



## **Středoškolská technika 2017**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

### **Stirlingův motor**

**Jan Brablec**

Mendelovo gymnázium

Komenského 5, Opava

## Obsah

1	Úvod.....	4
2	Anotace.....	4
3	Klíčová slova.....	4
4	Tepelné stroje .....	5
4 . 1	Tepelné motory .....	5
4 . 2	Chladicí stroje/ tepelná čerpadla .....	5
5	Tepelné motory .....	5
5 . 1	Parní stroj .....	5
5 . 2	Spalovací motor .....	6
5 . 3	Spalovací turbína .....	7
5 . 4	Raketový motor.....	7
6	Stirlingův motor .....	8
6 . 1	Historie.....	8
6.1.1	Robert Stirling .....	8
6.1.2	Raný vývoj motoru.....	9
6.1.3	Vývoj ve 20. století .....	10
6.1.4	Další vývoj .....	10
6 . 2	Popis funkce.....	11
6 . 3	Části motoru.....	12
6.3.1	Zdroj tepla .....	12
6.3.2	Ohříváč/ výměník teplé strany .....	12
6.3.3	Regenerátor .....	12
6.3.4	Chladič/ výměník studené strany .....	13
6.3.5	Přehaněč .....	13

6 . 4	Konfigurace Stirlingova motoru .....	14
6.4.1	Alfa konfigurace.....	14
6.4.2	Beta/ Gama konfigurace.....	14
6.4.3	Jiné typy .....	14
6 . 5	Teorie za Stirlingovým motorem .....	15
1)	Izotermická expanze .....	15
2)	Izochorické chlazení .....	15
3)	Izotermická komprese.....	15
4)	Izochorický ohřev .....	15
6 . 6	Porovnání s motorem s vnitřním spalováním .....	17
6 . 7	Využití.....	17
6.7.1	Alternativy.....	17
7	Závěr.....	18
	Citace:.....	19

## **1 Úvod**

Téma této práce jsem si vybral, protože jsem byl donucen udělat seminární práci. Tato příležitost mi dala možnost hledat téma, které by mi vyhovovalo a rozšířilo obzory. Hledal jsem tedy nejzajímavější způsob, který je používám k ekologické výrobě energie. Při svém hledání jsem narazil na zajímavý název motoru, o kterém jsem nikdy neslyšel. O Stirlingově motoru jsem se nikdy ani neučil z důvodů mi neznámých a rád jsem zjistil o tomto motoru něco víc.

## **2 Anotace**

Tato práce pojednává o Stirlingově motoru, o jeho historii, odlišnostech od jiných tepelných motorů a jeho využití. Práce obsahuje zkrácené popisy ostatních typů často využívaných tepelných motorů a popis, výhody, nevýhody a využití Stirlingova motoru.

## **3 Klíčová slova**

Stirlingův motor, tepelný motory, Stirlingův cyklus

## 4 Tepelné stroje

Tepelné stroje jsou stroje, které přeměňují tepelnou energii na mechanickou na základě prvního termodynamického zákona, podle něhož je možné přeměnit teplo na vnitřní energii nebo práci. Tepelné stroje nemohou pracovat se 100% úspěšností na základě druhého termodynamického zákona.

### 4.1 Tepelné motory

Přeměňuje se v nich teplo ze zásobníků s vyšší teplotou na práci při vzniku zůstatkového tepla, které zahřívá zásobník s nižší teplotou. Pracovní cyklus v p-V diagramu probíhá ve směru hodinových ručiček.

### 4.2 Chladicí stroje/ tepelná čerpadla

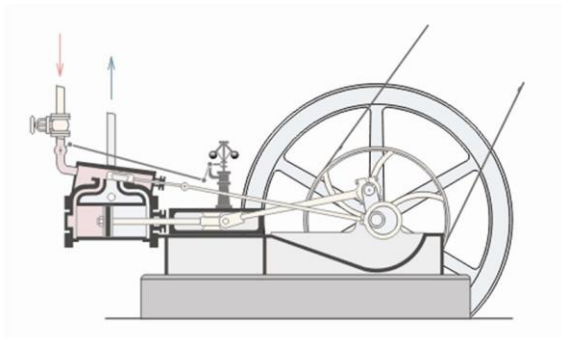
Přivedená mechanická energie se spotřebovává pro přenos tepla ze zásobníku s nižší teplotou do zásobníku s vyšší teplotou. Pracovní cyklus v p-V diagramu probíhá proti směru hodinových ručiček.

