

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Bakalářská práce

**Zhodnocení využití Stirlingova motoru v hybridních
automobilech**

**Vypracoval: Hořejší Filip
Vedoucí: Ing. Petr Jindra, Ph.D.**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Filip Hořejší

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Zhodnocení využití Stirlingova motoru v hybridních automobilech

Název anglicky

Evaluation of the Stirling engine use in hybrid cars

Cíle práce

Cílem práce je provést jednoduchý návrh Stirlingova motoru a provést ekonomickou analýzu jeho využití v hybridním automobilu.

Metodika

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

Doporučený rozsah práce

40-50

Klíčová slova

alternativní pohony, spotřeba paliva, účinnost

Doporučené zdroje informací

HROMÁDKO, J. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.

ZARE, Shahryar, A.R. TAVAKOLPOUR-SALEH, A. AGHAHOSSEINI, M.H. SANGDANI a Reza MIRSHEKARI. Design and optimization of Stirling engines using soft computing methods: A review. Applied Energy [online]. 2020, 116258. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2020.116258

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Petr Jindra, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 28. 1. 2021

Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 26. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Zhodnocení využití Stirlingova motoru v hybridních automobilech vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 31.3.2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Petru Jindrovi, Ph.D. za ochotu a věcné připomínky v průběhu tvorby této práce.

Zhodnocení využití Stirlingova motoru v hybridních automobilech

Abstrakt

Teoretická část práce se zabývá stručnou historií a představením Stirlingova motoru. Následuje popsání funkce, základních výpočtů, jednotlivých typů a možného praktického využití. V další části jsou popsány hybridní automobily a rozděleny do skupin dle využití a rozmístění pohonných technologií. Dále je rozebrána možnost využití zbytkového tepla spalovacího motoru včetně popisu jednotlivých zdrojů. V navazující praktické části je vybrán vhodný typ Stirlingova motoru na základě teoretického posouzení, je zvolena vhodná lokace pro umístění do výfukového potrubí na základě dosahované teploty a jsou zhodnoceny základní typy materiálů tepelně namáhaných částí. Na základě těchto parametrů je vypočítána teoretická kapacita, dodaná do baterií hybridního automobilu za využití Stirlingova motoru. Poslední část se zabývá ekonomickým zhodnocením z hlediska odhadovaných nákladů na vývoj a produkci a přidanou hodnotou v podobě zvýšeného dojezdu automobilu.

Klíčová slova: Stirlingův motor, hybridní automobil, WHR, výfukové plyny, využití tepla, ekonomické zhodnocení

Evaluation of the Stirling engine use in hybrid cars

Abstract

The theoretical part deals with a brief history and introduction of the Stirling engine. The following part is a description of the function, basic calculations, individual types and possible practical use. The next section describes hybrid cars and is divided into groups according to the use and distribution of propulsion technologies. Furthermore, the possibility of using the residual heat of the internal combustion engine, including a description of individual sources, is discussed. In the following practical part, a suitable type of Stirling engine is selected on the basis of theoretical assessment and a suitable location for placement in the exhaust pipe is selected based on the achieved temperature and the basic types of materials of thermally stressed parts are evaluated. Based on these parameters, the theoretical capacity delivered to the hybrid car's batteries using a Stirling engine is calculated. The last part deals with the economic evaluation in terms of estimated development and production costs and added value in the form of increased car mileage.

Keywords: Stirling engine, hybrid car, WHR, exhaust gases, heat utilization, economic evaluation

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Cíl práce a metodika	12
2.1. Cíl práce	12
2.2. Metodika BP.....	12
2.2.1. Teoretická část	12
2.2.2. Vlastní práce	12
3. Přehled řešené problematiky	13
3.1. Historie	13
3.2. Koncepce Stirlingova motoru	14
3.3. Základní komponenty.....	15
3.4. Práce motoru	16
3.4.1. Výpočet účinnosti	17
3.4.2. Výpočet výkonu	18
3.5. Výhody a nevýhody	19
3.6. Typy Stirlingova motoru	19
3.6.1. Typ Alfa.....	19
3.6.2. Typ Beta.....	20
3.6.3. Typ Gamma	21
3.6.4. S volným pístem	22
3.7. Praktické využití Stirlingova motoru	23
3.7.1. Kryogenika.....	23
3.7.2. Automobilový průmysl	23
3.7.3. Kogenerační jednotky	24
3.7.4. Využití u ponorek	25
3.7.5. Solární generátor	26
3.8. Hybridní automobily	27
3.9. Dělení podle využití hybridního ústrojí	27
3.9.1. E-REV (Extended-Range Electric Vehicles)	27
3.9.2. PHEV (Plug-In Hybrid Electric Vehicles).....	28
3.9.3. HEV (Hybrid Electric Vehicles).....	29
3.9.4. MHEV (Mild Hybrid Electric Vehicles)	29
3.9.5. Micro Hybrid	29
3.9.6. FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles)	30
3.10. Dělení podle uspořádání hnacího ústrojí.....	30

3.10.1. Paralelní hnací ústrojí	31
3.10.2. Sériové hnací ústrojí s centrálním motorem	31
3.10.3. Hnací ústrojí s palivovými články a centrálním motorem	31
3.10.4. Sériové hnací ústrojí s motory v nábojích kol	31
3.10.5. Hnací ústrojí s palivovými články a motory v nábojích kol	32
3.11. Účinnost hybridního ústrojí.....	32
3.12. Využití zbytkového tepla spalovacího motoru.....	32
4. Praktická část práce.....	34
4.1. Volba typu Stirlingova motoru.....	34
4.2. Volba umístění a dosahované teploty	36
4.3. Teoretický výpočet Stirlingova motoru	37
4.4. Ekonomická analýza přínosů a ztrát	40
5. Závěr.....	41
6. Seznam použitých zdrojů	43
7. Přílohy	47

Seznam obrázků

Obrázek 1 Patent Stirlingova motoru.....	13
Obrázek 2 elektrický generátor NV Philips.....	14
Obrázek 3 Model nízkoteplotního Stirlingova motoru	15
Obrázek 4 Základní komponenty Stirlingova motoru	16
Obrázek 5 P-V diagram	17
Obrázek 6 Stirlingův motor Alfa	20
Obrázek 7 Stirlingův motor Beta	21
Obrázek 8 Stirlingův motor Gamma.....	21
Obrázek 9 Stirlingův motor s volným pístem.....	22
Obrázek 10 Kryogenický chladič Sunpower Inc.	23
Obrázek 11 Pohonná jednotka Mod II.....	24
Obrázek 12 CHP jednotka firmy Helec Ltd.....	25
Obrázek 13 Ponorka s Diesel-Stirlingovou hybridní jednotkou.....	26
Obrázek 14 Solární generátor v jižní Kalifornii	26
Obrázek 15 E-REV	28
Obrázek 16 PHEV	28
Obrázek 17 HEV.....	29
Obrázek 18 FCEV.....	30
Obrázek 19 typy ústrojí hybridních automobilů	31
Obrázek 20 Ztráty spalovacího motoru	33
Obrázek 21 Závislost Bealeova čísla na teplotě	35
Obrázek 22 Teplota výfukového potrubí	36
Obrázek 23 Závislost hustoty vzduchu na teplotě	38

Seznam použitých zkratk

WHR – waste heat recovery

kW – kilowatt

°C – stupeň Celsia

% – procento

Inc. – veřejná obchodní společnost

1. Úvod

Aktuálním trendem v automobilovém průmyslu je snižování emisí na minimum a důraz na udržitelnost. Potenciálním řešením může být rozšíření elektromobilů, které si ale žádá výstavbu a posílení infrastruktury. Dalším problémem jsou baterie elektromobilů, které jsou citlivé na výkyvy teplot, dosahují vysoké hmotnosti a výrobní ceny. Současně je jejich životnost oproti spalovacím motorům omezena a ekologická hospodárnost zcela nevyřešena. Současným řešením důrazu na ekologii mohou být hybridní automobily, které kombinují technologii elektromobilů a automobilů se spalovacím motorem za účelem dosažení optimální spotřeby pohonných hmot a snížení emisí, produkovaných spalovacím motorem.

Pokročilé spalovací motory v současné situaci dokáží plnit emisní limity, jejich účinnost ale není vysoká a potenciál motorů tak není zcela využit. Proto se rozšiřují a uplatňují technologie WHR (waste heat recovery), které zvyšují účinnost motorů využitím vyprodukovaného odpadního tepla při spalování paliva. Toto teplo lze přeměnit na elektrickou energii a v případě hybridních automobilů ji využít pro pohon. Jedním z potenciálních řešení je využít Stirlingův motor pro zachycení a přeměnu tepla.

