

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Bakalářská práce

Možnosti využití Stirlingova motoru

Jan Čermák

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Čermák

Inženýrství údržby

Název práce

Možnosti využití Stirlingova motoru

Název anglicky

The possibilities of using the Stirling engine

Cíle práce

Cílem práce je teoretický průzkum problematiky Stirlingova motoru a následné zhodnocení potenciálu v kogeneraci a využití odpadního tepla.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl a metodika práce
3. Přehled řešené problematiky
4. Praktická část práce
5. Závěr
6. Seznam použitých zdrojů
7. Přílohy

Doporučený rozsah práce

30 – 50

Klíčová slova

Spotřeba, kogenerace, teplo

Doporučené zdroje informací

- GÜVEN, Metin, Hasan BEDİR a Günay ANLAŞ. Optimization and application of Stirling engine for waste heat recovery from a heavy-duty truck engine. *Energy Conversion and Management* [online]. 2019, 180, 411-424 [cit. 2023-03-30]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2018.10.096
- HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- REDDY, Chirla C. S. a Gade P. RANGAIAH. Waste heat recovery: principles and industrial applications. Beijing;Singapore;Hong Kong;Chennai;Shanghai;Tokyo;Taipei;London;New Jersey;: World Scientific, 2022. ISBN 9811248397;9789811248399
- ZARE, Shahryar, A.R. TAVAKOLPOUR-SALEH, A. AGHAHOSEINI, M.H. SANGDANI a Reza MIRSHEKARI. Design and optimization of Stirling engines using soft computing methods: A review. *Applied Energy* [online]. 2020, 116258. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2020.116258
- 97/02193 Assessment of a multistage underwater vehicle concept using a fossil-fueled Stirling engine. *Fuel and Energy Abstracts* [online]. 1997, 38(3) [cit. 2023-03-30]. ISSN 01406701. Dostupné z: doi:10.1016/S0140-6701(97)88110-6

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 22. 12. 2023

doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 11. 1. 2024

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 23. 01. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Možnosti využití Stirlingova motoru" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 27.3.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Jakobovi Maříkovi, PhD. za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během mého studia.

Možnosti využití Stirlingova motoru

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá problematikou Stirlingova motoru. První část zaznamenává historii vzniku a vývoje motoru, princip oběhu, konstrukční druhy a jejich odlišnosti. Druhá část práce seznamuje s kombinovanou výrobou tepelné a elektrické energie, rozsah použití Stirlingova motoru a konkurenčních technologií v kogeneraci. Ve třetí části jsou uvedeny konkrétní aplikace Stirlingova motoru v oblasti kogenerace, využití odpadního tepla a obnovitelných zdrojů. V poslední části práce posuzuje potenciál motoru v těchto oblastech.

Klíčová slova: Spotřeba, kogenerace, teplo

The possibilities of using the Stirling engine

Abstract

The presented bachelor's thesis deals with the issues of the Stirling engine. The first part outlines the history of the origin and development of the engine, the operating principle, structural types, and their differences. The second part of the thesis introduces combined heat and power generation, the scope of Stirling engine applications, and competitive technologies in cogeneration. The third part provides specific applications of the Stirling engine in cogeneration, the utilization of waste heat, renewable sources. Finally, the thesis assesses the engine's potential in these areas.

Keywords: Consumption, cogeneration, heat

Obsah

1 Úvod.....	12
2 Cíl práce a metodika	13
2.1 Cíl práce	13
2.2 Metodika	13
3 Stirlingův motor	14
3.1 Historie	14
3.2 Princip Stirlingova cyklu.....	16
3.2.1 Ideální cyklus	17
3.2.2 Reverzní cyklus.....	18
3.2.3 Cyklus tepelného čerpadla	19
3.2.4 Reálný cyklus.....	20
3.3 Druhy konstrukce	21
3.3.1 Alfa	21
3.3.2 Beta	22
3.3.3 Gama	22
3.3.4 S volným pístem (FPSE).....	23
4 Kogenerace.....	24
4.1 Rozdělení kogenerace	27
4.1.1 Podle měřítka a kapacity	27
4.1.2 Podle způsobu přeměny	28
4.1.3 Tepelné čerpadlo	29
4.1.4 Trigenerace	30
5 Konkrétní aplikace.....	31
5.1 Kogenerace se Stirlingovým motorem.....	31
5.1.1 Solo Stirling 161	32
5.1.2 Stirlingův motor firmy TEDOM.....	32
5.1.3 Whispergen	34
5.1.4 FPSE v mikrokogeneračních jednotkách	34
5.1.5 Průmyslová kogenerace SE	37
5.1.6 Solární energie	38
5.2 Motorová vozidla	40
5.3 Kryochladiče	46
6 Závěr.....	47
7 Seznam použitých zdrojů	48
8 Přílohy	51

Seznam obrázků

Obrázek 1: Výkres prvního Stirlingova motoru z patentu vydaného 1816 [2].....	14
Obrázek 2: SE jako pohonná jednotka ve Fordu Torino 1973 [4].....	15
Obrázek 3: Pracovní fáze Stirlingova motoru (upraveno) [5]	16
Obrázek 4: p-V a T-s diagram ideálního oběhu [1]	17
Obrázek 5: Reverzní cyklus pro pohon a chladicí zařízení [6].....	18
Obrázek 6: Porovnání diagramů a) tepelného čerpadla, b) chladicího zařízení [6].....	19
Obrázek 7: Reálný cyklus [8]	20
Obrázek 8: Alfa modifikace [10]	21
Obrázek 9: Beta modifikace [10].....	22
Obrázek 10: Gama modifikace [10].....	22
Obrázek 11: Stirlingův motor s volným pístem (upraveno) [12].....	23
Obrázek 12: Příklad rozdělené a kogenerační výroby [15]	24
Obrázek 13: Schéma tepelného čerpadla [15]	29
Obrázek 14: Řez motorem Solo Stirling 161 [5]	32
Obrázek 15: Jednotka Solo Stirling 161 [5].....	32
Obrázek 16: Stirlingův motor firmy TEDOM [22]	33
Obrázek 17: Motor Whispergen (upraveno) [5]	34
Obrázek 18: FPSE firmy Microgen [24].....	35
Obrázek 20: Pellematic Condens_e [25]	36
Obrázek 19: WoodGen S-Tronic [24]	36
Obrázek 21: Motor a jednotka FleXgen [26].....	37
Obrázek 22: Schéma kogeneračního systému na biomasu (upraveno) [5].....	37
Obrázek 23: Stirlingův motor s parabolickým zrcadlem (upraveno) [29].....	39
Obrázek 24: Energetické ztráty ve spalovacím motoru (upraveno) [32].....	40
Obrázek 25: Závislost účinností cyklů na teplotě [30]	42
Obrázek 26: Závislost výkonů cyklů na teplotě [30].....	43
Obrázek 27: Stirlingův motor v systému EGR [32]	44
Obrázek 28: Kryochladič CryoTel MT [35]	46

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti druhů KJ dle pohonné jednotky (upraveno) [14][16].....	26
Tabulka 2: Srovnání pohonných jednotek mikrokogenerace (upraveno) [21]	31
Tabulka 3: Parametry motoru TEDOM (upraveno) [22].....	33
Tabulka 4: Parametry motoru Microgen (upraveno) [24]	35
Tabulka 5: Parametry solárního SE firmy SES (upraveno) [29]	39
Tabulka 6: Emise APU (upraveno) [34]	45
Tabulka 7: Parametry CryoTel MT (upraveno) [35]	46

Seznam použitých zkratek

SE	Stirling engine (Stirlingův motor)
FPSE	Free piston Stirling engine (Stirlingův motor s volným pístem)
COP	Coefficient of performance (Topný faktor)
CHP	Combinated heat and power (Kogenerace)
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
PEZ	Primární energetické zdroje
CZT	Centralizované zásobování teplem
EGR	Exhaust gas recirculation (Recirkulace výfukových plynů)
ORC	Organic Rankine cycle (Organický Rankinův cyklus)
IBC	Inverted Brayton cycle (Inverzní Braytonův cyklus)
AC	Alternating current (Střídavý proud)
APU	Auxiliary power unit (Pomocná motorová jednotka)
DPF	Diesel particulate filter (Filtr pevných částic)

Seznam veličin

Symbol	Veličina	Jednotka
V	Objem	m ³
S	Entropie	J/K
η	Účinnost	%
P	Výkon	kW, hp
E	Elektrický výkon	kW _e
Q	Tepelný výkon	kW _t
T	Teplota	°C
σ	Teplárenský modul	-
Lp	Hlučnost	dBA
-	Emise	kg/MWh
U	Napětí	V
f	Frekvence	Hz
m	Hmotnost	kg
p	Tlak	MPa
ε	Topný faktor	-

1 Úvod

V současné době, kdy je kladen důraz na snižování emisí, ekologické zátěže a na obnovitelnost zdrojů, se stále hledají nové technologie a jejich zdokonalení v oblasti energetiky a automobilového průmyslu. Na rozdíl od osobní autodopravy, ve které vývoj směřuje hlavně k elektromobilitě, těžká nákladní autodoprava hledá i jiná řešení, vedoucí především k úspoře paliva nebo snížení produkce emisních plynů, a to prostřednictvím využití odpadního tepla ve výfukových plynech.

V energetice se rozmáhá snaha o decentralizované systémy, čímž se zvyšuje nezávislost objektů, nedochází ke ztrátám při distribuci a pro koncové zákazníky to přináší stabilnější ceny energií. Lokální tepelné systémy nejsou ničím novým a jsou zaběhlé v mnoha domácnostech. Trendem dnešní doby jsou elektrické lokální systémy a v podobě fotovoltaických elektráren se začaly hojně instalovat až v posledních dvaceti letech. Kombinovaná výroba tepla a elektřiny zvaná kogenerace, je historicky využívána převážně pro průmyslové objekty nebo v komerčních aplikacích. Z důvodů udržitelnosti energetických zdrojů a ekonomické efektivity, získává v posledních letech větší popularitu také v domácnostech a menších objektech. Vhodnými hnacími mechanismy jsou plynové turbíny, Stirlingovy motory, palivové články nebo spalovací motory.

Díky těmto skutečnostem se vkládají velké naděje do Stirlingova motoru, který po dlouholetém vývoji a úpravách překonal mnoho nedostatků a konečně získává své uplatnění. Ačkoliv je konstrukce Stirlingova motoru oproti klasickým spalovacím motorům nebo turbínám složitější a nákladnější na výrobu, díky vnějšímu spalování a nízké údržbě se v některých aplikacích jeví jako nejlepší řešení. Stirlingův motor také přináší značnou flexibilitu, pokud jde o druh paliva a kombinaci s jinými technologiemi.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem práce je představit problematiku Stirlingova motoru, princip činnosti, historii vývoje a konstrukční typy. Dále uvést konkrétní příklady využití a porovnat je s ostatními technologiemi v oblasti kogenerace a využití odpadního tepla. Také vyhodnotit potenciál Stirlingova motoru v systémech nákladních automobilů pro recirkulaci odpadního tepla výfukových plynů.

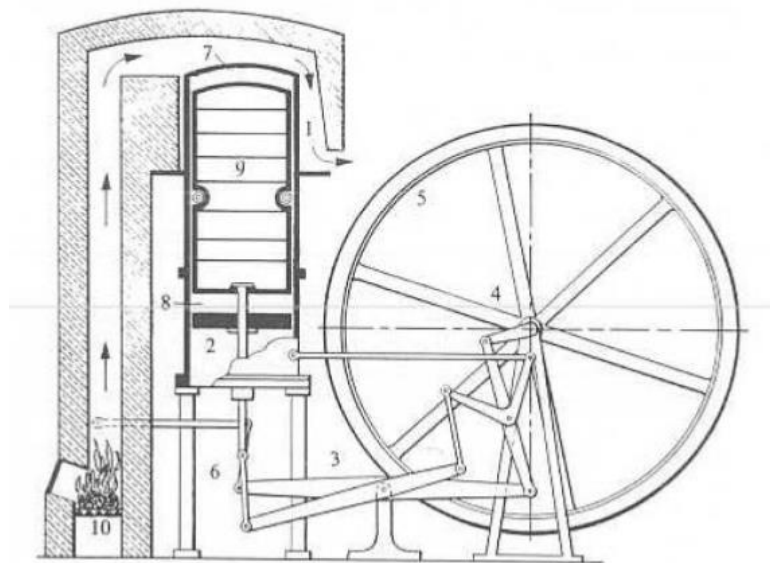
2.2 Metodika

Bakalářská práce je psána formou rešerše s využitím dostupných zdrojů a odborné literatury. Na základě shromážděných informací, výsledků analýz a názorů odborníků, je sepsána teorie Stirlingova motoru, způsoby uplatnění, jeho výhody, nevýhody a potenciál v blízké budoucnosti.

