ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy

STIRLINGŮV MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. JAN HROMÁDKO, PhD.

Autor práce: PETR BLAŽEK

2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Petr Blažek

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Stirlingův motor

Název anglicky

Stirling engine

Cíle práce

Cílem práce je vytvořit literární rešerši s vlastními komentáři zabývající se Stirlingovým motorem.

Metodika

- prostudovat základní literaturu v oblasti Stirlingova motoru
- kontaktovat významné organizace zabývající se danou problematikou
- provést globální literární rešerši v dané problematice
- vlastní rozbor problematiky Stirlingova motoru
- návrh doporučení a předpokládaný vývoj v oblasti využití Stirlingova motoru

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran formátu A4

Klíčová slova

Stirlingův motor, kogenerační jednotka, alternativní zdroj energie, vnější spalování

Doporučené zdroje informací

1. Hromádko J.: Speciální spalovací motory a alternativní pohony, Nakladatelství Grada, Praha, 2012, ISBN 978-80-247-4455-1
2. Kameš, J.: Alternativní pohony automobilů. Nakladatelství BEN, Praha 2004. ISBN 80-7300-127-6
3. Vlk, F.: Alternativní pohony motorových vozidel. Nakladatelství a zasilatelství Vlk, Brno, 2004. ISBN 80-239-1602-5
4. Rauscher, J.: Spalovací motory, Studijní opory, VUT FSI Brno, 2004
5. Macek, J: Spalovací motory I, ČVUT Praha, 2007, ISBN 978-80-01-03618-1
6. Scholz, C.: Konstrukce pístového spalovacího motoru. Skripta TU Liberec 2003, ISBN 80-7083-693-8

Předběžný termín obhajoby

2015/05 (květen)

Vedoucí práce

Ing. Jan Hromádko, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 13. 1. 2014

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 2. 2014

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.
Děkan

V Praze dne 31. 03. 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Stirlingův motor* vypracoval samostatně a všechny použité zdroje jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 29.3.2015

…….

podpis autora

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce je představení Stirlingova motoru, zhodnocení jeho využití v praxi a návrh dalšího možného rozvoje v této oblasti. První část je věnována historickému vývoji Stirlingova motoru. V další části je stručně vysvětlena jeho funkce, popsány jednotlivé komponenty, představeny všechny modifikace a zhodnoceny hlavní výhody a nevýhody. Poslední část se zabývá využitím motoru v budoucnu s ohledem na jeho vlastnosti, konstrukci a možné provedení.

Klíčová slova:

Stirlingův motor, kogenerační jednotka, alternativní zdroj energie, vnější spalování

Stirling engine

Abstract:

The aim of this thesis is to introduce the Stirling engine, to evaluate its potential use in practice and to propose possible further development in this area. The first part is devoted to the historical development of the Stirling engine. The next part contains brief explanation of its function, describes the individual components, introduces all modifications and evaluates the main advantages and disadvantages. The last part deals with the use of the engine with respect to its properties, structure and possible design.

Keywords:

Stirling engine, cogeneration unit, alternative energy resource, external burning

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Janu Hromádkovi Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky, cenné rady a ochotu při konzultování práce.

OBSAH

ÚVOD **8**
1 HISTORICKÝ VÝVOJ **9**
2 CHARAKTERISTIKA MOTORU **11**
2.1 KOMPONENTY MOTORU 11
2.1.1 Ohřívač *12*
2.1.2 Regenerátor *13*
2.1.3 Chladič *14*
2.2 PRINCIP ČINNOSTI MOTORU 15
2.3 CYKLUS MOTORU 18
2.3.1 Ideální cyklus motoru *18*
2.3.2 Skutečný cyklus motoru *21*
2.4 MODIFIKACE STIRLINGOVA MOTORU 22
2.4.1 Modifikace α *22*
2.4.2 Modifikace β *24*
2.4.3 Modifikace γ *24*
2.5 ENERGETICKÁ BILANCE 25
3 VYUŽITÍ STIRLINGOVA MOTORU **27**
3.1 HISTORICKÉ VYUŽITÍ 27
3.2 VYUŽITÍ V SOUČASNOSTI 31
3.2.1 Vývoj v tuzemsku *31*
3.2.2 Zahraniční vývoj *34*
3.3 VÝHODY A NEVÝHODY MOTORU V POROVNÁNÍ SE SPALOVACÍM MOTOREM 41
3.3.1 Výhody *41*
3.3.2 Nevýhody *41*
DOPORUČENÍ A ZÁVĚR **43**
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ **46**
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ **48**

Úvod

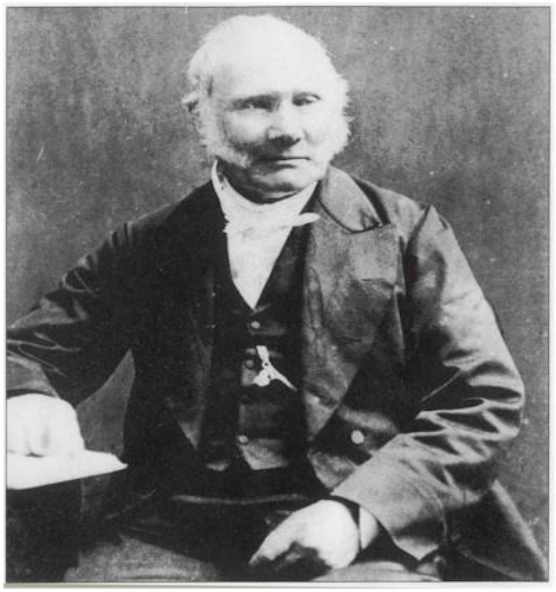
Vynález parního stroje v 18. století znamenal pro lidstvo obrovský pokrok především v dopravě. Po celém světě byly četně vystavovány železniční tratě, které urychlovaly spojení především na delší vzdálenosti. V době největšího rozmachu parního stroje, tedy začátkem 19. století byl zkonstruován i Stirlingův motor. S trochou nadsázky by se dalo říci, že měl tento motor určitý náskok před motorem zážehovým a vznětovým, přesto se mu takové slávy jako předchozím zmiňovaným nedostalo. Jeho vynálezce Robert Stirling, který v podstatě neměl technické vzdělání, jej vynalezl s cílem konkurovat právě parnímu stroji. Pokoušel se o nahrazení parního stroje v lokomotivě jeho motorem, ale ten se bohužel v těchto podmínkách ukázal jako nevhodný. Úspěšnější byly aplikace motorů s menšími výkony.

Poměrně dlouhou dobu byl však tento vynález opomíjen. Pomyslné znovuobjevení tohoto motoru nastalo až v 50. letech minulého století, kdy posilující ropná krize vytvářela čím dál větší nátlak nejen na výrobce automobilů, ale i na ostatní průmyslová odvětví závislá na dostupnosti fosilních paliv. Všechny tyto okolnosti výrazně přispěly k tomu, aby se Stirlingův motor vrátil mezi více využívané pohony. Motor byl zkušebně namontován například do automobilu, ale zde se také příliš neosvědčil. V současnosti je motor využíván především pro pohon kogeneračních jednotek. Splňuje zde veškeré požadavky na motor kladené a stal se proto v tomto odvětví velice oblíbeným.

1 Historický vývoj

První zmínky o Stirlingově motoru sahají do 19. století, přesněji řečeno do roku 1806. Z tohoto roku se zachovaly první záznamy o existenci tepelného motoru s otevřeným cyklem, který jako první sestrojil pravděpodobně Sir George Cayley (1773 – 1857). Vynález si ale nenechal patentovat. To se povedlo až skotskému pastorovi Robertu Stirlingovi (1790 – 1878) dne 27. září 1816. Jeho snahou bylo sestrojit motor, který by mohl konkurovat parnímu stroji. V době vydání patentu nebyla obecná teorie tepelných motorů popsána. Je víc než zřejmé, že Stirling chápal všechny náležitosti nutné k sestrojení motoru, tedy především podmínky nutné k přeměně tepla na mechanickou práci. Dva roky po vydání patentu zkonstruoval motor s výkonem 2 hp, který byl určen k čerpání vody z kamenolomu. V následujících letech si nechal zapsat ještě dva patenty na zdokonalení motoru a rovněž sestrojil regenerátor (ekonomizér), což podstatně zvýšilo jeho účinnost. V jeho prospěch hovoří i fakt, že nepotřeboval nijak kvalifikovanou obsluhu. Parní stroj byl v té době považován za nebezpečný. Kotle vlivem nedokonalé regulace často praskaly a zapříčinily tak v mnoha případech smrtelná zranění. Motor zkonstruovaný Stirlingem byl také levnější na výrobu a mnohem méně náročný na údržbu. Oproti parnímu stroji měl velmi tichý chod a v podstatě se neopotřebovával. Naopak v jeho neprospěch hovoří technické problémy spojené s jeho konstrukcí. V této době nebyly známy materiály, které by při větší konstrukci a výkonu vydržely potřebné tepelné namáhání. Navzdory těmto negativním vlastnostem si motor našel své uplatnění. Nejčastěji se používal jako čerpadlo, případně pro pohon navijáku. V menším provedení se používal pro pohon šicích strojů nebo zubařských vrtaček. Jako palivo mohla být použita pevná, kapalná i plynná paliva, což bylo velice praktické. [1][2][16]

Obr. 1: Robert Stirling



Zdroj: http://members.jcom.home.ne.jp/kobysh/stirling/Portrait.html

Značné výhody tohoto motoru vedly v následujících letech k jeho dalšímu vývoji, o který se snažilo hned několik konstruktérů. Kromě samotného Stirlinga mnoho motorů pro konkrétní využití sestrojil známý vynálezce John Ericsson (1803 – 1889). Za svůj život zkonstruoval motory využívané například v zemědělství nebo i průmyslu. Za jednu z jeho nejznámějších aplikací motoru je považována bitevní loď zvaná Monitor z období občanské války v USA. Jako první také sestrojil Stirlingův motor, jehož pohon zajišťovala pouze sluneční energie. Konstrukci větších a výkonnějších Stirlingových motorů značně bránily metalurgické možnosti. [1][18]

Zájem byl tedy spíše o menší motory, které byly mnohem méně poruchové. Koncem 19. století začal motoru vážně konkurovat nově vyvinutý elektromotor a zejména pístový plynový spalovací motor, z něhož později vzešly motory zážehové a vznětové. Za konstruktéra zážehového motoru je považován Karl Benz (1844 – 1929), který si motor patentoval v roce 1879. Motor měl malou hmotnost na jednotku výkonu, relativně vysokou účinnost a stal se tak velice oblíbeným. Naproti tomu Stirlingův motor měl nižší účinnost, byl náročnější na technologii výroby a měl malý poměr hmotnosti vůči jednotce výkonu. Vznětový motor byl sestrojen Rudolfem Dieslem (1858 – 1913) a oproti Stirlingovu motoru měl v podstatě shodné výhody jako motor zážehový. [3][2]

Stirlingův motor upadl na nějaký čas v zapomnění a jeho použití bylo spíše sporadické. Krátce před druhou světovou válkou se dalším vývojem motoru zabýval známý fyzik Gerard Philips (1858 –1942). Philips vešel ve známost díky výrobě malých přenosných radiopřijímačů. Jeho hlavním cílem bylo vytvořit malý generátor pro vysílací stanice, který by nerušil samotné vysílání. Klasický benzínový spalovací motor využíval pro zapálení směsi vysoké napětí, které vysílání rušilo. Podařilo se mu vyvinout motor o výkonu 200 W, který byl pro malé radiostanice jako stvořený. Při pokusech ve snaze zvýšit výkon také zjistil, že jako pracovní plyn se mnohem více hodí helium nebo vodík, protože tyto plyny mají na rozdíl od vzduchu nižší molekulovou hmotnost. [1]

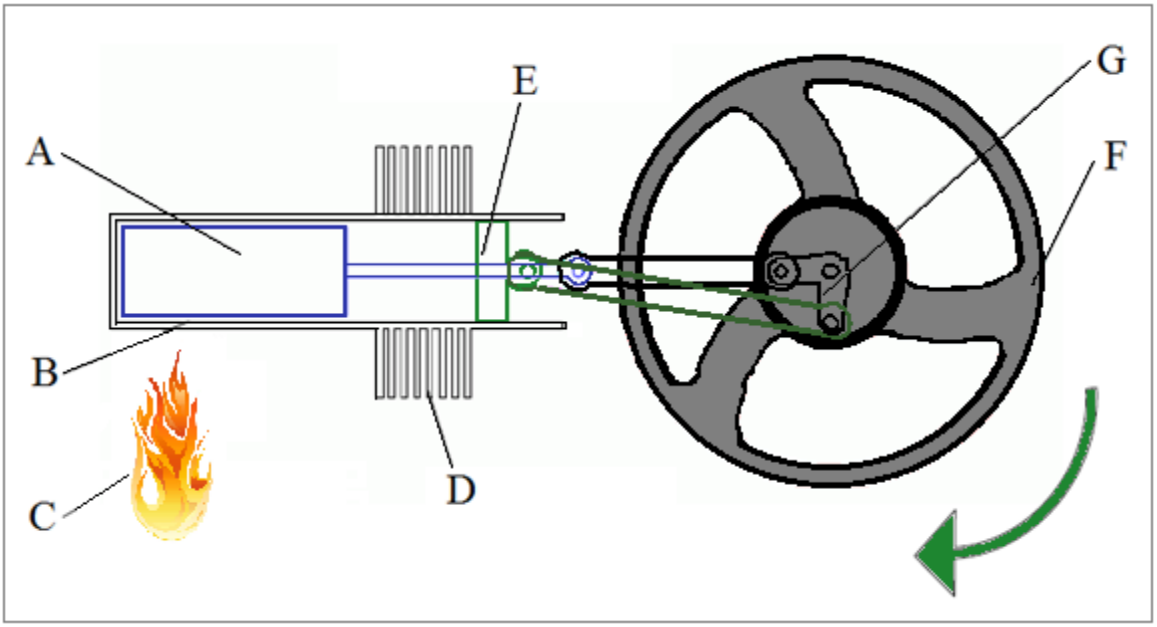
2 Charakteristika motoru

Stirlingův motor řadíme mezi teplovzdušné objemové motory s vnějším spalováním. Práce je vykonávána změnou objemu, teploty a tlaku pracovního plynu. Vlivem otáčení klikové hřídele je plyn přesouván opakovaně za pomoci pístů mezi studenou a ohřívanou stranou pracovního válce. Mezi studenou a ohřívanou částí je navíc umístěn regenerátor. [4][6]

2.1 Komponenty motoru

Všechny modifikace Stirlingova motoru se skládají vždy z několika neměnných součástí, jejichž uspořádání je závislé na zvolené modifikaci motoru. Druhy a odlišnosti jednotlivých modifikací budou popsány později. Popis jednotlivých částí motoru názorně ukazuje obr. 2. V tomto případě se jedná o motor v modifikaci β. [20]

Obr. 2: Motor v modifikaci β, popis komponent



Zdroj: vlastní zpracování

Legenda:

A – přeháněcí píst (přehaneč) B – ohřívaná strana válce C – zdroj tepla

D – chladící žebra E – pracovní píst F – setrvačník

G – kliková hřídel

Pro jednoduchost není na obrázku zobrazen regenerátor. Zpočátku motory tento prvek neměly. Byl vyvinut až později ve snaze zvýšit účinnost motoru. Jeho funkce bude popsána dále a na obrázcích je vždy znázorněn fialovou barvou.

