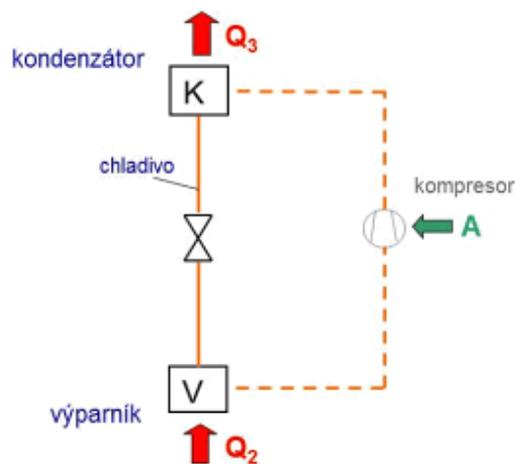
V poslední době se v souvislosti s mikrokogenerací začíná mluvit právě o Stirlingovu motoru, který naproti klasickým spalovacím motorům vyniká nízkou mírou produkovaného hluku, vyšší účinností a malými nároky na údržbu, navíc jsme pro jeho chod schopni využít i různých alternativních zdrojů energie. [4, 15, 17]

4. TRIGENERACE

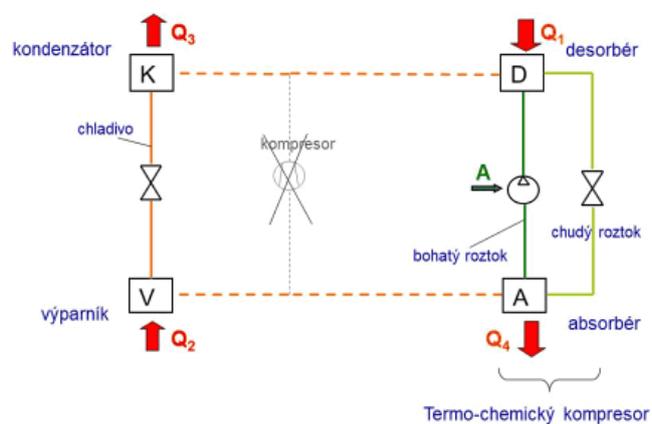
Na rozdíl od klasické kogenerace jsme mimo teplo a elektřinu schopni vyrobit i chlad. Možnost produkovat chlad vede k ještě efektivnějšímu využití paliva a tedy i zvýšení účinnosti. Mnohdy právě menší využitelnost tepla z kogenerace během léta stojí za konečným nasazením jednotek o nižších výkonech, než by bylo třeba. Pokud jsme ale schopni teplo přeměnit na chlad, není problém pořídit jednotku na míru, aniž bychom museli uvažovat nad jejím využitím během teplých měsíců.

Obecně vzato máme dva základní způsoby, jak vyprodukovat chlad. První možností je kompresorové chlazení (*Obr. č. 4.1*), tato metoda je jedním z nejčastějších způsobů

chlazení, je založena na opakujícím se odpařování a kondenzaci chladiva. Takové zařízení se skládá z kompresoru, kondenzátoru a výparníku. Druhou možností je chlazení absorpční (Obr. č. 4.2). Na rozdíl od kompresorového chlazení nejsou páry chladiva dopravovány z výparníku do kondenzátoru prostřednictvím klasického elektrického kompresoru, ale tzv. tepelného kompresoru. Páry chladiva jdoucí z výparníku jsou v absorbérů pohlcovány roztokem absorbentu. Absorbent s rozpuštěnými parami chladiva (bohatý roztok) putuje do desorbéru, kde jsou přívodem tepla separovány páry chladiva od absorbentu (chudý roztok). V kondenzátoru je vyšší tlak, dochází k ochlazení par chladiva a jejich kondenzaci. Dále je kapalně chladivo vypuštěno přes škrťací ventil do výparníku. Zde je chladivo přivedeno k bodu varu vlivem poklesu tlaku, dochází tedy k jeho vypaření a celý cyklus se opakuje.



Obr. č. 4.1 – Schéma kompresorového chladicího oběhu [11]



Obr. č. 4.2 – Schéma absorpčního chladicího oběhu [11]

U trigenerace je pro nás výhodnější využívat absorpční metodu, během které spotřebováváme teplo, než metodu kompresní, kde bychom museli vynaložit elektrickou energii na pohon kompresoru. [11]

5. STIRLINGŮV MOTOR

5.1 Obecně

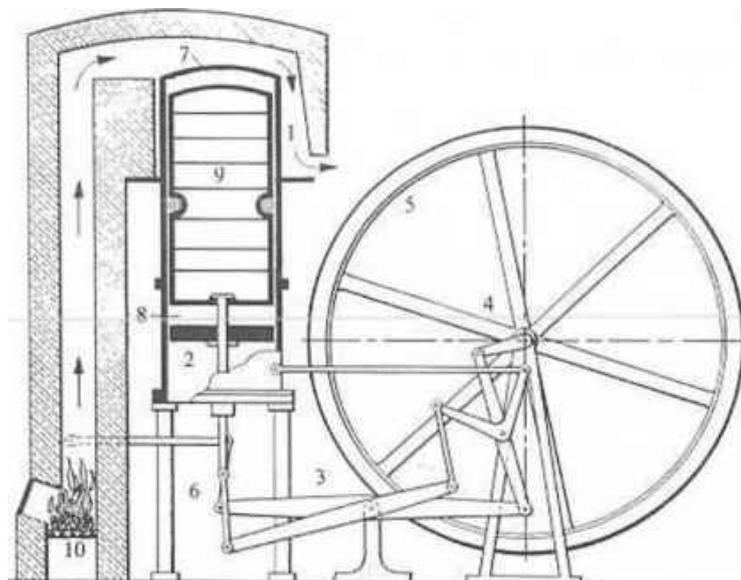
Stirlingův motor je tepelný stroj fungující na principu cyklického stačování a expanze pracovní látky. Pracovní látkou může být vzduch, avšak k dosažení lepšího výkonu a celkové účinnosti se používá spíše vodík nebo hélium pro jejich vysokou tepelnou kapacitu. K transformaci tepelné energie na mechanickou práci dochází při stlačování pracovního plynu za nízkých teplot a jeho následné expanzi při vysoké teplotě. Jedná se o termodynamický systém s uzavřeným oběhem, což znamená, že nedochází k výměně pracovního plynu s okolím. Jediná výměna, ke které dochází, je výměna tepla v místě tepelných výměníků ohřívače a chladiče. Mimo ohřívač a chladič je nedílnou součástí každého Stirlingova pohonu regenerátor. Jedná se o další tepelný výměník, který uschovává tepelnou energii v době mezi expanzí a kompresí. Právě regenerátor odlišuje tento druh motoru od jiných horkovzdušných pohonů.

Stirlingův motor se řadí mezi motory s vnějším spalováním. Tím je spalovací proces spolu se vznikajícími škodlivinami izolován od samotné pracovní části zařízení, což se mimo jiné pozitivně odráží na celkové životnosti zařízení. Zdrojem tepla však nemusí být nutně spalovací proces. Nejefektivnější je využití společně s dalšími technologiemi, které produkují dostatečné množství tepla. Toto teplo by při samostatném provozu bylo předáváno volně do okolního prostředí a dále by zůstávalo nevyužito. Ve spojení se Stirlingovým motorem je však možné přebytečné teplo využít k přeměně na mechanickou práci a dále například k výrobě elektrické energie. Proto je poměrně rozšířené využití ve spojení s kogeneračními jednotkami popřípadě se solárními systémy. Takto navržené soustavy dosahují mnohem vyšších hodnot účinnosti, než při odděleném provozu. V dnešní době existuje několik provedení Stirlingova motoru, z nichž každé má své výhody a nevýhody. [10, 16]

5.2 Historie a vývoj

5.2.1 Postupný vývoj a využití

Historie Stirlingova motoru sahá až na počátek 19. století, kdy byl v roce 1816 vynalezen a patentován první takový motor (*Obr. č. 5.1*) skotským pastorem Robertem Stirlingem. Sice se nejednalo o úplně první tepelný motor, jako první však obsahoval tepelný výměník, který zlepšoval celkovou účinnost zařízení.