3 Stirlingův motor

3.1 Historie

Stirlingův motor byl patentován 27. 9. 1816 skotským pastorem a vynálezcem Robertem Stirlingem, a to osm let před vydáním odborné práce Sadi Carnota „Úvahy o hybné síle ohně a o strojích vhodných k vyvíjení této síly“. Sadi Carnot byl zakladatel termodynamiky a popsal cyklus ideálního stroje, který se skládá ze dvou izotermických a dvou adiabatických dějů, dnes známý jako Carnotův cyklus. Ačkoliv v této době nebyla popsána teorie tepelných motorů ani termodynamické zákony, Stirling si ve svém patentu plně uvědomoval podmínky k efektivní přeměně tepla na mechanickou práci. Dva roky po vydání patentu postavil motor s výkonem 2 hp (1,47 kW) na čerpání vody z lomu. V roce 1827 a 1840 získal Robert Stirling ještě dva patenty na pokročilejší konstrukce motoru. V 19. století se Stirlingův motor využíval jako vodní čerpadlo nebo jako pohon malých strojů, např. šicí stroje, mixéry, ventilátory či vrtačky. Oproti parnímu stroji, který měl účinnost 5-15 % dosahoval Stirlingův motor až 40 % účinnosti. Jeho výhody však spočívaly i v tichém chodu, spolehlivosti a bezpečnosti. [1][2]



Obrázek 1: Výkres prvního Stirlingova motoru z patentu vydaného 1816 [2]

Největšího prodejního rozmachu Stirlingova motoru dosáhl švédský vynálezce John Ericsson, který svými konstrukcemi předběhl dobu. Jeho konstrukce byly prodávány v mnoha velikostních variacích. Postavil také Stirlingův motor poháněný pouze sluneční energií. V roce 1850 konstruoval čtyřválcový motor o výkonu 300 kW s průměrem jednoho válce 4,5 m. Tento motor spotřeboval oproti podobně velkému parnímu stroji poloviční množství paliva. Omezení Stirlingova motoru spočívalo v metalurgických možnostech doby, a tak byl vytlačen elektromotory a spalovacími motory. [2] Zpět se vrátil až v roce 1938, kdy se společnost Philips rozhodla zahájit vývoj motoru jako nízko-energetický

přenosný generátor pro rádia s výkonem 200 W. Stirlingův motor, na rozdíl od spalovacího motoru, nemá zapalovací svíčky, které by rušily rádiové vlny a může být poháněn různými druhy paliva (lampový olej, kerosin). Při výzkumu se zjistilo, že plyny, jako helium nebo vodík, mají díky nižší molekulové hmotnosti lepší vlastnosti pro zvýšení účinnosti a výkonu motoru. [1]

Rozvoj technologie výroby materiálů v polovině 20. století umožnil další posun Stirlingova motoru. Kvůli ropné krizi se hledala alternativní paliva k naftě a benzínu. Za použití licence Philips se ve společnosti United Stirling spustil vývoj čtyřválcového motoru pro městský autobus s výkonem 200 hp (149kW). Motor měl střední tlak 22 MPa a tak společnost vyvinula motor s označením 4-65, který dosahoval stejného výkonu při tlaku 15 MPa a polovičních otáčkách. Nicméně po výpočtech nákladů sériové výroby se zjistilo, že složitá konstrukce by zvýšila cenu 2,5krát oproti stejně výkonným spalovacím motorům. Další vývoj pohonné jednotky, tentokrát pro automobil, se prováděl na vozidlech společnosti Ford. Kvůli pomalé změně výkonu bylo zapotřebí používat automatickou převodovku. Finální verze V4X35 měla čtyři dvojčinné písty, výkon 62 kW a pracovním plynem byl vodík. Splnila veškeré jízdní zkoušky i požadavky na akceleraci, překvapila komfortem a tichostí jízdy. Problémem však bylo startování, které za běžných podmínek trvalo 30 sekund. Motor byl také instalován do závodní karoserie Porche Bergspyder a automobil dosáhl rychlosti $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, což je rychlostní rekord osobního automobilu poháněného Stirlingovým motorem. Z důvodu veliké rivality v automobilovém průmyslu nebyla sériová výroba nikdy zahájena. [3][4]

Po neúspěšných pokusech Fordu a United Stirling aplikovat Stirlingův motor do vozidla jako pohonnou jednotku, se od tohoto způsobu použití definitivně upustilo a začal se komerčně používat ve stacionárních aplikacích. Největší uplatnění má v kogeneraci, obnovitelných zdrojích nebo astronautice. Reverzní cyklus funguje jako chladicí zařízení a využívá se ke zkapalnění vzduchu, separaci nebo čištění plynů.

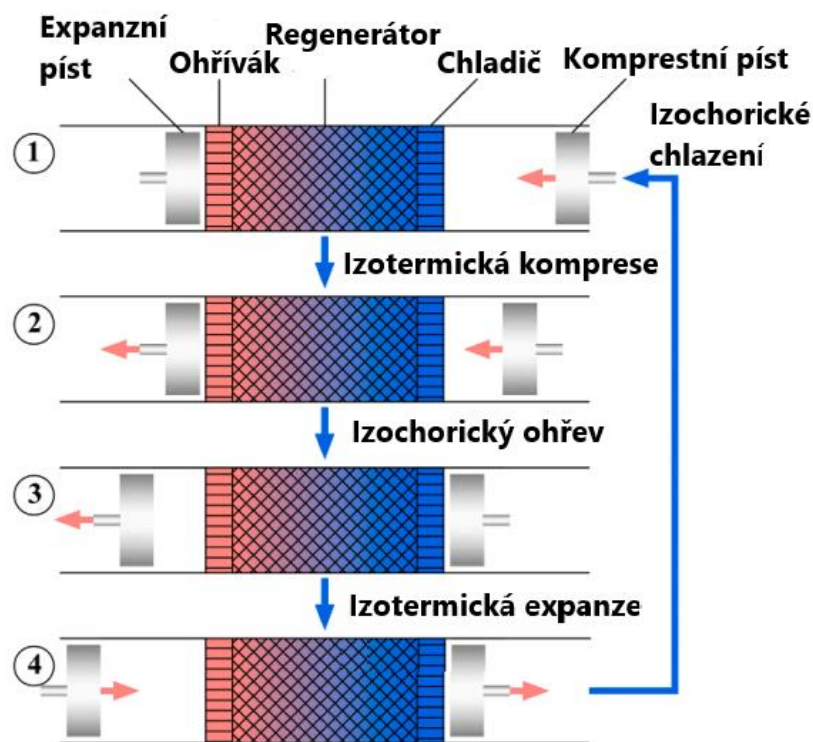


Obrázek 2: SE jako pohonná jednotka ve Fordu Torino 1973 [4]

3.2 Princip Stirlingova cyklu

Stirlingův cyklus je uzavřený termodynamický oběh, který pracuje na základě změny objemu plynu vlivem teplotních rozdílů (nejčastěji hélia, vodíku nebo vzduchu). Válec obsahuje regenerátor a dva protichůdné písty, které jsou kinematicky spojeny tak, aby docházelo k požadovanému zpoždění. Pracovní médium je přemísťováno mezi horkou a chladnou komorou přes regenerátor, který uchovává teplo. To by jinak uniklo do prostoru.

Při zahřátí plynu dochází k expanzi, ta se využije k mechanické práci expanzního pístu, která se přenáší přes mechanismus a udává do pohybu kompresní píst. Tím se přemístí pracovní médium přes regenerátor do chladné komory. Vlivem snižování teploty plynu nastává komprese. Kompresní píst předává energii expanznímu pístu a ochlazený plyn je přemístěn zpět do horké komory. Cyklus je uzavřen. [3][1]



Obrázek 3: Pracovní fáze Stirlingova motoru (upraveno) [5]

3.2.1 Ideální cyklus

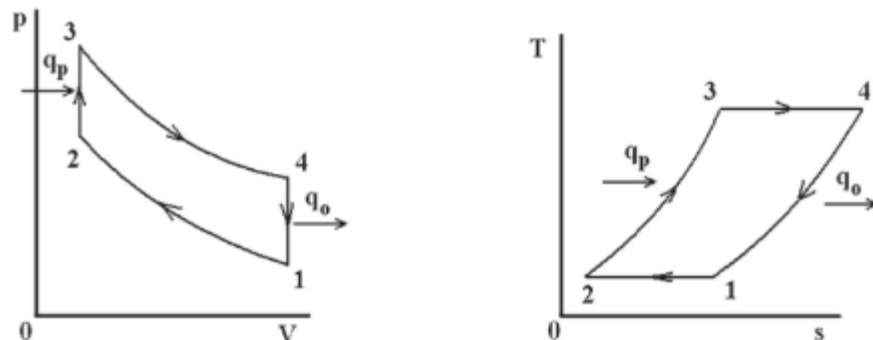
Ideální cyklus slouží ke zjednodušení reálného cyklu a k pochopení vnitřních termodynamických dějů. Skládá se ze dvou izotermických a dvou izochorických změn. Tento cyklus počítá s rovnicemi ideálního plynu. To je takový plyn, jehož částice na sebe vzájemně nepůsobí a plyn je ideálně stlačitelný. V reálných plynech na sebe částice vždy působí, což se projevuje tím, že plyn kapalní a následně tuhne. Dále nejsou započítány ani konstrukční nedostatky jako je mechanické tření, únik pracovního média, prostup tepla válcem či pístem nebo omezená tepelná kapacita regenerátoru. V ideálním cyklu má regenerátor 100% účinnost, termická účinnost celého ideálního Stirlingova oběhu je tedy stejná jako termická účinnost Carnotova cyklu definována vztahem:

$$\eta = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} \quad [-]$$

Kde: η – celková účinnost cyklu
 T_{max} – maximální teplota
 T_{min} – minimální teplota

Jednotlivé fáze cyklu:

- Cyklus začíná v bodě 1, při maximálním objemu, izotermickou kompresí 1-2. Plyn je stlačován za minimální teploty T_{min} .
- Izochorická změna 2-3 probíhá za minimálního objemu a plyn je ohříván na maximální teplotu T_{max} . Při této změně se nekoná práce, narůstá entropie a vnitřní energie přiváděním tepla.
- Následuje izotermická expanze 3-4, při této změně plyn expanduje na maximální objem. Koná se práce a narůstá entropie.
- Aby se cyklus uzavřel, musí se během izochorické změny 4-1 odvést teplo. [3][1]



Obrázek 4: p-V a T-s diagram ideálního oběhu [1]

3.2.2 Reverzní cyklus

Ideální reverzní cyklus pro chlazení lze popsat stejně jako ideální cyklus pro pohon. Celý cyklus probíhá opačným směrem, takže teplo není dodáváno, ale naopak odebíráno, čímž se produkuje tepelná práce ve formě ochlazování. Aby byly splněny podmínky zákonů termomechaniky, musí být dodávána mechanická práce v podobě otáčení hřídele (v případě konstrukce s volným pístem viz. kap. 3.1.7, se jedná o kmitavý pohyb vybuzeň například cívku). [6]

Na Obrázku 4 můžeme vidět srovnání pohonu a chladicího zařízení. Izotermická komprese (1-2) je stejná pro motor i pro chladicí zařízení, ale místo izochorického ohřevu (2-3) nastává izochorické ochlazení (2-3'). U obou oběhů následuje izotermická expanze, u motoru se v této fázi (3-4) koná práce, u chladicího zařízení je potřeba ve změně (3'-4') práci dodávat. V poslední fázi pohonu (4-1) se odevzdává teplo a v chladicím zařízení (4'-1) se teplo naopak přivádí.[7]

Výkon chladicího zařízení určuje koeficient COP (*coefficient of performance*), neboli topný faktor ε , který lze vyjádřit následovně:

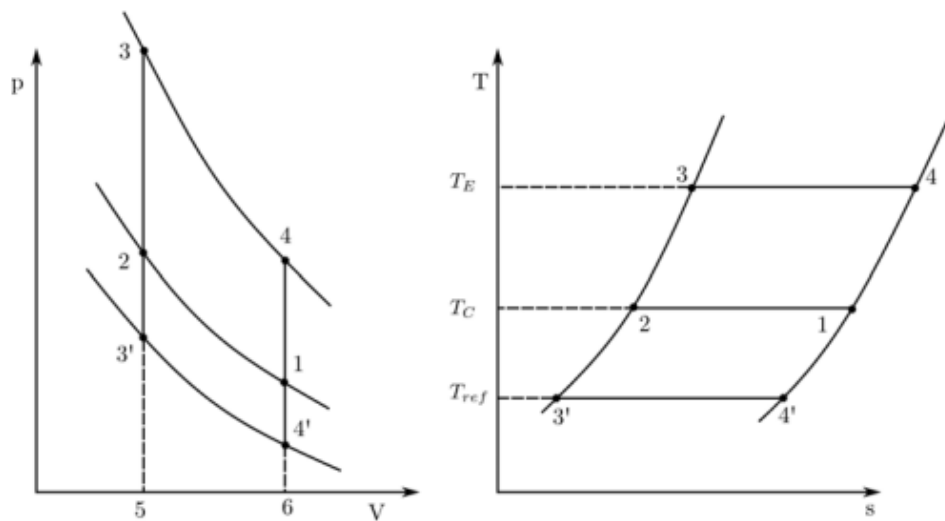
$$COP = \frac{\text{odvedené teplo}}{\text{vykonaná práce}} = \frac{T_{ref}}{T_C - T_{ref}} \quad [-]$$

Kde: COP – coefficient of performance

T_C – teplota komprese

T_{ref} – referenční teplota

T_E – teplota expanze (v grafu)



Obrázek 5: Reverzní cyklus pro pohon a chladicí zařízení [6]

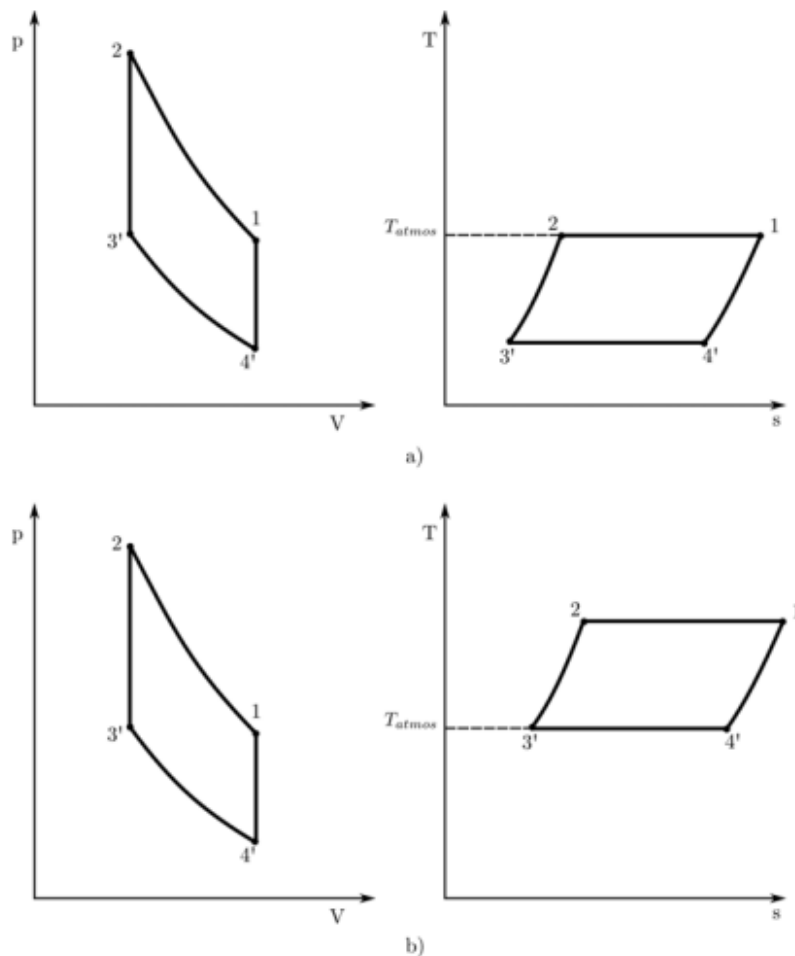
3.2.3 Cyklus tepelného čerpadla

Stirlingův cyklus v tepelném čerpadle pracuje stejně jako výše popsany cyklus pro chladicí zařízení. V tepelném čerpadle jsou však teploty T_C a T_{ref} nižší, jak můžeme vidět na Obrázku 5. U tepelného čerpadla je teplota T_C využita k vytápění pomocí pracovního média, které má vyšší tlak než atmosférický. Vstupní médium, což bývá venkovní vzduch, má atmosférický tlak a teplotu T_{ref} . Teplota T_C v motoru i v chladicím zařízení je teplota chladicího média proudícího v systému za atmosférického tlaku. Stejně jako chladicímu zařízení, je potřeba tepelnému čerpadlu dodávat mechanickou práci. [7]

Rozdíl mezi chladicím zařízením a tepelným čerpadlem spočívá v tom, že užitečným produktem tepelného čerpadla je tepelná energie o teplotě T_C , takže převádí nižší hodnotu teploty na vyšší. Topný faktor lze vypočítat vztahem:

$$COP = \frac{T_C}{T_C - T_{ref}} \quad [-]$$

Jak si můžeme všimnout, topný faktor tepelného čerpadla je převrácenou hodnotou tepelné účinnosti, na rozdíl od tepelného faktoru chladicího zařízení.