Tímto tématem se zabývá tato práce. První rešeršní část se skládá z krátkého shrnutí historie této technologie a úvodem do problematiky Stirlingova motoru. Je zde popsán základní princip funkce, jednotlivé konstrukční typy a základní výpočty pro zjištění účinnosti a výkonu těchto motorů. V další části jsou popsány hybridní automobily, jejich fungování a jednotlivé typy. Následuje rešerše možností využití zbytkového tepla spalovacích motorů, kde jsou rozebrány nejvhodnější lokace pro umístění Stirlingova motoru.

Praktická část se skládá z teoretické volby typu Stirlingova motoru, jeho optimalizace a následné implementace do výfukového potrubí vybraného spalovacího motoru. Na základě teoretické úvahy je pro chlazení zařízení vybráno uzpůsobení chladicího systému spalovacího motoru, čímž lze spolehlivě regulovat požadovanou teplotu. Výsledkem práce je výpočet energie zbytkového tepla spalovacího motoru a teoretický výpočet výkonu Stirlingova motoru a energie, dodané do baterie. Řešení je ekonomicky zhodnoceno ve smyslu očekávaných nákladů, souvisejících s implementací tohoto zařízení a přidané hodnoty pro potenciální zájemce v podobě prodloužení dojezdu a zvýšení celkové efektivity automobilu.

2. Cíl práce a metodika

2.1.Cíl práce

Cílem práce je provést rešerše na téma Stirlingův motor a jeho využití, dále koncepce a základní typy hybridních automobilů. Rešeršní část by měla být zakončena možnostmi využití zbytkového tepla spalovacího motoru. Cílem další části práce je vypracovat jednoduchý teoretický návrh Stirlingova motoru, vypočítat možný energetický výstup v podobě kapacity, uchované v baterii a provést ekonomickou analýzu jeho využití v hybridním automobilu.

2.2.Metodika BP

Bakalářská práce se skládá ze dvou základních částí, teoretické a praktické. Teoretická část je rešeršní a je vypracovávána na základě dostupných zdrojů. Praktická část obsahuje vlastní návrh a možná východiska řešené problematiky.

2.2.1. Teoretická část

Teoretická část práce se skládá z několika menších částí. Úkolem v první části je popis historie Stirlingova motoru. Dalšími body jsou: popis jednotlivých koncepcí, tj. alfa, beta, gamma a s volným pístem, včetně výhod a nevýhod. V další části se práce zabývá popisem teoretických východisek pro návrh motoru, určení výkonu a účinnosti.

V navazující části je popsáno možné využití Stirlingova motoru v různých oblastech činnosti.

V poslední části je cílem teoretické části rozbor hybridních automobilů. Zde jsou popsány základní koncepce hybridů, energetická bilance a dále je popsána úvaha o možnostech využití zbytkového tepla ze spalovacího motoru.

2.2.2. Vlastní práce

Cílem vlastní práce je vytvořit teoretický model Stirlingova motoru, nalézt vhodné umístění pro využití tepla spalovacího motoru a zjistit jeho teoretický výkon a vypočítat energii, uloženou do baterií automobilu. Dalším aspektem je teoretická volba materiálu na základě dosahovaných teplot. V poslední části bude provedena ekonomická analýza přínosů a ztrát.

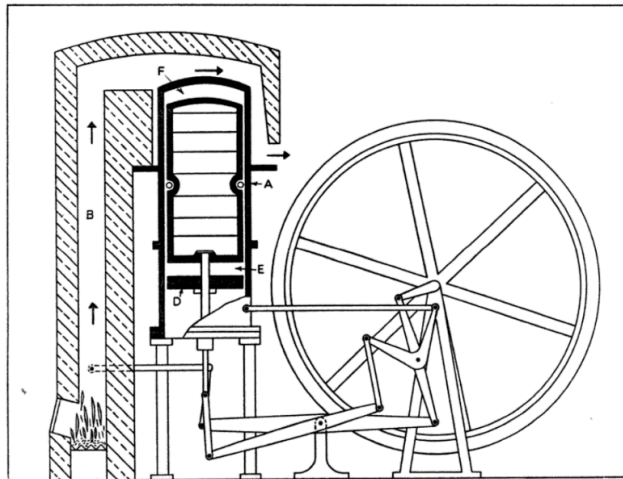
3. Přehled řešené problematiky

V této části bude rozebrána historie, koncepce, základní výpočty a možné praktické využití Stirlingova motoru. Následovat bude základní přehled hybridních automobilů, jednotlivé typy a možnosti využití tepla spalovacího motoru.

3.1. Historie

Za předchůdce Stirlingova motoru můžeme považovat teplovzdušné motory. Za zmínku stojí experimentální teplovzdušný motor, jenž v roce 1807 představil pan George Cayley. Princip funkce nebyl v té době inovativní, ale šlo o zdokonalení dosavadních řešení. Tento motor, na rozdíl od Stirlingova, nevyužíval uzavřeného oběhu média, proto nedosahoval velké účinnosti. Teplovzdušný motor s uzavřeným oběhem si nechal patentovat v roce 1816 pan Robert Stirling, podle nějž se tyto motory v dnešní době nazývají. Nákres z patentu viz. Obrázek 1. Myšlenku k tomuto vynálezu panu Stirlingovi zavdaly doposud používané parní stroje v průmyslové výrobě, které nebyly pro dané použití příliš bezpečné kvůli vysokému tlaku páry při jejich provozu.

Obrázek 1 Patent Stirlingova motoru



Zdroj: www.hotairengines.org

První využití našel Stirlingův motor v roce 1818 jako pohon vodní pumpy v lomu. Motor se potýkal s mnoha problémy kvůli použitým laciným materiálům, které nedokázaly vhodně odolávat vysokým teplotám, jež jsou pro pohon nutné. Vývoj motoru pokračoval, až se začal využívat ke komerčním účelům. Výrobou tohoto typu motorů se proslavil zejména pan John Ericsson, který v roce 1833 vyvinul vlastní dvouválcový Stirlingův motor s uzavřeným oběhem o výkonu až 3,8 kW. Mezi lety 1838 až 1850 dále vyvíjel

a zdokonaloval tepelné motory. V roce 1851 se zasadil o vybudování lodi s motorem jeho vlastní konstrukce. Loď ale nikdy nedosáhla požadované rychlosti pro její efektivní využití.

V roce 1937 hledala nizozemská společnost NV Philips vhodný motor pro pohon generátoru, jenž by napájel rádiové přijímače. Stirlingův motor se ukázal jako vhodná varianta a došlo k jeho dalšímu vývoji. Obrázek 2 zachycuje elektrický generátor, pracující na principu Stirlingova motoru. Firma NV Philips byla schopna vyprodukovat tichý motor, dosahující až 5000 otáček za minutu a účinnosti až 38 %.

V roce 1964 pan William T. Beale vynalezl a sestavil inovativní Stirlingův motor s volným pístem, který obsahoval pouze dvě pohyblivé součásti. V roce 1974 založil se svým týmem firmu Sunpower, která se podílela na dalším vývoji tohoto typu motoru a jeho využití v kriogenice.

V posledních letech našel Stirlingův motor využití u agentury NASA pro výrobu elektrické energie a chlazení například v astronautice. Také se využívá v kogeneračních jednotkách.(1)(2)

Obrázek 2 elektrický generátor NV Philips



Zdroj: www.autoride.sk

3.2.Koncepce Stirlingova motoru

Stirlingův motor je teplovzdušný motor s vnějším spalováním. Pracuje na principu rozpínání a smršťování uzavřeného média uvnitř stroje pomocí změny teplot. Pro chod stroje tedy ohřívání část musí dosáhnout vyšší teploty než část ochlazovaná. To vše za předpokladu, že médium se ve stroji pohybuje z ohřívání části do chladné, a naopak za pomoci pístů. Při nižších nárocích na výkon lze jako médium použít vzduch. Nejlepších výsledků však bylo dosaženo při použití média s pokud možno co nejnižší měrnou tepelnou kapacitou. Těmto požadavkům vyhovuje zejména vodík, či hélium.(3)

Pro Stirlingův motor jsou charakteristické 3 hlavní podmínky:

1. Médium, užitý ve Stirlingově motoru je uzavřené a v ideálním případě neopustí motor.
2. Pro běh motoru je zapotřebí setrvačnický, udržující motor v chodu při nepracovních fázích cyklu. Pro spuštění je potřeba externí síly.
3. Zdroj tepla je umístěn mimo motor, nedochází tedy ke kontaminaci média, ani vnitřních součástí.(4)

Obrázek 3 Model nízkoteplotního Stirlingova motoru



Zdroj: www.gyroscope.com

Obrázek 3 zobrazuje nízkoteplotní Stirlingův motor, na kterém lze tyto podmínky pozorovat. Dominantním prvkem je setrvačnický, propojený s pohyblivými hnanými komponenty motoru. Spodní část je v ideálním případě hermeticky uzavřená a pohon lze u tohoto modelu zajistit pouze teplotou lidské ruky.