Obr. č. 5.1 – Stirlingův teplovzdušný motor podle patentového návrhu Roberta Stirlinga z roku 1816 [14]

V průběhu 19. století zažívaly mimo jiné bouřlivý rozvoj parní stroje. Docházelo však k velkému množství smrtelných nehod v důsledku explozí parních kotlů, proto se začalo uvažovat o Stirlingovu motoru jakožto o možné bezpečnější alternativě. K zajištění vysokých výkonů Stirlingovým pohonem bylo třeba dosáhnout vysokých teplot a právě tyto vysoké teploty kladly obrovské nároky na materiál, což mnohdy vedlo k poruchám samotného zařízení. Postupem času se parní pohony stávaly bezpečnějšími a účinnějšími, to však neznamenalo konec Stirlingova motoru. Své postavení si i nadále udržel na místech, kde nebyly kladeny vysoké nároky na výkon a bylo třeba zařízení s jednoduchou údržbou a spolehlivým provozem. Jednalo se tak o ideální zdroj energie například pro čerpání vody, stlačování vzduchu, pohon ventilátoru, šicí stroje, atd.

O další vývoj se zasadil vynálezce ze Švédska John Ericsson, který si byl dobře vědom výhod Stirlingova motoru. Tento významný muž proslul mimo jiné v době Americké občanské války jakožto konstruktér první pancéřové lodi Monitor. Dále vynalezl solární stroj shlukující sluneční světlo. Věnoval se výrobě teplovzdušných motorů využívaných zejména k čerpání vody.

Na počátku 20. století došlo k prudkému rozvoji motorů s vnitřním spalováním, což vedlo na delší dobu k ztrátě zájmu o další využití Stirlingova pohonu a zároveň se jedná o konec éry, ve které dominovaly teplovzdušné motory.

V 50. letech 20. století se o opětovné vzkříšení pokusila firma Philips, která hledala zdroj energie pro napájení radiostanic v místech, kde nebyl zaveden elektrický proud. Jeho hlavní výhodou oproti spalovacímu motoru byl tichý chod a nízká míra rušení rádiových frekvencí. Avšak s nástupem tranzistorových zařízení o mnohem menší spotřebě byl tento projekt bohužel brzy ukončen, přesto varianta společnosti Philips (*Obr. č. 5.2*) znamenala krok kupředu v podobě přetlakové koncepce. Do této doby byly všechny návrhy limitovány atmosférickým tlakem.



Obr. č. 5.2 – Stirlingův generátor navržený společností Philips [16]

Myšlenka Stirlingova motoru byla opět vzkříšena až v 70. letech 20. století během ropné krize v USA. Prvním, kdo přišel s nápadem sestavit automobil poháněný takovým motorem, byla firma Ford. Pro tyto účely byl sestaven speciální prototyp o odpovídající

velikosti a výkonu. Během testování se však ukázalo toto řešení jako nevhodné. Jedny z hlavních důvodů byly problémy s regulací výkonu a akcelerací. [10, 15, 16]

5.2.2 Současnost a vyhlídky do budoucna

V současné době se o Stirlingově pohonu uvažuje nejčastěji ve spojení s pojmem kogenerace, jedná se o kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. Na trhu jsou takové kogenerační jednotky již k dostání i pro širokou veřejnost. Aktuální vývoj je soustředěn především na Stirlingovy motory o výkonu cca do 50 kWe využívající obnovitelných zdrojů energie. V tomto ohledu se zdá být výhodnou výroba elektrické energie ze slunečního záření. Součástí této koncepce je parabolické zrcadlo, v jehož ohnisku je upevněn Stirlingův motor spolu s elektrickým generátorem tak, aby koncentrovaný sluneční paprsek dopadal na plochu ohříváku. Celá tato soustava (Obr. č. 5.3) se v průběhu dne natáčí za Sluncem, čímž je dosaženo optimálního výkonu jednotky.



Obr. č. 5.3 – Stirlingův motor na sluneční energii [16]

Do budoucna zvažuje NASA využití Stirlingova motoru u svých kosmických sond a na mezinárodních vesmírných stanicích. Jako zdroj tepla se uvažuje radioizotopový blok (SRG – Stirling Radioisotope Generator). [16]

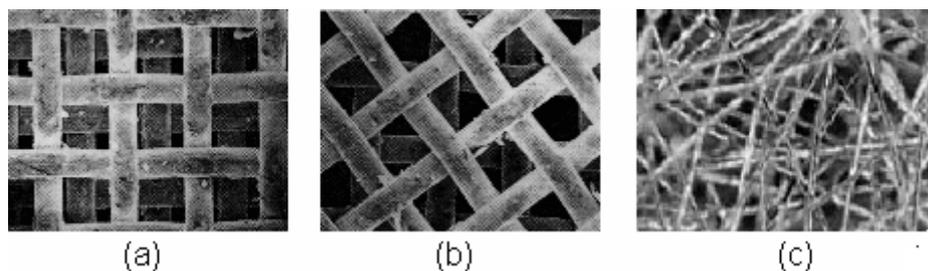
5.3 Části Stirlingova motoru a jejich funkce

Obecně je stroj navržen tak, že v chladné části zařízení (Chladiči) dochází ke stlačování pracovní látky pístem a v teplé části (Ohříváči) k následné expanzi. Ve výsledku se tedy jedná o přeměnu tepelné energie na mechanickou práci. Myšlenka celého stroje je unikátní v použití regenerátoru, který slouží k uschování tepelné energie, jak už bylo psáno v obecném úvodu. [10, 16]

5.3.1 Regenerátor

Regenerátor je jednou z nejdůležitějších součástí Stirlingova motoru. Jedná se o tepelný výměník umístěný mezi teplou a studenou částí zařízení. Můžeme ho chápat jako termodynamickou houbu, která střídavě absorbuje a uvolňuje teplo. Pracovní plyn střídavě prochází tělem regenerátoru. Cílem je uchování tepla uvnitř, tak aby nedocházelo ke zbytečným tepelným ztrátám do okolí. Snažíme se tedy přiblížit co nejvíce k ideálnímu Carnotovu oběhu zvýšením rozdílu maximální a minimální teploty oběhu.

Matrici regenerátoru (*Obr. č. 5.4*) tvoří nejčastěji vzájemně spečené drátky velmi malých průměrů (menší než 0,1 mm). Tyto drátky mohou být různě rozmístěny, od mřížkových vzorů až po chaotické uspořádání. Matrice regenerátoru však nemusí být nutně drátkové konstrukce, vyskytují se i regenerátory vytvořené z tenkých plechů. U některých konfigurací je funkce regenerátoru suplována přemísťovacím pístem.



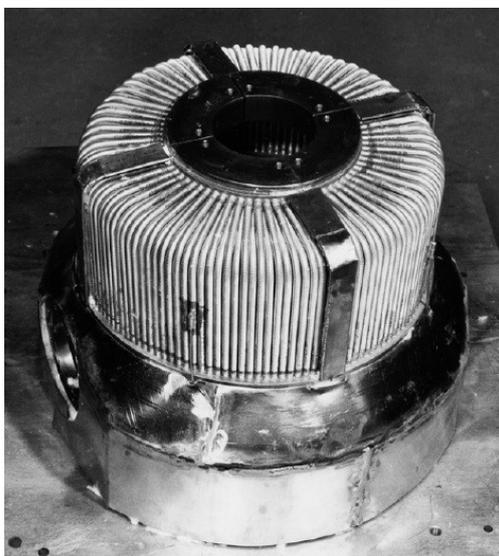
Obr. č. 5.4 – Matrice regenerátoru pod mikroskopem a, b - síťová matrice; c- chaoticky uspořádaná matrice [16]

Pro správný návrh regenerátoru je nezbytné znát množství regenerovaného tepla, hmotnostní průtok regenerátorem a teplotní diferencí mezi maticí regenerátoru a pracovním plynem.