Obrázek 6: Porovnání diagramů a) tepelného čerpadla, b) chladicího zařízení [6]

3.2.4 Reálný cyklus

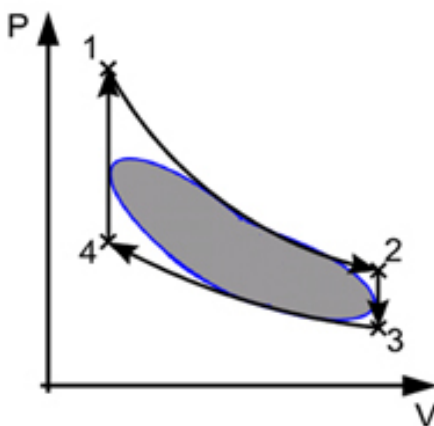
Reálný cyklus počítá se všemi činiteli konstrukce (mechanické a hydraulické tření, únik média, kinematické vlastnosti, aerodynamický odpor), vlastnostmi média a materiálů (turbulentní proudění plynu, nedokonalý prostup tepla). Kvůli kinematickým vazbám konstrukce se válce pohybují spojitě a hrany diagramů ideálního cyklu jsou vyhlazeny elipsou, jak je zobrazeno na obrázku 6. [8]

V reálném cyklu probíhá místo izotermické komprese a expanze spíše adiabatická změna, tedy bez tepelné výměny, protože přestup tepla probíhá v krátkém čase a probíhá nedokonale.

Dalším velmi důležitým faktorem je mrtvý prostor. Je to část objemu válce, která se aktivně nepodílí na kompresi nebo expanzi a nedochází zde k výměně tepla. Tento prostor může vzniknout v několika částech motoru, například v potrubí nebo regenerátoru. Regenerátor je zdrojem mrtvého prostoru, jestliže pracovní plyn není plně přemístěn mezi studenou a horkou komorou. Pro co nejvyšší účinnost a výkon motoru je potřeba mrtvý prostor co nejvíce minimalizovat. [2]

Účinnost motoru také velmi ovlivňuje regenerátor samotný. Tomu se při změně 4-1 odevzdává teplo pracovního média a opět se přivádí při změně 2-3. Proto musí být vyrobený z materiálu s vysokou tepelnou kapacitou, jako jsou keramické materiály nebo kovová síť. Matrice regenerátoru je nejčastěji tvořena spečenými dráty o průměru do 0,1 mm, ale může se skládat i z tenkých plechů. [3]

Ideální Stirlingův cyklus znázorňuje střídavé ohřívání a chlazení v jednom prostoru. Takový motor by sice bylo možné postavit, ale docházelo by ke stresu materiálu a ke ztrátám způsobeným střídavým ohřevem a chlazením kovových stěn. Proto jsou u skutečných motorů studené a horké komory odděleny a pracovní médium je mezi nimi přemísťováno. [8][9]



Obrázek 7: Reálný cyklus [8]

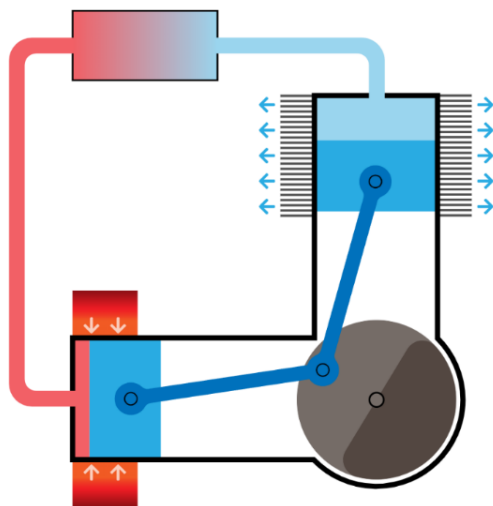
3.3 Druhy konstrukce

Všechny typy konstrukcí, které se postupem času vyvíjely a prošly mnoha úpravami, lze rozdělit do tří základních modifikací alfa (α), beta (β) a gama (γ). Zvláštní variantou je konstrukce s volným pístem, viz kap. 3.1.5. Tyto modifikace se liší v umístění pístů, jejich funkci a v počtu válců. Dalším rozdělením jsou motory jednočinné, dvojčinné a hybridní, které se neliší ve funkci, ale v počtu pístů, konstrukčním uspořádání a kombinaci různých technologií. V praxi se druhy konstrukcí často kombinují, proto se může stát, že stroj nelze jednoznačně zařadit do konkrétní varianty. Všechna tato rozdělení mají své výhody, nevýhody a omezení, proto je každý typ vhodný pro různou oblast použití. [9]

3.3.1 Alfa

Vyznačuje se tím, že je mezi válci umístěn ohřívák, regenerátor a chladič. Tato modifikace má dva samostatné písty v propojených válcích. Jeden válec je horký, označovaný jako expanzní, a druhý studený, označovaný jako kompresní. Oba písty mají přemísťovací i pracovní funkci. Nevýhodou je mazání a utěsnění především horkého pístu při vysokých teplotách. Při vhodném uspořádání válců do vidlice pod úhlem 90° se jedná o nejjednodušší konstrukci, protože písty je možné kinematicky spojit v jedné vazbě na hřídeli. [3]

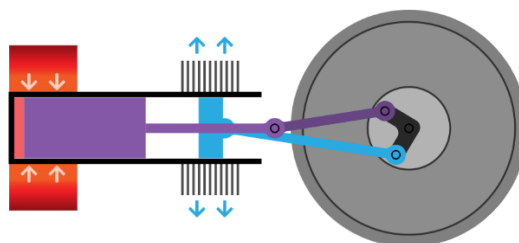
Alfa modifikaci lze vyrobit i ve dvojčinném provedení, které obsahuje minimálně čtyři válce. V takovém provedení je studený prostor válce spojený s horkým prostorem sousedního válce. Čímž se snižuje měrná hmotnost na jednotku výkonu. Proto je tato varianta nejvíce rozšířena ve vysokovýkonných aplikacích. [1]



Obrázek 8: Alfa modifikace [10]

3.3.2 Beta

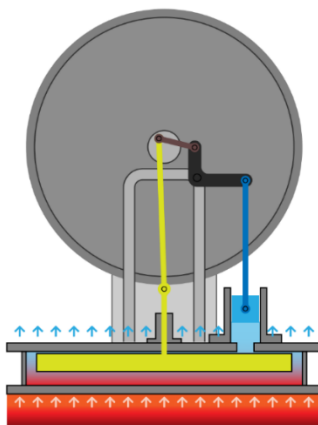
Beta modifikace obsahuje pouze jeden válec, ve kterém se pohybují dva písty. U této konstrukce se jeden píst označuje jako přemísťovací, někdy také přenašeč, protože má funkci pouze přenášet pracovní medium mezi horkým a studeným prostorem. Druhý píst koná práci a je označován jako pracovní. Tuto konstrukci si nechal patentovat vynálezce Robert Stirling. Pracovní prostor lze maximálně využít, protože se zdvihy obou pístů mohou překrývat. V souvislosti s přítomností pouze jednoho válce a efektivností využití pracovního prostoru lze snížit hmotnost a rozměry stroje. V beta modifikaci nastávají komplikace u těsnění pístní tyče přemísťovacího pístu, která prochází dutou pístní tyčí pracovního pístu. Další nevýhodou je, že přepouštěcí píst je ve válci usazený s dostatečnou vůlí a vlivem jeho hmotnosti může dojít k většímu opotřebení válce nebo uložení pístnice v duté pístnici pracovního válce. Proto je vhodné použití β -modifikace ve vertikální poloze. [2]



Obrázek 9: Beta modifikace [10]

3.3.3 Gama

Konfigurace gama je podobná beta konfiguraci, to znamená že má také pracovní a přemísťovací píst, ale každý píst je umístěn ve vlastním válci. Díky tomu je možné snadno docílit těsnosti pracovního prostoru i snazšího mechanismu. V této modifikaci je objem chladného prostoru vždy nenulový, což značně snižuje účinnost motoru. Proto je modifikace gama omezena na modely o výkonu v řádech stovek wattů a na malé motory s nízkým teplotním rozdílem. [10][1]

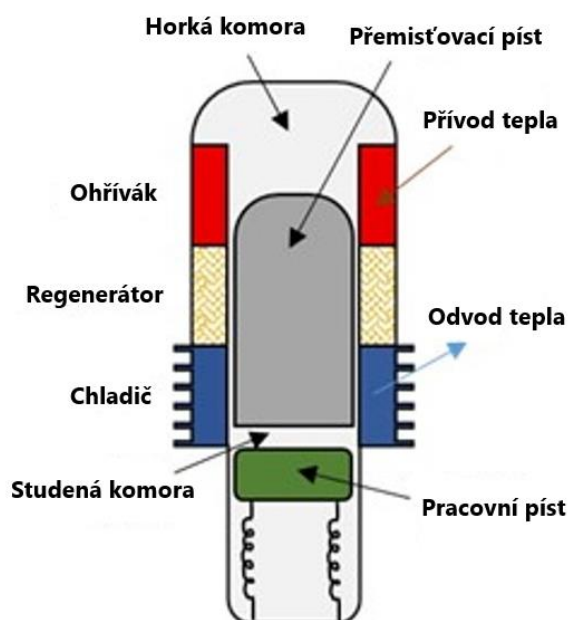


Obrázek 10: Gama modifikace [10]

3.3.4 S volným pístem (FPSE)

Poměrně revoluční řešení je modifikace s volným pístem. Tuto koncepci vynalezl profesor William Beale v roce 1964. Aby se mohl naplno věnovat své technologii, založil v roce 1974 firmu s názvem Sunpower. Hlavním cílem bylo vytvořit řešení pro domy běžných obyvatel. Tento cíl se mu nepodařilo splnit, ale po vývoji nutných technologií jako je lineární alternátor, simulační systémy či vysokoteplotní kovy, našel FPSE jeho firmy uplatnění v odvětví kryochladičů. [11]

Stirlingův motor s volným pístem vychází z modifikace beta, ale písty nemají žádné mechanické spojení. To má kladný vliv na snižování hmotnosti a rozměrů stroje. Další výhodou je snazší utěsnění pracovního prostoru a odpadá celý problém s konstrukcí pístních tyčí. Kliková hřídel je nahrazena vnitřním pružinovým tlumičem pod pracovním pístem nebo je možné k tlumení využít samotné pracovní médium jako pneumatický tlumič. Díky absenci kinematického mechanismu je motor méně radiálně namáhán a zvyšuje se jeho životnost. FPSE je vhodné použít například v nepřístupných místech, protože už při nízkých teplotních rozdílech začínají písty oscilovat. Tím pádem není zapotřebí použít startovací zařízení. Výstupní výkon lze odebírat z lineárního alternátoru. V takovém případě bývá k pracovnímu pístu připevněný permanentní magnet, který svým oscilujícím pohybem přes budící cívku vytváří elektřinu. FPSE je schopen pracovat jako motor i chladič zároveň v konstrukci se dvěma přemísťovacími písty. [12]



Obrázek 11: Stirlingův motor s volným pístem (upraveno) [12]

4 Kogenerace

Kogenerace znamená současná výroba více druhů energie, nejčastěji elektřiny a tepla. Tato definice není přesná, protože při výrobě elektřiny vzniká vždy i teplo. V kogeneračních jednotkách se ale toto teplo maximálně využívá. Společnou produkcí tepla a elektřiny se dosahuje vyšší účinnosti. V odborné literatuře se můžeme setkat s termínem KVET (Kombinovaná výroba elektřiny a tepla).

Tepelnou energii lze obtížně transformovat na kvalitnější formy energie a má užší rozsah využití. Její získání z primárních energetických zdrojů (PEZ), v podobě ohřevu vody, je ale levné a technicky jednoduché, proto je tato výroba ekonomicky výhodná. Pro výrobu tepelné energie lze prostřednictvím spaloven využít i palivo určené k likvidaci, například komunální odpad. [13]

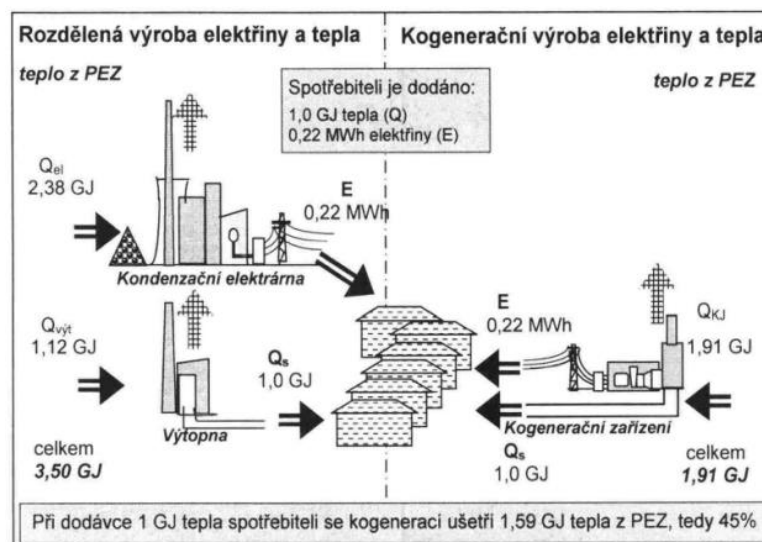
Elektrická energie je nejkvalitnější druh energie a je možné ji všestranně přeměňovat na jiné formy energií. Vyrábí se převážně transformací tepelné energie, ale tento proces je velmi nákladný a vyžaduje složitou energetickou infrastrukturu. Při rozdělené výrobě je zbytková část tepelné energie bez užitku odvedena. [13]

Paroplynové elektrárny, které spalují zemní plyn nebo topný olej, mají účinnost kolem 55 %. Protože Česká republika nemá vlastní ložiska, zvyšuje se tím nestabilita a závislost na ostatních zemích.