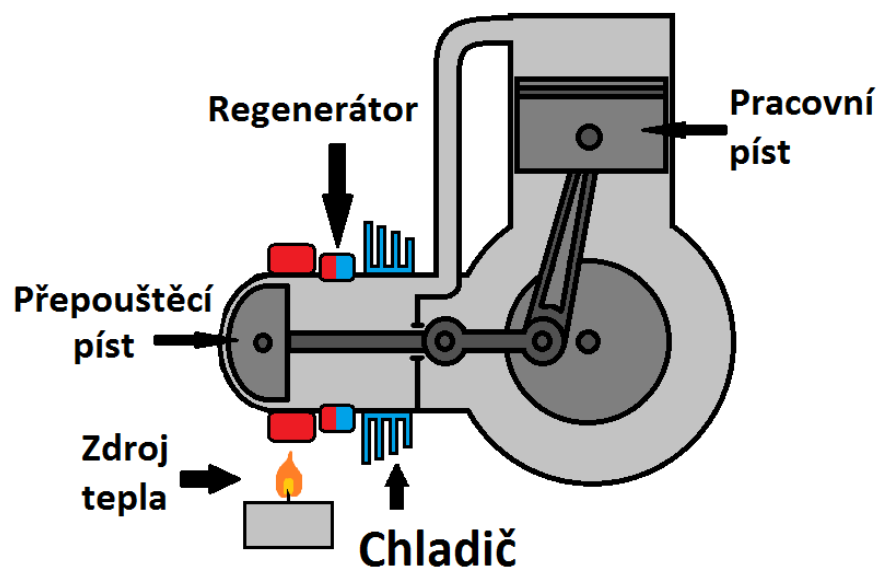
3.3. Základní komponenty

Stirlingův motor, podobně jako ostatní motory s vnitřním, či vnějším spalováním obsahuje specifické komponenty, které schematicky popisuje Obrázek 4. Základní užití díly tedy jsou:

1. **Zdroj tepla:** jelikož spalování neprobíhá uvnitř motoru, lze využít k pohonu širokou škálu paliv. Při vhodné konstrukci je možné využívat téměř jakýkoliv zdroj tepla, aniž by došlo k poškození motoru.

2. **Regenerátor:** funkce regenerátoru je zachytit a následně využít odpadní teplo, které by při práci motoru bylo předáno okolnímu prostředí a již znovu nevyužito. Tato součást významně zvyšuje účinnost. Jednoduchý regenerátor se skládá z pletiva kovových drátů, které jsou schopné absorbovat teplo. V ideálním Stirlingově cyklu působí jako regenerátor celý spojovací prostor mezi horkým a chladným válcem.
3. **Chladič:** zpravidla se k udržování nižší teploty chladného válce využívá teploty okolního prostředí, přičemž ke zvýšení efektivity tento válec může mít žebrovaní. V ostatních případech lze válec aktivně chladit například vodou, či kapalným dusíkem.
4. **Přepouštěcí píst:** Využívá se k přesunu pracovního média mezi teplou a chladnou částí motoru, pomocí čehož dochází střídavě k expanzi a kontrakci média při provozu motoru. Někdy bývá nazýván jako píst přemísťovací.
5. **Pracovní píst:** U většiny typů Stirlingova motoru přenáší práci na klikový hřídel. Pohybuje se na základě změny objemu pracovního média v závislosti na teplotě. Tomuto dopomáhá píst přepouštěcí.(5)

Obrázek 4 Základní komponenty Stirlingova motoru



Zdroj: Vlastní

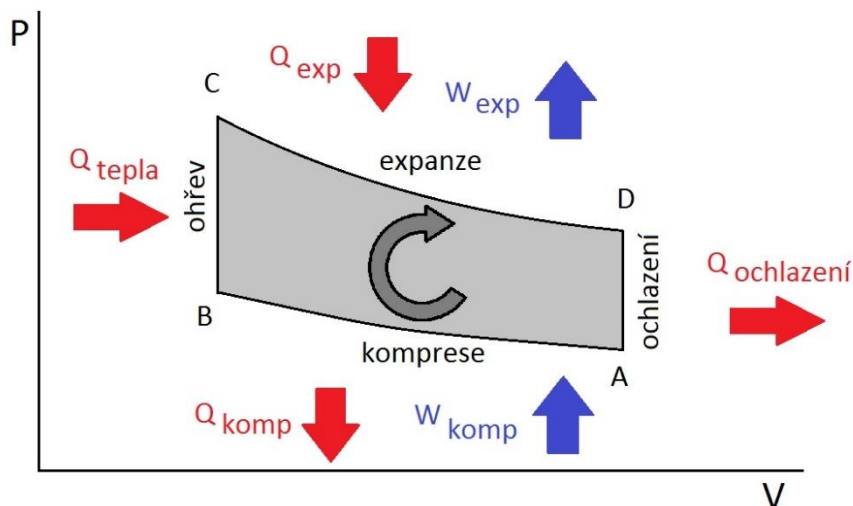
3.4. Práce motoru

Pro lepší pochopení pracovního cyklu Stirlingova motoru lze použít diagram tlaku v závislosti na objemu ideálního pracovního média, který vyobrazuje Obrázek 5. Pracovní cyklus zahrnuje 4 základní termodynamické děje: izotermická expanze, izochorické

ochlazení, izotermická komprese a izochorický ohřev. Na diagramu lze jednotlivé fáze cyklu popsat takto:

1. Fáze C-D: médium prochází izotermickou expanzí, při které přijímá teplo. Pracovní píst vykonává pohyb směrem k dolní úvratí, přičemž se zvyšuje objem média při současném poklesu tlaku.
2. Fáze D-A: pracovní píst dosáhl dolní úvratě, kde dojde k jeho zastavení. Objem je konstantní. Médium prochází regenerátorem, kterému předává teplo pro další fázi cyklu. Přitom dochází k poklesu teploty média. V průběhu této fáze nedochází k žádné mechanické práci.
3. Fáze A-B: pracovní píst se přesouvá z dolní úvratě k horní. Dochází ke snižování objemu a zvyšování tlaku média, přičemž dochází k výměně tepla v chladném válci.
4. Fáze B-C: pracovní píst dosáhl horní úvratě a zůstává ve své nejvyšší pozici, přičemž objem je konstantní. Pracovní médium znovu prochází regenerátorem a přijímá teplo, předané ve druhé fázi. Se zvyšováním teploty dochází i ke zvýšení tlaku. Při konstantním chodu stroje se po této fázi celý cyklus opakuje. (4)(6)

Obrázek 5 P-V diagram



Zdroj: (36)

3.4.1. Výpočet účinnosti

Stirlingův cyklus je v mnoha ohledech podobný Carnotovu cyklu, který popisuje kontinuální práci ideálního tepelného motoru. Předpokladem je tedy absence tření a nulový únik pracovního média. Účinnost se, stejně jako v Carnotově cyklu, získá dosazením do vzorce (1).

$$\eta = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} \quad (1)$$

Kde:

T_{max} – maximální dosažená teplota cyklu [K]

T_{min} – minimální dosažená teplota cyklu [K]

Dalším matematickým vztahem, vhodným k použití při návrhu a posouzení účinnosti tepelného motoru je termodynamická účinnost, vyjádřena vztahem (2).