Přesto, že se rychlost i směr pracovního plynu procházejícího regenerátorem mění, lze s dostatečnou přesností použít postupy pro výpočet výměníku se stacionárním prouděním. Mimo jiné se mění také teplotní rozdíl mezi pracovním plynem a maticí regenerátoru, proto se zavádí střední teplotní rozdíl. [10, 16]

5.3.2 Ohříváč

Ohříváč je nezbytnou částí Stirlingova motoru, prostřednictvím které přivádíme teplo do samotného motoru. Většinou se jedná o teplo spalin nebo koncentrované sluneční záření. V ideálním případě tvoří většinu škodlivého prostoru (prostor nevyužitý ke zdvihu válce) na teplé straně. U málo výkonných motorů může jako ohříváč sloužit samotná stěna válce v zahřivaném prostoru. Pro zajištění lepší výměny a tedy i dosažení vyšších výkonů je nezbytné provést úpravy v podobě návrhu žebrování, které může být vnitřní nebo vnější, popřípadě se používají malé trubičky (*Obr. č. 5.5*). Při návrhu optimálního ohříváče je třeba najít kompromis mezi dostatečně velkou plochou k výměně tepla s nízkými tlakovými ztrátami a velikostí škodlivého prostoru. Ve strojích pracujících s vysokými tlaky a teplotami je důležité, aby byl ohříváč vyroben z kvalitních materiálů schopných odolat mechanickému napětí, teplotě a korozi.



Obr. č. 5.5 – Ohříváč z hladkých trubek (motor V4X35) [16]

Během cyklu se teplota pracovního plynu v ohříváči mění, a to ve větším rozsahu než teplota vnitřní plochy výměníku. Pokud je tedy teplota pracovního plynu menší

než teplota vnitřní plochy ohříváče, dochází k přestupu tepla z ohříváče do pracovního plynu, to samé platí i naopak. Lze tedy říci, že vnitřní plocha funguje jako regenerátor, který ovšem více tepla předá, než získá. [10, 16]

5.3.3 Chladič

Podobně jako u ohříváče se jedná o tepelný výměník. Jeho úkolem je odvádět teplo z pracovní látky ven do okolí. Jako chladicí médium se používá nejčastěji vzduch. V ideálním případě tvoří chladič většinu škodlivého prostoru studené strany motoru. U malých strojů s malým výkonem je tvořen pouze stěnou válce na studené straně. Pro motory o velkých výkonech by však takové řešení bylo nedostatečné, proto se u nich používají trubkové výměníky chlazené kapalinou například vodou (*Obr. č. 5.6*). Dosažení většího rozdílu teplot mezi teplou a studenou stranou nám umožňuje navýšit výkon.



Obr. č. 5.6 – Chladič Stirlingova motoru Tedom 180VI [16]

Stejně jako u ohříváče se teplota pracovního plynu v chladiči mění ve větším rozsahu než teplota vnitřní plochy výměníku. Jestliže je teplota pracovního plynu nižší než vnitřní teplota plochy chladiče, dochází k přestupu tepla z chladiče do pracovního plynu a naopak. Tedy i vnitřní povrch chladiče pracuje jako regenerátor, který však více tepla z pracovního

plynu odebere, než mu dodá. Odvedené teplo se dále může využít například pro vytápění nebo ho lze přivést zpět na teplou stranu. [10, 16]

5.3.4 Přeháněcí píst

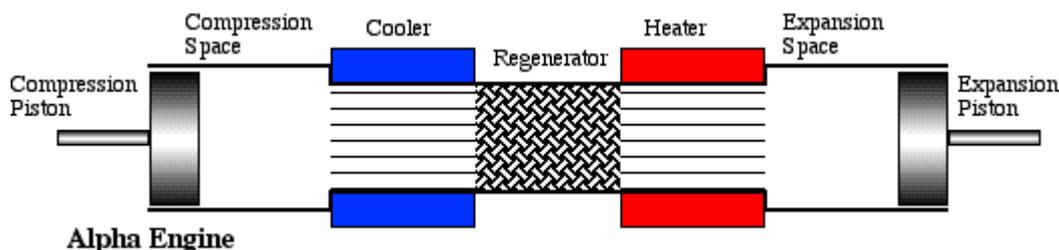
Jedná se o speciální píst, který slouží k dopravě pracovního plynu mezi teplým a studeným prostorem. V závislosti na provedení může být píst uložen s vůlí nebo je utěsněn. Provedení s vůlí umožňuje plynu proudit okolo válce, zatímco utěsnění nutí pracovní plyn přesouvat se přes výměník a regenerátor. [10, 16]

5.4 Typy a modifikace

Existuje několik mechanických řešení a uspořádání základních částí Stirlingova motoru. Obecně rozlišujeme tři základní typy – α , β a γ . [10, 16]

5.4.1 Typ Alfa

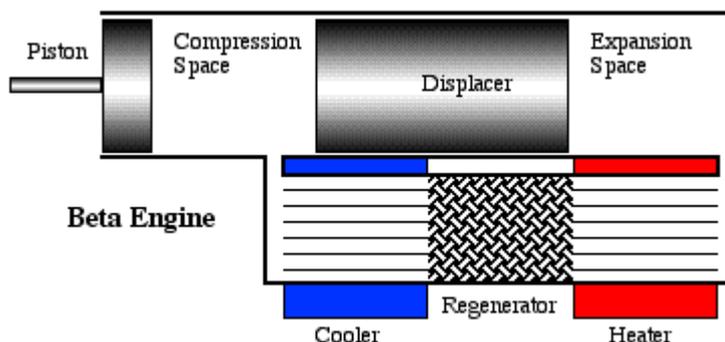
Alfa modifikace je charakteristická tím, že má dva pracovní písty (*Obr. č. 5.7*). Oba písty pracují v oddělených válcích. Jedná se o koncepčně nejjednodušší modifikaci. Expanzní válec je zahříván na vysoké teploty a pracovní plyn uvnitř něj se cyklicky rozpíná, zatímco z kompresního válce se teplo odebírá, objem plynu se zmenšuje a je cyklicky stlačován. Oba válce jsou propojeny pomocí regeneračního výměníku, který střídavě odebírá teplo a zase ho vrací zpět v závislosti na směru proudění pracovního plynu. Tato modifikace dosahuje vysokého výkonu a účinnosti prostřednictvím velké teplotní diference, nevýhodou je však problematické řešení mazání a těsnění teplého pístu za vysokých teplot. [1, 10, 16]



Obr. č. 5.7 – Typ Alfa [1]

5.4.2 Typ Beta

Jde o původní návrh podle patentu Roberta Stirlinga. U této modifikace se oba písty pohybují ve společném válci (*Obr. č. 5.8*). Na rozdíl od α modifikace je pouze jeden píst pracovní, tedy pouze jeden píst koná práci, označujeme jej též jako píst kompresní. Druhý píst slouží k přesunu pracovní látky z teplého (expanzního) prostoru přes tepelné výměníky a regenerátor do studeného (kompresního) prostoru a naopak. Přemísťovací píst by měl být dostatečně velký, aby zajistil pokud možno co nejlepší izolaci mezi teplou a studenou částí válce. Principiálně největší rozdíl mezi oběma písty je v tom, že pracovní píst musí být dobře utěsněn, aby nedocházelo ke ztrátám pracovního plynu a tím i k ztrátám tlaku. Na druhé straně přemísťovací píst není utěsněn a plyn kolem něj může proudit, tlak před a za ním je tedy stejný, až na tlakové ztráty vlivem aerodynamického tření. Při přesunu pracovního plynu na teplý konec dochází k expanzi a tedy ke vzniku tlaku na pracovní píst. Při přesunu na studený konec plyn ztrácí svůj objem a je stlačen setrvačností pracovního pístu na klikové hřídeli. Nutno dodat, že na rozdíl od α modifikace se β typ vyhnul komplikacím s těsněním a mazáním pístu v teplé části. [2, 10, 16]

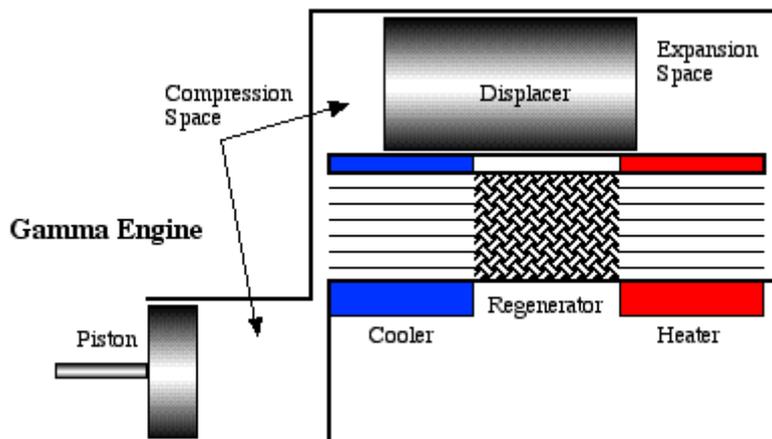


Obr. č. 5.8 – Typ Beta [2]