## 5 Tepelné motory

### 5.1 Parní stroj

Pístový tepelný stroj, který přeměňuje tepelnou energii vodní páry v energii mechanickou a to

#### Parní stroj – schéma



Obrázek 1 Parní stroj

nejčastěji v pohyb rotační. Pracuje na principu přetlaku, který rozhýbe píst parního stroje. Řadí se mezi tepelné stroje/ spalovací stroje s vnějším spalováním.

Účinnost přeměny energie parního stroje se pohybuje podle typu a sestavy okolo 30%. Tepelná účinnost kotle dosahuje až 50%. Účinnost parního stroje dohromady s kotlem se potom pohybuje mezi 5% a 15%.

## 5 . 2 Spalovací motor

Mechanický tepelný stroj, který využívá přeměny chemické energie na energii mechanickou a tepelnou. Slouží jako nejčastěji využívaný pohon jiných mechanických zařízení (motorizovaná zařízení).

Co se účinnosti týče, na mechanickou energii je přeměněno, díky omezeným technickým vlastnostem, pouze 10% až 50% chemické energie paliva (záleží na typu spalovacího motoru)



Obrázek 2 Osmiválcový spalovací motor

### 5.3 Spalovací turbína

Tepelný stroj, jehož pracovní látkou jsou spaliny vzniklé spalováním paliva ve spalovací komoře. Palivo se spaluje za pomoci stlačeného vzduchu. Spaliny rozhýbou turbínu při průchodu přes ní, a tak rozproudí spalovací turbínu. Znaměřší je jako proudový motor, využití našla v letectví, díky svému využití tlaku vzduchu. Účinnost těchto motorů je poměrně vysoká, ačkoliv jsem



Obrázek 3 Spalovací turbína

nenašel přesné rozpětí účinnosti.

### 5.4 Raketový motor

Motor pracující na principu akce a reakce, díky dostatečně velkému výbuchu paliva se motor



Obrázek 4 Raketový motor na tuhé palivo

a těleso, které pohání pohybuje. Výhodou je, že není závislý na atmosférickém kyslíku, takže funguje i mimo zemskou atmosféru. Díky tomu našel využití při sestrojování raket určených k letům mimo planetu Zemi.

## 6 Stirlingův motor

### 6.1 Historie

#### 6.1.1 Robert Stirling

Robert Stirling se narodil 25. září 1790 Gloag, Methvin, Perthshire, jako v pořadí třetí dítě z osmi. Jeho otec byl Patrick Stirling, syn vynálezce mlátičky obilí Michaela Stirlinga.



Rev Robert Stirling D.D.

Obrázek 5 Robert Stirling



### 6.1.2 Raný vývoj motoru

Stirlingův motor byl patentován roku 1816 Robertem Stirlingem. V té době byl známý také jako Stirlingův vzduchový motor. Roku 1818 našel Stirlingův motor své první využití při čerpání vody z dolu. Hlavní myšlenkou Roberta Stirlinga byl tepelný výměník zvaný „Ekonomizér“, který zlepšoval spotřebu paliva v různých oblastech využití. Patent také do podrobností popisuje využití jedné formy ekonomizéru ve Stirlingově jedinečném návrhu horkovzdušného motoru s uzavřeným oběhem. V tomto použití je nyní všeobecně známý jako 'regenerátor'. Následný vývoj Roberta Stirlinga a jeho bratra Jamese vyústil v patenty různých vylepšených uspořádání původního stroje, včetně zvýšeného tlaku, který měl v roce 1843 dostatečně vysoký výkon, aby mohl hnát všechny stroje ve slévárně železa ve skotském městě Dundee. Všeobecně bylo předpokládáno, že se Robert snažil vynalézt motor, který bude jak úspornější, tak bezpečnější, než parní stroje té doby. Ty byly často poruchové a přetlak vzniklý v kotlích mohl při výbuchu kotle zranit nebo zabít obsluhu parního stroje.