V České republice mají velké zastoupení uhelné elektrárny, které vykazují nízkou účinnost kolem 33 %. Vlivem tlaku Evropské unie na snižování emisí a zdražování emisních povolenek se plánuje v blízké době ukončení výroby energií z uhelných zdrojů.

Za účelem snižování emisí a zvýšení obnovitelnosti primárních energetických zdrojů se podporuje lokální výroba elektřiny pomocí solárních panelů nebo mikrokogenerace pro jednotlivé objekty. Kromě ekologických výhod má tato výroba i ekonomický prospěch. [14]

Přínos kogenerační výroby tepla a elektřiny je zobrazený v následujícím příkladu:



Obrázek 12: Příklad rozdělené a kogenerační výroby [15]

Důležitým ukazatelem pro technický popis a hodnocení technologií kogeneračních jednotek je modul teplotní výroby elektřiny σ . Název a označení modulu není ještě sjednocen. Můžeme se setkat s názvem „teplotní modul“, který se používá často v české literatuře nebo „směrné číslo vyjadřující poměr výroby elektřiny v zařízení KVET“, používaný českou legislativou. V souvislosti s tímto názvem se používá symbol „y“, ale můžeme se setkat i s označením „e“. V anglické literatuře se používá název „power/heat ratio“. Tento modul je definován jako podíl výroby elektřiny k výrobě užitečného tepla nebo jako poměr elektrického a tepelného výkonu kogeneračního zařízení. [15][16]

Lze tedy vypočítat jednoduchým vztahem:

$$\sigma = \frac{E}{Q} \quad [-]$$

Kde σ – modul teplotní výroby elektřiny
 E – elektrický výkon
 Q – tepelný výkon

Ku příkladu, pokud je modul teplotní výroby elektřiny kogenerační jednotky roven hodnotě 0,5, znamená to, že na výrobu 0,5 wattu elektrického výkonu E je potřeba 1 watt tepelného výkonu Q . Z toho lze usoudit, že teplotní modul spolu s celkovou účinností jsou dva hlavní ukazatele relativní úspory PEZ, vztaženou k jednotce tepla, kterou lze vypočítat ze vzorce:

$$\frac{Q_u}{Q} = \sigma \left(\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right) \quad [-]$$

Kde Q_u – úspora tepla z paliva
 Q – množství vyrobeného tepla (tepelný výkon)
 σ – teplotní modul
 η_{el} – elektrická účinnost
 η_{kj} – celková účinnost kogenerační jednotky

Pohonná jednotka	Používané palivo	Rozsah výkonu [MW _e]	Modul teplotárenské výroby elektřiny	Elektrická účinnost	Celková účinnost
Odběrová parní turbína	libovolné	5–300	0,9 - 1,2	10–30 %	78–88 %
Protitlaková parní turbína	libovolné	0,1 - 100	0,8 - 1,0	7–20 %	75–88 %
Spalovací turbína	zemní plyn lehký topný olej bioplyn nafta	1–250	0,4 - 1,2	25–48 %	75–90 %
Paroplynové zařízení	zemní plyn lehký topný olej bioplyn nafta	10–400	0,8 - 2,0	35–60 %	85–90 %
Spalovací motor	zemní plyn lehký topný olej bioplyn nafta	0,01 - 10	0,5 - 1,1	25–45 %	75–92 %
Parní motor	biopalivo	0,02 - 1	0,1 - 0,3	10–25 %	70–80 %
Stirlingův motor	zemní plyn biopalivo alternativy: solární energie atd.	0,001 - 0,05	0,3 - 0,7	20–40 %	70–85 %
Mikroturbína	zemní plyn bioplyn	0,025 - 0,3	0,5 - 0,7	26–33 %	65–85 %
Palivový článek	vodík methanol (ethanol)	0,04 - 50	0,2 - 1,5	38–65 %	85–90 %

Tabulka 1: Vlastnosti druhů KJ dle pohonné jednotky (upraveno) [14][16]

4.1 Rozdělení kogenerace

4.1.1 Podle měřítka a kapacity

- **Mikrokogenerace** – Jsou to malá zařízení, s elektrickým výkonem do 50 kW_e , které se využívají k zásobování energií jednotlivých budov a objektů. Díky lokálnímu použití nevznikají ztráty přenosem energie z centrálního zdroje energie k místu spotřeby a jsou vhodné pro odlehle objekty. Zvyšuje se samostatnost objektu, což je v dnešní době žádoucí z důvodu vzrůstajících cen energií. Proto mají mikrokogenerační jednotky uplatnění například v hotelech a penzionech, které potřebují celoroční dodávku tepla i elektřiny. Nejlepším pohonem mikrokogeneračních jednotek je, podle tabulky výše, Stirlingův motor, mikroturbína, palivový článek nebo spalovací motor s vnitřním spalováním. [14]

Mikrokogenerační jednotky jsou hojně používány a Stirlingův motor má v této kategorii kogenerace největší uplatnění, proto se jimi budou zabývat další kapitoly.

- **Malá kogenerace** – Jednotky s elektrickým výkonem od 50 kW_e do 1000 kW_e , jsou dimenzovány pro průmyslové objekty, nemocnice, ale i menší systémy centralizovaného zásobování teplem (CZT). Tyto a větší kogenerační zařízení nejsou vyráběny sériově, ale vždy jsou navrženy podle roční energetické bilance daného objektu. [14]

V ČR se rozhodly tuzemské firmy ČEZ a TEDOM vystavět v roce 2021 kogenerační jednotky pro nemocnice v Havlíčkově Brodě a v Pelhřimově s garantovanou celkovou účinností přesahující 90 %. Každá jednotka je vybavena spalovacím motorem na zemní plyn o elektrickém výkonu 1 MW_e (což je na pomezí této kategorie). Kogenerační jednotka v Pelhřimovské nemocnici pokryje 70% spotřeby tepla a v Havlíčkově Brodě 60 %. Elektrická energie je vyváděna do sítě. Tato investice zajišťuje nemocnicím stabilnější cenu energií a větší bezpečnost. [17]

- **Velká kogenerace** – Velké kogenerační jednotky mají elektrický výkon nad 1 MW_e , jsou instalovány v centralizovaných systémech tepláren, elektráren a spaloven. Zajišťují dodávku tepla a elektřiny pro velké množství odběratelů (vesnice, sídliště, města). Podle druhu paliva je nejlepším pohonem turbína. U jednotek s výkonem do 10 MW_e je vhodný také spalovací motor. [14]

Příkladem velké kogenerační jednotky v České republice je městská teplárna v Prachaticích vystavěna firmou Motorgas v roce 2020. Kogenerační jednotka se skládá ze dvou rakouských spalovacích motorů Jenbacher JMS 320 poháněných zemním plynem. Každý motor má elektrický výkon 1 MW_e (přesněji 1067 kW_e). Elektrická účinnost motoru je 40,9 % a tepelná účinnost 45,2 % (s výměníkem tepla), to znamená že celková účinnost je 86,1 % a spotřeba plynu je $476 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. [18][19]

4.1.2 Podle způsobu přeměny

- **Přímá kogenerace** – Energie z paliva se přeměňuje přímo na elektrickou energii. Tento způsob přeměny je stále ve vývoji a objevuje se pouze v palivových článcích. Jedná se o galvanické články. Na záporně nabitou elektrodu (anodu) se přivádí palivo v podobě vodíku a na kladnou elektrodu (katodu) se přivádí oksličovadlo. V elektrolytu se katalyticky slučují a vzniká voda nebo vodní pára a stejnosměrný proud. Proto je pro jeho použití v elektrické síti zapotřebí střídač. Při této chemické reakci se v palivovém článku zároveň produkuje odpadní teplo, které je dobře využitelné a díky tomu články mohou dosahovat celkové účinnosti 80-85 %. Palivový článek je schopen pracovat nepřetržitě dokud má přísun paliva. [16]
- **Nepřímá kogenerace** – V této metodě se z paliva uvolňuje teplo, nejčastěji hořením. Tepelná energie, nebo její část, se transformuje na mechanickou práci a ta se pomocí generátoru přemění na elektrickou energii. Zbylé teplo se opět využije k teplotenské aplikaci. Na tomto principu pracují všechny kogenerační jednotky se spalovacími motory, turbínami, ale i se Stirlingovým motorem. [13]

4.1.3 Tepelné čerpadlo

Tepelného čerpadla lze použít v kogeneraci, jestliže je k dispozici pouze zdroj nízkopotenciálního tepla, například geotermální voda nebo odpadní voda v průmyslu. Princip tepelného čerpadla spočívá v převodu nižší hodnoty teploty na vyšší. Aby byl splněn druhý termodynamický zákon, tepelnému čerpadlu je potřeba dodat energii pomocí kompresoru. Teplo je přivedeno do výparníku, ve kterém se pracovní médium odpaří. Tato pára je kompresorem stlačena na sytou páru a následně převedena do kondenzátoru. V kondenzátoru předává pracovní médium (které kondenzuje) teplotu ohřívané látce, ta proudí v topné soustavě a vytápí objekt. Zkondenzované pracovní médium je přivedeno zpět do výparníku přes škrťací ventil. Škrťací ventil redukuje tlak pracovního média na tlak ve výparníku a cyklus se uzavírá. Vlivem redukce tlaku dojde k částečnému odpaření pracovního média, a tak vstupuje do výparníku ve stavu mokré páry. Nevýhodou tepelného čerpadla je, že teplota pracovního média ve výparníku musí být nižší než teplota zdrojové vody a teplota v kondenzátoru musí být naopak vyšší než teplota ohřívané vody. Tím se omezuje rozsah použití tepelného čerpadla v kogeneraci. [15]

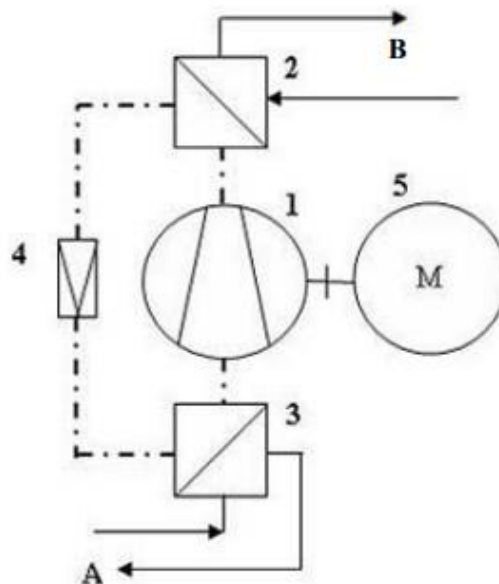
Topný faktor tepelného čerpadla se vypočítá vzorcem:

$$COP = \frac{Q_B}{E_k}$$

Kde COP – topný faktor

Q_B – tepelný výkon tepelného čerpadla

E_k – elektrický výkon kompresoru



Obrázek 13: Schéma tepelného čerpadla [15]

1 – kompresor, 2 – kondenzátor, 3 – výparník, 4 – škrťací ventil, 5 – pohonná jednotka

A – zdrojová voda, B – topná voda

4.1.4 Trigenerace

Trigenerace je produktem dalšího technologického vývoje, kdy je do kogenerační jednotky integrován nebo s ní propojen navíc chladič. Jedná se tedy o kombinovanou výrobu tepla, elektřiny a chladu. Takové spojení vede k ještě vyšší efektivitě zařízení, úspoře PEZ a prodloužení doby provozu. Mimo topnou sezonu totiž klesá potřeba tepla na minimum a potřeba elektřiny zůstává relativně stejná, v zařízení s chladičí jednotkou je teplo využito k ochlazení vody nebo pracovního média, například klimatizace. Některé objekty, jako laboratoře nebo sklady, potřebují chlazení celoročně, takže se touto technologií také rozšiřuje oblast využití kombinované výroby energií. [20]

Druhy chladičích zařízení:

- **Kompresorové chlazení** – Pracuje na stejném principu jako tepelné čerpadlo, viz kap. 4.1.3, ale teploty v kondenzátoru a ve výparníku jsou podstatně nižší. Zapojení při chlazení je opačné než u tepelného čerpadla, to znamená že kondenzátor odvádí teplo do okolí a výparník odvádí teplo z vychlazovaného prostoru. Nevýhodou kompresorového chlazení je, že odpadní teplo odváděné z kondenzátoru do atmosféry nelze teplotně využít. [15]
- **Absorpční chlazení** – Komprese je nahrazena tepelným procesem, kde se v absorbéru pohlcuje (rozpouští) chladivo za nízkého tlaku látkou zvanou absorbent (roztok bromidu lithného). Ve výparníku se chladivo za vyššího tlaku přivede k varu a odděluje se od absorbentu. Takto uvolněné chladivo se přemístí do kondenzátoru, ze kterého se opět odvádí teplo. Děj ve výparníku a v kondenzátoru je podobný jako Rankinův-Clausiusův (parní) cyklus. Tento systém chlazení má tři vodní okruhy. Pro studenou vodu, která je v soustavě pro odvádění tepla z vychlazovaného prostoru, pro horkou vodu, která je napojena na zdroj tepla, a pro chladičí vodu, ta odvádí teplo z chladičích zařízení a ochlazuje se v chladičích věžích. Na rozdíl od kompresorového chlazení je možné odpadní teplo využít k teplotně aplikaci. Okruh horké vody může mít teplotu od 70 °C. Výsledná studená voda má většinou teplotu od 2 do 20 °C. Chladičí voda mívá v závislosti na teplotě horké vody a na velikosti chladičích věží teplotu od 20 do 45 °C. Pro zlepšení parametrů oběhu je mezi výparník a kondenzátor umístěn regenerační výměník, ve kterém se předává teplo z teplejšího chladiva chladnějšímu a tím se předejde. [15]

Technologicky by bylo možné v trigenerační jednotce použít pouze Stirlingův motor, a to konstrukci FPSE se dvěma přemísťovacími písty, viz kap. 3.1.8.