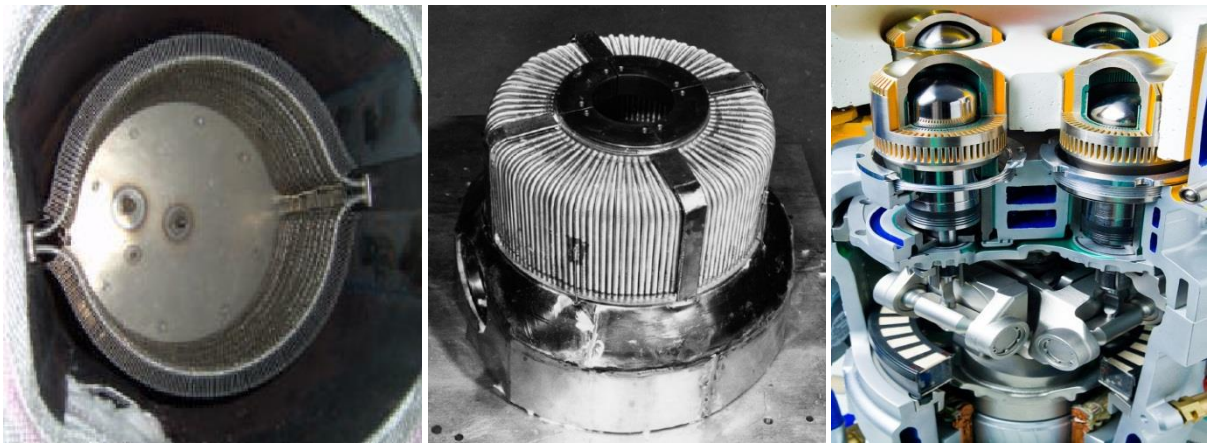
U modifikace α se písty nazývají kompresní a expanzní. Expanzní píst se nachází v ohřívané a kompresní v ochlazované části válce.

Níže jsou podrobněji popsány tři nejdůležitější části motoru - ohřívač, regenerátor a chladič.

2.1.1 Ohřívač

Ohřívač slouží k ohřevu teplé strany válce motoru. Jedná se tedy o tepelný výměník, který pracuje vně motoru a pomocí něhož je do motoru dopravováno teplo. Toto teplo se přivádí buď ze spalin, nebo v případě solárního pohonu, ze slunečních paprsků. Obrázky níže znázorňují několik možných konstrukčních variant ohřívačů. [4]

Obr. 3: Ohřívače motoru



Zdroj: http://www.transformacni-technologie.cz/obrazky/820.jpg

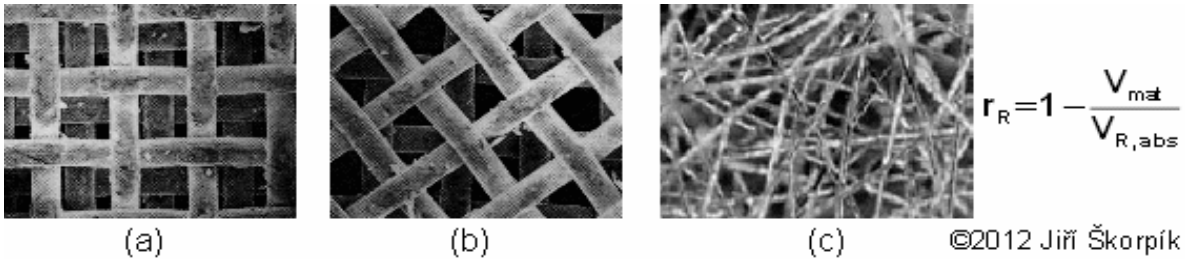
Vlevo je zobrazen ohřívač motoru V160 společnosti United Stirling. K ohřevu zde slouží dvě řady žebrovaných trubek. Uprostřed je ohřívač motoru V4X35, který je tvořen pouze z hladkých trubek. Vpravo se ohřev motoru uskutečňuje přímo přes žebra válce. Ohřívač jako takový zde není a teplo tak proudí podél válce. Předpokladem pro správnou funkci motoru je fakt, že ohřívač bude tvořit většinu tzv. mrtvého objemu ohřívané části motoru. [4]

Teplo není v ohříváku předáváno pracovnímu plynu kontinuálně. Přenos tepla probíhá střídavě, obdobně jako je tomu v regenerátoru. Z toho je patrné, že samotná teplota pracovního plynu se při běhu motoru mění ve větší míře než teplota povrchu uvnitř ohříváku. V případě, že je teplota pracovního plynu menší než teplota na vnitřní straně ohříváku, je toto teplo předáváno pracovnímu plynu a naopak. Vnitřní povrch ohřívače potom funguje jako pomyslný regenerátor, který většinu v sobě akumulovaného tepla předá pracovnímu plynu. Z hlediska teplotních změn je mnohem více namáhán vnitřní povrch ohříváku, proto jeho konstrukce vyžaduje použití speciálních materiálů. Tento velký rozsah teplot je dán především tlumením teplotních změn. Pro usnadnění výpočtu potřebné velikosti přestupní plochy byl proto zaveden pojem střední teplota pracovního plynu a střední teplota vnějšího povrchu ohřívače. Střední teplota vnějšího povrchu ohřívače není nic jiného než střední teplota spalin při průchodu ohřívačem. Tyto střední teploty lze určit početně, neboť změna teploty závisí právě na změně tlaku. [4][14]

2.1.2 Regenerátor

Vnitřní konstrukce regenerátoru hraje velkou roli z hlediska správné funkce motoru. Základ tvoří nejčastěji velmi tenké drátky, které jsou spečeny do mřížky, a to buď nahodile, nebo rovnoměrně. V menší míře jsou použity tenké plíšky namísto drátků. Obrázky níže zobrazují detaily jednotlivých struktur. [25]

Obr. 4: Vnitřní matrice regenerátoru



Zdroj: http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html

V případě a) a b) se jedná o rovnoměrnou a v případě c) pak o nahodilou strukturu. Samotná konstrukce regenerátoru je poměrně složitá a při jejím řešení je kladen důraz hlavně na následující vlastnosti:

1) Dosažení co nejmenších tlakových ztrát
2) Zajištění co nejmenšího mrtvého objemu regenerátoru
3) Zajištění regenerace potřebného objemu tepla

Legenda:

r_R [-] – pórovitost regenerátoru

V_{mat} [m^3] – objem matrice regenerátoru (tj. čistý objem drátů)

$V_{R,abs}$ [m^3] – celkový objem regenerátoru

Při samotném výpočtu potřebné velikosti regenerátoru (tj. objemu a teplosměnná plochy) je nutné znát především velikost regenerovaného tepla, dále pak rozdíl teplot pracovního plynu a regenerátoru a hmotnostní průtok v regenerátoru. [4]

2.1.3 Chladič

Chladič slouží v motoru ke chlazení média ve válci. Jedná se opět o povrchový tepelný výměník. Chlazení je možné pomocí kapaliny nebo vzduchu. V případě, že se jedná o chlazení vzduchem, jsou na válci chladící žebra, která tvoří s válcem jeden celek a teplo je odváděno pomocí nich. V optimálním případě chladič utváří většinu mrtvého objemu ochlazované části motoru. Níže je zobrazena možná konstrukce chladiče. [4]

Obr. 5: Chladič motoru Tedom 180V1

Zdroj: http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html

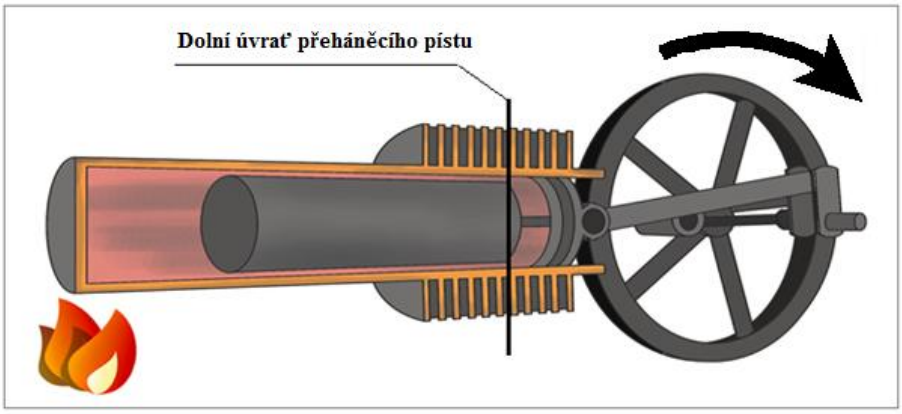
Teplo se pracovnímu plynu neodebírá rovněž stále, ale pouze ve chvíli, kdy se v ochlazované části válce nahromadí ohřáté médium. Rozdíl teplot přímo v chladiči je větší než na jeho povrchu. Opět zde platí, že pokud teplota média nedosahuje teploty vnitřní strany chladiče, je teplo předáváno právě pracovnímu plynu. To platí i v opačném případě. Vnitřní povrch chladiče musí být tedy schopen rychle akumulovat teplo a následně jej odvést. Toto teplo putuje prostřednictvím vnějšího povrchu do chladicí kapaliny, případně je sdíleno se vzduchem. [4]

2.2 Princip činnosti motoru

Jak bylo již zmíněno, Stirlingův motor představuje ve své podstatě tepelný, resp. teplovzdušný stroj, který pracuje na principu roztažnosti plynu. Z toho vyplývá, že ne všechny plyny jsou pro pohon tohoto motoru vhodné. Použitý plyn (médium) musí být dobře tepelně vodivý a musí mít co největší tepelnou roztažnost. K nejčastěji používaným patří vodík, hélium, vzduch nebo dusík. Na palivo pro ohřev válce nejsou kladeny žádné speciální požadavky jako v případě spalovacího motoru. Lze tak lépe redukovat emise vzniklé hořením tohoto paliva a rovněž může být použito méně kvalitní palivo. [1][9][22]

Princip motoru bude dále vysvětlen na modifikaci β bez regenerátoru. Motor se vždy skládá ze dvou pístů. Tyto písty se navzájem zpožďují o ¼ otáčky (přeháněcí píst je v předstihu). Přeháněcí píst se ve válci ukládá s jistou vůlí, aby mohl plyn ve válci okolo něj proudit. Válec je z jedné strany ohříván a z druhé chlazen. Oba písty jsou připevněny ke klikové hřídeli. Na klikovou hřídel je připevněn setrvačník, který hraje v činnosti motoru důležitou roli, neboť pomáhá překonat mrtvý bod motoru a zároveň ztišuje chod. Ke ztišení chodu motoru dochází vlivem vyrovnávání výchylek otáček při běhu motoru. Důležité pro správný chod motoru je také velmi dobré utěsnění pracovního pístu. Obr. 6 znázorňuje motor ve stavu, který budeme považovat pro popis jeho funkce za výchozí. Zároveň zpočátku předpokládáme, že tlak v motoru je stejný jako atmosférický. [1][5][22]