Způsob používání Stirlingova motoru v době jeho vynalezení často překračovalo limity odolnosti materiálu, který díky tomu podléhal častým poruchám způsobeným únavou materiálu. Tyto limity byly porušovány z důvodu dosažení co největší účinnosti. Tento nedostatek vedl k častému praskání horkého válce, které, ač nebyla tak nebezpečná jako u parního stroje, vedly k nahrazení Stirlingových motorů, ve slévárně železa ve městě Dundee, parními stroji.

Na konci devatenáctého století se zvýšila bezpečnost parních strojů a Stirlingův motor, který byl v té době méně účinný, než parní stroj, začal, spolu se svými vynálezci, upadat v zapomnění. Stirlingův motor se v této době používá už jen jako menší zdroj mechanické energie například v kostelech pro pohánění varhan, nebo pro čerpání vody. Díky své menší náročnosti k obsluze mohl Stirlingův motor ovládat kdokoliv.

### 6.1.3 Vývoj ve 20. století

Stirlingův motor začal být pomalu nahrazován elektromotory, či malými spalovacími motory. Stirlingův motor upadal postupně do zapomnění a vyráběl se pouze jako hračka nebo ve ventilacích a skrytý kterémukoliv obyčejnému člověku. Posun přišel až s firmou Philips, která hledala vhodné řešení pro expanzi do zemí, ve kterých nebyl zdroj elektrického napětí běžně dostupným. Potřebovali tedy vytvořit vhodný generátor, který by pracoval s dostupnými zdroji v těchto zemích. Firma tedy pověřila výzkumnou technickou laboratoř v Eindhovenu, aby vyhodnotila alternativní cesty k dosažení jejich záměru. Po výzkumů různých variant motorů se tým rozhodl pokračovat ve vývoji Stirlingova motoru a to hlavně proto, protože v tomto směru nebyl zaznamenán dlouhodobě žádný posun. Domnívali se tedy, že moderní materiály a moderní způsoby výroby umožní velké zlepšení.

V roce 1951 byla připravena řada 180/200W Stirlingových generátorů, známá jako „Bungalow set“, k výrobě. Bohužel bylo brzy jasné, že výroba těchto generátorů není výhodná, vzhledem k postupujícímu rozvoji jiných typů motorů a jiným okolnostem. 150 kusů však bylo vyrobeno a našlo si svou cestu na odborná učiliště, univerzity a jiné školy, kde jsou vhodným příkladem pro studenty zabývající se problematikou Stirlingova motoru.