5 Konkrétní aplikace

5.1 Kogenerace se Stirlingovým motorem

V kogeneraci se jeví Stirlingův motor jako alternativa ke spalovacím motorům s vnitřním spalováním nebo k mikroturbínám. Ale jeho použití je potřeba pečlivě zvážit. Ačkoliv se Stirlingův motor vyznačuje řadou výhod, jako je spolehlivost, nízká hlučnost, dlouhý servisní interval nebo nulová spotřeba oleje, náklady na výrobu se odhadují 2 až 3krát vyšší než u motorů s vnitřním spalováním, viz Tabulka 2. Nespornou výhodou Stirlingova motoru, oproti spalovacím motorům nebo turbínám je, že spalování (přívod tepla) probíhá vně motoru, což umožňuje použití různých druhů paliva, které by u spalovacích motorů nebylo možné použít, například biomasu, plyn s nízkou výhřevností nebo těžko spalitelný plyn ze skládek. [21]

Složitost konstrukce výrazně stoupá s velikostí výkonu, proto je výhodná výroba mikrokogeneračních jednotek přibližně do elektrického výkonu 35 kW_e a tepelného výkonu 80 kW_t. Jednou z nejlepších a ekonomicky nejvýhodnějších konstrukcí pro elektrický výkon do 10 kW_e jsou motory vycházející z typu United Stirling V-160. Víceválcové motory s výkonem přesahujícím 10 kW vycházejí z β -modifikace. Naopak pro nízké výkony do 1 kW_e je vhodná konstrukce s volným pístem, která je kompaktní, odolná a konstrukčně jednoduchá. [1]

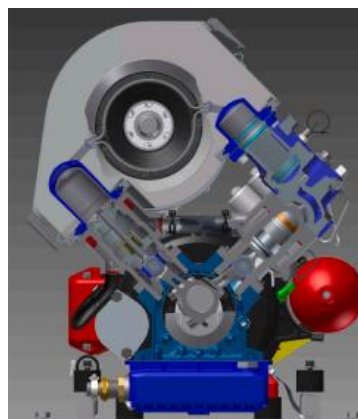
V roce 2003 zahájil Carbon Trust test, kde byly srovnávány kogenerační jednotky Whispergen a Microgen s kondenzačními kotli a kogeneračními jednotkami se spalovacími motory. Do testu bylo zahrnuto 72 zařízení se Stirlingovým motorem, 15 zařízení se spalovacími motory a 36 kondenzačních kotlů. Průměrně měly kogenerační jednotky se Stirlingovým motorem tepelnou účinnost o 10-15 % nižší než kondenzační kotle, protože část tepla byla použita k výrobě elektřiny. Byla naměřena i znatelně vyšší tepelná ztráta. Pozitivem pro KVET bylo, že pokryla 34 % celkové spotřeby elektřiny domácnosti. Bohužel pro Stirlingův motor byla návratnost investice nízká, kvůli vysoké vstupní ceně. Slibnou technologií se jevil FPSE, kde bylo potřeba překonat několik technických problémů k vyvinutí špičkového systému KVET na spalování zemního plynu a biomasy. [5]

	Spalovací motor	Mikroturbína	Stirlingův motor
Výkon [kW]	25–5000	25–100	25–100
Elektrické účinnost [%]	25–45	25–30	29–40
Hlučnost [dBA]	>100	57–82	50–75
Emise CO ₂ [kg/MWh]	500–650	720	672
Emise No _x [kg/MWh]	0,99 – 12,7	0,18 – 0,99	0,18 – 0,90
Cena [USD/kW]	340–1600	900–1500	1300–2000
Provoz a údržba [USD/kWh]	0,007 – 0,015	0,002 – 0,01	0,004 – 0,015

Tabulka 2: Srovnání pohonných jednotek mikrokogenerace (upraveno) [21]

5.1.1 Solo Stirling 161

Do motoru United Stirling V-160 se vkládaly velké naděje. Proto skupila práva švédská firma SOLO Stirling GmbH a zahájila další vývoj motoru. Nově byl vybaven spalovací komorou s extrémně nízkými emisemi a vyřešily se všechny hlavní problémy zařízení jako bylo např. nedostatečné těsnění pístu nebo řídicí systém. Vývoj se zaměřil také na snížení výrobních nákladů a dostupnost SE. Motor, nově zvaný Solo Stirling 161, mohl být integrován do kogeneračních jednotek pro menší průmyslové objekty, bytové domy nebo školky. Dosahoval elektrického výkonu $7,5 \text{ kW}_e$ a tepelného výkonu 26 kW_t , při tlaku pracovního média (helium) 13 MPa , teplotě $650 \text{ }^\circ\text{C}$ horké komory a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ topné vody. Celková účinnost dosahovala 90% a elektrická účinnost 24% . Konstrukce zůstala stejná, a to jednočinná α -modifikace s válci pod úhlem 90° . Motor byl přímo připojen k třífázovému asynchronnímu generátoru, který sloužil současně ke spuštění motoru. Celá jednotka měla hmotnost 460 kg a rozměry $70 \times 128 \times 98 \text{ cm}$. Solo Stirling 161 byl na trhu od roku 2004 do roku 2008. Poté firma z finančních důvodů vyhlásila bankrot a všechna práva skupila firma Azelio, která tuto jednotku zakomponovala do svého systému skladování energie a nabízí jí dodnes. [5][1]



Obrázek 15: Jednotka Solo Stirling 161 [5] Obrázek 14: Řez motorem Solo Stirling 161 [5]

5.1.2 Stirlingův motor firmy TEDOM

Od roku 2001 se začala česká firma TEDOM zabývat vývojem kogeneračních jednotek řady Micro se Stirlingovým motorem, který by byl alternativou k tříválcovému spalovacímu motoru Škoda EA 111 (objem $1,2 \text{ l}$). Tento projekt byl podnícen snahou snížit emise a vyvinout kogenerační jednotku na spalování biomasy, jakožto obnovitelného zdroje. Výzkum byl částečně podporován i Ministerstvem průmyslu a obchodu. Hlavním cílem vývoje bylo snížení výrobních nákladů a snížení rozměrů motoru, proto se rozhodlo použít opět jednočinnou α -modifikaci se zdvihovým objemem 183 cm^3 ($1,8 \text{ litru}$), přičemž zařízení mělo být konstruováno tak, aby bylo možné spalovat více druhů paliva (biomasa, zemní plyn, bioplyn). Pracovním médiem bylo helium. [1]

Ačkoliv funkční prototyp nedosahoval na cílové parametry, podařilo se celkovou hmotnost udržet pod 110 kg a použité díly byly z běžných materiálů jako je šedá litina (kromě horké strany motoru z žárupevných materiálů). Konstrukce přinesla řadu inovací jako je vyprazdňovací kompresor pro snižování tlaku helia k regulaci výkonu anebo technické řešení utěsnění tlakového prostoru. Mazanou částí byl pouze klikový mechanismus, díky čemuž měla olejová náplň jen 2 litry. V roce 2010 firma ukončila projekt. [1][22]

	Cílové parametry	Dosažené parametry
Výkon motoru při ot. 1500 min ⁻¹	10 kW	7,9 kW
Elektrická účinnost	25 % (při teplotách 650 °C/60 °C)	24,13 % (při teplotách 670 °C/ 50 °C)
Max. střední tlak	14 MPa	11,2 Mpa
Emise CO	150 mg/Nm ³	Neměřeno
Emise Nox	70 mg/Nm ³	Neměřeno
Servisní interval	8000 h	Motor byl v chodu 180 h
Minimální životnost	25000 h	

Tabulka 3: Parametry motoru TEDOM (upraveno) [22]



Obrázek 16: Stirlingův motor firmy TEDOM [22]

5.1.3 Whispergen

Pro domácnosti je určena také kogenerační jednotka od firmy Whispergen, s elektrickým výkonem 1,2 kW_e a tepelným výkonem 8-10 kW_t. V této jednotce je použitý čtyřválcový Stirlingův motor, který má válce uspořádané do kruhu pod úhlem 90° a pro převod axiální síly na radiální je místo hřídele použita otočná deska. Konstrukce vychází v základu z β-modifikace. Motor vyrábí teplo i elektřinu a není s ním integrován žádný kotel. Díky tomu má jednotka malé rozměry 83,8 x 49,1 x 56,3 cm a nízkou hmotnost 154 kg. Proto ji lze dokonce instalovat i do kuchyňské linky. Jedná se spíše o plynový kotel s doplňkovou výrobou elektřiny a mimo topnou sezonu je zařízení mimo provoz. Motor má malou elektrickou účinnost 11 %, ale díky tomu se však výrazně snížila cena zařízení. [1][5]



Obrázek 17: Motor Whispergen (upraveno) [5]

5.1.4 FPSE v mikrokogeneračních jednotkách

V posledních letech dosáhl komerčního úspěchu Stirlingův motor s volným pístem, popsáný v kapitole 3.1.8, od nizozemské firmy Microgen engine corporation, který byl integrován do mnoha kogeneračních jednotek v kombinaci s různými druhy kotlů. Velmi výhodnou kombinací se ukázal kondenzační kotel. Ten pracuje na principu využití tepla ve spalinách (využití latentního tepla). Voda, která se vrací z topné soustavy zpět do kotle je předehřívána ve výměníku spalinami, ty obsahují vodní páru, a ta vlivem ochlazování dosáhne rosného bodu a kondenzuje. Díky tomuto předehřívání se sníží rozdíl teploty vratné vody a teploty v kotli, čímž se snižuje spotřeba paliva. Výhodou těchto kotlů je, že teplota spalin se pohybuje v rozmezí teplot 40–90 °C. I v kombinaci se Stirlingovým motorem lze použít plastové prvky v systému odkouření a není potřeba instalovat komín. [23]

Konstrukce firmy Microgen je i v drsných podmínkách velmi spolehlivá a bezúdržbová. Navíc podle způsobu použití vyžaduje jen drobné úpravy, které do základní konstrukce v podstatě nezasahují. Jestliže má motor svůj vlastní spalovací prostor je potřeba použít podle typu paliva správně přizpůsobený hořák. Hlavní typy hořáků jsou na zemní plyn, bioplyn a biomasu. Obdobně je to s akceptory tepla, které předávají teplo pracovnímu médiu (helium) uvnitř válce. Pokud Stirlingův motor pohání teplo z jiného zdroje, například z kotle nebo ze solární energie, není zapotřební použít hořák. [24]



Max. el. Výkon	1050 W
Jmenovité napětí	230 V (186-264 V)
Frekvence	50 nebo 60 Hz
Hmotnost bez hořáku	49 kg
Výška bez hořáku	45 cm
Průměr	30 cm
Účinnost	26 %
Životnost	50 000 h

Tabulka 4: Parametry motoru Microgen (upraveno) [24]

Obrázek 18: FPSE firmy Microgen [24]

Od roku 2012 byla dostupná mikrokogenerační jednotka Vitotwin 300-W od známé německé firmy Viessmann. Tato jednotka obsahuje plynový kondenzační kotel Vitodens 200-W 20 kW. Elektrický výkon jednotky je 1 kW_e a tepelný výkon až 26 kW_t, proto je vhodný pro větší rodinné domy se stálou potřebou dodávání tepla, například pro vytápění bazénu. Stirlingův motor dokáže dodávat tepelný výkon 6 kW_t. V případě vyšší potřeby tepla pokryje tuto potřebu kondenzační kotel, z tohoto důvodu musí mít Stirlingův motor vlastní hořák. Podmínkou jednotky je použití akumulární nádoby. [23]

Firma Viessmann přestala vyrábět produkty se Stirlingovým motorem v roce 2018 kvůli nízké konkurenceschopnosti a zaměřila se na jednotky se spalovacími motory poháněné zemním plynem či bioplynem.

Další firmou používající FPSE ve svých kogeneračních jednotkách je rakouská firma ÖkoFEN. Stirlingův motor od firmy Microgen integruje do kogenerační jednotky Pellematic Condens_e o rozměrech 73,2x72,4x179 cm s kondenzačním kotlem na pelety. Díky kondenzační technologii kotle dosahuje kogenerační jednotka celkové účinnosti 107,3 % (metoda horní výhřevnosti paliva). Součástí celého systému zvaného myEnergy365 jsou také fotovoltaické panely. Cílem konceptu je úplná samostatnost rodinných domů. Systém se snaží o co největší kompatibilitu a flexibilitu. To znamená, že kotel lze napojit na stávající fotovoltaický systém a je možné ho instalovat ihned,

nebo až dodatečně se Stirlingovým motorem. Systém je vybaven také řídicí jednotkou, která reguluje provoz kogenerační jednotky tak, aby byl objekt napájen primárně z FVE, její výkon závisí na počasí. V případě přebytků se energie ukládá do baterií nebo akumulčních nádrží. V kogenerační jednotce Pellematic Condens_e je Stirlingův motor s průměrným elektrickým výkonem 600-1000 W poháněn teplem z kondenzačního kotle, který se dodává ve variantách s tepelným výkonem od 10 kW do 16 kW. Firma ÖkoFEN je prozatím jediná na trhu, která nabízí v systému kombinaci těchto prvků (FVE, SE, kotel na biomasu). [25]

Pro odlehle objekty je vhodná mikrokogenerační jednotka WoodGen S-Tronic, kterou dva roky vyvíjela firma Microgen se slovinskou firmou Waltis. Beta verze byly uvedeny na trh v dubnu roku 2023. Jedná se o první kogenerační jednotku se Stirlingovým motorem, která spaluje dřevo a splňuje normu ČSN EN 303-5. Nyní se s prvními zákazníky pracuje na vylepšeních. [24]



Obrázek 20: Pellematic Condens_e [25]

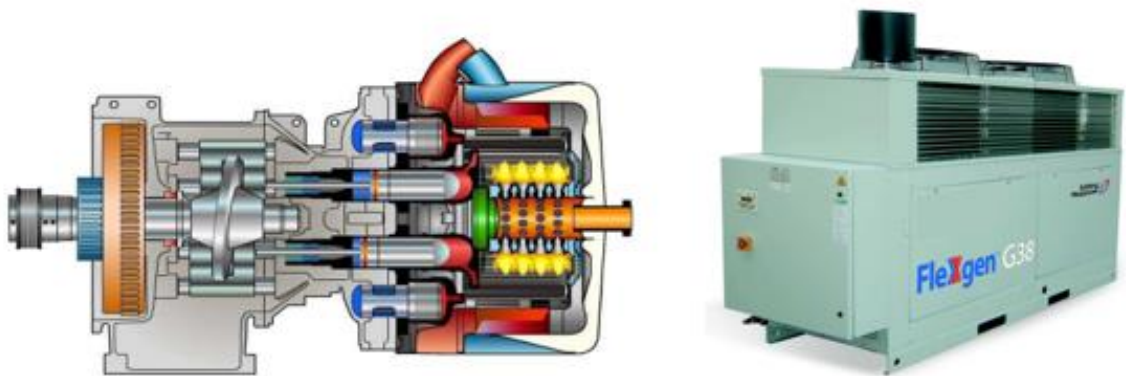


Obrázek 19: WoodGen S-Tronic [24]

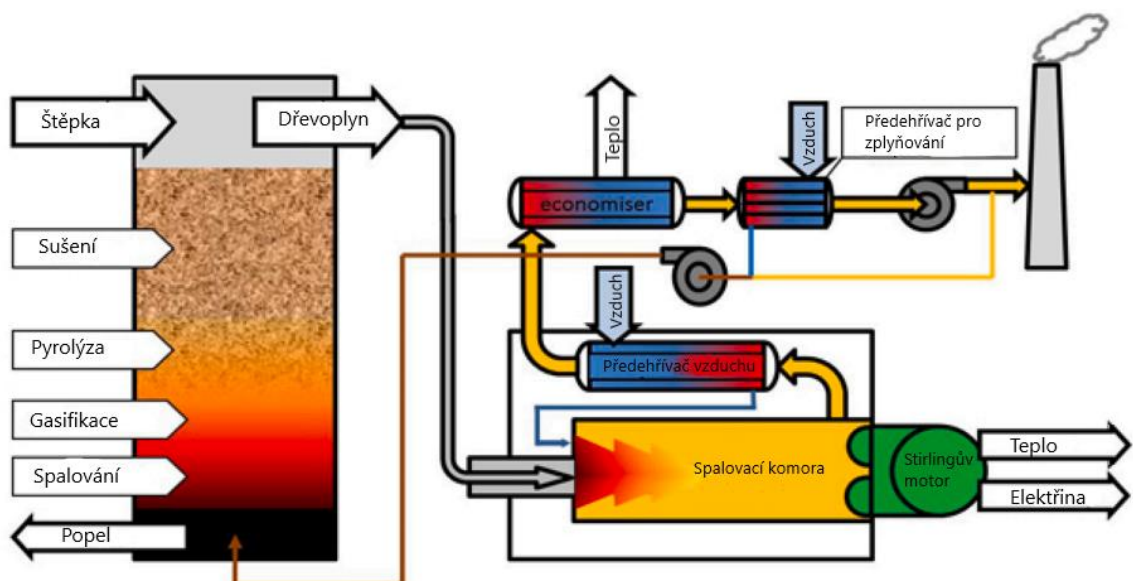
5.1.5 Průmyslová kogenerace SE

Ačkoliv je nejvýhodnější použití Stirlingova motoru pro malé výkony, existují i kogenerační jednotky s většími výkony do 100 kW_e pro průmyslové využití.