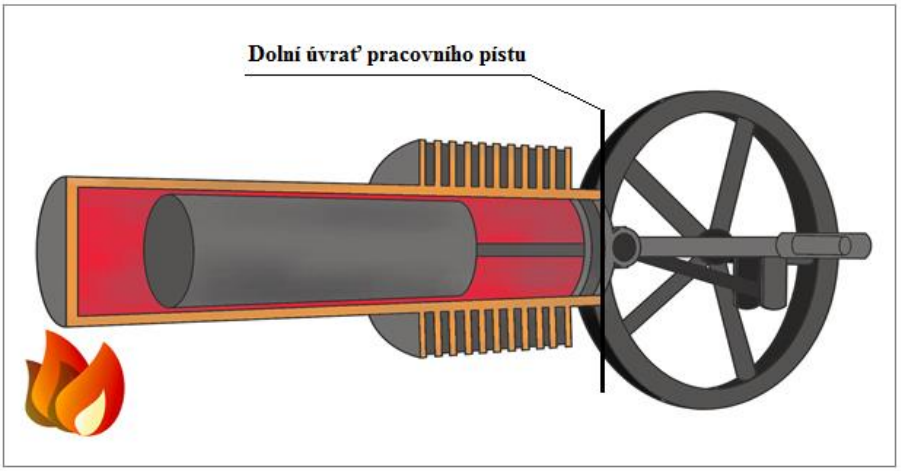
Obr. 6: Stirlingův motor v modifikaci β, 1.fáze



Zdroj: vlastní zpracování

Představme si, že většina plynu se nyní nachází v ohřívané části válce. Celý oběh začíná tím, že se plyn v této části zahřívá a zvětšuje tím svůj objem. Vlivem otáčení klikové hřídele se přeháněcí píst posouvá dále do ohřívané části válce. Pracovní plyn je postupně vytlačován opačným směrem, tedy do ochlazované části válce. Pracovní píst se postupně posouvá do dolní úvratě. V této fázi si lze dobře všimnout již zmiňovaného pootočení pístů vůči sobě na klikové hřídeli. [1][5][23]

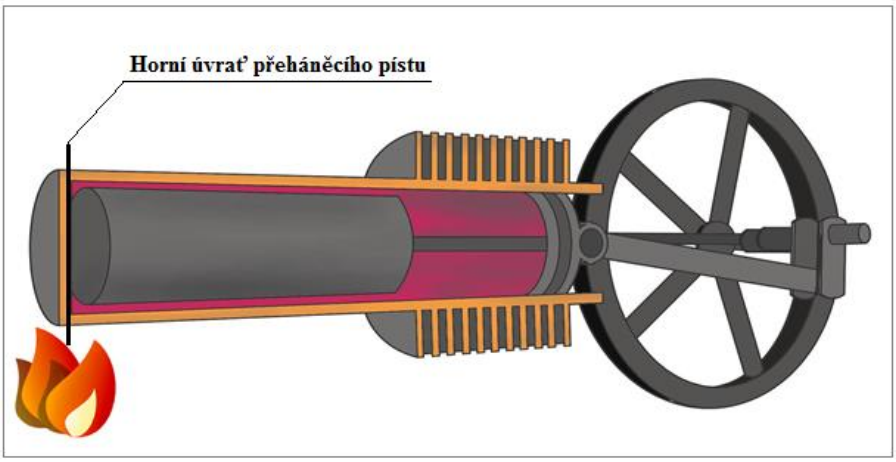
Obr. 7: Stirlingův motor v modifikaci β, 2.fáze



Zdroj: vlastní zpracování

V další fázi (obr. 7) je pracovní píst vyobrazen v dolní úvrati. Přeháněcí píst se již posunul blíže k horní úvrati. Tento píst vytlačuje plyn před sebou a většina plynu je tak postupně soustředěna mezi oba písty tj. v ochlazované části válce. [1][5][23]

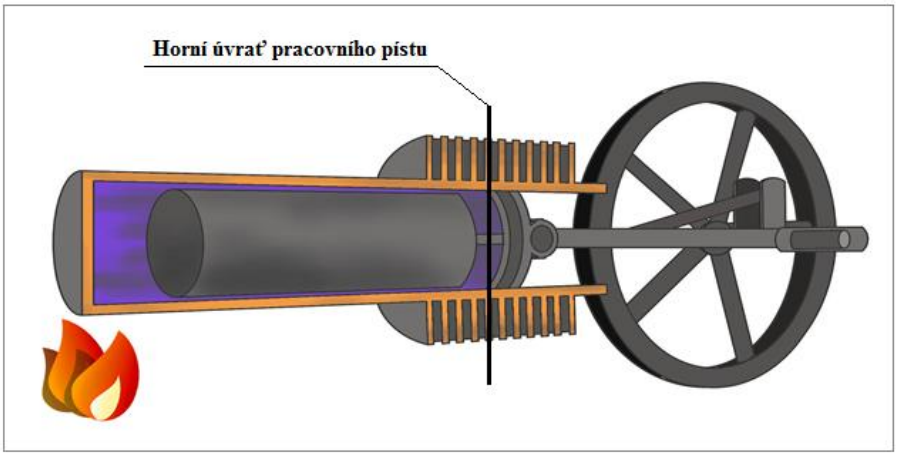
Obr. 8: Stirlingův motor v modifikaci β, 3.fáze



Zdroj: vlastní zpracování

V předposlední fázi (obr. 8) se přeháněcí píst postupně posunul až do horní úvratě a teoreticky všechno médium je v tuto chvíli v ochlazované části válce. Zde se plyn ochlazuje a zmenšuje tím svůj objem. Pracovní píst se z dolní úvratě postupně posouvá do horní úvratě. [1][5]

Obr. 9: Stirlingův motor v modifikaci β, 4.fáze



Zdroj: vlastní zpracování

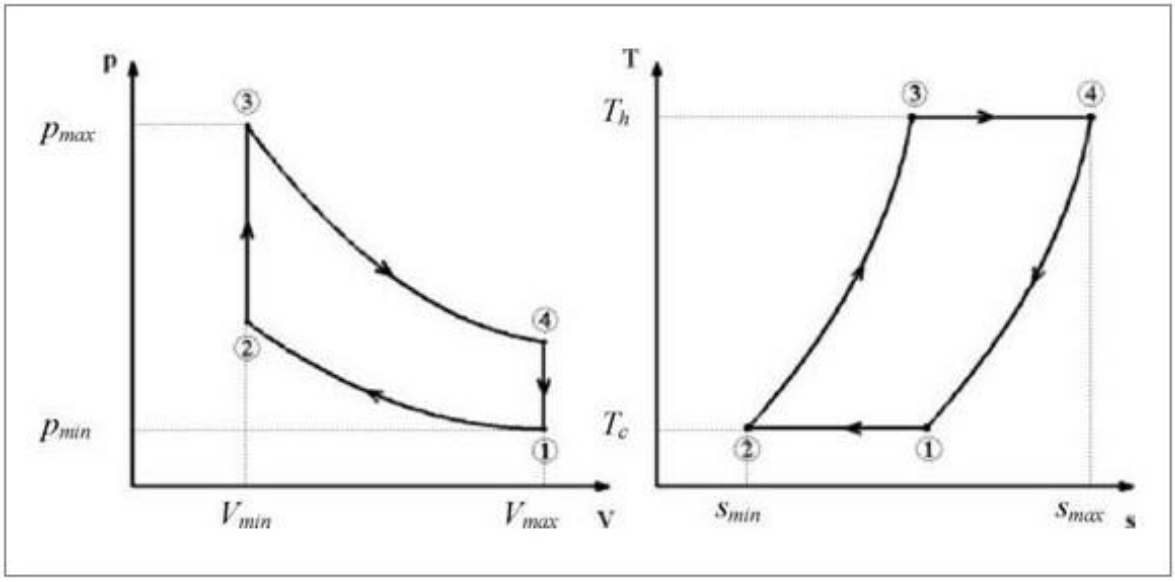
V poslední fázi (obr. 9) se pracovní píst přesunuje do horní úvratě. Přeháněcí píst přesouvá ochlazený plyn z ochlazované do ohřívané části válce. V ochlazované části měl plyn menší objem i tlak. Právě tlak zde často klesá i pod úroveň hodnoty atmosférického tlaku. V ohřívané části válce se obě tyto veličiny naopak znovu zvyšují. Pracovní píst se zpět posouvá směrem do dolní úvratě a celý oběh se cyklicky opakuje. [1][5][24]

2.3 Cyklus motoru

2.3.1 Ideální cyklus motoru

Ideální cyklus Stirlingova motoru se skládá ze dvou izotermických a dvou izochorických dějů. V tomto ideálním případě považujeme oba děje za vratné. Neuvažujeme zde nevyužité (škodné) objemy, skutečnou kinematiku klikového mechanismu, nedokonalost chladiče, nedokonalost regenerátoru a celý systém považujeme za dokonale utěsněný. V reálném cyklu nemá chladič, ohřívák ani regenerátor 100%ní účinnost. Všechny tyto zjednodušení výrazně ovlivňují tvar a průběh p-V a T-s diagramu (obr. 10). Dále si celý cyklus popíšeme z termodynamického hlediska. [4][10]

Obr. 10: p-V a T-s diagram oběhu Stirlingova motoru



Zdroj: http://ctirling.ru/a-low-temperature-differential-stirling-engine-for-power-generation/engine-types-and-classifications/

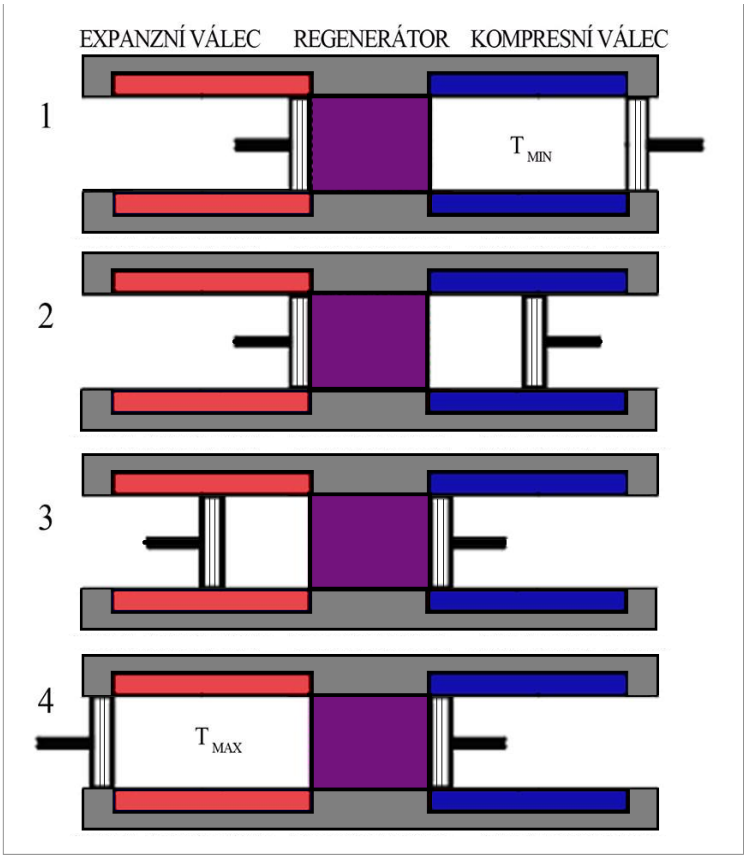
Pro snazší vysvětlení a zobrazení jednotlivých pracovních fází motoru si představme model s protilehlými písty, kompresním a expanzním. Prostor, v němž se pohybuje kompresní píst, je ochlazován na teplotu T_{min}. Naproti tomu prostor, v němž se nachází expanzní píst, je ohříván na teplotu T_{max}. Regenerátor se nachází mezi písty (obr.11). Teplota uvnitř regenerátoru tak bude rovna $T_{max} - T_{min}$. Regenerátorem zvyšujeme teplotní (termickou) účinnost motoru a můžeme se tak přiblížit k účinnosti Carnotova cyklu, jehož účinnost je definována minimální a maximální teplotou v celém oběhu. Toto teplo by jinak bylo vyměněno s okolím a snížil by se tak rozdíl maximální a minimální teploty. Rozdíl těchto teplot je směrodatný z hlediska účinnosti motoru. V případě, že bude mít účinnost regenerace hodnotu 100% a budou dodrženy podmínky správného provozu motoru, lze říci, že termická účinnost Stirlingova motoru bude stejná jako termická účinnost Carnotova cyklu. Tato je dána následujícím vztahem. [9][11][25]

$$\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \qquad [1]$$

Z uvedeného vzorce [1] lze na první pohled odvodit, že pro dosažení co možná nejvyšší účinnosti stroje je zapotřebí dosáhnout co nejnižší teploty T_{min} a naopak co nejvyšší teploty $T_{max,}$ tedy co největšího rozdílu těchto dvou teplot. Při snaze o dosažení těchto teplot narážíme na určité limitní faktory. Nejnižší teplotu limituje teplota chladícího média resp. nejnižší teplotu, které toto médium dokáže přenést. Dosažení co nejvyšší teploty omezují svou tepelnou únosností použité materiály na výrobu ohříváku popř. válce, pístu aj.