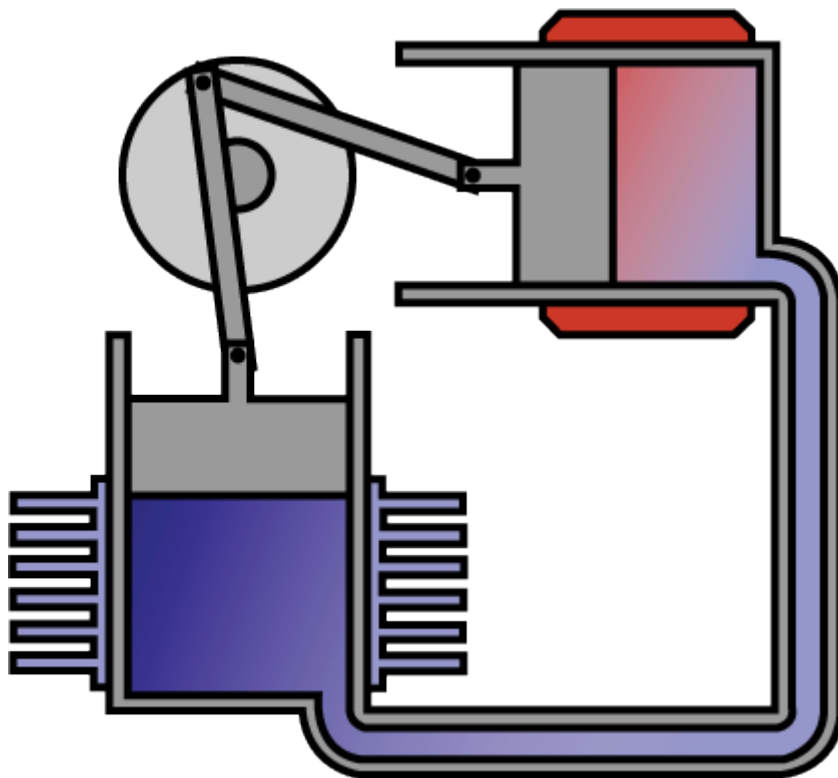
### 6.1.4 Další vývoj

Společnost Infinia začala v roce 1986 s vývojem nového spolehlivějšího pulzního Stirlingova motoru s volným pístem a zároveň termoakustického chladiče, využívajícího stejnou technologii. Zveřejněný návrh používal pružinová ložiska a jako pracovní plyn helium v hermeticky uzavřené nádobě pro dosažení testované spolehlivosti překračující 20 let. Do roku 2010 společnost pracovala na vývoji tohoto typu motoru a získala tak více než 30 patentů. Stirlingův motor tohoto typu se nyní využívá v produktech pro kombinované chlazení a topení a pro výrobu elektřiny ze sluneční energie. NASA v této době uvažuje o reálném využití Stirlingova motoru, pracujícím na principu radioaktivního rozpadu, pro vytváření elektrické energie na kosmických sondách ve vnější Sluneční soustavě.

## 6 . 2 Popis funkce

Stroj je navržen tak, že pracovní plyn se obvykle stlačuje ve studené části stroje a expanduje v teplé části. Tím se mění tepelná energie na mechanickou práci. Vnitřní výměník tepla regenerátor zvětšuje tepelnou účinnost stroje oproti teplovzdušným strojům bez regenerátoru.

Jako důsledek uzavřeného pracovního cyklu, musí být všechno teplo pohánějící Stirlingův motor vedeno ze zdroje tepla do pracovního plynu přes výměník tepla ohříváče a následně musí být teplo odváděno z pracovního plynu přes výměník tepla chladiče.



Obrázek 6 Alfa konfigurace Stirlingova motoru

## 6.3 Části motoru

### 6.3.1 Zdroj tepla

Zdrojem tepla může být spalování paliva. Protože ze zdroje tepla přijde do kontaktu se strojem pouze vzniklé teplo (a ne zplodiny vzniklé spalováním), může Stirlingův motor pracovat i se zdroji tepla, se kterými by nemohli pracovat ostatní stroje (například skládkové plyny s obsahem siloxanu). Jako zdroje tepla se dají ale využít i jiné, alternativní zdroje, jako například sluneční energie, geotermální energie, jaderná energie, odpadní teplo z průmyslových procesů nebo bioenergie. Z těchto zdrojů je v této době nejčastější solární energie, která se koncentruje pomocí zakřivených zrcadel přímo na motor a tím zvyšuje účinnost.

### 6.3.2 Ohřivač/ výměník teplé strany

V malých, málo výkonných motorech, může být ohřivač jednoduše zastoupen stěnou teplého prostoru. Stroje s větším výkonem vyžadují velkou plochu výměníků pro zajištění dostatečného přenosu tepla do pracovního plynu. Obvykle se používají buď vnitřní a vnější žebra, nebo mnoho malých trubic.

Při návrhu tepelného výměníku Stirlingova stroje je třeba nalézt kompromis mezi velkou plochou pro zajištění vysokého tepelného přenosu s malými tlakovými ztrátami a malým mrtvým prostorem (vnitřní prostor nevyužitý pro zdvih pístů). Ve strojích pracujících při vysokých výkonech a tlacích musí být tepelný výměník vyroben z materiálu, který dostatečně odolává mechanickému napětí, teplotě, korozi a deformaci.

### 6.3.3 Regenerátor

Regenerátor ve Stirlingově motoru je vnitřní tepelný výměník a dočasný zásobník tepla, umístěný mezi teplým a studeným prostorem tak, že přes něj pracovní plyn prochází střídavě v jednom a druhém směru. Jeho funkcí je uchovat v systému teplo, které by jinak bylo vyměněno s okolím. Uchování tohoto tepla v systému umožňuje přiblížit účinnost Stirlingova motoru k účinnosti Carnotova cyklu definovanou maximální a minimální teplotou cyklu.