Jednou takovou jednotkou je série FleXgen řady G a řady H. Technologie je navržena na zpracování biomasy a odpadu v průmyslu. Jednotka obsahuje čtyřválcovou konstrukci motoru, podobnou jako v jednotce Whispergen, takže je motor opět vybaven otočnou deskou místo klikové hřídele. Firma Stirling Biopower / Qalovis (dnes Haiqi), vyrábějící tuto sérii, přepracovala problematickou strukturu těsnění a vytvořila kompletní tepelný a energetický systém. Série kladla důraz na flexibilitu paliva. FleXgen řady G obsahuje spalovací systém, navržený na spalování průmyslových odpadů, skládkového metanu a bioplynu. Jednotka dosahuje elektrického výkonu 38 kW_e při 1800 otáčkách za minutu, což odpovídá elektrické účinnosti 29 %. Díky výměníku tepla je celková účinnost až 78 %. Řada H spalovací systém neobsahuje a pracuje pouze s odpadním teplem. Elektrický výkon tedy závisí na průtoku a teplotě odpadního tepla. Je možné ji použít například u vysokoteplotních výfukových plynů nebo u pecí na biomasu. [26]



Obrázek 21: Motor a jednotka FleXgen [26]



Obrázek 22: Schéma kogeneračního systému na biomase (upraveno) [5]

5.1.6 Solární energie

Jedním z použitelných obnovitelných zdrojů pro Stirlingův motor je solární energie. V tomto odvětví má SE velkého konkurenta, a to fotovoltaické panely. Velmi stručně řečeno, fotovoltaické panely pracují s fotony, které dopadají na polovodič (obvykle křemík) typu N s přebytkem elektronů. To vyvolá uvolnění elektronu z atomu polovodiče. Následně je elektron usměrněn do polovodiče typu P s přebytkem děr. Vlivem rozdílného napětí mezi typy polovodiče se elektron vrátí přes jednosměrně propustný přechod PN zpět do typu N. Tímto procesem vzniká stejnosměrný elektrický proud, který lze odebírat. Panely mají elektrickou účinnost 14 až 22 %. Účinnost panelů však klesá přibližně o 0,5 % na každý °C zvýšení teploty polovodiče. [27]

Stirlingův motor pracuje oproti fotovoltaickým panelům pouze s teplem ze solární energie. Proto je jeho použití vhodné pro horké podnební podmínky například v Austrálii nebo v rovníkové oblasti. Přizpůsobení SE pro solární aplikaci obsahuje parabolické zrcadlo, které soustřeďuje sluneční záření na ohřívák. Pro přenos tepelné energie jsou používány trubicové absorbéry, které poskytují rovnoměrné rozložení teploty. V trubicích absorbéru se odpařuje tekutý kov (sodík), který kondenzuje u horké komory SE a předává teplo pracovnímu médiu motoru. Díky těmto technologiím je maximální provozní teplota horké komory až 806 °C. FVE mohou dosahovat účinnosti až 34 %, ale taková technologie je velmi drahá a aplikuje se pouze ve výjimečných případech. Proto je SE v některých oblastech vhodnější volbou, protože dosahují vyšší účinnosti až 35 % a má delší dobu životnosti. FVE postupem času klesá výkon bez možnosti uvedení do původního stavu, oproti tomu SE lze udržovat na stejném výkonu pravidelnou údržbou. [28]

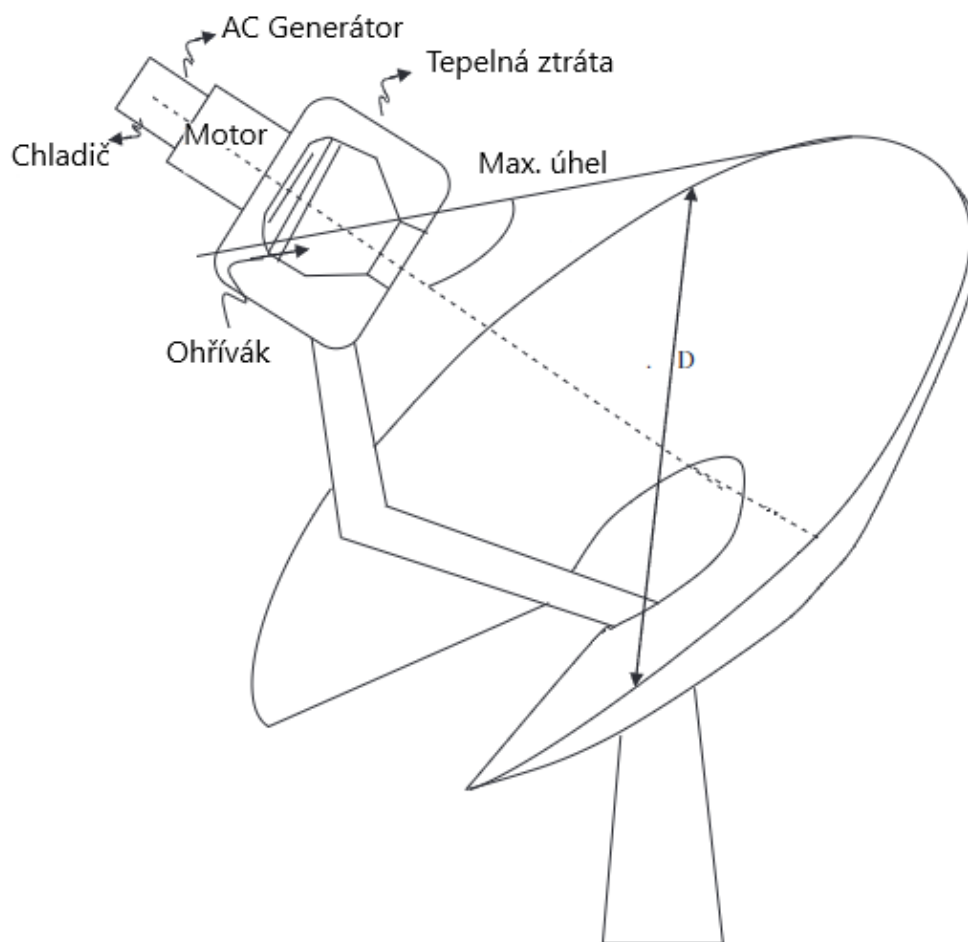
Pro konkrétní aplikace SE s parabolickým zrcadlem se používají motory Microgen, viz kap. 5.1.4. a motory Solo Stirling 161, viz kap. 5.1.1. Firmy SES a United Stirling však vyvinuly i jednotku pro solární elektrárny s celkovým výkonem 500 MW_e v Mohavské poušti v Kalifornii a 300 MW_e v Imperial Valley, s možností výkonnostního rozšíření. Tyto motory jsou sestaveny jako dvojčinné se čtyřmi písty. Jsou chlazeny vodou s centrálními chladicími věžemi a jejich výkon lze regulovat pomocí změny tlaku pracovního média. V elektrárně jsou jednotky instalovány paralelně s dostatečně velkým odstupem, aby nedocházelo k zastínění. [29][28]

V roce 2011 vyhlásila firma SES bankrot kvůli klesajícím cenám fotovoltaických panelů z Číny, kterým solární Stirlingův motor nemohl konkurovat.

Další použití solárního Stirlingova motoru je v zemědělství v chudších oblastech světa s nedostatkem vody, kde se používá jako lokální zdroj energie k čerpání vody z podzemí. Pro takovou aplikaci byl v roce 2011 sestaven nízkotlaký Stirlingův motor firmy Sunvention Solar Energy, u kterého se kladl důraz na nízkou cenu odhadovanou na 1250 USD. Toto zařízení bylo schopné vypumpovat 80 000 l vody za den. Vlivem vývoje v zemědělství se ale nejspíš jedná pouze o dočasné řešení v oblastech Indie nebo Afriky. [29]

Průměr zrcadla D	10,57 m
Ohnisková vzdálenost	7,45 m
Průměr absorbéru	200 mm
Provozní teplota prac. Média	759 °C
Max. tlak prac. média	20 Mpa
Hmotnost motoru	225 kg
Jmenovitý výkon	25 kW _e
Účinnost alternátoru	94 %
Elektrická účinnost SE	29,40 %

Tabulka 5: Parametry solárního SE firmy SES (upraveno) [29]

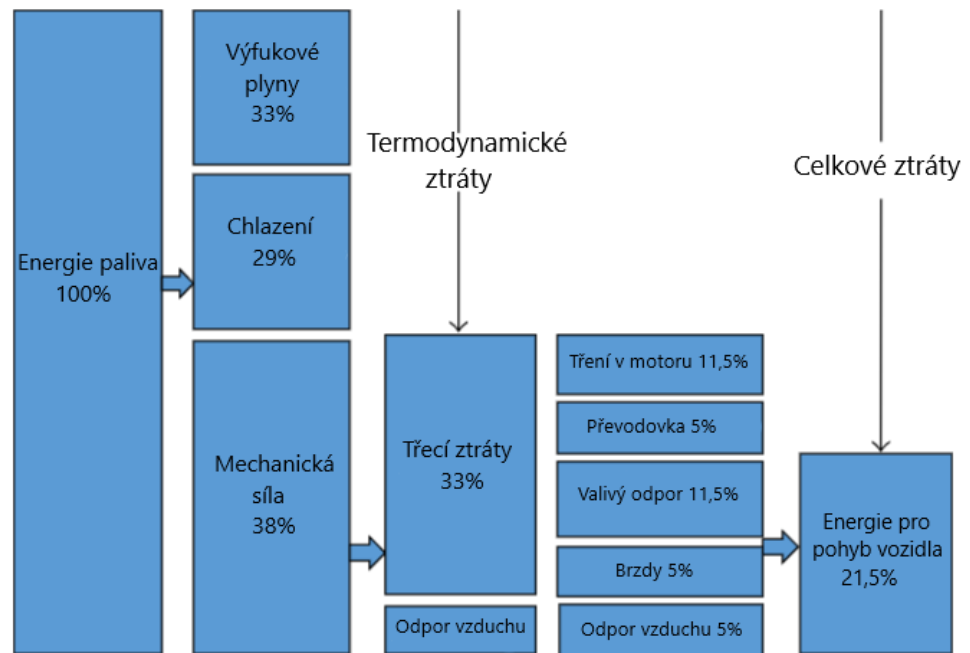


Obrázek 23: Stirlingův motor s parabolickým zrcadlem (upraveno) [29]

5.2 Motorová vozidla

Vlivem zpřísnování emisních předpisů, které vyžadují vyvíjení čistších motorů, by mohl Stirlingův motor získat v motorových vozidlech jiné uplatnění než jako pohonná jednotka. V současné době tvoří těžká nákladní vozidla přibližně 17 % světové dopravy. Technologie motorů se zlepšila z hlediska výkonu, emisí a účinnosti paliva, ale stále se hledá způsob snížení nákladů na palivo nákladních vozidel. Emisní předpisy však vedou naopak k vyšší spotřebě paliva, protože některé požadované technologie zvyšují hmotnost vozidla, odpor v potrubí nebo snižují účinnost paliva. Patří mezi ně například filtr pevných částic (DPF) nebo recirkulace výfukových plynů. Z tohoto důvodu se provádí stále intenzivnější studie zaměřené na hybridní motory, snížení hmotnosti vozidla, zmenšení motoru a také na odvod tepla. [30]

Z vnitřního spalovacího prostoru se teplo přenáší do okolí prostřednictvím chlazení a výfukových plynů. Odváděním tepla ze spalovacího motoru vznikají velké tepelné ztráty, které tvoří přibližně 60% energie paliva. Celkové energetické ztráty spalovacího motoru jsou zobrazeny na Obrázku 20. Proto se hledají řešení, jak toto teplo využít a tím zvýšit účinnost paliva a snížit jeho spotřebu. Nejnadějnějším způsobem odvodu tepla je recirkulace výfukových plynů pomocí systému EGR. Tento systém pracuje tak, že přivádí část výfukových spalin zpět do sání. Přítomnost spalin ve válci má za následek snížení maximální teploty spalování a tím se snižuje množství produkce oxidu dusíku, ale je zapotřebí tyto spaliny nejprve ochladit. Teplota systému EGR a výfukových plynů se pohybuje v rozmezí 200 a 500 °C. [30] Pro takové teplotní rozmezí jsou kompatibilní: Rankine – Clausiuv (parní), Braytonův a Stirlingův cyklus. [31]