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad (2)$$

Kde:

W – práce vytvořená [J]

Q – přijatá energie [J]

Ve většině aplikací je hlavním cílem dosažení maximální účinnosti, která je limitována druhým termodynamickým zákonem, dle kterého není možný přechod tepla z chladného tělesa na teplé. Vypočtená účinnost musí dosahovat vždy nižšího čísla, než 1.(7)

3.4.2. Výpočet výkonu

Výkon Stirlingova motoru lze zjistit pomocí Bealeova čísla (3). To vzniklo pozorováním pana Williama Bealea, který přišel na přímou spojitost mezi výstupním výkonem, tlakem, objemem a rychlostí Stirlingova motoru. Jedná se o základní spojitost, ve které je vliv teploty promítnut do konstanty Bealeova čísla. Je prokázáno, že Bealeovo číslo dosahuje hodnoty přibližně 0,15 jednotky při teplotě ohříváče 650 °C. Pokud je potřeba ve výpočtu zohlednit teplotu, používá se Westovo číslo (4). To činí přibližně 0,25 jednotky v případě Stirlingova motoru s výkonem od 5 do 150 kW. U motorů s nižším výkonem se toto číslo zvýší na 0,35 jednotky.(8)

$$B_n = \frac{W_0}{P \cdot V \cdot f} \quad (3)$$

$$W_n = B_n \cdot \frac{T_H + T_C}{T_H - T_C} \quad (4)$$

Kde:

W_0 – výstupní výkon motoru [W]

P – tlak média [Pa]

V – objem motoru [m³]

f – frekvence [Hz]

T_H – teplota horké části motoru [K]

T_C – teplota chladné části [K]

3.5. Výhody a nevýhody

Největší výhodou je široká škála paliv, které mohou Stirlingův motor pohánět, aniž by došlo ke kontaminaci média, či mechanického poškození stroje. Zjednodušeně lze říci, že pro pohon je vhodný téměř jakýkoliv zdroj tepla. U motorů s vnitřním spalováním dochází k zažehnutí, nebo vznícení směsi paliva se vzduchem, což se na venek projevuje rázem. U Stirlingova motoru k tomuto nedochází, protože přívod tepla je kontinuální. Motor se tedy projevuje velice tiše. Na rozdíl od parních motorů nepracuje s tak vysokými tlaky a mizí riziko exploze při nahodilém poškození motoru, díky čemuž je bezpečnější. Nižší provozní tlaky a vnější spalování paliva mají za důsledek vyšší spolehlivost a životnost motoru. Možné je také využití v nehostinném prostředí, například v ponorkách, či satelitech.

Nevýhodou může být dlouhá doba rozběhu motoru v aplikacích, které vyžadují rychlý start, tedy například primární pohon automobilu, či lodě. Ačkoliv motor dokáže být velmi verzatilní, jeho komerční využití ve velkém měřítku je obtížně realizovatelné. Stirlingův motor zpravidla nedosahuje takové účinnosti a výkonnosti, jaké jsou při totožných nákladech na výrobu schopny dosáhnout konkurenční stroje, například spalovací motory. (6)

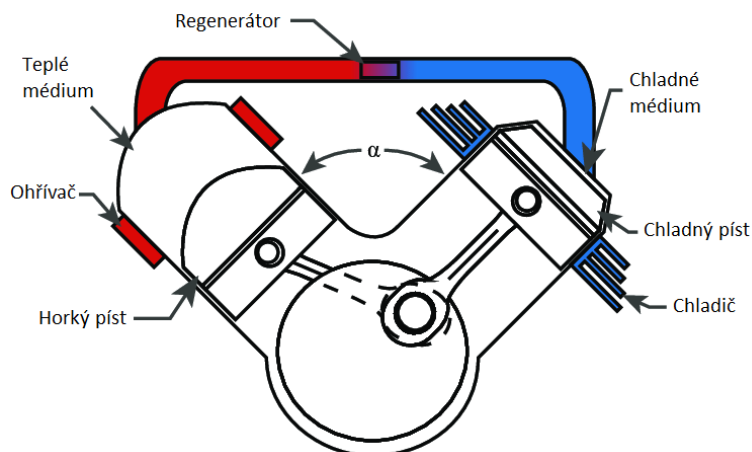
3.6. Typy Stirlingova motoru

Stirlingův motor má za dobu svého vývoje mnoho variant. Dle rozmístění válců jej dělíme na tři základní varianty: alfa, beta a gamma. Existují ale i další více, či méně příbuzné konstrukční řešení, které se zpravidla liší v mechanismu převodu přímočarého pohybu pístů na pohyb rotační. Za průlomové řešení je považován Stirlingův motor s volným pístem, který žádným typem mechanismu pro převod na rotační pohyb nedisponuje. Proto je popsán jako další varianta. (3)

3.6.1. Typ Alfa

Tento typ disponuje dvěma válci, teplým a chladným. Každý válec má samostatný pracovní píst, nenachází se zde tedy píst přepouštěcí. Válce jsou propojeny přepouštěcím potrubím, jež v případě dosažení větší účinnosti obsahuje regenerátor. Válce jsou uspořádány do V v úhlu 90°. Schematické vyobrazení znázorňuje Obrázek 6.

Obrázek 6 Stirlingův motor Alfa

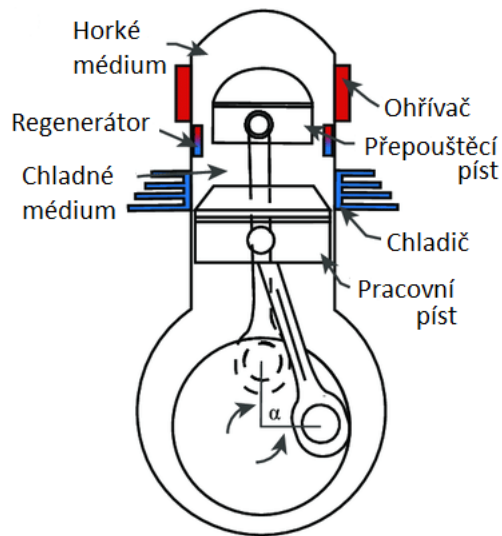


Zdroj: (37)

3.6.2. Typ Beta

Typ Beta je velmi efektivní. Jedná se o jeden z prvních typů, který navrhl pan Robert Stirling. Disponuje dvěma písty, umístěnými ve stejném válci. Přepouštěcí píst (někdy nazýván přemíst'ovací) se nachází v teplé části válce a pracovní píst v části chladné. Součástí přepouštěcího pístu je ojnice se zpravidla kruhovým průřezem, procházející otvorem v pracovním pístu. Oba písty jsou spojeny jednou klikovou hřídelí. Nevýhoda motoru může nastat při využití v horizontální poloze. Přepouštěcí píst je ve válci usazen s dostatečnou vůlí, aby bylo umožněno přepouštění média. Jeho váha tedy může spočívat na pracovním pístu, kterým prochází a dojde tak k většímu opotřebení válce. Řešením může být použití motoru ve vertikální poloze. Další nevýhodou může být potřeba dvou ojnic pro pracovní píst, aby bylo zachováno rovnoměrné zatížení při provozu, jelikož přepouštěcí píst prochází středem pístu pracovního. Tím může docházet k většímu tření. Schematické vyobrazení znázorňuje Obrázek 7.

Obrázek 7 Stirlingův motor Beta

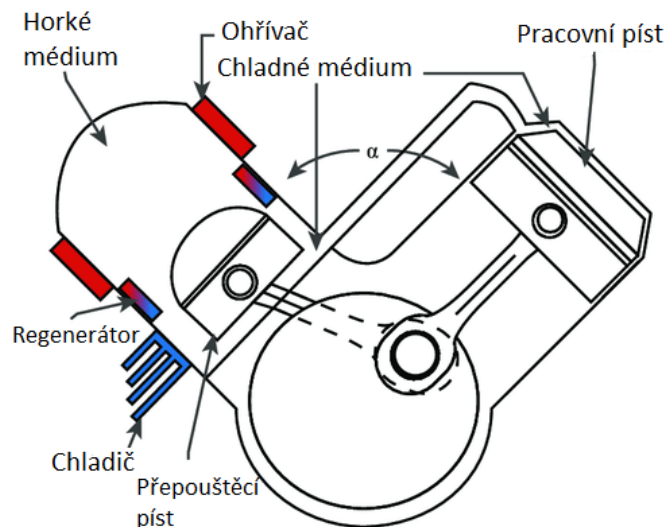


Zdroj: (37)

3.6.3. Typ Gamma

Tento typ disponuje dvěma oddělenými válci. Jeden je určen pro pracovní a druhý pro přepouštěcí píst, někdy také nazývaný jako přemísťovací píst, nebo přehaněč. Tyto válce spolu mohou sdílet stejnou klikovou skříň a jejich písty mohou být napojeny na jednu klikovou hřídel. Oproti předchozím variantám se jedná o jednodušší řešení. Nevýhodou mohou být ztráty v přepouštěcím kanálku, jelikož válce nejsou spojeny přímo. Motor znázorňuje Obrázek 8.(2)(9)

Obrázek 8 Stirlingův motor Gamma



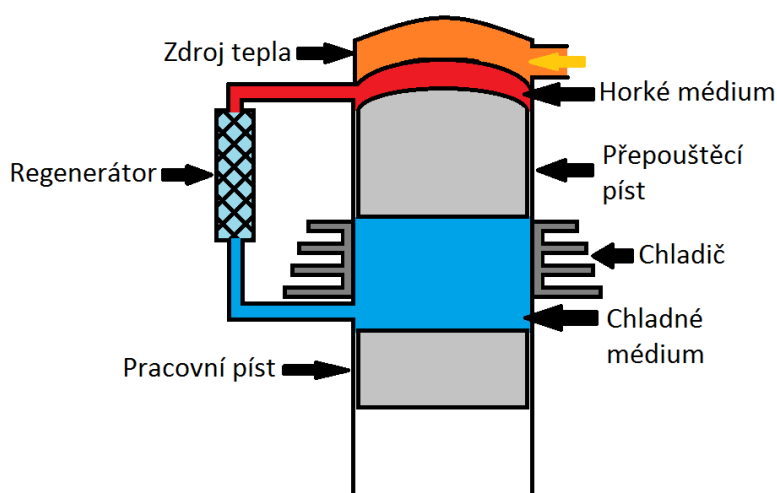
Zdroj: (37)