Celý cyklus začíná v bodě 1, kdy je teoreticky veškeré médium přemístěno do chladné části válce. Následuje část cyklu 1-2, při které probíhá ve stejném válci komprese. V této fázi se pomocí chladiče udržuje stále nízká (konstantní) teplota označovaná jako T_{min}. Snaha udržet tuto teplotu má velký význam pro účinnost stroje. Práce je při této fázi spotřebovávána a teplo se odvádí. Bod 2 charakterizuje nejmenší objem celého cyklu. Tento objem se z velké většiny přemístí do bodu 3, tedy do ohřívané části válce. Jde o změnu 2-3, při níž se médium ohřeje na maximální teplotu T_{max} a tato teplota je neustále udržována. Poté médium v této fázi expanduje za stálé teploty (teplo je stále dodáváno, tj. válec je neustále ohříván) a je také konána práce. V okamžiku, kdy se píst nachází v horní úvrati, má médium stále stejnou teplotu a opět nejmenší objem. V této fázi je žádoucí teplo z plynu odvést. Tuto změnu znázorňuje stav 4 – 1. Plyn je přemístěn zpět do chladného válce. Zde jeho teplota postupně klesne až na T_{min}. Při tomto přemisťování se v regenerátoru teplo uchovává a opět využívá při přesouvání média ve fázi označované jako 2-3. [1]

Obr. 11: Znázornění pracovních fází motoru



Zdroj: vlastní zpracování

Všechna tato tvrzení platí pro ideální cyklus. V reálném oběhu bude účinnost ještě nižší, neboť nikdy nemůžeme dosáhnout dokonalého utěsnění válce. Budou zde také vznikat škodné objemy (zejména v chladiči, ohříváku a regenerátoru) a s tím spojené tlakové ztráty. Část tepla bude nutně sdílená s okolím. V reálném cyklu nepovažujeme oba izotermické a izochorické děje za vratné. Bereme v potaz, že přestup tepla netrvá nekonečně malý čas a také nemůžeme nikdy dosáhnout teoreticky dokonalé kinematiky. Za technicky vyspělý považujeme motor s účinností 0,4 η a více. [1]

2.3.2 Skutečný cyklus motoru

Skutečný cyklus se od ideálního významně liší. Všechny vlivy, které v ideálním oběhu zanedbáváme, mají velký vliv především na celkovou účinnost stroje. V ideálním cyklu jsme předpokládali nekontinuální pohyb pístu. Písty by se tak pohybovaly v závislosti na požadované změně objemu. Tohoto stavu však není reálně možné dosáhnout, neboť oba písty jsou připojeny na klikovou hřídel a pohybují se kontinuálně. [3]

Další významnou odlišností jsou ztráty vzniklé třením. Tyto ztráty nepříznivě ovlivňují průběh cyklu. Komprese a expanze plynu se po celou dobu neodehrává při stejné teplotě a tyto děje tedy nemůžeme považovat za izotermické. Povrch stěn válců je vzhledem k množství plynu malý a proto zejména při vyšších otáčkách tj. nad 900 min^{-1} neprobíhá dokonalá výměna mezi médiem a stěnou válce. [3][17]

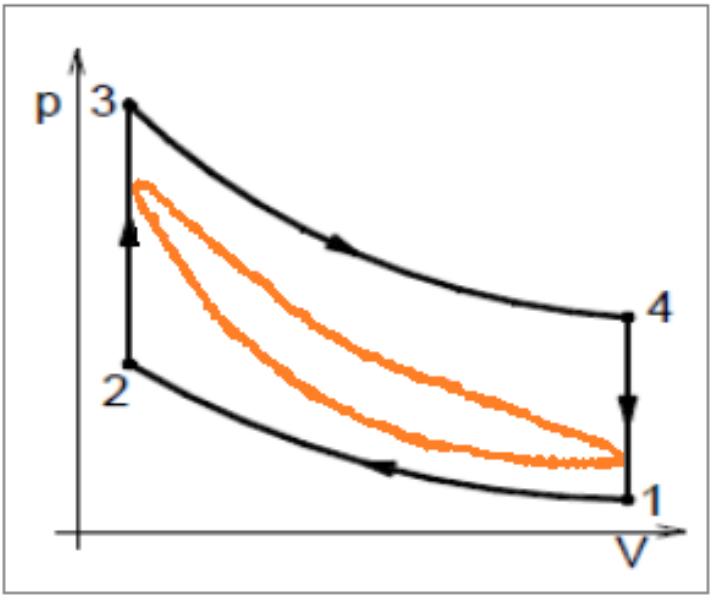
Pro potlačení tohoto jevu jsou na motory montovány přídavné ohřívače a také chladiče. Ohřev a ochlazení plynu lze poté uskutečnit kvalitněji a v kratším časovém úseku, což se pozitivně projevuje hlavně při požadavku na vyšší otáčky motoru. [3]

V případě ideálního oběhu neuvažujeme škodné objemy motoru. Za takové objemy jsou považovány takové, které netvoří zdvihový objem motoru. Mezi takovéto objemy řadíme například vlastní objem regenerátoru, objem ostatních výměníků a vnitřní objem potrubí spojující válce. Velikost celkového škodného objemu snižuje kompresní poměr a výrazně zvyšuje vzniklé tlakové ztráty motoru. [3]

Také regenerátor ve skutečnosti dokonale neabsorbuje všechno teplo a při průchodu média zpět jej všechno opět plynu nepředá. Samotná regenerace tak není dokonalá. Při průchodu plynu z ohřívané části válce do ochlazované části není plynu odebráno veškeré teplo, což má za následek nedokonalé ochlazení plynu. V praxi je tak o mnoho obtížnější přiblížit se teoretické teplotě T_{min} a dosáhnout tak vyšší účinnosti. V případě regenerátoru je tak nutné použít materiály s velmi dobrou tepelnou vodivostí. [3]

Rozdíl mezi ideálním a skutečným oběhem znázorňuje obr. 12. Diagram skutečného oběhu zahrnuje veškeré výše zmíněné ztráty včetně tlakových ztrát, které způsobuje aerodynamické tření. [3]

Obr. 12: Porovnání ideálního a skutečného Stirlingova oběhu



Zdroj: Vlastní zpracování

2.4 Modifikace Stirlingova motoru

Základní podoba Stirlingova motoru se skládá většinou ze dvou válců, jejichž vedení spojuje regenerátor (výměník). Jednotlivé modifikace se mezi sebou odlišují vzájemným umístěním horké a studené části motoru, přičemž každou konstrukci motoru můžeme zařadit do jedné ze tří modifikací – α, β, nebo γ. [1][5]

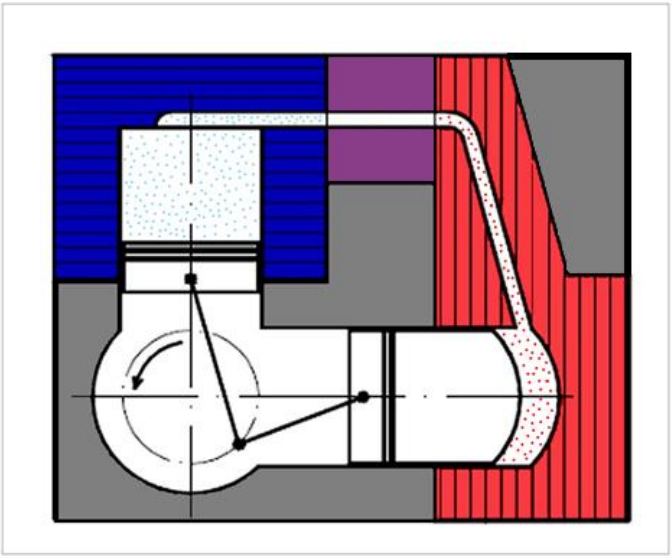
2.4.1 Modifikace α

Pro první a v praxi nejvíce používanou konstrukci Stirlingova motoru je typická poloha chladiče, ohříváku a regenerátoru ve vedení mezi válci (obr.13). Často je součástí této modifikace vyrovnávací nádrž, která propojuje oblasti pod písty. Hlavním cílem této nádrže je snížení tlakového poměru mezi těmito prostory. V optimálním případě se tento tlak rovná střednímu tlaku pracovního plynu. Nežádoucí tlak v prostoru pod písty vzniká hlavně u motorů s menším zdvihovým objemem. Tento zvýšený tlakový poměr má nežádoucí účinky na celkové namáhání a především opotřebení motoru. [4][17]

Obtížné je u této modifikace i utěsnění obou válců. Toto uspořádání válců vyžaduje pro svůj pohon co největší rozdíl teplot. Zároveň můžeme konstatovat, že rozdíl objemu pracovního plynu v ohřívané části válce závisí pouze na pístu v tomto válci. Totéž platí i pro ochlazovanou část válce. [17][28][30]

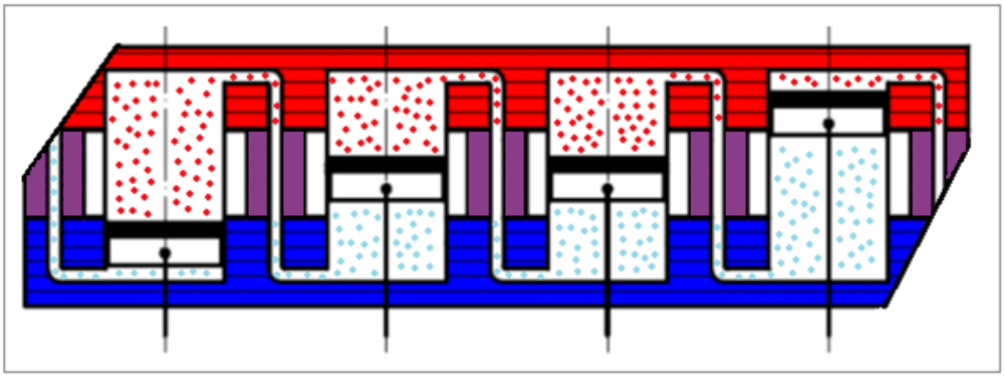
V praxi se můžeme setkat kromě jednočinné modifikace také s dvojčinnou α modifikací (obr. 14). Objem válce pod pístem plní u této modifikace roli ochlazované části válce pro další válec. V případě této modifikace je nutné mít alespoň tři válce, k nejpoužívanějším však patří motory se čtyřmi nebo i šesti válci. Hlavní výhodu tohoto dvojčinného provedení lze spatřovat ve snížení měrné hmotnosti motoru na jednotku výkonu. [1][4][5]

Obr. 13: Motor v modifikaci α



Zdroj: vlastní zpracování

Obr. 14: Dvojčinný motor v modifikaci α

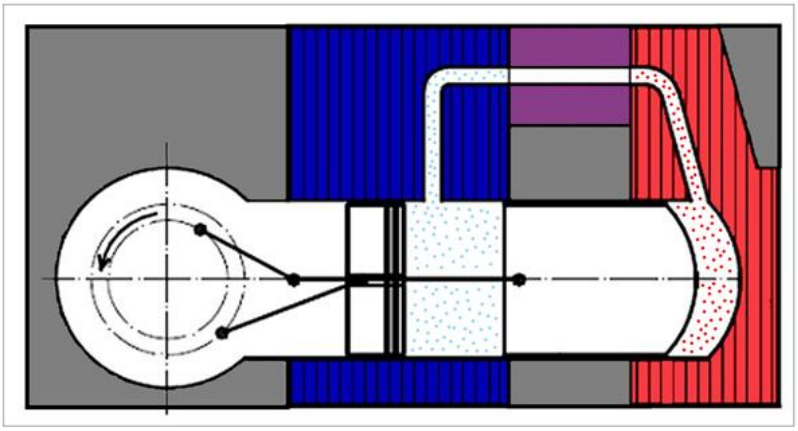


Zdroj: vlastní zpracování

2.4.2 Modifikace β

Modifikaci β charakterizují oba písty umístěné v jednom válci. Písty zde nemůžeme rozdělit na kompresní a expanzní jako u předešlé modifikace. Tím, že se oba písty nachází v jednom válci, se částečně mění i jejich význam při činnosti motoru. Jeden píst můžeme označit jako pracovní (blíže klikové hřídeli) a druhý jako přeháněcí. Právě přeháněcí píst slouží pouze jako „přemisťovač“ média z ochlazované části válce do ohřívané a naopak. Na rozdíl od předchozí modifikace zde závisí rozdíl objemu v ochlazované části jak na ochlazované, tak na ohřívané části válce. Z obr. 15 je patrné, že zde nastává problém s utěsněním ojnice pracovního pístu v duté tyči přeháněcího pístu. Zmiňované utěsnění musí být dvojité (vně i uvnitř), aby nedocházelo k poklesu tlaku ve válci. Tato modifikace se v praxi příliš nepoužívá. [1][4][5]

Obr. 15: Motor v modifikaci β



Obr. 17: Motor v modifikaci β; Zdroj: vlastní zpracování

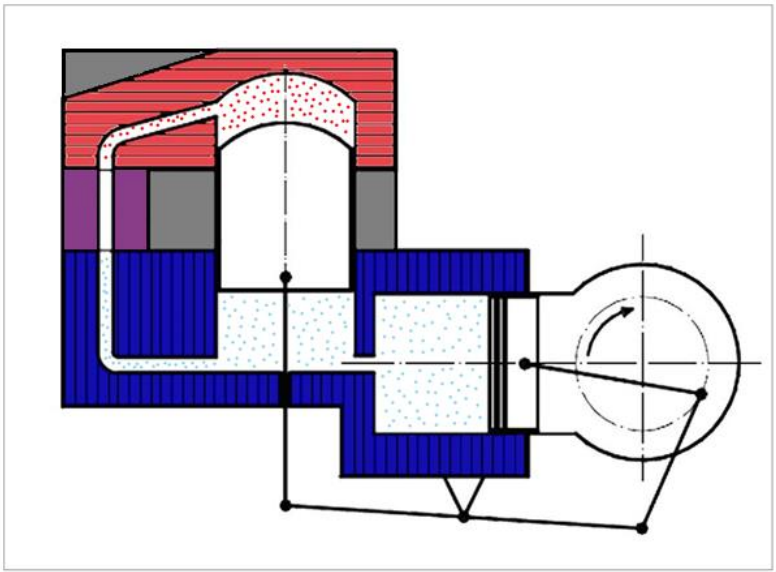
2.4.3 Modifikace γ

Poslední známá modifikace se velmi podobá té předchozí, proto se někdy označuje jako beta modifikace se dvěma válci. Obdobně má také přeháněcí a pracovní píst. Rozdíl spočívá v tom, že tato verze má právě dva válce - opět ochlazovaný a ohřívaný.