5.4.3 Typ Gama

V mnohém se tato modifikace podobá β typu. Opět máme dva písty, jeden pracovní a jeden přemísťovací, rozdíl je však v tom, že oba písty jsou uloženy v samostatných válcích (*Obr. č. 5.9*). Výhodou je jednodušší oddělení ohřívané a ochlazované části. Další výhodou je fakt, že pístní tyč přemísťovacího pístu neprochází skrz píst pracovní a její utěsnění je snazší než těsnění celého pístu u α modifikace. Dochází tedy k menším ztrátám

pracovního média. Nevýhodou je nižší kompresní poměr, z mechanického hlediska je však jednodušší. [5, 10, 16]



Obr. č. 5.9 – Typ Gama [5]

5.4.4 Další provedení

Některé modifikace dovolují skládat válce do bloků. Například modifikace β umožňuje spojení více válců s regenerativním přeháněčem na společnou klikovou hřídel, čímž lze dosáhnout vyššího měrného výkonu. Modifikace α umožňuje pro změnu propojit prostor nad pístem jednoho válce přes regenerátor s prostorem pod pístem následujícího válce. Takové uspořádání se označuje jako Riniovo. Nejvhodnější je při propojení tří až šesti válců do kruhu. Řazení do řady není vhodné, jelikož by byla potřeba dlouhý kanál k vedení plynu mezi krajními válci. Mimo klasická pístová provedení existují dále například Rotační Stirlingovy stroje, Kapalinový motor, Dvouválcový Stirlingův motor s Rossovým vahadlem a jiné konfigurace. [1, 10, 20]

5.5 Srovnání Stirlingova motoru s motory s vnitřním spalováním

Hlavním rozdílem mezi oběma typy motorů je princip, na kterém fungují. Stirlingův motor pracuje s uzavřeným cyklem, tedy nedochází k výměně pracovní látky s okolním prostředím. V případě motorů s vnitřním spalováním však dochází ke spalování paliva přímo v pracovním prostoru, jedná se tedy o cyklus otevřený.

Typickým příkladem motoru s vnitřním spalováním je motor vznětový. Na počátku cyklu je do spalovacího prostoru skrze sací ventil nasáván vzduch. Po uzavření sacího ventilu dochází ke kompresi nasátého vzduchu. Do takto stlačeného vzduchu je vstříknuto palivo. Vlivem vysoké teploty vzduchu zahřátého kompresí se palivo samovznítí. Vzniklé spaliny expandují a konají práci. V poslední fázi cyklu jsou spaliny odvedeny do okolí skrz výfukový ventil.

Při porovnání vznětového a Stirlingova motoru stejného výkonu se v případě pořizovacích nákladů dostaneme u Stirlinga na vyšší částky. Nicméně účinnost je o něco vyšší a zároveň náklady pro chod zařízení jsou nižší než u vznětového motoru. Vzniklé náklady na jednotku vyrobené energie jsou tedy srovnatelné. V souvislosti s údržbou je navíc nutné u vznětových motorů zajistit dobré mazání, bez kterého by se motor mohl zadřít. Na rozdíl od Stirlingova motoru jsou vznětové motory hojně využívány v automobilové dopravě, kde je Stirlingův motor nekonkurenceschopný pro malý výkon na jednotku hmotnosti, vyšší cenu a nedostatečnou míru flexibility. Mimo jiné u vznětových motorů jsme schopni dosáhnout vyšších celkových výkonů.

Velký potenciál Stirlingova pohonu se však skrývá v možnostech pracovat s různými zdroji tepla, není tedy závislý na teple vznikajícím ze spalování fosilních paliv. Může tedy využívat například solární energii, atomové zdroje, geotermální energii nebo odpadní teplo. S tím souvisí i ekologičnost a malé množství produkovaných emisí. V souvislosti s využitím odpadního tepla jsou Stirlingovy motory často využívány při kogeneraci. [3, 10, 15]

Stirlingův motor	Vznětový motor
Nízké nároky na údržbu	Vyšší nároky na údržbu
Tichý chod	Hlučný
Nízké emise	Vyšší emise
Pomalejší start	Prakticky okamžitý start
Možnost využití různých zdrojů energie	Využití energie fosilních paliv
Vyžaduje kontinuální provoz	Možnost špičkovat
Nízký střední tlak	Vysoký střední tlak

Tab. č. 5.1 – Srovnání Stirlingových a vznětových motorů

5.6 Hlavní výhody a nevýhody Stirlingova motoru

Výhody:

- Bezpečnost provozu bez rizik fatálních nehod, se kterými se např. potýkaly parní kotle
- Tichost chodu
- Spolehlivost
- Jednoduchost
- Nenáročnost na údržbu a obsluhu
- Možnost využití různých zdrojů energie (obnovitelné zdroje, pevná, kapalná a plynná paliva)
- Vysoce ekologický v kombinaci s vhodnými zdroji energie
- Vhodný pro použití v kogeneračních jednotkách

Nevýhody:

- Menší výkon na jednotku hmotnosti
- Špatně regulovatelný
- Vyžaduje intenzivní chlazení
- Nevhodný pro automobilovou dopravu
- Vyšší pořizovací cena
- Pomalejší náběh motoru

[15, 18]

6. VÝPOČET MOTORU

Pro potřeby běžného rodinného domku jsem navolil základní parametry motoru tak, aby byl schopen svým výkonem částečně pokrýt spotřebu elektrické energie, přičemž přebytečné teplo bude dále využíváno k ohřevu vody. Mnou navolené parametry jsou uvedeny v *Tab. č. 6.1*, tyto parametry jsou nezbytné pro následující výpočty.

Rozměry Stirlingova motoru		
Průměr kompresního prostoru	D_{ZK}	1,0 m
Zdvih kompresního pístu	l_{ZK}	0,20 m
Průměr expanzního prostoru	D_{ZE}	1,0 m
Zdvih expanzního pístu	l_{ZE}	0,20 m
Průměr přemíst'ovacího pístu	D_{PP}	0,996 m
Výška přemíst'ovacího pístu	l_{PP}	0,05 m
Objem škodlivého kompresního prostoru	$V_{ŠK}$	15% V_{ZK}
Objem škodlivého expanzního prostoru	$V_{ŠE}$	15% V_{ZE}
Fázový posuv pístů	φ	90°
Pracovní otáčky	n	100 ot./min.

Tab. č. 6.1 – Rozměry Stirlingova motoru

6.1 Schmidtova teorie

Pro výpočet Stirlingova motoru vypracoval a roku 1871 publikoval na Německém vysokém učení technickém v Praze Gustav Schmidt teorii, která vychází ze základních předpokladů:

- Motor pracuje za ustálených pracovních podmínek
- Množství pracovní látky je stálé (bezztrátový provoz)
- Pracovní látka je ideální plyn
- V celém pracovním prostoru motoru je okamžitý tlak stejný
- Komprese i expanze probíhají izotermicky
- V celém prostoru výměníku má plyn stejnou teplotu
- Teplota v expanzním prostoru je rovna teplotě v ohříváči a je nejvyšší v celém cyklu
- Teplota v kompresním prostoru je rovna teplotě v chladiči a je nejnižší v celém cyklu
- Teplota stěn z jednotlivých dílů, tvořících pracovní prostor motoru je stálá
- Promíšení plynu v pracovních prostorech je dokonalé,
- Změna kompresního i expanzního prostoru se děje podle sinusovky s fázovým posuvem φ (klikový mechanismus)

Schmidtovu teorii je možno aplikovat i na jiné mechanismy, je nutno pouze znát závislost pohybu pístů a tím i změny pracovních prostorů v závislosti na pootočení hřídele.