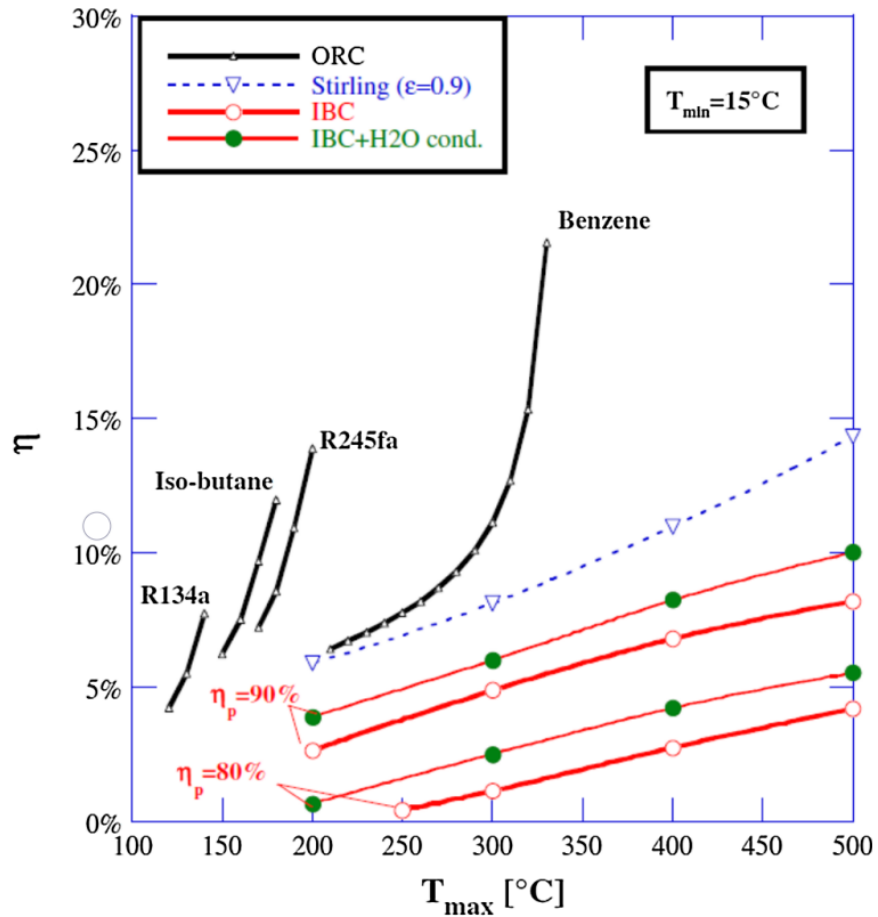
Obrázek 24: Energetické ztráty ve spalovacím motoru (upraveno) [32]

Princip organického Rankinova cyklu spočívá v čerpání pracovního média do výparníku, kde se odpařuje. Pára pohání expanzní zařízení, nejčastěji turbínu. Dále je potřeba medium ochladit v kondenzátoru, ve kterém kondenzuje a čerpadlem je opět přemístěno do výparníku. Klasický Rankinův cyklus používá jako pracovní medium vodu. Organický Rankinův cyklus (ORC) používá jako pracovní medium organickou látku, například benzen nebo izobutan. [32]

Braytonův cyklus (IBC) se skládá ze dvou izotermických a dvou izobarických změn, přičemž se teplo přivádí a odvádí během změn izobarických. Vzduch je kompresorem stlačen na vysoký tlak a následně se za stálého tlaku ohřívá. Vzduch o vysoké teplotě a tlaku expanduje a pohání turbínu. Nakonec je expandovaný vzduch ochlazen na původní teplotu nebo vypuštěn do atmosféry. [32]

Při porovnání cyklů dosáhl nejlepších výsledků Rankinův cyklus, ale jen pro malé teplotní rozmezí. V závislosti na použité organické kapalině dosahoval maximální účinnosti pouze při malém rozsahu teplot. Proto není vhodné Rankinův cyklus používat pro odvod tepla ze spalovacího prostoru. Braytonův cyklus naopak dosahuje nízké účinnosti maximálně 10 %, a to jestliže teplota překročí hodnotu 400 °C. [33]

Z hlediska stability výkonu a účinnosti v celém teplotním rozmezí je vhodný Stirlingův cyklus. Aplikace takového zařízení by navíc nepřidávala složitost systému, protože nevyžaduje použití dalších součástí jako je čerpadlo, turbína nebo kondenzátor, které by zvyšovaly požadavky na údržbu. Závislost účinností a výkonů cyklů při teplotě chladící vody 15 °C jsou zobrazeny na Obrázku 25 a 26. [33]



Obrázek 25: Závislost účinností cyklů na teplotě [30]

Kde

η – Účinnost cyklu

T_{\max} – Maximální teplota cyklu

T_{\min} – Chladicí teplota cyklu

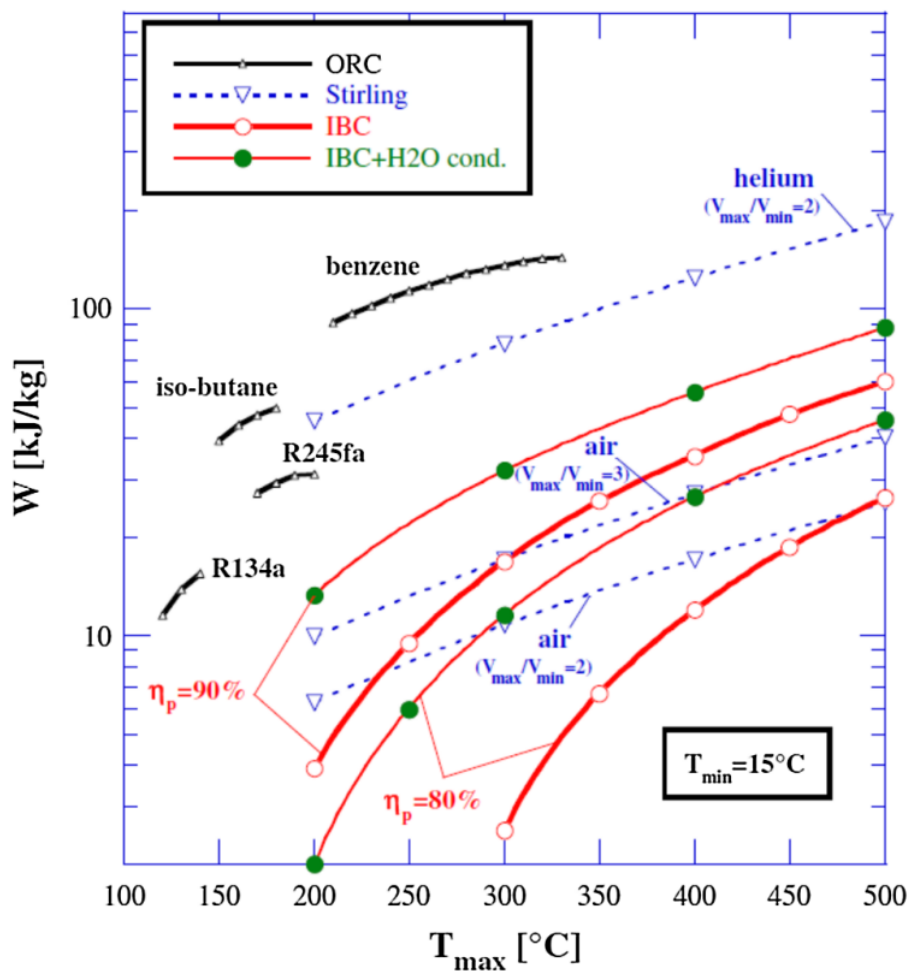
η_p – Účinnost komprese v turbíně Braytonova cyklu

ε – Účinnost regenerátoru Stirlingova motoru

ORC – Organický Rankinův cyklus

IBC – Inverzní Braytonův cyklus

IBC+H₂O cond. - Inverzní Braytonův cyklus s vodním kondenzátorem



Obrázek 26: Závislost výkonů cyklů na teplotě [30]

Kde

W – Výkon cyklu

T_{\max} – Maximální teplota cyklu

T_{\min} – Chladicí teplota cyklu

η_p – Účinnost komprese v turbíně Braytonova cyklu

V_{\max}/V_{\min} – Objemový poměr Stirlingova motoru

ORC – Organický Rankinův cyklus

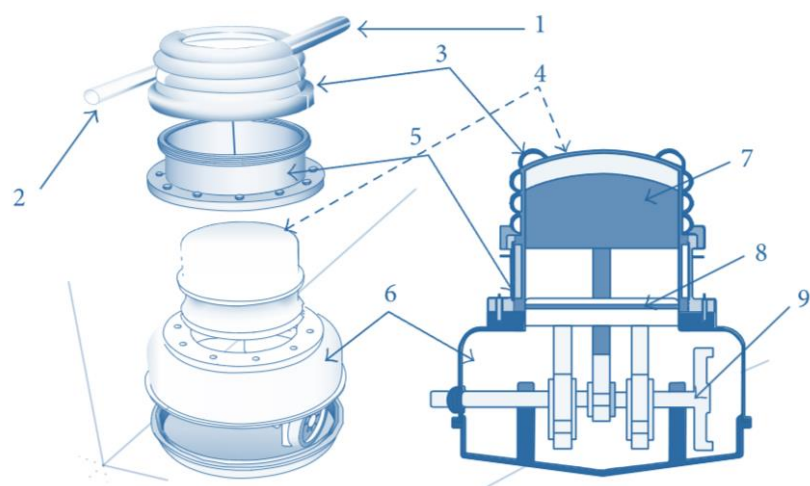
IBC – Inverzní Braytonův cyklus

IBC+H₂O cond. - Inverzní Braytonův cyklus s vodním kondenzátorem

R134a – Organická pracovní látka v ORC tetrafluorethan

R245fa – Organická pracovní látka v ORC heptafluoropropan

Podle několika matematických studií by bylo možné generovat pomocí systému EGR 1,5-3 kW výstupního výkonu při hmotnosti Stirlingova motoru 11-14 kg. W. Aladayleh [32] se zabýval ve své práci integrací Stirlingova motoru do systému recirkulace výfukových plynů. Výkon Stirlingova motoru závisí na hmotnostním průtoku výfukových plynů a jejich teplotě. Proto byl pro vstupní hodnoty experimentu použit jednoválcový zážehový motor Robin, s výkonem 3,2 kW, chlazený vzduchem. Následně byl k výpočtu Stirlingova cyklu použit Schmidtův cyklus pro získání ideálního výkonu a Bealovo číslo na odhad skutečného výkonu. Schmidtův cyklus je definován jako Stirlingův cyklus, ve kterém se písty pohybují sinusově a jsou definovány mrtvé objemy. Předpokládá se nulový únik pracovního média a je potřeba znát konstantní teploty plynu v celém objemu motoru. Metoda počítá s ideálním plynem, takže je tlak v každém okamžiku stejný v celém objemu pracovního plynu. Bealovo číslo se používá k odhadu skutečného výkonu Stirlingova motoru pomocí vztahu ideálního výkonu ke střednímu tlaku, provozní frekvenci a objemu expanzního prostoru. Výsledný Stirlingův motor měl ideální výkon 772 W a odhadovaný skutečný výkon 420 W, při teplotě ohříváku 200°C. Výsledkem využití Stirlingova motoru v systému EGR daného spalovacího motoru je 15 % úspory paliva. Není však započítána zvýšená hmotnost vozidla ani odpor ve výfukovém potrubí. [32]



Obrázek 27: Stirlingův motor v systému EGR [32]

1 – Výstup výfukových plynů, 2 – Vstup výfukových plynů, 3 – Výměník tepla,
4 – Horká komora, 5 – Chladicí plocha, 6 – Vysokotlaká kliková skříň, 7 – Přemístovací píst,
8 – Pracovní píst, 9 – Kliková hřídel a setrvačnick

M. Güven a spol. [30] provedli analýzu navrženou pro nákladní vozidlo o hmotnosti 40 tun. Nejvhodnější pro aplikaci do tohoto systému je β -modifikace. A-modifikace sice může dosáhnout podobného výkonu, ale při větší celkové hmotnosti. Navržený Stirlingův motor generuje výkon přibližně 3 kW po celou dobu provozu. To činí více než 1,3 % výstupního výkonu spalovacího motoru vozidla. Po započítání zvýšení odporu ve výfukovém potrubí a navýšení hmotnosti může systém odvodu odpadního tepla s použitím SE snížit celkovou spotřebu paliva přibližně o 1 %. [30]

Výkon získaný prostřednictvím Stirlingova motoru lze převést na nabíjení akumulátorů nebo na řízení pomocných zařízení jako je vodní nebo olejové čerpadlo, posilovač řízení či kompresor klimatizace. Během povinných odpočinkových pauz nákladních vozidel nechávají řidiči motor vozidla v chodu 1860 hodin ročně, aby zajistili dodávku elektřiny spotřebičům jako jsou ledničky, vařiče, vytápění nebo klimatizace. Pro tyto účely by mohl Stirlingův motor v systému EGR nabíjet akumulátor, který by spotřebičům dodával během této pauzy potřebný příkon. Pro stejnou oblast využití se provádějí studie k využití Stirlingova motoru v pomocné výkonové jednotce (APU) namísto spalovacích motorů, které jsou značně neekologické a vlivem nařízení výbavy systému pro úpravu výfukových plynů také velmi drahé. APU zařízení je nezávislý zdroj energie, který poskytuje řidiči komfort mimo jízdu, aby nemusel být hlavní motor v chodu. Tento podsystému musí být poháněn vlastním spalovacím zařízením. Stirlingův motor v takovém použití není schopný dodat dostatečný výkon k pohonu všech spotřebičů a zároveň klimatizace. Proto je nutné v zařízení APU použít také absorpční chladič, viz. kap. 4.1.4, který využije odpadní teplo ze SE. V experimentu byly použity hodnoty jednotky Whispergen, viz kap. 5.1.3. Takový systém je schopný pokrýt celkový požadovaný výkon, vykazuje větší komfort z hlediska hlučnosti a produkuje velmi nízké emise. [34]

	CO [g/kWh]	Nox [g/kWh]	Pevné částice [g/Kwh]
Dieselový motor	1,2	6,2	0,09
Dieselový motor s DPF	1,2	6,2	0,0135
Stirlingův motor	1,67	1,78	0,0004

Tabulka 6: Emise APU (upraveno) [34]

Pro hybridní vozidla je možné použít Stirlingův motor v systému EGR k napájení trakční baterie pro pohon vozidla. Taková technologie by mohla nabídnout snížení emisí, snížení hluku a potenciál pro větší celkový dojezd hybridního vozidla. [30]
S novými požadavky na emise a účinnost paliva se očekává, že využití a zdokonalení jednotek APU a systémů k odvodu tepla z výfukových plynů v budoucnu vzroste.