Každý z pístů se tedy pohybuje ve svém válci. Oba tyto válce spojuje vedení, na kterém se nachází chladič, ohřívač a regenerátor (stejně jako u modifikace α).

Jak ukazuje obr. 16, nemůže nikdy nastat situace, kdy by byl objem chladného prostoru nulový a to ani v případě nulového mrtvého objemu. V praxi se tento typ používá pouze pro malé motory, ve větší míře se používá při stavbě modelů. [1][4][5]

Obr. 16: Motor v modifikaci γ



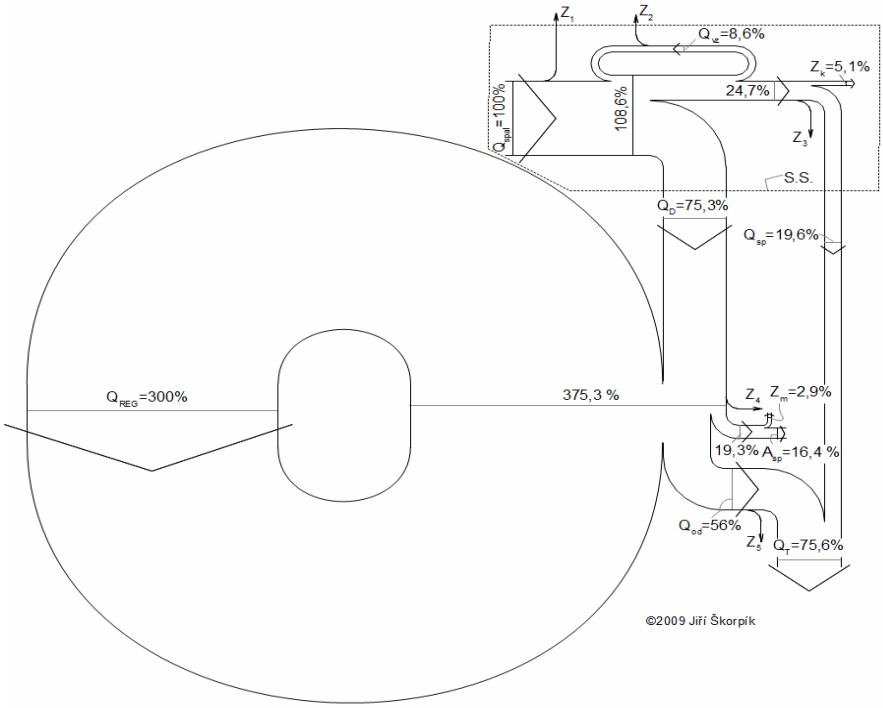
Zdroj: vlastní zpracování

Každá z výše uvedených modifikací je charakteristická svým konstrukčním řešením. V závislosti na tom, v jakém stroji bude motor použit, lze vždy říci, že některá z modifikací bude pro daný typ konstrukce vhodnější. Nelze ale říci, že by některá z modifikací měla oproti ostatním značnou výhodu.

2.5 Energetická bilance

Kvalita převodu tepelné energie na práci je vyjádřena tepelnou účinností na spojce. U technicky vyspělých motorů se tato účinnost pohybuje v rozmezí 15 – 35%. Vypočítáme ji jako poměr práce na hřídeli ku celkovému množství přivedeného tepla. Výše účinnosti závisí na poměru střední teploty pracovního plynu v ohřívané části válce a stejně tak i na tomto poměru na ochlazované straně. Příklad energetických toků znázorňuje následující Sankeyův diagram (viz obr. 17). [4][21]

Obr. 17: Sankeyův diagram energetických toků



Zdroj: http://www.transformacni-technologie.cz/obrazky/253.gif

Jsou dány tyto parametry:

- Palivem je biomasa
- Střední teplota pracovního plynu v ohřívané části - $t_T = 490°C$
- Střední teplota pracovního plynu v ochlazované části - $t_S = 105°C$
- S.S. hranice spalovacího systému
- Q_{spal} [%] teplo uvolněné při spalování paliva
- Q_{vz} [%] teplo spotřebované na předehřev spalovacího vzduchu
- $Q_{spal\text{-}tuv}$ [%] teplo ze spalin využité pro ohřev vody nebo vytápění
- Q_D [%] teplo sdělené pracovnímu plynu v ohříváku
- Q_{reg} [$J \cdot kg^{-1}_{pal}$] množství tepla regenerovaného v regenerátoru
- Z_m [%] mechanické ztráty
- A_{sp} [%] práce motoru na spojce
- Q_{Od} [%] teplo odvedené z pracovního plynu v chladiči
- $Q_{v\text{-}tuv}$ [%] teplo odvedené z jednotky (možno využít pro ohřev teplé užitkové vody)
- $Z_{1...5}$ [%] ztráty sáláním do okolí, ztráty způsobené chlazením bloku motoru apod.
- Z_k [%] komínová ztráta-teplo spalin odvedené do komína

Celková účinnost jednotky dále závisí na účinnosti spalovacího zařízení.

3 Využití Stirlingova motoru

3.1 Historické využití

Jak již bylo zmíněno, Stirlingův motor byl v minulosti vyhledáván pro různé strojní pohony. Za první okamžik, kdy byl motor reálně využit, považujeme rok 1843. V tomto roce sám Robert Stirling upravil parní stroj právě na jím zkonstruovaný motor. V počátcích zaznamenal veliký úspěch. Motor měl totožný výkon jako parní stroj, tedy 27 kW a navíc pracoval oproti parnímu stroji velmi tiše. Další nespornou výhodou bylo o mnoho menší množství spáleného uhlí. Problém nastal až po několika měsících provozu, když prasklo dno válce motoru. Tuto závadu se nepodařilo trvale odstranit a motor byl tak zpět přestaven na parní stroj. Důvodem tohoto neúspěchu byly především nedostatečné znalosti té doby v oblasti metalurgie. Motor se tak pro velké výkony neosvědčil, ale pro menší výkony (přibližně do 5 kW) se stal poměrně oblíbenou náhradou parního stroje. [1][4]

Výraznější posun ve vývoji, a tím i ve využití, nastal v 30. letech minulého století. Už v té době si mnoho výrobců uvědomovalo, že použití klasických pístových spalovacích motorů ve velké míře závisí na dostupnosti fosilních paliv. V roce 1938 nizozemská společnost N. V. Philips začala vyvíjet generátor pro své radiopřijímače. Při dosavadním použití benzínového spalovacího motoru docházelo k rušení kvůli vysokonapěťovému zapalování. Společnosti se podařilo Stirlingův motor zdokonalit a vytvořit tak malý přenosný agregát pro výrobu elektrické energie. Sériové výrobě však zabránila 2. Světová válka, při které byl výrobní závod společnosti zcela zničen. I přesto ve vývoji společnost pokračovala dál. Uvědomovala si, že motor je oproti jiným velice spolehlivý a není náročný na údržbu. V roce 1950 byl tak sestrojen mobilní generátor elektrické energie poháněný právě Stirlingovým motorem (obr.18). [4]

Obr. 18: Mobilní elektrocentrála společnosti N.V.Philips

Zdroj: http://www.transformacni-technologie.cz/obrazky/748.jpg

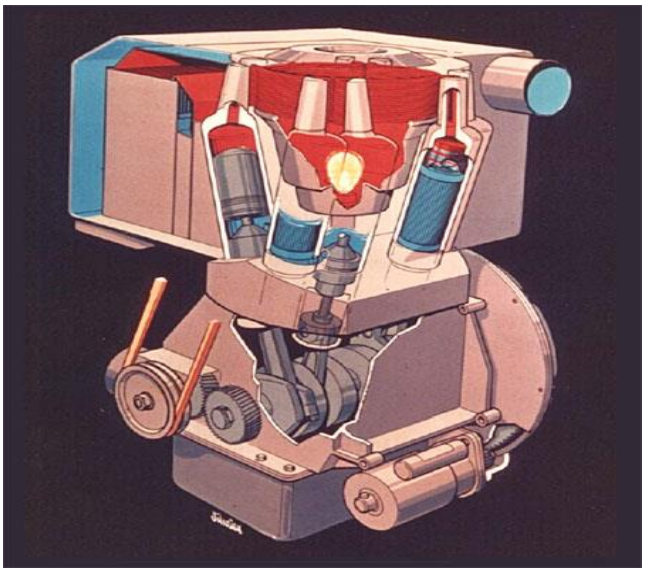
Tato elektrocentrála byla vyráběna sériově a prodalo se jí hned několik set kusů. Udávaný výkon dosahoval 200 W, střední pracovní tlak plynu 1,35 MPa a pracovním plynem byl vzduch.

V následujících desetiletích vývoji motoru velmi pomohly nové znalosti v oblasti metalurgie. S blížící se ropnou krizí bylo také žádoucí vyvinout pro dopravní prostředky pohon nezávislý na ropě. Asi nejvýznamněji se na tomto vývoji podílela firma United Stirling, která se starala o licenci od N. V. Philips. Cílem bylo vyvinout motor využitelný v autobusech, osobních automobilech nebo například v ponorkách. Při zkušebních testech motoru se však ukázalo, že životnost motoru při požadovaném výkonu bude o mnoho nižší, než se předpokládalo. Spojení těchto dvou firem ve vývoji motoru pokračovalo. Prioritou bylo snížit střední tlak a otáčky, a tím dosáhnout nižších výrobních nákladů. Přes veškerou snahu se nakonec ukázalo, že stavba a případná sériová výroba motoru by byla přibližně 2,5 krát dražší než srovnatelný vznětový motor. [1][4]

V 70. letech minulého století byl společností Ford navržen motor pro osobní automobily nesoucí označení V4X2 (viz obr. 19), který byl zkušebně namontován do osobního auta Ford Pinto s automatickou převodovkou. Motor přesvědčil komfortem a tichostí během jízdy. Tento typ motoru se dočkal i řady vylepšení, ale do sériové výroby se nikdy nedostal. [27]

Na jedné straně byl motor velmi tichý, dobře akceleroval i deceleroval, ovšem velkým problémem stále byly jeho vysoké výrobní náklady i při případné o sériové výrobě. [1][4]

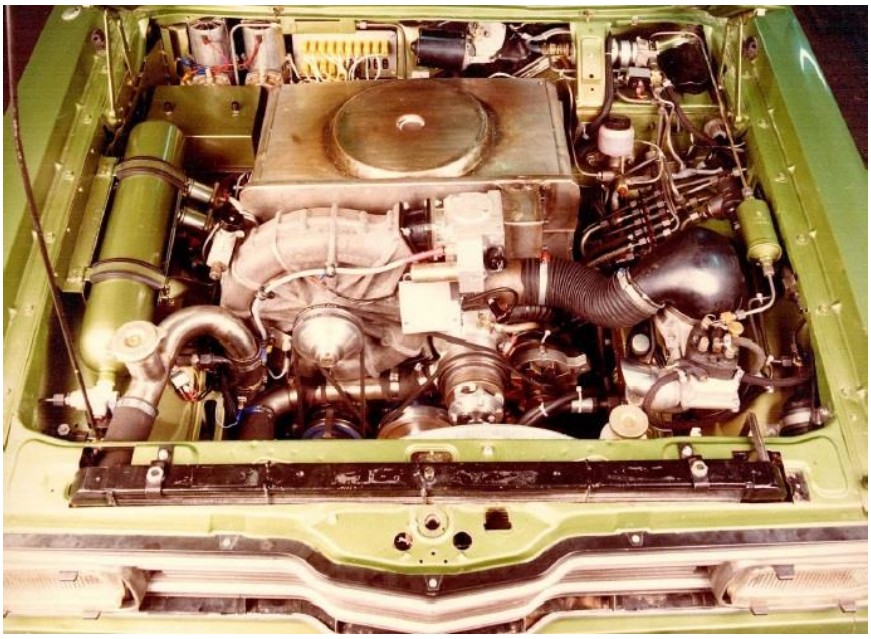
Obr. 19: Motor V4X2



Zdroj: http://img.archive.today/aiN6E/869b6b585a99393e4240d93b85fa47b1f0d3a5dd.jpg

Automobilka postavila v roce 1974 další prototyp automobilu s tímto pohonem. Vylepšený motor s označením V4X35 (obr. 20) byl usazen do vozu Ford Taunus tentokrát s manuální převodovkou. Tato kombinace se ukázala jako nevhodná, protože při použití manuální převodovky je důležité, aby motor byl schopný rychleji reagovat na požadovanou změnu výkonu. U převodovky automatické je tato vlastnost vyžadována v menší míře. Právě schopnost motoru rychle měnit výkon patří u osobních automobilů k nejdůležitějším. Z tohoto důvodu byl vyvinut systém regulace výkonu. Při jeho použití motor výkonové výkyvy zvládal podstatně lépe, nicméně podstatně zvýšil cenu motoru. Zejména kvůli vysoké ceně nebyla sériová výroba nikdy uskutečněna a vše tak zůstalo jen u stádia prototypů. [1][4][27]

Obr. 20: Motor V4X35 ve vozu Ford Taunus



Zdroj: http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html

Poslední zmiňovaný motor dosahoval výkonu 40 hp, pracoval na vodík a během testování bylo najeto přibližně 10 000 km. [4]

Další prototyp motoru nesoucí označení V4X36 byl zastavěn do speciálně upravené a odlehčené karoserie vozu Porsche Bergspider. V tomto automobilu bylo dosaženo rychlostního rekordu 200 $km.h^{-1}$ Stirlingova motoru instalovaném v automobilu. O sériové výrobě však neexistují žádné zmínky. [1][26]

Po těchto zkušenostech bylo jasné, že motor pro zástavbu do osobních aut není vhodný. V 80. letech minulého století společnost United Stirling zahájila vývoj Stirlingova motoru s názvem United Stirling V 161. Jedná se o motor v α modifikaci, který má dva válce – každý o objemu 161 cm^3. Pracovním plynem je hélium. Motor disponuje výkonem přibližně 10 kW. Je schopen plynulé regulace výkonu změnou tlaku a teploty pracovního plynu. Dlouholetým vývojem se podařilo dosáhnout optimálních vlastností, a tak dnes můžeme tento motor označit za jeden z technologicky nejvyspělejších na trhu. [1][4][26]

3.2 Využití v současnosti

V současnosti je Stirlingův motor nejčastěji spojován s pojmem kogenerace. Pojmem kogenerace rozumíme současnou výrobu více druhů energie. Stroj, který toto umí, nazýváme kogenerační jednotkou. V případě použití Stirlingova motoru v kogenerační jednotce jde nejčastěji o současnou výrobu tepla a elektrické energie. Stirlingův motor je v této jednotce využíván pouze pro pohon dalších zařízení, která vyrábějí požadovaný druh energie. V posledních letech převládají návrhy těchto jednotek pro běžné domácnosti. Tyto jednotky jsou tomuto předurčenému použití uzpůsobeny a v jejich prospěch hovoří i fakt, že oproti motorům s vnitřním spalováním disponují nižší hlučností a mají menší vibrace.