[10]

6.2 Výpočet celkového okamžitého objemu pracovního válce:

Abychom mohli vypočítat celkový okamžitý objem válce, je třeba nejprve vypočítat okamžité objemy expanzního a kompresního prostoru a objem regenerátoru. [10]

$$V_C = V_E + V_K + V_R \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

V_C – okamžitý objem pracovního válce [m³]

V_E – okamžitý objem expanzního prostoru [m³]

V_K – okamžitý objem kompresního prostoru [m³]

V_R – objem regenerátoru [m³]

Výpočet okamžitého celkového objemu pro úhel natočení kliky o 0°:

$$V_{C0} = V_{E0} + V_{K0} + V_R \text{ [m}^3\text{]} \quad (2)$$

$$V_{C0} = 0,0236 + 0,2592 + 0,0003$$

$$V_{C0} = \mathbf{0,2831 \text{ [m}^3\text{]}}$$

Výsledky celkových okamžitých objemů pro další úhly natočení kliky jsou vypsány v Tab. č. 6.2.

6.2.1 Výpočet okamžitých objemů expanzního a kompresního prostoru:

Pro výpočet okamžitých objemů je nezbytné si prvně vypočítat zdvihový objem kompresního (V_{ZK}) a expanzního (V_{ZE}) prostoru a objemy škodlivých prostorů. [10]

Výpočet zdvihového objemu kompresního prostoru:

$$V_{ZK} = \pi \cdot \frac{D_{ZK}^2}{4} \cdot l_{ZK} \text{ [m}^3\text{]} \quad (3)$$

$$V_{ZK} = \pi \cdot \frac{1^2}{4} \cdot 0,2$$

$$V_{ZK} = \mathbf{0,1571 \text{ [m}^3\text{]}}$$

Výpočet zdvihového objemu expanzního prostoru:

$$V_{ZE} = \pi \cdot \frac{D_{ZE}^2}{4} \cdot l_{ZE} \text{ [m}^3\text{]} \quad (4)$$

$$V_{ZE} = \pi \cdot \frac{1^2}{4} \cdot 0,2$$

$$V_{ZE} = 0,1571 \text{ [m}^3\text{]}$$

Výpočet objemu škodlivého kompresního prostoru:

$$V_{\text{šK}} = V_{ZK} \cdot \frac{15}{100} \text{ [m}^3\text{]} \quad (5)$$

$$V_{\text{šK}} = 0,1571 \cdot \frac{15}{100}$$

$$V_{\text{šK}} = 0,0236 \text{ [m}^3\text{]}$$

Výpočet objemu škodlivého expanzního prostoru:

$$V_{\text{šE}} = V_{ZE} \cdot \frac{15}{100} \text{ [m}^3\text{]} \quad (6)$$

$$V_{\text{šE}} = 0,1571 \cdot \frac{15}{100}$$

$$V_{\text{šE}} = 0,0236 \text{ [m}^3\text{]}$$

Při známých hodnotách zdvihových objemů kompresního (V_{ZK}) a expanzního (V_{ZE}) prostoru a objemů škodlivého kompresního prostoru ($V_{\text{šK}}$ – prakticky objem chladiče), škodlivého expanzního prostoru ($V_{\text{šE}}$ – objem ohřívače) a známé hodnotě fázového posuvu ($\varphi=90^\circ$) obou pístů lze určit okamžité objemy kompresního a expanzního prostoru pro úhel natočení kliky (α). [10]

Výpočet okamžitého objemu kompresního prostoru pro úhel natočení kliky o 0° :

$$V_K = \frac{V_{ZE}}{2} \cdot (1 + \cos \alpha) + \frac{V_{ZK}}{2} \cdot [1 - \cos(\alpha - \varphi)] + V_{\text{šK}} \text{ [m}^3\text{]} \quad (7)$$

$$V_{K0} = \frac{0,1571}{2} \cdot (1 + \cos 0) + \frac{0,1571}{2} \cdot \left[1 - \cos\left(0 - \frac{\pi}{2}\right)\right] + 0,0236$$

$$V_{K0} = 0,2592 \text{ [m}^3\text{]}$$

Výpočet okamžitého objemu expanzního prostoru pro úhel natočení kliky o 0° :

$$V_E = \frac{V_{ZE}}{2} \cdot (1 - \cos \alpha) + V_{\text{šE}} \text{ [m}^3\text{]} \quad (8)$$

$$V_{E0} = \frac{0,1571}{2} \cdot (1 - \cos 0) + 0,0236$$

$$V_{E0} = 0,0236 \text{ [m}^3\text{]}$$

Výsledky okamžitých kompresních a expanzních prostorů pro další úhly natočení kliky jsou vypsány v *Tab. č. 6.2*.

6.2.2 Výpočet objemu regenerátoru:

$$V_R = \pi \cdot \frac{D_{ZK}^2 - D_{PP}^2}{4} \cdot l_{PP} \text{ [m}^3\text{]} \quad (9)$$

$$V_R = \pi \cdot \frac{1^2 - 0,996^2}{4} \cdot 0,05$$

$$V_R = 0,0003 \text{ [m}^3\text{]}$$

6.3 Výpočet hmotnosti plynu pro okamžitý tlak a okamžité objemy:

Na základě předpokladů Schmidty teorie platí pro určení hmotnosti plynu pro okamžitý tlak a okamžité objemy: [10]

$$m = \frac{p}{r} \cdot \left(\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_K}{T_K} \right) \text{ [kg]} \quad (10)$$

m – hmotnost plynu v motoru [kg]

p – okamžitý tlak [Pa]

r – plynová konstanta pro vzduch = 287,1 [J·kg⁻¹·K⁻¹]

V_E – okamžitý objem expanzního prostoru [m³]

V_K – okamžitý objem kompresního prostoru [m³]

V_R – objem regenerátoru [m³]

T_E – teplota v expanzním prostoru [K]

T_K – teplota v kompresním prostoru [K]

T_R – teplota v regenerátoru [K]

$$m = \frac{p}{r} \cdot \left(\frac{V_{E0}}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_{K0}}{T_K} \right) \text{ [kg]} \quad (11)$$

$$m = \frac{101325}{287,1} \cdot \left(\frac{0,0236}{473,15} + \frac{0,0003}{398,15} + \frac{0,2592}{323,15} \right)$$

$$m = \mathbf{0,3009 \text{ [kg]}}$$

6.4 Výpočet okamžitého tlaku v motoru:

Obdobně je možno při známé hodnotě hmotnosti plynu v motoru určit okamžitý tlak:
[10]

$$p = \frac{m \cdot r}{\frac{V_E + V_R + V_K}{T_E + T_R + T_K}} \text{ [Pa]} \quad (12)$$

m – hmotnost plynu v motoru [kg]

r – plynová konstanta pro vzduch = 287,1 [J·kg⁻¹·K⁻¹]

V_E – okamžitý objem expanzního prostoru [m³]

V_K – okamžitý objem kompresního prostoru [m³]

V_R – objem regenerátoru [m³]

T_E – teplota v expanzním prostoru [K]

T_K – teplota v kompresním prostoru [K]

T_R – teplota v regenerátoru [K]

$$p = \frac{m \cdot r}{\frac{V_{E0} + V_R + V_{K0}}{T_E + T_R + T_K}} \text{ [Pa]} \quad (13)$$

$$p_0 = \frac{0,3009 \cdot 287,1}{\frac{0,0236}{473,15} + \frac{0,0003}{398,15} + \frac{0,2592}{323,15}}$$

$$p_0 = \mathbf{101325 \text{ [Pa]}}$$

Výsledky okamžitých tlaků v motoru pro další úhly natočení kliky jsou vypsány v *Tab. č. 6.2.*

α [°]	V_E [m ³]	V_K [m ³]	V_C [m ³]	p [Pa]
0	0,0236	0,2592	0,2831	101325
5	0,0239	0,2520	0,2762	103943
10	0,0248	0,2443	0,2694	106756
15	0,0262	0,2362	0,2627	109761
20	0,0283	0,2276	0,2562	112953