3.6.4. S volným pístem

Za vynálezce je považován pan William T. Beale. Tento typ nedisponuje žádným mechanismem, jenž by propojoval jednotlivé písty, či měnil jejich přímočarý pohyb na pohyb rotační. Písty se v motoru pohybují pouze pomocí sil, vyvolaných pracovním médiem, či například pružinou. Pohybující prvky jsou pracovní píst a přepouštěcí píst. Médium, které je umístěné pod pracovním pístem se chová jako pneumatické odpružení. Je také možné toto řešení nahradit mechanickou pružinou. V obou případech toto odpružení dovoluje pístu oscilovat při práci motoru. Pohyb přepouštěcího pístu je charakterizován sinusoidou. Obrázek 9 zobrazuje zjednodušené schéma motoru.

Výhodou tohoto typu je absence vnější síly při spuštění. Již při mírném zahřívání začnou písty lehce oscilovat. Tato vlastnost motor předurčuje k použití v aplikacích, kde je třeba ušetřit přebytečnou hmotnost v podobě startovacího zařízení a zároveň například v místech, nepřístupných pro člověka. Další výhodou je eliminace větších bočních sil, působících na písty. V případě motoru s kinematickým mechanismem, tedy písty, spojenými ojnicí s klikovým hřídelem jsou při práci více namáhány stěny válce. Tento mechanismus totiž nevyvíjí sílu na píst pouze v axiálním směru. Tím, že písty nejsou propojeny s žádnou součástí a pohybují se pouze ve válci, je možné je zcela hermeticky uzavřít a dojde k úspoře hmotnosti zařízení. Tím je také možné zvýšit životnost motoru.(7)

Obrázek 9 Stirlingův motor s volným pístem



Zdroj: Vlastní

3.7. Praktické využití Stirlingova motoru

Charakteristika Stirlingova motoru jej předurčuje k využití v místech, kde jiný typ spalovacího motoru využít nelze, nebo pouze značně omezeně. Ke své funkci motor nepotřebuje stálý přísun kyslíku, či jiného média. Využití kteréhokoliv zdroje tepla dělá ze Stirlingova motoru vhodnou ekologickou alternativu k doposud používaným řešením.

3.7.1. Kryogenika

Stirlingův motor lze využít k efektivnímu ochlazování. První výzkum na tomto poli provedla Nizozemská firma Philips. V roce 1953 byl představen první chladicí přístroj, využívající Stirlingova cyklu. Během dalšího vývoje došlo k výraznému zdokonalení kryogenických chladicích jednotek, zmenšování jejich rozměrů a snižování výstupních teplot. V praxi našly tyto jednotky využití zejména k ochlazování namáhané elektroniky, zejména infračervených senzorů. Výrobou kryogenických chladicích zařízení se zabývá i firma Sunpower Inc., která vyvinula chladíč, dosahující až 20 % Carnotovy účinnosti. Ten vyobrazuje Obrázek 10.(7)(1)

Obrázek 10 Kryogenický chladíč Sunpower Inc.



Zdroj: www.sunpowerinc.com

3.7.2. Automobilový průmysl

Ke konci sedmdesátých let začalo ministerstvo energetiky spojených států amerických hledat vhodnou ekologičtější náhradu spalovacích motorů v automobilech, aby mohlo být dosaženo dlouhodobě udržitelné strategie ochrany životního prostředí. Jeden z alternativních motorů, který byl podroben vývoji a testování byl právě Stirlingův motor. Byl tedy založen program Automotive Stirling Engine (ASE), financovaný agenturou NASA a ministerstvem energetiky. Výsledkem vývoje byl motor Mod II, který bylo možné

implementovat do již sestavených automobilů jako náhradu za motor s vnitřním spalováním a při masové produkci byl cenově dostupný. Tuto jednotku zobrazuje Obrázek 11.

NASA
C-1986-3727



Zdroj: www1.grc.nasa.gov

V roce 1987 byly představeny dosažené výsledky na automobilu Chevrolet Celebrity. Vůz ve zrychlení a spotřebě dosáhl podobných parametrů, jako verze se spalovacím motorem, zůstal ale pouze ve fázi prototypu. Vývoj byl poté ukončen s ohledem na zdokonalování motorů s vnitřním spalováním.(10)

3.7.3. Kogenerační jednotky

Jedná se o zařízení, využívané pro ohřev a výrobu elektrické energie pro budovy. Z využití je odvozen název technologie combined heat and power (CHP). V praxi se nejčastěji používají menší jednotky pro zajištění komerčních staveb. Tato technologie napomáhá snižování emisí oxidu uhličitého, dosahuje vysoké účinnosti a provoz jednotky je spolehlivý, tichý a téměř bez vibrací. K výrobě elektrické energie je nejčastěji využíván Stirlingův motor s volným pístem pro svou vysokou spolehlivost a jednoduchost. Zdroj tepla rozpohybuje tento motor a zároveň může ohřívat vodu a tepelný výměník. CHP jednotka tedy dokáže efektivně vytápět budovu, vyrábět elektrickou energii a ohřívat vodu. Obrázek 12 zobrazuje CHP jednotku od firmy Helec Ltd.(11)

Obrázek 12 CHP jednotka firmy Helec Ltd

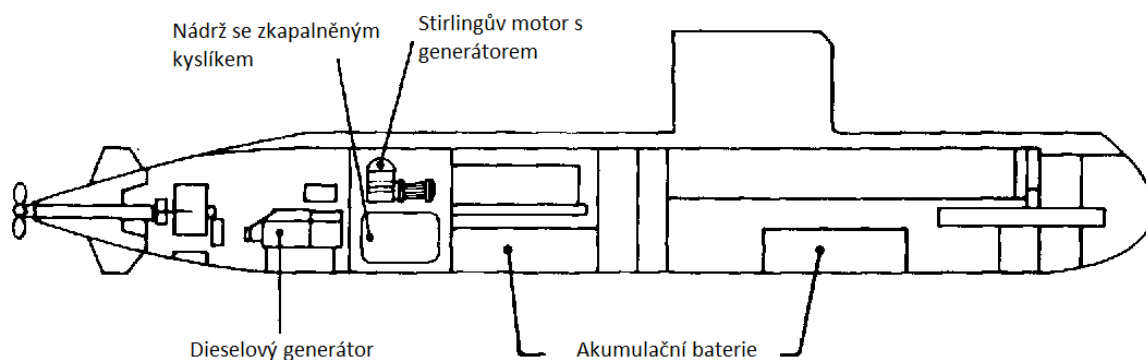


Zdroj: www.helec.co.uk

3.7.4. Využití u ponorek

Implementace Stirlingova motoru, jako pohonné jednotky ponorky přináší mnoho výhod oproti standardním ponorkám s dieselovým, či nukleárním pohonem. Dieselový spalovací motor pro provoz potřebuje přívod kyslíku, jež je v ponorce zajištěn v podobě doplňitelných nádrží. Pro provoz ponorky je tedy potřeba tyto nádoby po vyčerpání doplnit a vynořit se se strojem nad hladinu. Ponorka s nukleárním reaktorem může dosáhnout doby ponoru v řádu měsíců. Tento pohon ale vyžaduje neustále chlazení a využívá výkonných vodních pump, které mohou způsobit zvýšené vibrace. Aplikace Stirlingova motoru by umožnila dlouhý, kontinuální ponor bez nutnosti přísunu kyslíku a snížení vibrací na minimum. Dosažitelný výkon je ale oproti ostatním řešením podstatně nižší, proto je výhodné využít Stirlingův motor v kombinaci s jmenovanými řešeními, jak jej zobrazuje Obrázek 13. V praxi bylo toto řešení využito v ponorkách Švédského královského námořnictva a společností Comex z Francie. Jednalo se o modul s označením V4-275R vyvinutý firmou Kockums. Systém pro švédské námořnictvo byl úspěšně testován od roku 1985. Francouzská firma Comex vyrobila ponorku SAGA, která využívá pro pohon 2 Stirlingovy moduly, každý o výkonu 100 kW. Ponorka dokáže setrvat pod hladinou až na 14 dní.(12)(13)