5.3 Kryochladiče

Stirlingův motor má své uplatnění také jako kryochladič pro vědecké, lékařské a laboratorní účely, například ke zkapalnění plynů nebo při výrobě polovodičů. V tomto odvětví se používá výhradně konstrukce FPSE. Ta se po dlouholetém vývoji firmy Sunpower, viz kap. 3.1.8., dostala na úroveň špičkové technologie kryochladičů. Ačkoliv je FPSE složitější konstrukce a má vyšší náklady na výrobu než některé jiné druhy kryochladičů, má nízké vibrace a hluk, je extrémně spolehlivý a bezúdržbový. Dosahuje velmi nízkých teplot za udržení nejvyšší účinnosti. Konstrukce má navíc nejmenší rozměry na jednotku výkonu, takže je možné ho snadno integrovat, a to s libovolnou orientací. Protože pracovní píst osciluje, musí být vybaven redukcí vibrací tzv. balancerem. Princip kryochladiče spočívá v odvádění tepla, proto musí být také vybaven systémem pro chlazení. K tomu je možné použít chlazení vodou, nebo prosté žebrování. Kryochladiče firmy Sunpower se osvědčily natolik, že je začala využívat i NASA. [35]



Obrázek 28: Kryochladič CryoTel MT [35]

Příkon	80 W
Min. teplota	40 K (-233,15 °C)
Hmotnost	2,1 kg
Délka	242,8 mm
Vnější průměr	73 mm
Stabilita teploty	±0,1 K
Napájení	DC 24 V
Životnost	200 000 h

Tabulka 7: Parametry CryoTel MT (upraveno) [35]

6 Závěr

Situace okolo Stirlingova motoru je velmi proměnlivá. Řada výzkumů a vývoju skončila nezdarem a některé vedly až k bankrotu podniků. I samotný trh je velmi nestabilní. Velký počet firem zmiňovaných ve starší literatuře již zanikl nebo upustil od Stirlingova motoru a zaměřil se na jiné technologie. Na druhou stranu některé firmy, které setrvaly ve vylepšování, dovedly své produkty na úroveň konkurenceschopnosti a získaly své místo na trhu.

V mikrokogeneraci má Stirlingův motor velký potenciál. S ohledem na jeho výrobní cenu má uplatnění tam, kde není možné použít konkurenční technologie. Patří sem vzdálené objekty s potřebou získávání energií z lokálních zdrojů biomasy nebo objekty v extrémně drsných podmínkách, kterým konstrukce Stirlingova motoru odolává. Vhodné využití najde i v systémech, ve kterých Stirlingův motor slouží jen jako doplňkové zařízení. Jeho použití v kogeneraci má své opodstatnění i z ekologického hlediska, proto je možné očekávat podpůrná opatření ve formě dotací, které by takovou technologii zpřístupnily široké veřejnosti.

Výskyt kogeneračních jednotek na bázi Stirlingova motoru pro průmyslová zařízení je spíše raritou a většina projektů končí u plánování a projektování. Teoretické využití by bylo velmi zajímavé, ekonomicky je však stále nevýhodné oproti konkurenčním technologiím.

Konstrukce s parabolickým zrcadlem má své určité výhody, ale v masové výrobě se potýká s nedostatky jako je náročná údržba. Je možné setkat se s mnoha amatérskými konstrukcemi, které generují velmi malý výkon a slouží především jako zajímavost. V komerční výrobě je prozatím převládán fotovoltaickými panely, které mají sice významně nižší účinnost, ale vlivem nižší pořizovací ceny a vhodnosti jejich umístění jsou velmi žádané.

Zařazení Stirlingova motoru do systému recirkulace výfukových plynů se zatím zdá jako nejlepší možnou volbou. Elektronické metody využití tepla z výfukových plynů nedosahují takových výsledků jako termodynamické cykly. Z těch má pro tento systém optimální vlastnosti Stirlingův cyklus. Výstupní výkon poskytuje řadu možností využití pro pomocná zařízení motoru nebo jiné spotřebiče vozidla. Zda bude integrace Stirlingova motoru do systému recirkulace výfukových plynů výhodná je otázkou následujících praktických výzkumů, ale se zpřísňujícími požadavky na emise je možné předpokládat, že se systémy recirkulace výfukových plynů budou nadále vyvíjet.

Pomocná motorová jednotka je ve své podstatě mikrokogenerační nebo trigenerační jednotka. Nahrazení dieselového spalovacího motoru Stirlingovým motorem by mohlo být další úrovní snižování emisí u nákladních vozidel. V této oblasti jsou jiné možnosti jen elektrické akumulátory nebo další vývoj a instalace zařízení upravující výfukové plyny dieselového motoru. S těmi se však výrazně zvyšuje pořizovací cena na úroveň srovnatelnou s cenou Stirlingova motoru.

Fakt, že Stirlingův motor potřebuje pro svou činnost pouze rozdíl teplot vně motoru, z něho činí velmi univerzální stroj s širokou oblastí využití. Avšak jako každý stroj má své nevýhody a je potřeba ho využívat tam, kde vyniknou jeho výhody. Proto už se s ním nejspíš nesetkáme v přenosných generátorech nebo v automobilech, ale hlavně v kryochladičích, ve stacionárních aplikacích k využití odpadního tepla a v kogeneraci. V případě navazující práce by bylo vhodné věnovat se systému recirkulace výfukových plynů.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [2] WALKER, Graham, Edward R. BINGHAM, Fauvel R. OWEN a Graham T. READER. *The Stirling Alternative. Power System, Refrigerants and Heat Pumps*. Yverdon: Gordon and Breach Science Publ., 1999. ISBN 9782881246005.
- [3] ŠKORPÍK, Jiří. Stirlingův motor. *Transformační technologie* [online]. 2013, ISSN 1804-8293 [cit. 2023-11-13]. Dostupné z: https://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor_332013.html
- [4] MIMO DISCOVERY. *Stirling engines* [online]. 31.12.2023 [cit. 2024-01-24]. Dostupné z: <https://www.beyonddiscovery.org/stirling-engines/dli-witf121.html>
- [5] A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology. *Applied energy* [online]. 2021, 15.7.2021, 24 [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2021.116965
- [6] WALKER, Graham. *Stirling-cycle machines*. Oxford: Clarendon Press, 1973. ISBN 9780198561125.
- [7] MACHÁČEK, Jan. *Stirlingův termodynamický cyklus*. Brno, 2009. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [8] SUNPOWER INC. *Stirling cycle* [online]. c2024 [cit. 2024-01-24]. Dostupné z: <https://www.sunpowerinc.com/our-technologies/stirlingcycle>
- [9] SENFT, James R. *Ringbom stirling engines*. Oxford: University Press, 1993. ISBN 0195077989.
- [10] SVĚT ENERGIE. *Stirlingův motor, výklad* [online]. c2020 [cit. 2024-01-24]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/stirlinguv-motor/vyklad>
- [11] SUNPOWER INC. History. *Sunpowerinc* [online]. c2024 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.sunpowerinc.com/about-sunpower/history>
- [12] MDPI. Free-Piston Stirling Engine Technologies and Models. *MDPI* [online]. 2021, 20.9.2021 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/21/7009>
- [13] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN isbn8073001187.
- [14] POVÝŠIL, Roman. *Mikrokogenerace - efektivní nástroj stability a bezpečnosti dodávek energie*. 2011. Dostupné také z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/mikrokogenerace.pdf>
- [15] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřízení a provoz*. Praha: GAS, 2007. GAS. ISBN 978-80-7328-151-9. Dostupné z <https://www.mpo->

efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf.

- [16] KARAFIÁT, Josef. *Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla*. Praha: ORTEP, s.r.o, 2006. Dostupné také z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>
- [17] ČEZ. *Nemocnice v Havlíčkově Brodě a Pelhřimově modernizují energetiku*. [online]. 2020 [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy>
- [18] MOTORGAS. *Teplárna Prachatice* [online]. 2020 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.motorgas.cz/cs/portfolio/kogenerace-teplarna-prachatice/>
- [19] ZORG BIOGAS. *Jenbacher JMS 320 GS-BL* [online]. c2024 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://zorg-biogas.com/equipment/generators>
- [20] ŠVAŇA, Vladan. *Trigenerační výroba energií s využitím plynových motorů* [online]. MOTORGAS, 2021. Dostupné také z: <https://www.motorgas.cz/wp-content/uploads/2021/03/TRIGENERACE-prednaska.pdf>
- [21] BABAMIRI, Arash. *Multi-criteria evaluation of a novel micro-trigeneration cycle based on α -type Stirling engine, organic Rankine cycle, and adsorption chiller* [online]. c2021 [cit. 2024-03-11]. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115162
- [22] TEDOM vyvíjí vlastní Stirlingův motor. *Enviweb* [online]. 2007 [cit. 2024-03-03]. ISSN 1803-6686. Dostupné z: <https://www.enviweb.cz/62085>
- [23] VIESSMANN. *Přehled produktů* [online]. c2024 [cit. 2024-03-04]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/>
- [24] MICROGEN ENGINE CORPORATION. *News/Information* [online]. c2019 [cit. 2024-03-04]. Dostupné z: <https://www.microgen-engine.com/news-information/>
- [25] ÖKOFEN. *Pelety, fotovoltaika a Stirlingův motor* [online]. [cit. 2024-03-04]. Dostupné z: <https://www.oekofen.com/>
- [26] SHRIEVES, Jason. *Qalovis Energy Introduction and FleXgen Overview* [online]. In: . s. 19 [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: <https://www.biowkk.eu/wp-content/uploads/2015/02/12748858113-Qalovis-Shrieves-Flexgen.pdf>
- [27] WÜRFEL, Peter a Uli WÜRFEL. *Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts*. 2. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 9783527408573.
- [28] Demonstration Stirling Engine based Micro-CHP with ultra-low emissions. *SGC* [online]. 2004, 51 [cit. 2024-03-06]. ISSN 1102-7371. Dostupné z: <https://dl.icdst.org/pdfs/files1/324777b951cfb3a9bbb6b35a93d86a9.pdf>
- [29] Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic dish Stirling engine solar power plant. *Energy research* [online]. 2012, 15 [cit. 2024-03-06]. ISSN 1287–1301. Dostupné z: [doi:10.1002/er.2](https://doi.org/10.1002/er.2)

- [30] GÜVEN, Metin. *Optimization and application of Stirling engine for waste heat recovery from a heavy-duty truck engine* [online]. **2019** [cit. 2024-03-08]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2018.10.096
- [31] PAANU, Tommi. *Waste Heat Recovery – Bottoming Cycle Alternatives* [online]. University of Vaasa, 2012 [cit. 2024-03-08]. ISBN 978–952–476–389–9. Dostupné z: https://osuva.uvasa.fi/bitstream/handle/10024/7796/isbn_978-952-476-389-9.pdf?sequence=1
- [32] ALADAYLEH, Wail. Recovery of Exhaust Waste Heat for ICE Using the Beta Type Stirling Engine. *Journal of energy* [online]. 2015 [cit. 2024-03-21]. ISSN 2314-615X. Dostupné z: doi:doi.org/10.1155/2015/495418
- [33] M. BIANCHI a A. DE PASCALE. Bottoming cycles for electric energy generation: Parametric investigation of available and innovative solutions for the exploitation of low and medium temperature heat sources. *Applied energy* [online]. 2011, 10 [cit. 2024-03-08]. ISSN 0306-2619.
- [34] FLANNERY, Barry. Development and experimental testing of a hybrid Stirling engine-adsorption chiller auxiliary power unit for heavy trucks. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2017 [cit. 2024-03-22]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.062
- [35] SUNPOWER INC. *CryoTel MT* [online]. c2024 [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: <https://www.sunpowerinc.com/products/stirling-cryocoolers/cryotel-cryocoolers/mt>

8 Přílohy

Příloha 1: Souhrn kogeneračních jednotek se Stirlingovým motorem.....	52
---	----

Příloha 1: Souhrn kogeneračních jednotek se Stirlingovým motorem

Rok	Firma	Model	Konstrukce	Palivo	Pracovní plyn	Výkon [kW]		Účinnost [%]			Motor
						Elektrický	Tepelný	Elektrická	Tepelá	Celková	
2008	Cleanergy/SOLO	Stirling 161	α	zemní plyn	He	9	26	25	72,2	97,2	-
Od 1993	Whisper Tech	WhisperGen	4 válce β	zemní plyn	N ₂	1-1,2	7,5-14,5	12	77	89	-
Od 2010	Microgen	-	FPSE	zemní plyn	He	1,1	15-36	13	77	90	-
Od 2010	BAXI Ecogen	-	FPSE	zemní plyn	He	1	6	13,5	81,1	94,6	-
Od 2010	Remeha eVita	eVita 25s, 28c	FPSE	zemní plyn	He	1	5	15,9	79,4	95,3	Microgen SE
Od 2010	Viessmann	Vitotwin 300 W	FPSE	zemní plyn	He	1	5,3	15,3	81,5	95,8	Microgen SE
Od 2010	Senertec	Dachs Stirling	FPSE	zemní plyn	He	1	5,8	13,3	77,3	90,6	Microgen SE
2012	Disenco	-		zemní plyn	He	3	15	16	76	92	-
Od 2000	Enatech	-	FPSE	zemní plyn	He	1	6,4	12,5	80	92,5	Infinia SE
Od 2008	Bosch Thermotechnik	-	FPSE	zemní plyn	He	1	6,4	13	82	95	Infinia SE
2013	Qnergy	SmartBoiler	FPSE	zemní plyn	He	2,8-7,2	43	15,3	-	99	-
2008	Shanghai MircoPower	4R90GZ	α	zemní plyn	He	50	90	28-32	-	>85	-
2003	Stirling Danmark	-	β	biomasa	He	31	272	9,2	80,8	90	-
2007	Stirling Danmark	SM5A	β	zemní plyn bioplyn	He	9	25	20-22	-	80-88	není již dostupný
2004	Stirling Danmark		β	biomasa	He	75	475	12	74	86	není již dostupný
2010	Stirling Biopower/ Qalovis	FlexGen	4 válce β	štěpka pelety	He	35	65	29	-	78	-
Od 2005	Sunmachine	-	α	pelety	N ₂	3	10,5	20	70	90	není již dostupný
2014	Genoastirling Cardozo	-	γ	pelety	N ₂	0,489	15	2,3	69,7	72	-
2018	Zhu	-	FPSE	elektřina	He	2,9	6,3	28	59,5	87,5	-
2020	Park	-	FPSE	zemní plyn	He	0,96	2,75	23	65	88	-
2019	ÖkoFEN	Pellematic Condens_e	FPSE	pelety	He	0,6-1	10-16	13	94	107	Microgen SE