Regenerátor je ve Stirlingově stroji proto, aby zvětšoval tepelnou účinnost „recyklací“ vnitřního tepla, které by jinak prošlo přes stroj nevratně. Tím lze zvýšit výkon motoru při stejné konstrukci chladiče a ohřivače, které nejčastěji omezují průchod tepla strojem. V praxi se tento přídavný výkon nedaří zcela využít kvůli zvětšenému mrtvému prostoru a tlakovým ztrátám, které jsou neoddelitelně spjaté s prakticky realizovatelným regenerátorem. Tyto

ztráty tedy omezují dosažitelné zvětšení účinnosti stroje regenerátorem. Při konstrukci regenerátoru Stirlingova stroje je cílem dosáhnout dostatečný tepelný výkon a kapacitu při minimálním přidaném objemu (mrtvý prostor) a odporu proudění. Tyto dva protichůdné požadavky tvoří konstrukční konflikt, jenž je jednou z mnoha příčin, které omezují účinnost prakticky realizovatelného Stirlingova stroje. Typickou konstrukcí je nádrž naplněná jemnými dráty nebo sítíčkou s nízkou pórovitostí pro redukci mrtvého prostoru a s dráty kolmo na osu proudění, aby se snížila tepelná vodivost a zvětšil přenos tepla konvekcí.

Regenerátor (vymyšlený Robertem Stirlingem) je hlavním přínosem stroje a odlišuje skutečný Stirlingův stroj od ostatních strojů s uzavřeným oběhem (horkovzdušných motorů). Mnoho hraček a především typů s nízkou teplotní diferencí nemá jasně oddělený regenerátor a bylo by je možné zahrnout do horkovzdušných motorů. Přesto je zajištěna jistá regenerace tepla povrchem přehaneče a blízkou stěnou válce, nebo potrubím spojující teplý a studený.

#### **6.3.4 Chladič/ výměník studené strany**

V malých strojích s malým výkonem může být chladič jednoduše tvořen stěnami studeného válce. Pak se teplo odvádí do okolního prostředí a chladná část tak dosahuje téměř teploty okolí. Pro dosažení vyššího výkonu je nutné zvýšit rozdíl teplot mezi částí ohřívanou a chladičem. Proto je zde často chladič tvořen výměníkem, který je ochlazován kapalinou, například vodou (v některých případech i chladnějšími médii). Tato chladící kapalina se při provozu motoru ohřívá, získané teplo je pak možno použít pro vytápění - tomuto způsobu provozu se říká kogenerace. Stirlingův motor však umí využít tepelného spádu tvořeného na teplé straně okolním vzduchem a na chladné straně ledovou vodou; studená strana je případně chlazená kryogenně.

#### **6.3.5 Přehaneč**

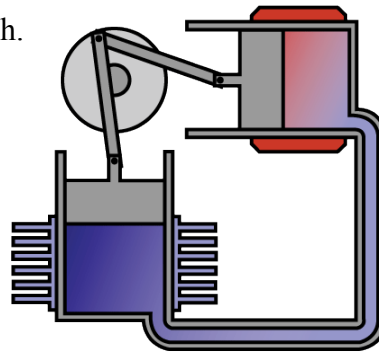
V Beta a Gama konfiguraci Stirlingova stroje se používá speciální píst zvaný přehaneč, který přesune pracovní plyn z teplého prostoru do studeného a naopak. V závislosti na konfiguraci stroje může být přehaneč umístěn ve stejném válci jako pracovní píst, nebo může mít vlastní válec. Přehaneč může být ve válci s vůlí a umožňovat tak pracovnímu plynu proudit kolem sebe, nebo může být utěsněn a přesunovat plyn přes výměníky a regenerátor.

## 6.4 Konfigurace Stirlingova motoru

Podle způsobu přesouvání plynů v motoru rozlišujeme dvě hlavní konfigurace Stirlingova motoru.

### 6.4.1 Alfa konfigurace

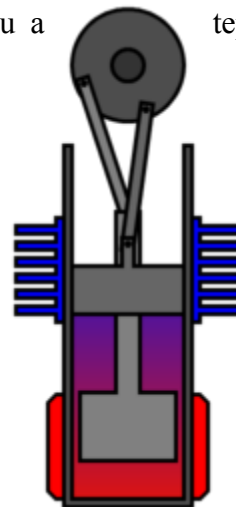
Stroj se dvěma pracovními válci. Pracuje bez přeháněče a pracovní plyn je přesunován z jednoho válce do druhého pomocí pístů v obou válcích.