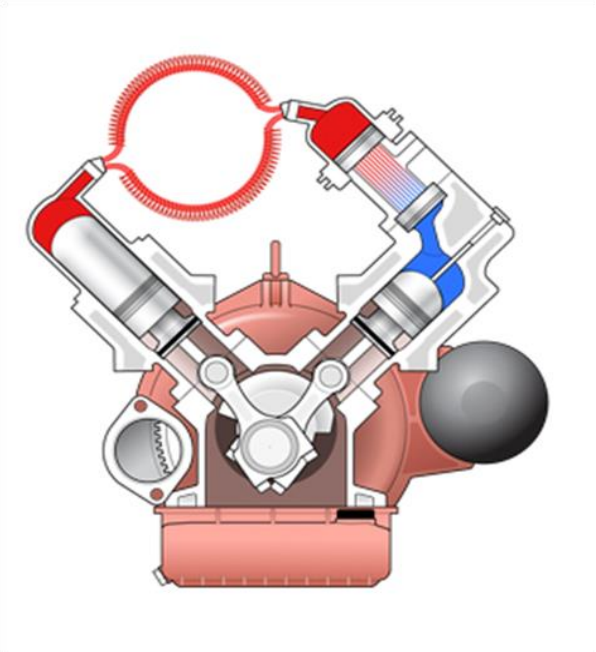
3.2.1 Vývoj v tuzemsku

Z hlediska vývoje Stirlingova motoru v České republice patří k nejvýznamnějším společnost TEDOM s.r.o. Již od roku 2002 probíhá intenzivní vývoj kogenerační jednotky schopné vyrábět jak elektrickou energii, tak teplo. Celý systém by měl fungovat na principu Stirlingova motoru a mělo by v něm být možné spalovat mj. i biomasu. Do této chvíle bylo do výzkumu i za příspěvku MPO ČR investováno několik desítek miliónů korun. Výsledné parametry jednotky by měly být následující:

- Pracovním plynem bude hélium
- Emise NOx 70 mg/Nm^3 a CO 150 mg/Nm^3 vztaženo k 3% O2
- Servisní interval 8000 hodin nebo 1 rok
- Výkon motoru minimálně 10 kW při 1500 min^{-1}
- Minimální životnost do generální opravy 25 000 hodin
- Maximální střední tlak média 14 MPa
- Možnost spalování více druhů paliv, od zemního plynu po biopaliva
- Minimální elektrická účinnost 25% při teplotě žárové hlavy 650 °C a vstupní teplotě 60 °C
- Nízká cena jednotky

Jako nejpravděpodobnější se zdá použití pouze jednočinné α modifikace mající zdvihový objem 1,83 dm^3. Tato modifikace byla po sérii zkoušek upřednostněna především kvůli své jednoduchosti, a tím pádem úspoře výrobních nákladů. [1][30]

Obr. 21: Motor společnosti TEDOM s.r.o.



Zdroj: Tedom.com

Společnosti se již podařilo sestrojit prototyp motoru, který tvoří základ pro další vývoj (viz. obr. 21). V současnosti jsou na něm prováděny veškeré zkoušky. Ty by měly pomoci zjistit nejvíce vhodné materiály na použití jednotlivých dílů motoru. Zkoušky by měly simulovat provoz jednotky v reálném pracovním prostředí a probíhají v rozsahu stovek hodin, aby byly zajištěny co nejpřesnější výsledky. Parametry tohoto motoru jsou následující:

- Výkon 7,9 kW při 1500 min^{-1}
- Modifikace α s dvěma válci s uspořádáním do V
- Účinnost 24,13 % při teplotě žárové hlavy 670 °C a vstupní teplotě 50 °C
- Střední tlak helia 11,2 MPa
- Palivo zemní plyn
- Emisní limity v této fázi nebyly řešeny
- Spolehlivá funkce pístních kroužků a ucpávky pístní tyče
- Celkem zkoušeno 1200 hodin, přičemž nejdelší zkouška trvala 700 hodin
- Stav motoru po celé zkoušce byl shledán jako uspokojivý

Z výše uvedených údajů vyplývá, že ještě nebylo dosaženo předem stanovených parametrů a vývoj proto nadále pokračuje. Během vývoje přichází nové poznatky, které jsou zpětně aplikovány na samotný motor. Kromě přijatelné ceny si dává společnost za cíl vyvinout motor, který by měl přijatelné rozměry a také hmotnost. [1][7]

Hmotnost testovaného motoru se pohybuje okolo 110 kg. K větším problémům při snaze o snížení hmotnosti patří řešení klikové skříně a válců. Mohutnější, a tím pádem i těžší konstrukce, se jeví jako vhodnější z důvodu lepší schopnosti eliminovat hluk od ojnic a křižáků. Kvůli obavám o horší funkci se od lehčí konstrukce těchto dílů raději upustilo. Velké procento hmotnosti se ale povedlo konstruktérům ušetřit na ostatních dílech motoru mimo částí, kde dochází k hlavnímu ohřevu. [7]

Většinu dílů motoru představují odlitky z běžných materiálů (např. šedá litina nebo tvárná litina). Použitím těchto běžných materiálů se podařilo významně snížit náklady. Dalším nemalým problémem bylo nalezení vyhovujícího materiálu pro ohřívanou část motoru. I přes snahu o použití levnějších materiálů musely nakonec být použity žáruvzdorné materiály. V motoru je zabudován úplný klikový mechanismus, který způsobil další konstrukční problémy. Nicméně jeho použití bylo nutné pro vytvoření netlakové skříně. Díky tomu jsou písty motoru namáhány jen osově a křižáky přenáší pouze normálové síly. Pouze osové namáhání pístu zabezpečuje správné vedení bez nutnosti použít mazivo. Samotný klikový mechanismus je mazán hydrodynamicky, tedy tlakově. Mazací tlak vytváří zubové čerpadlo umístěné na předním víku. Součástí mazacího okruhu je i redukční ventil a olejový filtr, přičemž náplň oleje v motoru jsou přibližně dva litry. [7]

Největší konstrukční problém představuje vytvoření správně pracujících ucpávek na pístní tyči. Bez správné funkce ucpávek by motor nefungoval. Motor funguje tak, že se pístní tyčí pomocí této ucpávky utěsní pracovní tlak motoru a zabraňuje tím proniknutí oleje do pracovního prostoru. Aby tyto ucpávky pracovaly bezchybně, bylo zapotřebí mnohokrát pozměnit tvar a koncepci mnoha dílů. V některých případech k úspěšnému řešení stačilo pouze zvýšit kvalitu materiálu. Inovativní je použití vyprazdňovacího kompresoru a souhrn opatření vedoucí ke snížení roztažnosti žárové hlavy. Kompresor má za úkol snižovat tlak plynu při regulaci výkonu. Pomocí opatření pro snížení roztažnosti je dosaženo vyšší životnosti žárové hlavy a dosahuje se tak lépe delšího servisního intervalu. [7]

Společnost TEDOM s.r.o. počítá s tímto motorem pro využití do své kogenerační jednotky, kde je v současné době používán motor společnosti Škoda Auto a.s. o zdvihovém objemu 1,2 dm^3. Použitím Stirlingova motoru společnost doufá ve zlepšení vlastností. [7]

Zejména jde o významné snížení hluku při chodu motoru, prodloužení servisního intervalu apod. Celá jednotka by potom mohla fungovat jako plynový kotel ovšem s tou výhodou, že bude vyrábět elektrickou energii.

Uživatel by tedy měl ušetřit finance především za elektrickou energii a také za servisní údržbu. Odhady některých odborníků dokonce tvrdí, že v kombinaci s například solárními panely by mohl běžný rodinný dům být na elektrické energii v podstatě nezávislý. Otázkou však zůstává cena jednotky a s ní spojená návratnost investovaných prostředků. [1][7]

3.2.2 Zahraniční vývoj

Zahraniční vývoj je oproti tuzemsku v pokročilejší fázi. Řada výrobců nabízí kogenerační jednotky s pohonem Stirlingova motoru již několik let a tyto výrobky už v podstatě jen konstrukčně vylepšuje.

Kogenerační jednotka Cleanenergy (obr. 22) je schopna poskytnout elektrický výkon v rozmezí od 2 do 9 kWe a tepelný výkon od 8 do 24 kWt. K pohonu této jednotky lze použít i tzv. skládkový plyn. Využití tohoto plynu bývá velmi problematické kvůli nevelké kvalitě tohoto plynu, která je dána rychle se snižující koncentrací metanu. Pro klasické pístové spalovací motory se tento plyn stává poměrně brzy nepoužitelným palivem. Výše zmíněná jednotka by měla být vhodná zejména pro starší skládky, kde je obsah metanu ve vyprodukovaném bioplynu zpravidla ještě nižší. Spalování plynu probíhá přímo u zdroje a nehrozí tak ve velké míře unikání plynu do ovzduší. Spalovat lze plyn i s pouhými 18% metanu a plyn může být i znečištěn. Tato jednotka funguje již řadu let na bezmála 2000 skládkách po celé Evropě. [1][8]

Obr. 22: Kogenerační jednotka C9G společnosti Cleanenergy

Zdroj: http://www.stirlingenergy.cz/aktuality/14-akce-predvadeci-jednotka-cleanergy-c9g-se-14-slevou.html

Další úspěšnou aplikací je použití Stirlingova motoru při výrobě elektrické energie pomocí sluneční energie. Funguje to tak, že každý motor má své parabolické zrcadlo, v jehož ohnisku je připevněn spolu s elektrickým generátorem. V ohnisku je také instalován ohřívač a teplota zde běžně dosahuje teploty 800 – 900 °C. Chlazení provádí buď vodní chladič s ventilátorem, nebo externě přiváděné chladící potrubí. Celý systém se potom natáčí tak, aby byl zajištěn optimální výkon jednotky. Za slabý článek takto zkonstruované jednotky lze považovat zajištění správné funkce ve všech polohách. Při jiné poloze než vodorovné totiž nastává problém například v mazání nebo utěsnění pístních tyčí. [4][5]

V souvislosti se Stirlingovým motorem by měla být zmíněna společnost Stirling Energy Systems, Inc, USA. Vyvinula solární jednotku pro výrobu elektrické energie s výkonem 25 kW a účinností 29,4 %. K pohonu slouží upravený motor typu V4-95 Kockums a pracovním plynem je vodík dosahující tlaku až 20 MPa. K soustředění sluneční energie je instalováno zrcadlo o průměru úctyhodných 11,37 m. Celá jednotka je již několik let testována a upravována. O tuto jednotku projevil zájem investor, který plánuje rozšíření sluneční elektrárny, a proto v současné době probíhá její sériová výroba. Celý systém znázorňuje obr. 23. [1][4][32]

Obr. 23:Solární jednotka společnosti SES Inc.