Obrázek 13 Ponorka s Diesel-Stirlingovou hybridní jednotkou



Zdroj: www.journals.sagepub.com

3.7.5. Solární generátor

Využití slunečního záření, jako zdroje tepla pro výrobu elektrické energie za pomoci Stirlingova motoru je ekologická varianta solárních panelů. V roce 1987 patentoval pan Meijer Stirlingův motor s parabolickým koncentrátorem, který je pro zachycení a přeměrování slunečního záření nejefektivnější z dosud vynalezených řešení. První elektrárna využívající této technologie byla postavena v roce 2010 v USA. V současné době je vývoj zaměřen na zdokonalení parabolických koncentrátorů. Modelový solární generátor zobrazuje Obrázek 14.(14)

Obrázek 14 Solární generátor v jižní Kalifornii



Zdroj: www.stirlingengines.org.uk

3.8. Hybridní automobily

Jedná se o typ automobilů, který využívá ke svému pohonu více zdrojů energie a propojuje jejich benefity pro lepší ekonomiku jízdy. V drtivé většině jsou využívány kombinace spalovacího a elektrického motoru. Tato kombinace využívá výhod spalovacího motoru, jež jsou vysoký výstupní výkon, dlouhý dojezd a možnost okamžitého prodloužení dojezdu doplněním nádrže. Snížená efektivita spalovacího motoru vychází z jeho reálného využití, které bývá rozdílné a více dynamické, než využití teoretické, pro které byl motor navrhnout. Dalším aspektem snížení efektivity jsou tepelné ztráty. Pohon elektromotory ve spojení s bateriemi je efektivní s nulovým lokálním znečištěním prostředí. Dojezd je však nižší, než u motorů spalovacích. Hybridní pohon tedy umožňuje snížit spotřebu paliva a emise oxidu uhličitého při zachování jízdních vlastností. Hybridní automobil zpravidla využívá dva a více zdrojů výkonu. Je ovšem prokázáno, že více než dva zdroje výkonu již nejsou výhodné. Vyrůstá tím sofistikovanost a cena automobilu, aniž by bylo dosaženo významnějších výsledků. Hybridní automobily lze rozdělit do několika základních kategorií z hlediska využití a rozmístění pohonných technologií ve vozidle.(15)(16)

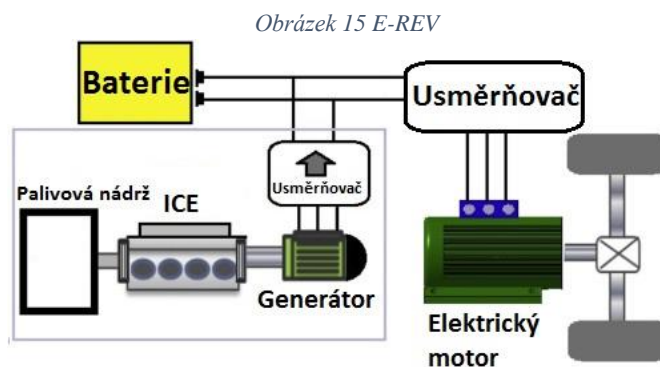
3.9. Dělení podle využití hybridního ústrojí

Hybridní automobily lze rozdělit podle míry využití spalovacího motoru, nebo palivových článků a elektrického motoru. Elektrický motor zde buď přímo pohání automobil, podílí se na pohonu s druhou pohonnou jednotkou, nebo je využit jako startér v systému start-stop spalovacího motoru.(15)

3.9.1. E-REV (Extended-Range Electric Vehicles)

V tomto případě je pohon zajištěn pouze elektrickým motorem. Baterie umožňuje dosah v rámci desítek kilometrů. V případě vyčerpání baterie je zapnut generátor, poháněný spalovacím motorem, který baterie dobije, popřípadě pohání přímo elektrický motor, čímž se zvýší dojezd. Výhodou tohoto způsobu může být efektivnější využití spalovacího motoru, jelikož nepohání přímo nápravu, ale generátor. Motor tedy může fungovat v otáčkách, při kterých nejméně spotřebovává palivo, zároveň dosahuje vysokého výkonu a neprodukuje vysoké množství škodlivin. Lze také využít různé typy tepelných motorů, například Stirlingův motor apod. Za další výhodu lze považovat absenci diferenciálu a převodů. Elektrický motor lze nainstalovat do kol automobilu, jelikož rozsah otáček těchto motorů to umožňuje. Nevýhodou tohoto řešení je snížená účinnost spalovacího motoru při

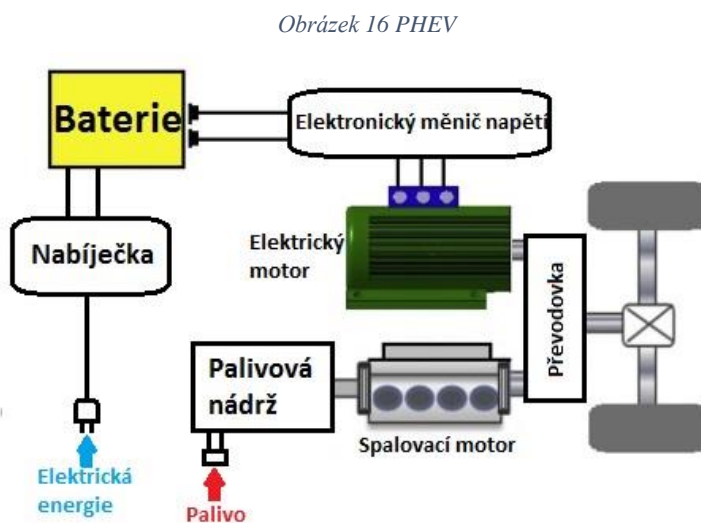
výrobě elektrické energie. Na elektrickém generátoru a při následném nabíjení baterií a využití při pohonu automobilu vznikají ztráty. Rozložení prvků vyobrazuje Obrázek 15.(15)



Zdroj: (38)

3.9.2. PHEV (Plug-In Hybrid Electric Vehicles)

Tento typ hybridního automobilu disponuje spalovacím a zároveň elektrickým motorem, společně s baterií, která umožňuje dojezd zpravidla v rámci desítek kilometrů. Po vyčerpání baterie dojde ke startu spalovacího motoru a řídicí jednotka automobilu uzpůsobí využití zdrojů, aby nedošlo k omezení dojezdu. Baterii lze také dobíjet externě. Výhodou je umožněný přímý pohon kol oběma motory. Nedochází tak ke ztrátám například při konverzi elektrické energie v generátoru, poháněném spalovacím motorem. Další výhodou je menší elektrický motor a generátor spalovacího motoru, což přináší úsporu hmotnosti. Nevýhodou může být velmi komplexní struktura pohonu. Schematické rozložení prvků zobrazuje Obrázek 16. (15)

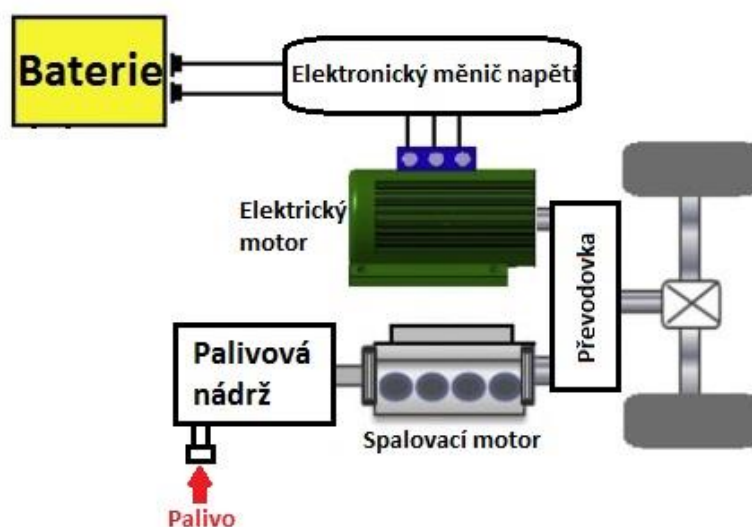


Zdroj: (38)

3.9.3. HEV (Hybrid Electric Vehicles)

U tohoto typu nelze dobít baterii externě. Zdrojem výkonu jsou spalovací a elektrický motor, jejichž míra použití je volena řídicí jednotkou automobilu. Z důvodu absence externí přípojky pro dobíjení, dochází k využití elektrické energie z rekuperace při brzdění a z elektrického generátoru, poháněného spalovacím motorem automobilu. Výhody i nevýhody jsou podobné, jako u hybridních automobilů PHEV. Tento typ schematicky vyobrazuje Obrázek 17. (15)