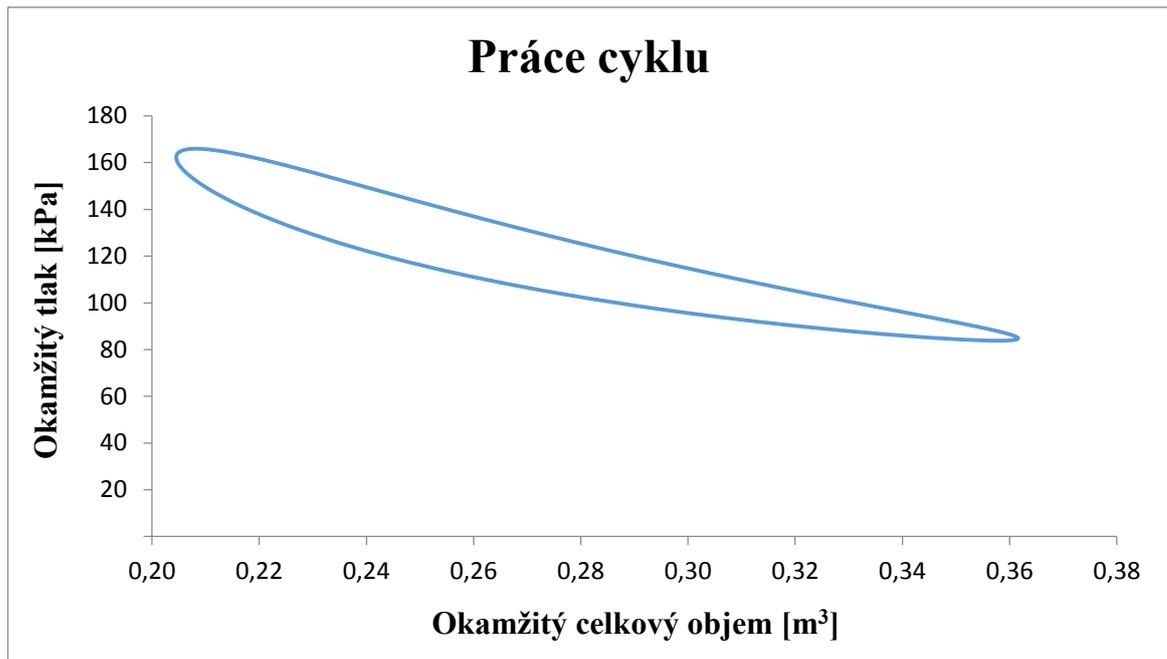
25	0,0309	0,2186	0,2499	116323
30	0,0341	0,2094	0,2438	119859
35	0,0378	0,1999	0,2380	123543
40	0,0419	0,1903	0,2326	127352
45	0,0466	0,1806	0,2275	131255
50	0,0516	0,1710	0,2229	135216
55	0,0571	0,1614	0,2187	139190
60	0,0628	0,1519	0,2150	143124
65	0,0689	0,1427	0,2119	146959
70	0,0752	0,1337	0,2093	150629
75	0,0818	0,1251	0,2072	154064
80	0,0885	0,1169	0,2057	157190
85	0,0953	0,1092	0,2048	159935
90	0,1021	0,1021	0,2045	162229
95	0,1089	0,0956	0,2048	164012
100	0,1157	0,0897	0,2057	165235
105	0,1224	0,0845	0,2072	165861
110	0,1290	0,0800	0,2093	165872
115	0,1353	0,0763	0,2119	165268
120	0,1414	0,0734	0,2150	164066
125	0,1472	0,0713	0,2187	162302
130	0,1526	0,0700	0,2229	160025
135	0,1576	0,0696	0,2275	157296
140	0,1623	0,0700	0,2326	154182
145	0,1664	0,0713	0,2380	150757
150	0,1701	0,0734	0,2438	147094
155	0,1733	0,0763	0,2499	143264
160	0,1759	0,0800	0,2562	139332
165	0,1780	0,0845	0,2627	135359
170	0,1794	0,0897	0,2694	131397
175	0,1803	0,0956	0,2762	127491
180	0,1806	0,1021	0,2831	123678
185	0,1803	0,1092	0,2899	119989
190	0,1794	0,1169	0,2967	116447
195	0,1780	0,1251	0,3034	113071
200	0,1759	0,1337	0,3099	109872
205	0,1733	0,1427	0,3162	106861
210	0,1701	0,1519	0,3223	104041
215	0,1664	0,1614	0,3281	101416

220	0,1623	0,1710	0,3335	98986
225	0,1576	0,1806	0,3386	96749
230	0,1526	0,1903	0,3432	94705
235	0,1472	0,1999	0,3474	92848
240	0,1414	0,2094	0,3511	91176
245	0,1353	0,2186	0,3542	89685
250	0,1290	0,2276	0,3569	88371
255	0,1224	0,2362	0,3589	87230
260	0,1157	0,2443	0,3604	86259
265	0,1089	0,2520	0,3613	85454
270	0,1021	0,2592	0,3616	84813
275	0,0953	0,2657	0,3613	84334
280	0,0885	0,2716	0,3604	84014
285	0,0818	0,2768	0,3589	83853
290	0,0752	0,2813	0,3569	83851
295	0,0689	0,2850	0,3542	84006
300	0,0628	0,2879	0,3511	84320
305	0,0571	0,2900	0,3474	84793
310	0,0516	0,2913	0,3432	85428
315	0,0466	0,2917	0,3386	86227
320	0,0419	0,2913	0,3335	87192
325	0,0378	0,2900	0,3281	88327
330	0,0341	0,2879	0,3223	89635
335	0,0309	0,2850	0,3162	91119
340	0,0283	0,2813	0,3099	92785
345	0,0262	0,2768	0,3034	94635
350	0,0248	0,2716	0,2967	96673
355	0,0239	0,2657	0,2899	98902
360	0,0236	0,2592	0,2831	101325

Tab. č. 6.2 – Výsledné hodnoty pro různé úhly natočení kliky

6.5 Výpočet teoretické vnitřní práce cyklu

Na základě výsledků okamžitých tlaků a okamžitých celkových objemů je možno pro zadané rozměry Stirlingova motoru sestavit pV diagram motoru (*Graf č. 6.1*) a z něj určit teoretickou vnitřní práci cyklu, která je dána velikostí ohraničené plochy v pV diagramu. [10]



Graf č. 6.1 – pV diagram Stirlingova motoru [zdroj: viz autor BP]

$$a_c = \oint p dV_c \quad [J] \quad (14)$$

$$a_c = \sum_{i=0}^{355} \frac{(p_{i+5} + p_i)}{2} \cdot (V_{ci+5} - V_{ci}) \quad [J] \quad (15)$$

$$a_c = 2970 \quad [J]$$

6.6 Výpočet teoretického vnitřního výkonu motoru:

Z vypočtené teoretické vnitřní práce cyklu (a_c) a námi navolených pracovních otáček (n) můžeme vypočítat teoretický vnitřní výkon motoru.

$$P = a_c \cdot \frac{n}{60} \quad [W] \quad (16)$$

$$P = 2970 \cdot \frac{100}{60}$$

$$P = 4950 \quad [W]$$

6.7 Výpočet teoretické účinnosti motoru:

Účinnost motoru je vyjádření dokonalosti motoru a obecně se dá vyjádřit jako poměr využitě a přivedené energie. Jednou z možností, jak účinnost určit je porovnání využitě

práce (práce cyklu) a přivedené práce (expanzní práce motoru). Expanzní práci získáme určením plochy pod křivkou expanze. [10]

Výpočet expanzní práce cyklu:

$$a_E = \sum_{i=90}^{265} \frac{(p_{i+5} + p_i)}{2} \cdot (V_{ci+5} - V_{ci}) \text{ [J]} \quad (17)$$

$$a_E = 19724 \text{ [J]}$$

Výpočet teoretické účinnosti motoru:

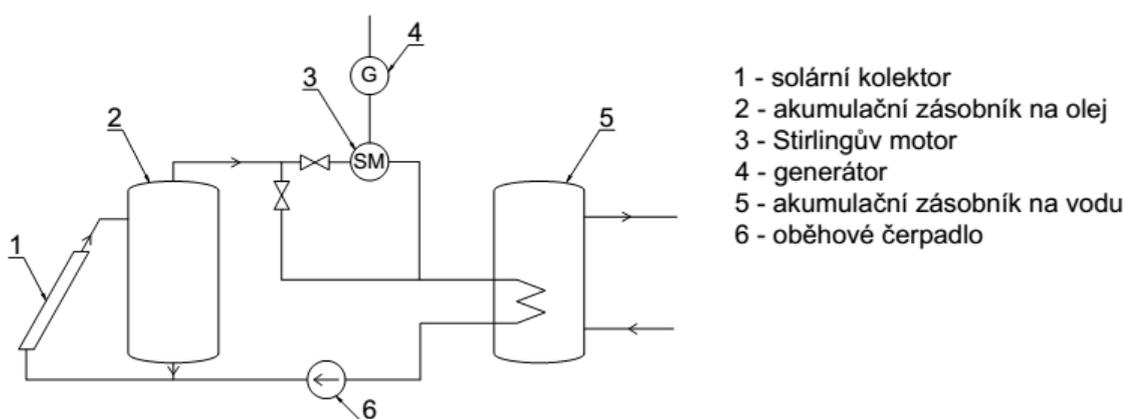
$$\eta = \frac{a_c}{a_E} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (18)$$

$$\eta = \frac{2970}{19724} \cdot 100$$

$$\eta = 15 \text{ [%]}$$

7. NÁVRH SOLÁRNÍHO SYSTÉMU

Jakožto zdroj energie pro mnou navržený motor bude sloužit termo olej ohříváný prostřednictvím koncentračního solárního kolektoru, jedná se tak o ideální řešení, které nikterak nezatěžuje okolní životní prostředí. Zbytkové teplo oleje po opuštění motoru bude dále možno využít k ohřevu vody pro domácnost. V případě teplot příliš nízkých pro využití v motoru bude olej použit pouze k ohřevu vody (*obr. č. 7.1*).



Obr. č. 7.1 – Schéma soustavy pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie
[zdroj: viz autor BP]

7.1 Volba teplotního média

Jako teplotní médium jsem zvolil termo olej, jelikož se zahřívá snadněji než voda a zároveň je ho možné ohřát na vyšší teploty. Mimo jiné se vyznačuje lepšími vlastnostmi v oblasti přestupu tepla, která hraje klíčovou roli při stanovování reálné účinnosti. Konkrétně se jedná o termo olej Heat Transfer Oil S2 společnosti Shell [12].

7.2 Volba solárního kolektoru

K ohřevu oleje bude sloužit koncentrační solární kolektor. Jedná se o typ kolektoru, který je schopen zahřát teplotní médium na požadovanou teplotu s využitím relativně malé plochy ve srovnání s dalšími typy kolektorů, navíc u jiných typů by mohla vyvstat otázka, zda jsou schopny olej ohřát na dostatečně vysoké teploty. Konkrétně jsem zvolil kolektor PolyTrough 1800 [13] společnosti NEP SOLAR, pro který jsem si následujícími výpočty ověřil schopnost zahřát olej za určitých podmínek na dostatečně vysokou teplotu pro chod motoru.

7.3 Výpočet teploty oleje na výstupu z kolektoru

Výpočty jsou provedeny pro hodnotu intenzity slunečního záření $G=1000 \text{ W/m}^2$ a velikost průtoku oleje v kolektoru $\dot{m}=70,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Potřebné parametry pro výpočet kolektoru jsou uvedeny v *Tab. č. 7.1*.

Parametry kolektoru		
Konstanty kolektoru	η_0	0,689
	a_1	$0,36 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
	a_2	$0,0011 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
Plocha apertury	S	$18,45 \text{ m}^2$

Tab. č. 7.1 – parametry kolektoru [13]

7.3.1 Výpočet účinnosti kolektoru:

Výpočet redukováného teplotního rozdílu:

$$A = \frac{t_s - t_e}{G} [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (19)$$

t_s – průměrná teplota kapaliny v kolektoru [°C]

t_e – venkovní teplota = 20 [°C]

$$t_s = \frac{t_{\text{vyst}} + t_{\text{so}}}{2} [\text{°C}] \quad (20)$$

t_{vyst} – výstupní teplota oleje z kolektoru = 270,8 [°C]

t_{so} – teplota studeného oleje = 20 [°C]

$$t_s = \frac{270,8 + 20}{2}$$

$$t_s = 145,4 [\text{°C}]$$

Abychom mohli vypočítat reálnou teplotu oleje na výstupu z kolektoru, je nutno stanovit přibližnou výstupní teplotu, které chceme dosáhnout. Výpočet opakujeme, dokud se hodnota námi zvolená a skutečně vypočtená od sebe neliší s určitou zanedbatelnou chybou. Pro ukázkový výpočet je použita již výsledná výstupní teplota $t_{\text{vyst}} = 270,8 \text{ °C}$.

$$A = \frac{145,4 - 20}{1000}$$

$$A = 0,125 [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

Výpočet účinnosti kolektoru:

$$\eta_K = \eta_0 - a_1 \cdot A - a_2 \cdot A^2 \cdot G [-] \quad (21)$$

$$\eta_K = 0,689 - 0,36 \cdot 0,125 - 0,0011 \cdot 0,125^2 \cdot 1000$$

$$\eta_K = 0,627 [-]$$

7.3.2 Výpočet stagnační teploty kolektoru:

Jedná se o teplotu, na které se solární kolektor ustálí v případě, že není zajištěn odběr tepla.

$$T_{\text{stagn}} = dT_{\text{stagn}} + t_e \text{ [K]} \quad (22)$$

dT_{stagn} – teplotní rozdíl při výpočtu stagnační teploty [K]

$$T_{\text{stagn}} = 644,5 + 20 \text{ [K]}$$

$$T_{\text{stagn}} = \mathbf{664,5 \text{ [K]}}$$

$$\eta_K = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{dT_{\text{stagn}}}{G} - a_2 \cdot \frac{dT_{\text{stagn}}^2}{G} \text{ [-]} \quad (23)$$

$$0 = 0,689 - 0,36 \cdot \frac{dT_{\text{stagn}}}{1000} - 0,0011 \cdot \frac{dT_{\text{stagn}}^2}{1000}$$

$$dT_{\text{stagn}} = \mathbf{644,5 \text{ [K]}}$$

7.3.3 Výpočet tepelného zisku daného kolektoru:

Výpočet měrného tepelného zisku daného kolektoru:

$$q_k = \eta_K \cdot G \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (24)$$

$$q_k = 0,627 \cdot 1000$$

$$q_k = \mathbf{627 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}]}$$

Výpočet tepelného zisku daného kolektoru:

$$Q_k = q_k \cdot S \text{ [W]} \quad (25)$$

$$Q_k = 627 \cdot 18,45$$

$$Q_k = \mathbf{11560 \text{ [W]}}$$

7.3.4 Výpočet výstupní teploty oleje:

Výpočet změny velikosti teploty:

$$dt_{\text{real}} = \frac{Q_k}{\dot{m} \cdot c} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (26)$$

c – měrná tepelná kapacita oleje při 150 °C = 2355 [J·kg⁻¹·K⁻¹] [12]

\dot{m} – velikost průtoku oleje kolektorem = 70,5 kg·h⁻¹·m⁻² = 0,0196 [kg·s⁻¹·m⁻²]

$$dt_{\text{real}} = \frac{11560}{0,0196 \cdot 2355}$$

$$dt_{\text{real}} = 250,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Výpočet výstupní teploty oleje:

$$t_{\text{vyst}} = dt_{\text{real}} + t_{\text{so}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (27)$$

$$t_{\text{vyst}} = 250,8 + 20$$

$$t_{\text{vyst}} = 270,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Je nutné si uvědomit, že intenzita slunečního záření není po celý den 1000 W/m^2 , ale že se během dne mění v závislosti na různých faktorech, které nejsme schopni ovlivnit, proto je nutno i tyto výpočty brát za pouze teoretické.