Zdroj: http://thefraserdomain.typepad.com/photos/uncategorized/sterling_solar_dish.jpg

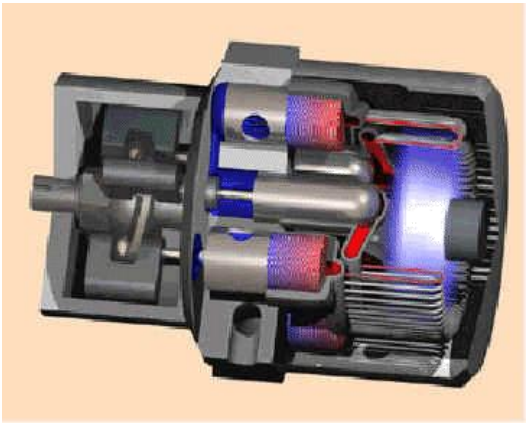
Společnost MSI si v roce 2002 nechala patentovat její chlazení základní desky počítače (obr. 24). Pro pohon je využíváno teplo, které produkuje ochlazovaný čip. Po stranách čipu jsou umístěny vodiče, které odvádí teplo před ventilátor. Čím vyšší teplo čip produkuje, tím vyšší je i rozdíl teplot a tudíž výkon motoru. Hlavní výhodou tohoto chlazení je nulová spotřeba elektrické energie. [5][31]

Obr. 24:Patentovaný způsob chlazení společnosti MSI

Zdroj: http://www.tweaktown.com/news/9051/msi_employs_stirling_engine_theory/index.html

Americká společnost STM Power, Inc. vyvinula kogenerační jednotku pracující se Stirlingovým motorem o výkonu 55 kW (obr. 24), která slouží pro pohon na plynná paliva. Pracovním plynem pro pohon je vodík. Účinnost jednotky dosahuje v závislosti na podmínkách použití až 30%. Za zmínku stojí také předepsaný servisní interval, který je garantovaný na minimálně 10 000 hodin provozu. V současné době se tato společnost věnuje vývoji výkonnější verze této jednotky. [1][30]

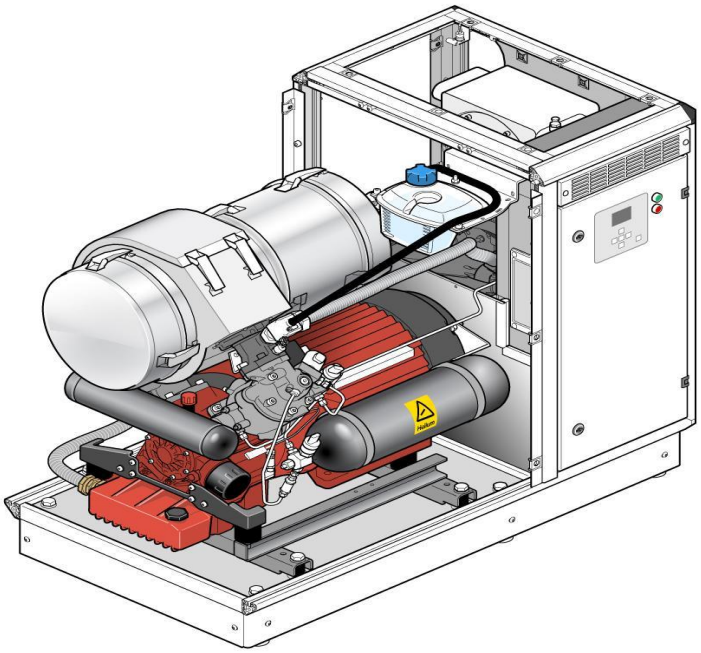
Obr. 25: Pohon kogenerační jednotky společnosti STM Power Inc.



Zdroj: http://zigherzog.net/stirling/DrIz/engines/engines.html

Původem německá společnost s názvem Solo Stirling GmbH upravila motor typu United Stirling V-160 a již několik let vyrábí a prodává kogenerační jednotku s tímto pohonem. V tomto případě se jedná o α modifikaci motoru, který má válce do V pod úhlem 90°. Tato modifikace a rozložení válců se pro motory s malým výkonem tj. do 10 kW ukázala jako nejvhodnější. Jednotka má elektrický výkon 7,5 kWe při tlaku 13 MPa a dosahuje účinnosti až 24% při střední teplotě plynu 650 °C a teplotě 50 °C topné kapaliny. Servisní interval je zde menší než v předchozím případě, konkrétně se pohybuje v rozmezí 5000 – 8000 hodin. Většímu rozšíření brání vysoká cena. Jednotka je znázorněna na obr. 26. [1][5][12]

Obr. 26: Kogenerační jednotka společnosti Solo Stirling GmbH



Zdroj: http://www.stirlingenergy.cz/galerie/2012/12.html

Z hlediska využití kogeneračních jednotek v domácnostech je velice zajímavá malá kogenerační jednotka novozélandské společnosti Whispergen (obr. 27). Elektrický výkon jednotky má hodnotu 1,2 kWe, tepelný výkon se pohybuje v rozmezí 8 – 10 kWt a účinnost dosahuje 10 – 13%. Pro použití této jednotky v běžných domácnostech v její prospěch hovoří i má malé rozměry a není tak problém s její instalací. Rozměry lze srovnat s myčkou nádobí. Vadu na kráse představuje ovšem velmi malá elektrická účinnost, která rozhodně nepokryje spotřebu běžné domácnosti. Tepelný výkon vyhovuje potřebám menších a středních domácností. Výrobce navíc láká nízkou cenou. [4][13][21]

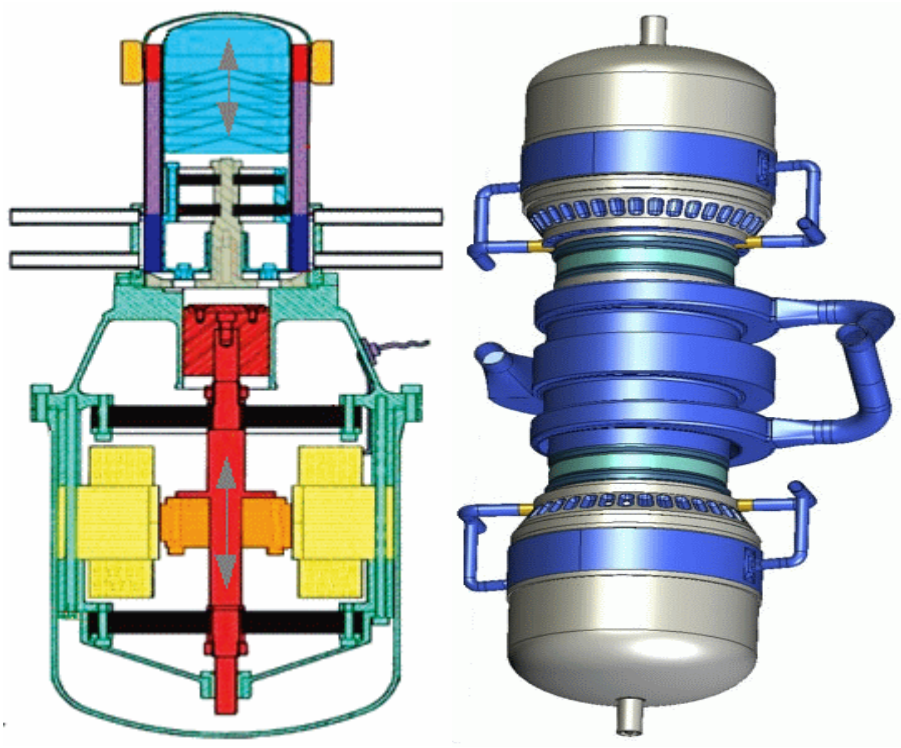
Výrobce udává, že provoz jednotky je plně řízen potřebou tepla. V topné sezóně, kdy elektrická energie spíše přebývá, přebytek putuje do sítě. Mimo topnou sezónu a tedy při menší spotřebě a požadavku na teplo je jednotka v provozu jen sporadicky a elektrická energie je v případě potřeby ze sítě odebírána. Elektrická síť potom funguje jako akumulátor energie. Bohužel jen málo zemí má legislativně ošetřeno takto elektrickou síť využívat. [4] [13][29]

Obr. 27: Kogenerační jednotka Whispergen

Zdroj: http://www.transformacni-technologie.cz/obrazky/250b.jpg

Za zmínku také využití motoru pro kosmické sondy případně malé elektrárny, které vyvíjí NASA. Přesněji řečeno jedná se o energetický systém, o jehož pohon se stará právě Stirlingův motor. Použití se předpokládá pouze v mimozemských oblastech. Celý systém se nazývá radioizotopový blok (SRG – Stirling Radioisotope Generator). Z hlavních výhod tohoto systému lze jmenovat nízkou spotřebu paliva a především vysokou účinnost, která při zchlazení pracovního plynu na 50°C dosahuje až 26% (dosud používaný termočlánek dosahuje účinnosti maximálně 8%). Na obr. 28 je systém znázorněn. [4]

Obr. 28: Sonda s pohonem Stirlingova motoru v řezu, celkový pohled



Zdroj: http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html

Obrázek vlevo (obr. 28) znázorňuje systém v řezu. Základ tvoří dvojice motorů, každý o výkonu 55 W (označeny žlutou barvou) společně s lineárním generátorem. Mezi motory se nachází smyčka ze sodíku a draslíku (Na – K smyčka), která obstarává transport tepla od radioizotopového topného bloku. Obrázek vpravo ukazuje celkový pohled na sondu.

V tomto případě se jedná o β modifikaci motoru, která má volný píst na ohřívané straně válce a celá funkce motoru je částečně upravena. Píst na ohřívané straně válce není spojen s pístem na studené straně a namísto toho je jeho pohyb vyvoláván pružným nárazníkem, který tvoří diskové pružiny. Samotné jádro generátoru je poháněno jen pístem na studené straně. Tento píst se pohybuje přímočaře a vratně. Ohřívaná část válce má dvě vrstvy. V prostoru mezi vrstvami se nachází ohřívák a regenerátor. Chladič je umístěn pod pružným nárazníkem mezi ohřívanou a studenou částí motoru. V menších kogeneračních jednotkách se využívá tento motor s pohonem na fosilní paliva s výkonem 1 kW. [4]

Lídrem ve vývoji Stirlingových motorů je švédská firma Kockums AB. Společnost se zabývá především konstrukcí výkonnějších motorů vhodných například do ponorek. Pro tyto účely navržený motor nese označení V4-235 a dosahuje výkonu 75 kW (obr. 29).

Obr. 29: Stirlingův motor V4-235 společnosti Kockums AB

Zdroj: http://www.valka.cz/clanek_14090.html

Tato pohonná jednotka byla během dlouholetého vývoje postupně vylepšována a dnes představuje zřejmě nejlepší kus na trhu. Pro společnost jsou nejdůležitějšími kritérii vlastnosti motoru a od toho se odvíjí i cena, která se pohybuje v rozmezí 1 – 2 milionů korun.

Speciálně pro ponorky byl vyvinut i systém AIP (Air Independent Propulsion), který funguje na principu Stirlingova motoru. Tento systém spaluje vodík spolu se synteticky vyráběným vzduchem. Vzduch je připravován z externích tlakových lahví. Při spalování vzniká pouze vodní pára. Tato pára kondenzuje a putuje do zásobníku. Hlavní výhodou tohoto systému je fakt, že celý proces může probíhat pod hladinou. Systém doplňuje ještě elektromotor, akumulátory, dieselagregát a elektrický generátor. Primárně zajišťuje pohon elektromotor. Pokud je ponorka na hladině, spustí se dieselagregát, který dobíjí baterie. Současně dochází k rozkladu kondenzované vody ze zásobníku zpět na vodík a kyslík. Nejslabším článkem tohoto systému jsou akumulátory, případně kapacita tlakových lahví. I přesto ponorka vybavená tímto systémem pohonu dokáže pod hladinou zůstat mnohonásobně déle než je tomu u klasického pohonu, tj. dieselagregát a akumulátory. [1][4][15]

3.3 Výhody a nevýhody motoru v porovnání se spalovacím motorem

3.3.1 Výhody

- **Možnost použití v zásadě jakéhokoliv paliva.** Jedná se o motor s vnějším spalováním, což znamená možnost použít pevné kapalné i plynné palivo.
- **Nižší náklady na údržbu motoru**. Servisní intervaly dosahují běžně 5000 až 10000 hodin. Olej nepřichází do přímého kontaktu se spalinami a ani s horkými díly motoru, neznečišťuje se a neztrácí tak rychle svoji mazací schopnost.
- **Motor má vyšší tepelnou účinnost.**
- **Prakticky nulová spotřeba oleje.**
- **Odpadní teplo lze snadno využít a s relativně vysokou účinností přeměnit například v elektrickou energii.**
- **Nižší hlučnost.** Oproti spalovacímu motoru je mnohem tišší, což je dáno plynulou změnou tlaku během cyklu. Navíc zde nedochází k opakovanému zažehnutí či vznícení.
- **Nižší zatížení životního prostředí.** V případě, že je spalovací systém vhodně navržen, lze díky vnějšímu spalování citelně lépe redukovat emise škodlivin vzniklé hořením paliva.
- **Absence rozvodového mechanismu.**

3.3.2 Nevýhody

- **Pomalejší regulace výkonu.** Hlavní nevýhodou bránící například v rozšíření do dopravních prostředků je pomalejší regulace výkonu než u spalovacího motoru, při použití v kogenerační jednotce však můžeme tento problém opomenout.
- Poměrně **vysoká měrná hmotnost** na 1 kW výkonu, při použití v kogenerační jednotce však tato vlastnost opět není důležitá.
- **Vysoké náklady**. Značnou nevýhodou jsou i vysoké výrobní náklady. Montáž motoru je více náročná na čistotu prostředí, kvalifikovanou pracovní sílu a nutnost použití speciálních materiálů. Na motoru je nutné také užití některých technologií, u nichž by byla sériová výroba značně komplikovaná.
- **Relativně malá celková účinnost motoru.**

- **Větší teplotní namáhání.** Na rozdíl od klasických pístových spalovacích motorů, kde je maximální teploty dosahováno jen krátkodobě, je zde ohřívaná část válce neustále teplotně zatížena, což je zdrojem mnoha konstrukčních problémů.
- **Ztráty.** Vlivem ztrát není teplo, které vzniká spalováním paliva v celém rozsahu využíváno pro ohřev válce a tato skutečnost nutně vede k zástavbě výkonnějších ohřívačů.