Obrázek 17 HEV



Zdroj: (38)

3.9.4. MHEV (Mild Hybrid Electric Vehicles)

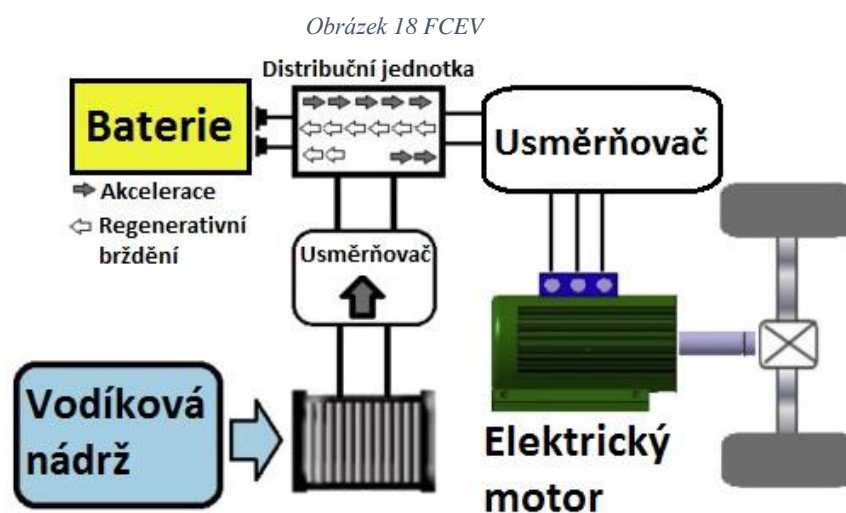
Typ Mild Hybrid nelze externě dobít, ani využívat k pohonu pouze elektrický pohon. K dobíjení baterie dochází například při brzdění a nainstalovaný elektromotor se poté podílí na akceleraci společně s motorem spalovacím. Elektromotor je v tomto typu pouze podpůrným prvkem.(15)

3.9.5. Micro Hybrid

Typ Micro Hybrid využívá k pohonu pouze spalovací motor. Využívá systému stop-start, který při zastavení vozidla tento motor vypne a při opětovném sešlápnutí plynového pedálu se znovu nastartuje. Dobíjení baterie probíhá pomocí rekuperace při brzdění a dobíjením z generátoru spalovacího motoru.(15)

3.9.6. FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles)

V praxi se také využívá vodíku pro pohon automobilů. Pro příklad Mercedes-Benz GLC F-CELL je automobil s elektrickým pohonem, jenž získává energii z akumulátoru, či vodíkových palivových článků. Akumulátor lze externě dobít a vodík se plní do určené nádrže. Z nádrže se vodík při provozu přečerpá do systému pohonu s palivovým článkem a dojde k vytvoření elektrické energie. Odpadem tohoto zařízení je voda a teplo, jedná se tedy o ekologickou variantu. Využití vodíkového pohonu zobrazuje Obrázek 18. (17)

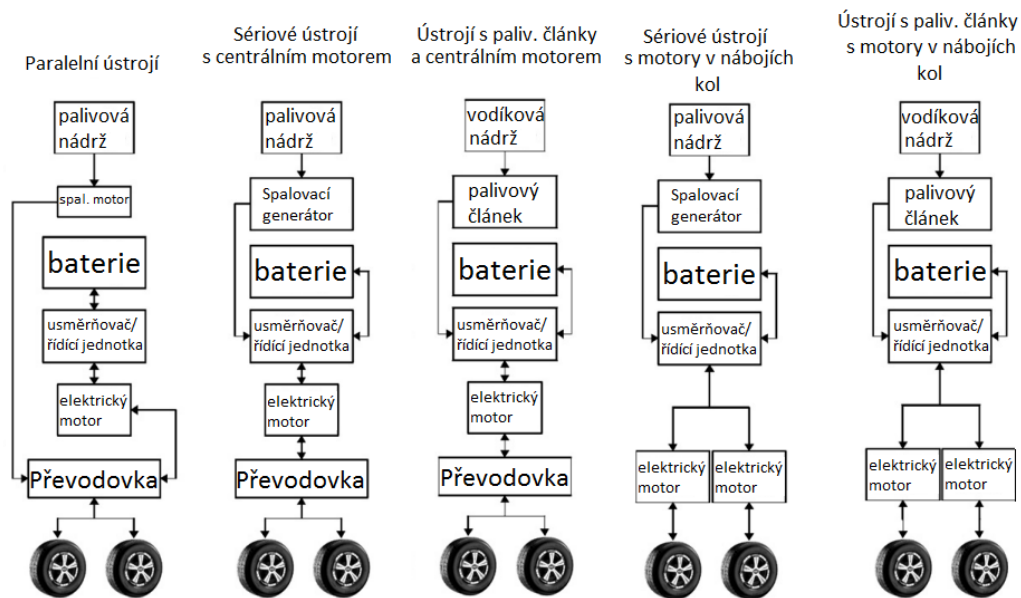


Zdroj: (17)

3.10. Dělení podle uspořádání hnacího ústrojí

Hybridní automobily můžeme rozdělit podle vnitřního uspořádání hnacího ústrojí. Všechny typy těchto automobilů využívají k pohonu kombinaci elektrického motoru a spalovacího motoru, či palivových článků. Jednotlivá ústrojí zobrazuje Obrázek 19.

Obrázek 19 typy ústrojí hybridních automobilů



Zdroj: (18)

3.10.1. Paralelní hnací ústrojí

Automobil využívá k pohonu spalovací a elektrický motor, přičemž oba jsou spojeny převodovkou a mohou pohánět hnanou nápravu. Baterie se dobíjí rekuperací, generátorem spalovacího motoru, či jinými alternativními způsoby dle typu vozidla.

3.10.2. Sériové hnací ústrojí s centrálním motorem

V tomto typu vozidla slouží spalovací motor pouze k výrobě elektrické energie skrze generátor. Ten poté dle režimu jízdy a pokynu řídicí jednotky může dobíjet baterii, či pohánět elektrický motor přímo. Elektrický motor zde pohání automobil skrze převodovku, která přenáší výkon na kola.

3.10.3. Hnací ústrojí s palivovými články a centrálním motorem

Elektrický motor zde skrze převod pohání přímo nápravu. Elektrická energie je dodávána buď pomocí baterie, nebo pomocí ústrojí s palivovými články, které může přímo pohánět elektrický motor, nebo dobíjet baterii.

3.10.4. Sériové hnací ústrojí s motory v nábojích kol

Elektrické motory jsou u tohoto typu umístěny přímo v nábojích kol automobilu. Dle modelu automobilu mohou pohánět přímo pár, popřípadě všechna kola. Spalovací motor zde

slouží ke generování elektrické energie a k dobíjení baterie, či přímému pohonu elektromotorů.

3.10.5. Hnací ústrojí s palivovými články a motory v nábojích kol

Elektrické motory jsou v tomto případě umístěny uvnitř kol vozidla a dodání elektrické energie je zajištěno baterií, či ústrojím s palivovými články, které mohou pohánět motory přímo, či dobíjet baterii.(18)

3.11. Účinnost hybridního ústrojí

Pro příklad v případě hybridu s paralelním ústrojím je přibližná ztráta energie na spalovacím motoru 63–72 %. Elektrický motor je schopen pracovat se ztrátou 5–20 % v závislosti na jízdních podmínkách a modelu automobilu. Baterie pracuje se ztrátou méně než 10 %. Při využití obou pohonných jednotek se tedy ztráta spalovacího motoru snižuje a systém dosahuje vyšší účinnosti. Účinnost konkrétního hybridního automobilu je ovlivněna typem spalovacího motoru, elektrického motoru, použitého typu baterie a dalšími aspekty. Při pohonu pouze elektrickým motorem lze dosáhnout účinnosti až 90 %.(19)(20)