8. ZÁVĚR

Stirlingův motor představuje zajímavou alternativu k ostatním druhům pohonných jednotek, nikdy se však netěšil takové slávě, jako v minulosti třeba parní stroje nebo v době dnešní motory vznětové a zážehové. Přesto se nedá říci, že by myšlenka Stirlingova motoru byla naprosto zapomenuta, ba naopak se v posledních letech nacházejí nové způsoby uplatnění. Většina projektů využívající Stirlingův motor je zatím pouze v experimentální fázi vývoje, přesto už v dnešní době roste zájem o jeho uplatnění například v souvislosti s kombinovanou výrobou elektrické energie a tepla. Navíc možnost využití v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie mu dává v době, kdy prudce roste zájem o „zelenou energii“, obrovskou výhodu oproti klasickým spalovacím motorům.

Cílem práce bylo vytvoření koncepčního návrhu Stirlingova motoru, který by za využití solární energie mohl sloužit jakožto doplňkový zdroj energie pro běžný rodinný dům. Takové řešení by mělo být maximálně šetrné k životnímu prostředí a zároveň by díky využití solární energie jakožto zdroje tepla pro motor nekladlo další nároky na palivo. Tyto požadavky jsou řešeny využitím termo oleje jakožto teplonosného média, které bude zahříváno v koncentračním solárním kolektoru a následně přiváděno na teplou stranu motoru, přičemž olej na výstupu z motoru bude mít stále dostatečnou teplotu k ohřevu vody pro běžné užití v domácnosti. Jedná se tak o unikátní řešení Stirlingova motoru v kombinaci s obnovitelným zdrojem energie a kombinovanou výrobou energie při zachování si dostatečného výkonu k tomu, aby mohl sloužit jako příležitostný zdroj energie pro běžný rodinný dům.

Mnou vypočtená a navržená soustava počítá s olejem zahřátým na teplotu 270 °C při intenzitě slunečního záření 1000 W/m², což by mělo stačit k dosažení teploty cca 200 °C uvnitř ohřívané části motoru, přičemž druhá strana motoru bude chlazena vodou na teplotu asi 50 °C. Pro tyto teploty při mnou navržených rozměrech bude motor dosahovat teoretického výkonu okolo 5 kW. Při nižších hodnotách intenzity slunečního záření logicky nebude možné zahřát olej na tak vysoké teploty, výkon motoru proto bude nižší. Provoz zařízení bude možný i v době, kdy nebude svítit slunce a to díky možnosti si olej předeheat a uchovat v zásobníku k tomu určenému. V případě, že by zahřátý olej nedosahoval teploty potřebné k dosažení alespoň 60 % mnou vypočteného výkonu, by provoz motoru ztrácel smysl, olej by však stále bylo možné využít k ohřevu vody pro domácnost.

Celý systém je možno regulovat dvěma způsoby. Regulací rychlosti průtoku oleje zahřívaného v koncentračním solárním kolektoru a změnou rychlosti oleje přiváděného na ohřívanou část motoru.

V této práci jsem ověřil, že se jedná o teoreticky proveditelné využití Stirlingova motoru. Poslední otázkou zůstává, jak velká by byla míra využití během roku, což by záviselo na intenzitě slunečního záření v průběhu jednotlivých měsíců. Dá se předpokládat, že během léta bude míra využití větší než v podzimním a zimním období.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Alpha Stirling Engines* [online]. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <<https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html>>.
- [2] *Beta Type Stirling Engines* [online]. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <<https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/beta.html>>.
- [3] BOŘIL, T. *Spalovací motory* [online]. [cit. 24.04.2017] Dostupné z: <http://www.tomasboril.cz/files/variousdocs/spalovaci_motory.html>.
- [4] Co je MIKROKOGENERACE? *MIKROKOGENERACE.CZ* [online]. [cit. 24.04.2017]. Dostupné z: <<http://www.mikrokogenerace.cz/co-je-mikrokogenerace>>
- [5] *Gamma Type Stirling Engines*. [online]. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <<https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/gamma.html>>.
- [6] JAROSLAV, K. a POLESNÝ, B. *Kogenerační jednotky - zřizování a provoz*. Praha: GAS, 2007. ISBN 978-80-7328-151-9.
- [7] Kogenerace – princip, technologie a výhody. *OEnergetice.cz* [online]. [cit. 24.04.2017]. Dostupné z: <<http://oenergetice.cz/technologie/kogenerace-princip-technologie-a-vyhody>>.
- [8] MASTNÝ, P. *Kogenerace* [online]. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/~mastny/vyuka/mmze/prednasky/07_08_pr.pdf>.
- [9] MÍKA, J. *Kogenerace s pístovými motory s vnitřním a vnějším spalováním*, teze docentské habilitační práce. VŠB-TU Ostrava, 2004, ISBN 80-248-0703-3
- [10] MÍKA, J. *Teplovzdušné motory – motory budoucnosti*. Text vypracován v rámci projektu CZ.1.07/1.1.00/08.0010, Ostrava 2013.
- [11] POSPÍŠIL, J. Chladicí oběhy, trigenerace, dálkové chlazení. *tzbinfo* [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <<http://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/7910-chladici-obehy-trigenerace-dalkove-chlazení>>.

- [12] Shell Heat Transfer Oil S2. *Technical Data Sheet* [online]. [cit. 2017-05-08].
Dostupné z:
<<http://s04.static-shell.com/content/dam/shell/static/ind/downloads/lubes-b2b/other-shell-lubricants/heat-transfer-oil.pdf>>.
- [13] Solar Collector Factsheet NEP PolyTrough 1800. *SPF* [online]. [cit. 2017-05-08].
Dostupné z: <<http://www.spf.ch/fileadmin/daten/reportInterface/kollektoren/factsheets/scf1549en.pdf>>.
- [14] *Stirling Engines* [online] [cit. 2016-12-27]. Dostupné z:
<<http://www.civilengineeringhandbook.tk/stirling-engines/1-1.html>>.
- [15] Stirlingův motor – historie, princip a jeho využití při kogeneraci. *ZELENE ZPRÁVY.CZ* [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z:
<<http://www.zelenezpravy.cz/stirlinguv-motor-%E2%80%93-historie-princip-a-jeho-vyuziti-pri-kogeneraci/>>.
- [16] ŠKORPÍK, J. Stirlingův motor. *Transformační technologie* [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <<http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html>>.
- [17] Úvod do mikrokogenerace. *Czech Nature Energy* [online]. [cit. 24.04.2017].
Dostupné z: <<http://www.cne.cz/mikrokogenerace/uvod-do-mikrokogenerace>>.
- [18] *Výhody a problémy teplovzdušných motorů* [online]. [cit. 1.05.2017] Dostupné z:
<<http://stirling.xf.cz/index1.htm>>.
- [19] Výhody kombinované výroby. *Kombinovaná výroba – efektivní a ekologické využití paliva* [online]. [cit. 2016 12-27]. Dostupné z: <<http://www.kombinovana-vyroba.cz/index.php?id=05&1494429317#>>.
- [20] WALKER, G. *Stirling-cycle machines*. Oxford University Press. 1973. 156 s. ISBN 0-19-896112-1.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 4.1 – Schéma kompresorového chladicího oběhu	18
Obr. č. 4.2 – Schéma absorpčního chladicího oběhu	18
Obr. č. 5.1 – Stirlingův teplovzdušný motor podle patentového návrhu Roberta Stirlinga z roku 1816	20
Obr. č. 5.2 – Stirlingův generátor navržený společností Philips	21
Obr. č. 5.3 – Stirlingův motor na sluneční energii	22
Obr. č. 5.4 – Matrice regenerátoru pod mikroskopem a, b - síťová matrice; c- chaoticky uspořádaná matrice	23
Obr. č. 5.5 – Ohřívač z hladkých trubek (motor V4X35)	24
Obr. č. 5.6 – Chladič Stirlingova motoru Tedom 180V1	25
Obr. č. 5.7 – Typ Alfa	26
Obr. č. 5.8 – Typ Beta	27
Obr. č. 5.9 – Typ Gama	28
Obr. č. 7.1 – Schéma soustavy pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie	39

SEZNAM TABULEK

Tab. č. 5.1 – Srovnání Stirlingových a vznětových motorů	29
Tab. č. 6.1 – Rozměry Stirlingova motoru	31
Tab. č. 6.2 – Výsledné hodnoty pro různé úhly natočení kliky	37
Tab. č. 7.1 – parametry kolektoru	40

SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 6.1 – pV diagram Stirlingova motoru	38
---	----