Obrázek 7 Alfa konfigurace Stirlingova motoru

### 6.4.2 Beta/ Gama konfigurace

Stroj pracující jen s jedním pracovním válcem, ve kterém se nachází přeháněč. Přeháněč přehání pracovní plyn z jedné části do druhé a musí být dostatečně velký, aby zajistil správnou izolaci a tím nedošlo k přesunu tepla mezi studenou a teplou částí.



Obrázek 8 Beta konfigurace Stirlingova motoru

### 6.4.3 Jiné typy

Vědci se stále zabývají vývojem účinnějších konfigurací Stirlingova motoru.

## 6 . 5 Teorie za Stirlingovým motorem

Ideální Stirlingův oběh sestává ze čtyř termodynamických dějů probíhajících v pracovní plyn.

### 1) Izotermická expanze

Izotermická expanze probíhá při konstantní teplotě. Expanzní prostor a připojený výměník tepla (ohřívač) je udržován na konstantní vysoké teplotě. V pracovním plynu probíhá téměř izotermická expanze a plyn přijímá teplo z tepelného zdroje.

### 2) Izochorické chlazení

Izochorické chlazení probíhá při konstantním

objemu. Pracovní plyn protéká přes regenerátor z [Obrázek 9 P/V diagram](#) teplého prostoru do studeného. V regenerátoru je plyn ochlazován a odevzdává teplo do jeho hmoty. Toto teplo bude využito v dalším cyklu ohřevu.

### 3) Izotermická komprese

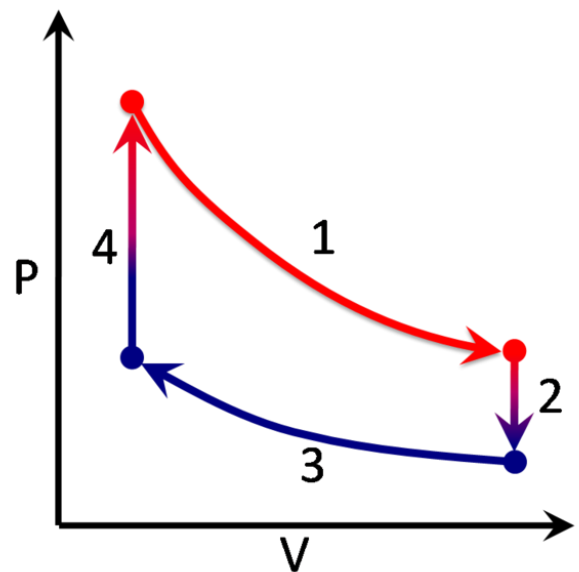
Izotermická komprese probíhá při konstantní teplotě. Kompresní prostor a výměník tepla (chladič) je udržován na konstantní nízké teplotě. V pracovním plynu probíhá téměř izotermická komprese a plyn odevzdává teplo do chladícího media.

### 4) Izochorický ohřev

Izochorický ohřev probíhá při konstantním objemu. Pracovní plyn protéká přes regenerátor z chladného prostoru do teplého. V regenerátoru je plyn ohříván a odebírá teplo z jeho hmoty. Toto teplo tam bylo odevzdáno v předcházejícím cyklu chlazení.

**Teoretická termodynamická účinnost** je rovna účinnosti v teoretickém Carnotově cyklu. Ten určuje nejvyšší dosažitelnou účinnost jakýmkoliv tepelným strojem.

Účinnost skutečných strojů je snižována ze dvou hlavních důvodů a to z přenosu tepla vedením přes stěny výměníků a tlakových ztrát při proudění pracovního plynu v potrubí stroje. Existují také praktická mechanická omezení. Například jednoduchý klikový mechanismus může být upřednostněn před složitějším mechanismem potřebným pro



přiblížení k ideálnímu cyklu a omezení způsobená dostupnými konstrukčními materiály jako je reálný plyn použitý jako pracovní, tepelná vodivost, pevnost v tahu, deformace, pevnost v ohybu, a teplota tání materiálu.