Doporučení a závěr

Cílem této bakalářské práce bylo představení Stirlingova motoru, zhodnocení jeho možného využití v praxi a návrh dalšího možného rozvoje v této oblasti. První část je zaměřena na historii vývoje motoru, druhá část se podrobně zabývá principem funkce, možnými konstrukcemi a jednotlivými díly. Poslední část je věnována využití motoru z historického i současného pohledu a zároveň obsahuje shrnutí výhod a nevýhod tohoto stroje.

Od doby zkonstruování byl tento motor zkušebně použit v mnoha systémech. V případě pokusu o nahrazení parního stroje byl neúspěch dán především nedostatečnými znalostmi z oblasti metalurgie této doby. Při snaze o použití tohoto motoru v dopravních prostředcích se nikdy nepodařilo dosáhnout stavu, kdy by motor byl jízdními vlastnostmi srovnatelný s klasickým pístovým spalovacím motorem a mohl ho tak alespoň částečně nahradit.

Značnou výhodou Stirlingova motoru při použití v dopravních prostředcích by kromě zajištění pohonu byla i současná výroba elektrické energie, která se pro komplexní funkci dopravního prostředku jeví jako nezbytná. Další výhodou by jistě byla možnost použití méně kvalitních paliv, protože Stirlingův motor nevyžaduje tak kvalitní paliva jako pístové spalovací motory. V současné době je také velká pozornost věnována výši emisí spalovacích motorů. Redukce emisí při vnějším spalování je o mnoho jednodušší. Naproti tomu jako značnou nevýhodu lze spatřovat fakt, že část válce Stirlingova motoru je po celou dobu provozu vystavována poměrně velkému tepelnému zatížení. Tento fakt limituje dosažení vyšší účinnosti, a tím i výkonu. Právě výkon však patří v dnešní době k hlavním parametrům, které ovlivňují konkurenceschopnost dopravního prostředku na trhu.

Přinejmenším zajímavá je představa použití upraveného Stirlingova motoru pro spalování vodíku. Velkou výhodou tohoto pohonu by beze sporu byly v podstatě nulové emise a absence klasického spalovacího motoru, který se jinak využívá v tomto systému k výrobě elektrické energie. Kyslík potřebný pro spalování je možné získávat přímo ze vzduchu, případně pomůže nainstalovat tlakové lahve. Produktem spalování motoru je pouze vodní pára, kterou lze po kondenzaci možno opět rozložit na vodík a kyslík. Jako poněkud složitější se ovšem jeví zajištění vodíku jako primárního paliva pro pohon motoru. Výroba vodíku je v současné době poměrně nákladná.

V případě, že by se povedlo zajistit zásobení vodíkem ve větším množství a za rozumnou cenu, byl by tento druh pohonu jistě velice zajímavým a především velmi ekologickým řešením.

Pokud by motor poháněný vodíkem nepokrýval všechny jízdní režimy, mohl by automobil být dodatečně vybaven například spalovacím motorem nebo i ekologičtější variantou v podobě kombinace solárního článku a elektromotoru. Tyto sekundární pohony by měly plnit funkci záložního zdroje a použily by se pouze při požadavku na větší výkon nebo při výpadku primárního zdroje. Zatím nejvyšší dosažený výkon motoru upraveného pro spalování vodíku je 75 kW, což v dnešní době dostačuje maximálně pro vozy nižší střední třídy. Dále by zde mohl také nastat problém se zabudováním celého systému do automobilu, protože pohon slouží především pro ponorky, které mají pro agregát více prostoru. Dalším možným problémem by mohla být cena jednotky. I v případě, že bychom se spokojili s méně výkonnou verzí, není zaručeno, že cena bude přímo úměrně klesat s výkonem motoru.

O mnoho snazší se zdá využití tohoto pohonu u lodí, kde zástavbové rozměry ani hmotnost nejsou rozhodujícím parametrem. Velké množství vodíku je navíc obsaženo právě ve vodě, ovšem jako v předchozím případě zde narážíme na problém jak tento vodík získat. Pohon větších lodí obstarávají motory s výkonem v řádu minimálně tisíců koňských sil a takovýto motor by jistě nebylo jednoduché konstrukčně navrhnout ani sestrojit. Pravděpodobnější se tak jeví využití více motorů, které by ve větším počtu dosahovaly požadovaného výkonu.

Jako velice slibné se zdá budoucí větší využití motoru pro výrobu elektrické energie. V minulosti byly realizovány výstavby elektráren, které tohoto principu využívají pomocí parabolického zrcadla. Požadovaného výkonu v řádech stovek megawattů je dosahováno velkým počtem menších jednotek o jmenovitém výkonu do 25 kW. Celý systém tak tvoří několik desítek tisíc takovýchto jednotek. Negativní vlastností těchto elektráren představuje nutnost jejich použití v oblastech s co největší intenzitou slunečního záření. Také je nezbytné, aby těchto slunečných dní bylo během roku co nejvíce. Neměli bychom opomenout také náročnost na zábor půdy.

Využití motoru pro kombinovanou výrobu energií v běžných domácnostech pokládám ze všech způsobů využití za jednu z nejreálnějších. Oproti předchozím aplikacím zde nejsou na motor kladeny tak vysoké nároky. Primárně jde zejména o výrobu tepelné energie. Dnes nabízené kogenerační jednotky fungují ve většině případů jako klasický plynový kotel a odpadní teplo je využíváno pro výrobu další energie.

Nejčastěji se pomocí tepla vyrábí elektrická energie. V takovém případě musí být v celém systému ještě zakomponován generátor. Rozšíření tohoto zařízení do bytů a rodinných domů záleží především na pořizovací ceně. S rostoucí cenou energií lze však předpokládat zvyšující se zájem o podobné zdroje vytápění. Aby bylo jednotku možné použít i v teplejším podnebí, kde není primárně kladen důraz na vytápění, bylo by vhodné výkon elektrické energie koncipovat tak, aby pokryl spotřebu například klimatizace v běžném rodinném domě. Zejména v letním období totiž značnou část elektrické energie spotřebují zařízení, které ochlazují vzduch.

Z výše uvedených informací je zřejmé, že Stirlingův motor má oproti ostatním motorům své výhody a nevýhody. Zřejmě největší potenciál z hlediska možného vývoje spatřuji v posledních dvou zmiňovaných aplikacích. Obě tyto aplikace při svém použití zaručují snížení nákladů na provoz a delší životnost stroje.

Seznam použitých zdrojů

[1] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony*. První. Praha: Grada Publishing, a.s., 2012, str. 24-33. ISBN 978-80-247-4455-1.

[2] Historie motorů. *www.auto-motory.com* [online]. 2008 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: http://www.auto-motory.com/historie-motoru/

[3] WALKER, G.*Stirling-cycle machines*. Oxford University Press. 1973, 156 s. ISBN 0-19-896112-1.

[4] ŠKORPÍK, Jiří. Transformační technologie. *Transformační technologie* [online]. 2013 [cit. 2015-01-14]. Dostupné z: http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html

[5] Stirlingův motor. *Stirlingův motor* [online]. 2010 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: http://stirlingmotor.cz/princip.html

[6] MÍČKOVÁ, Daniela. Mikrokogenerace. *Mikrokogenerace* [online]. 2012 [cit. 2015-01-16]. Dostupné z: http://mikrokogenerace.blogspot.cz/2012/10/stirlinguv-cyklus-vyuziti-stirlingova.html

[7] TEDOM s.r.o. *Kogenerace* [online]. 2015 [cit. 2015-01-16]. Dostupné z: http://kogenerace.tedom.com/

[8] Stirling energy. *Stirling energy* [online]. 2014 [cit. 2015-01-16]. Dostupné z: http://www.stirlingenergy.cz/aktuality/15-kogeneracni-system-se-stirlingovym-motorem-vyrabi-energii-i-z-velmi-nekvalitniho-skladkoveho-plynu.html

[9] KAMEŠ, J.: *Alternativní pohony automobilů*. Nakladatelství BEN, Praha 2004. ISBN 80-7300-127-6

[10] VLK, F.: *Alternativní pohony motorových vozidel*. Nakladatelství a zasilatelství Vlk, Brno, 2004. ISBN 80-239-1602-5

[11] ADAMOVSKÝ, Radomír a Pavel NEUBERGER. *Termomechanika I: termodynamika plynů, oběhy v plynech*. Vyd. 1. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2000, 85 s. ISBN 80-213-0683-1.

[12] STM Power. In: *Stirling Power* [online]. 2013 [cit. 2015-01-17]. Dostupné z: http://www.sp-usa.com

[13] Whispergen. *Whispergen saving energy* [online]. 2014 [cit. 2015-01-20]. Dostupné z: http://www.whispergen-europe.com/stirling_en.php

[14] SCHOLZ, Celestýn. *Konstrukční projekt pístového spalovacího motoru*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita, 2003, 43 s., [4] s. příl. ISBN 80-708-3693-8.

[15] SAAB Group. Kockums AB [online]. 2014 [cit. 2014-12-31]. Dostupné z: http://www.saabgroup.com/en/Naval/Kockums-Naval-Solutions/?tab=45317

[16] Stirling International. *Stirling engine* [online]. 2014 [cit. 2014-12-31]. Dostupné z: http://www.stirlinginternational.org/docs/presentations/history.asp

[17] *Stirling engine* [online]. 2015 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://diystirlingengine.com/

[18] HIRATA, Koichi. *Stirling engine* [online]. 1995 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/indexe.htm

[19] KEVENEY, Matt. *Animated engines* [online]. 2013 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://www.animatedengines.com/stirling.html

[20] LAIKA, Viktor. *MVE Energetika* [online]. 2012 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://mve.energetika.cz/uvod/stirling.htm

[21] České sdružení pro biomasu. *Biom.cz* [online]. 2009 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://biom.cz/cz/odborne-clanky/stirlinguv-motor-a-biomasa-presvedciva-kombinace

[22] MACEK, Jan. *Spalovací motory I*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2007, 260 s. ISBN 978-80-01-03618-1.

[23] Technická univerzita v Liberci. *Tul.cz* [online]. 2014 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2543

[24] Old.vscht.cz [online]. 2010 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/kolafa/stirling.html

[25] The operating principles of Stirling engine [online]. 2011 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: http://www.robertstirlingengine.com/principles.php

[26] WOODFORD, Christopher. *Http://www.explainthatstuff.com* [online]. 2012 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://www.explainthatstuff.com/how-stirling-engines-work.html

[27] Stirlingshop.com [online]. 2010 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://stirlingshop.com/html/applications.html

[28] Beta Type Stirling Engines [online]. 2010 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: http://www.ohio.edu/people/urieli/stirling/engines/beta.html

[29] HARRISON, Jeremy. *Stirling engine* [online]. 2014 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: http://www.microchap.info/stirling_engine.htm

[30] GRAS, Pierre. *STIRLING ENGINES WITH ROTARY ANNULAR TRILOBIC PISTONS* [online]. 2013 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: http://sycomoreen.free.fr/syco_english/concept_SPRATL_artactuel_eng.html

[31] MSI [online]. 2015 [cit. 2015-01-16]. Dostupné z: http://www.msi.com/news/591.html

[32] LINDSELL, Denis. *Http://www.solar-facts.com* [online]. 2015 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: http://www.solar-facts.com/light-concentration/stirling-engine.php

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Robert Stirling 9
Obr. 2: Motor v modifikaci β, popis komponent 11
Obr. 3: Ohřívače motoru 12
Obr. 4: Vnitřní matrice regenerátoru 13
Obr. 5: Chladič motoru Tedom 180V1 14
Obr. 6: Stirlingův motor v modifikaci β, 1.fáze 16
Obr. 7: Stirlingův motor v modifikaci β, 2.fáze 16
Obr. 8: Stirlingův motor v modifikaci β, 3.fáze 17
Obr. 9: Stirlingův motor v modifikaci β, 4.fáze 17
Obr. 10: p-V a T-s diagram oběhu Stirlingova motoru 18
Obr. 11: Znázornění pracovních fází motoru 20
Obr. 12: Porovnání ideálního a skutečného Stirlingova oběhu 22
Obr. 13: Motor v modifikaci α 23
Obr. 14: Dvojčinný motor v modifikaci α 23
Obr. 15: Motor v modifikaci β 24
Obr. 16: Motor v modifikaci γ 25
Obr. 17: Sankeyův diagram energetických toků 26
Obr. 18: Mobilní elektrocentrála společnosti N.V.Philips 28
Obr. 19: Motor V4X2 29
Obr. 20: Motor V4X35 ve vozu Ford Taunus 30
Obr. 21: Motor společnosti TEDOM s.r.o. 32
Obr. 22: Kogenerační jednotka C9G společnosti Cleanenergy 34
Obr. 23:Solární jednotka společnosti SES Inc. 35
Obr. 24:Patentovaný způsob chlazení společnosti MSI 36
Obr. 25: Pohon kogenerační jednotky společnosti STM Power Inc. 36
Obr. 26: Kogenerační jednotka společnosti Solo Stirling GmbH 37
Obr. 27: Kogenerační jednotka Whispergen 38
Obr. 28: Sonda s pohonem Stirlingova motoru v řezu, celkový pohled 39
Obr. 29: Stirlingův motor V4-235 společnosti Kockums AB 40