Často nastolenou otázkou je, zda ideální termodynamický cyklus, jako izotermická expanze a komprese, je opravdu správný ideální oběh použitelný pro Stirlingův stroj. Profesor C. J. Rallis ukázal, že je velmi obtížné představit si nějaké podmínky, kdy se může expanzní a kompresní prostor přiblížit k izotermickému chování a zda není mnohem více realistické představit si je jako adiabatické. V jedné ideální analýze je expanzní a kompresní prostor uvažován jako adiabatický s izotermickým výměníkem tepla a dokonalým regenerátorem. To je Rallisem prezentováno jako lepší ideální měřítko pro Stirlingův stroj. Rallis tento oběh nazývá 'pseudo-Stirlingův oběh' nebo „ideální adiabatický Stirlingův oběh“. Důležitým důsledkem tohoto ideálního oběhu je to, že nepředpokládá Carnotovu účinnost. Dalším poznatkem odvozeným z tohoto ideálního cyklu je, že maximální účinnosti je dosaženo při nízkých kompresních poměrech, což je typický rys pozorovaný u skutečných strojů. V nezávislé práci T. Finkelsteina se také v analýze Stirlingova otoru předpokládá adiabatický expanzní a kompresní prostor.



## 6 . 6 Porovnání s motorem s vnitřním spalováním

Na rozdíl od motorů s vnitřním spalováním může Stirlingův motor využívat i obnovitelných zdrojů tepelné energie a je také tišší, spolehlivější a klade menší nároky na údržbu. Výhodnější aplikace tohoto motoru je v případech, kdy je cena za generovanou energii důležitější, než finanční nároky na jednotku výkonu. Proto je Stirlingův motor konkurenční asi jen do výkonu 100kW.

Ve srovnání se spalovacím motorem toho samého výkonu má Stirlingův motor větší pořizovací náklady, je obvykle větší a těžší. Nicméně je účinnější než většina spalovacích motorů. Díky jeho nižším nárokům na údržbu jsou celkové náklady na jednotku energie srovnatelné. Tepelná účinnost je také srovnatelná (v rozsahu od 15 % do 30 %). Pro aplikace jako je mikrokogenerace jsou často Stirlingovy motory preferovány před spalovacími. Další aplikace jsou při čerpání vody, v kosmonautice a generování el. energie z rozptýlených zdrojů energie jako je sluneční záření, biomasa, zemědělské odpady a další odpady například z domácností. Stirlingovy motory jsou také použity pro pohon ponorek třídy Gotland ve Švédsku. Stirlingovy motory však nemohou konkurovat spalovacím motorům při použití v automobilech pro svoji vysokou cenu na jednotku výkonu, malý výkon na jednotku hmotnosti a vysokou cenu materiálu. Základní rozbor je založen na uzavřené formě Schmidtovy analýzy.

## 6 . 7 Využití

Stirlingův motor je použitelný od chlazení či topení až k pohonu ponorek. Využívá se v solárních kolektorech (zrcadlové solární elektrárny), jako tepelné čerpadlo, kryogenické generátory, námořní motory a motory pro malé tepelné spády. Často se prodává jako hračka.

### 6.7.1 Alternativy

Místo Stirlingova motoru lze použít termočlánek, především při aplikacích, kdy je třeba vyšší spolehlivost a nebo menší velikost.

## **7 Závěr**

V závěru bych chtěl říci, že podle mého názoru je Stirlingův motor slibnou alternativou do budoucna v oblasti motorů s vnějším spalováním. Stirlingův motor již našel využití v praxi a pokud budeme investovat do alternativních zdrojů, jako je Stirlingův motor, můžeme se časem úplně oprostit od motorů s vnitřním spalováním. Ovšem toto je pouhý sen, i když doufám, že se jednou splní a my budeme o krok blíže k oddálení devastace naší planety díky používání fosilních paliv.

## **Citace:**

Der V8-Motor. *Heise Autos* [online]. Hannover: Heise Medien, 2015 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <https://www.heise.de/autos/artikel/Der-V8-Motor-1398515.html>

Raketový motor C6-5 (3ks). *Modelářina.cz* [online]. Jičín: W-company PRO, 2008 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.modelarina.cz/raketovy-motor-c65-3ks-p-10728.html>

F100. *Letecké motory* [online]. Brno: Zdeněk Kussior, 2002 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.leteckemotory.cz/motory/f100/index.php?en>

Stirling Engines and their Role in the 21st Century. *Geocities* [online]. Oslo: Lund University, 2000 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.geocities.ws/kenboak/stirling.html>