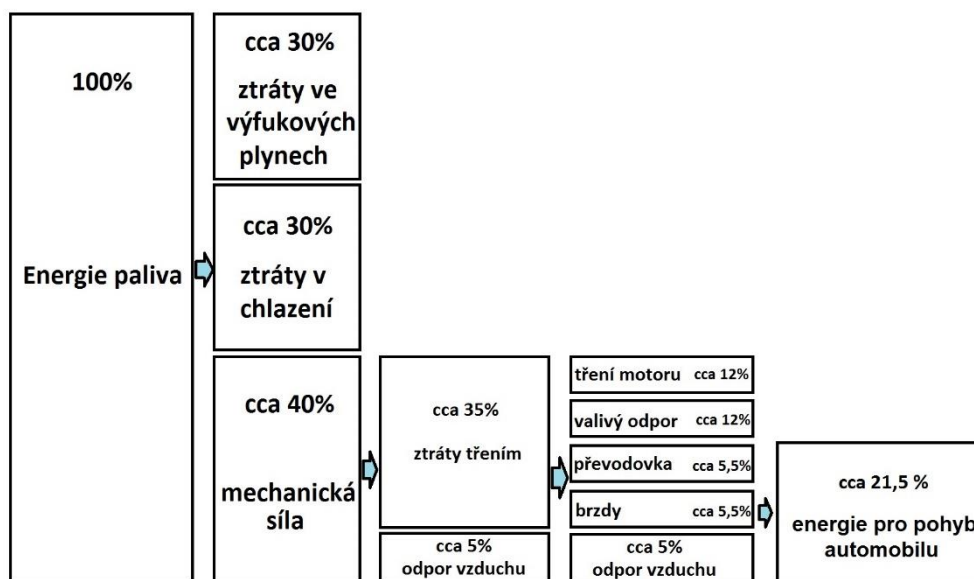
3.12. Využití zbytkového tepla spalovacího motoru

Spalovací motor je doposud základní hnací jednotkou osobních a užitkových automobilů. Moderní motory jsou efektivnější z důvodu mnohých vylepšení. U hybridních automobilů se využívá elektricky poháněné vodní pumpy pro chlazení, čímž lze lépe kontrolovat průtok a teplotu. U výfukových plynů dochází k recirkulaci, což umožňuje rychleji ohřát motor a dosáhnout vyšší účinnosti motoru. To se děje za použití EGR (Exhaust gas recirculation) ventilu, kterým lze přepouštět část výfukových plynů zpět do sání a zvyšovat účinnost motoru.(21)

Efektivita spalovacích motorů je i přes moderní vylepšení nízká oproti elektrickému motoru. Proto se v určitých případech využívá metoda WHR (waste heat recovery), která zahrnuje technologie, využívající odpadní teplo spalovacího motoru. Velký potenciál využití mají výfukové plyny motoru, protože 25–35 % energie paliva je ztraceno v této podobě a výfukové plyny dosahují vysokých teplot. Využito je v pokročilejších motorech přibližně 40 % energie paliva a jedná se v praxi o vysokou hodnotu, které dosahuje pouze určitá skupina spalovacích motorů. Další možností je využití teploty chladící kapaliny. Tou je ztraceno obdobné množství energie, jako u výfukových plynů, tedy přibližně 30 %. Využití

je vhodné v případě, kdy zařízení pro zachycení a přeměnu zbytkového tepla nedokáže pracovat s vysokými teplotami výfukových plynů, které mohou dosahovat maxima až 700 °C. Chladicí kapalina se při zahřátém motoru udržuje při teplotě 90 °C, což může být výhodou oproti výfukovým plynům, u kterých teplota kolísá v závislosti na otáčkách a namáhání motoru. Velikost odpadního tepla tedy závisí na konkrétním typu motoru, jeho namáhání a okolních podmínkách. Přibližné ztráty zobrazuje Obrázek 20.(22)(23)(24)(25)

Obrázek 20 Ztráty spalovacího motoru



Zdroj: (24)

4. Praktická část práce

Následující část se bude zabývat možným využitím vyprodukovaného tepla spalovacím motorem za pomoci Stirlingova motoru. Cílem práce je zjistit teoretické využití této konfigurace k prodloužení dojezdu hybridního automobilu. Stirlingův motor by za pomoci elektrického generátoru buď dobíjel baterii, nebo se přímo podílel na zásobování pohonného elektromotoru dle aktuální potřeby. Cílem této části je nalézt vhodnou lokaci pro umístění, vypočítat teoretickou hodnotu výkonu optimalizovaného Stirlingova motoru a zjistit možnou uchovanou kapacitu v baterii vozidla za danou časovou jednotku.

4.1. Volba typu Stirlingova motoru

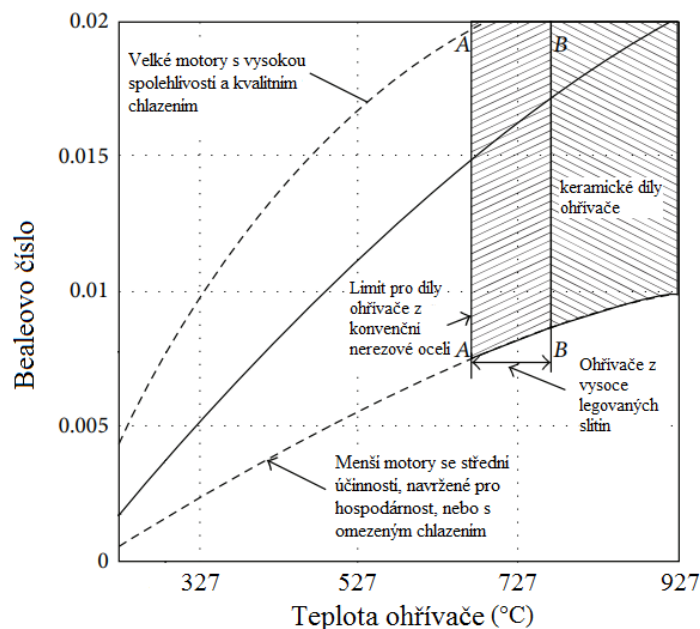
Pro využití tepla spalovacího motoru je potřeba vybrat vhodný typ Stirlingova motoru, který by byl schopen poskytnout vysokou účinnost a spolehlivost při zachování nízkých výrobních nákladů a přiměřené hmotnosti. K porovnání jednotlivých typů na základě výstupních hodnot lze použít Bealeovo číslo, pomocí kterého lze určit výstupní výkon, otáčky, či objem Stirlingova motoru bez zohlednění teploty. Významnější variantou je Westovo číslo, které oproti Bealeovu zahrnuje i rozdíl teplot.(8)

K porovnání základních typů motorů lze také použít technologii CFD (computational fluid dynamics). Motory lze tedy počítačově analyzovat z hlediska efektivity využití média, což je pro tuto práci vhodnější varianta kvůli absenci vstupních hodnot pro výpočet Bealeova, nebo Westova čísla. Všechny testované varianty, tedy alfa, beta a gamma byly porovnány za stejných podmínek, tedy při totožné teplotě, tlaku, objemu a se stejným pracovním médiem. V úvahu připadá i využití Stirlingova motoru s volným pístem, který je z hlediska konstrukce téměř totožný s typem beta, kromě absence klikového mechanismu. Teoretické výsledky účinnosti těchto typů jsou tedy téměř shodné. Nejméně vhodnou variantou z hlediska výstupního výkonu a účinnosti je typ alfa. Vyšších hodnot dosahují typy beta a gamma, přičemž gamma je neúčinnější. Zmíněné typy by při použití byly napojeny na elektrický generátor, pomocí kterého by docházelo k produkci elektrické energie. Nevýhodou při použití v automobilu je, že pro jejich spuštění je potřeba prvotní vnější síly. Musely by tedy disponovat vlastním startérem, což by zvýšilo hmotnost, cenu a celý systém by byl komplikovanější. Řešením je využít k rozpočívání generátor, který by v případě startu Stirlingova motoru na krátkou dobu sloužil jako elektrický motor. Alternativní variantou je typ s volným pístem. Ten se za působení tepla rozpočívá samovolně

a elektrická energie by byla generována elektromagnetickou indukcí. Cívka by tedy byla ovinuta kolem válce a pracovní píst, v tomto případě vyrobený z magnetického materiálu, by indukoval elektrický proud. Další výhodou tohoto řešení je absence klikového mechanismu. Jednotka pro přeměnu tepla by měla nižší hmotnost, výrobní náklady a pracovala by s vysokou spolehlivostí.(26)

Nejlepší volbou z hlediska váhy, jednoduchosti a efektivity je tedy buď typ Gamma, nebo typ s volným pístem. Použití konkrétního typu zařízení je závislé i na výběru automobilu, do kterého se zařízení nainstaluje. Výstupní výkon se kromě konstrukce odvíjí také od teploty odpadního tepla, dle kterého lze provést teoretický výpočet výstupního výkonu. Teplota také ovlivňuje použitý materiál zařízení a tím i jeho výslednou cenu. Limit materiálů ohřivače a závislost Bealeova čísla na teplotě vyobrazuje Obrázek 21. Lze tedy usoudit, že pokud nejvyšší pracovní teplota nepřesáhne přibližně 650 °C, je možné použít levnější materiál. Vliv na teoretickou účinnost má v neposlední řadě také míra chlazení, vhodné navržení konstrukce na základě vývoje a velikost celého zařízení. Pro teoretický výpočet byl tedy na základě vysoké účinnosti a možnosti připojit elektrický generátor ke klikové hřídeli vybrán typ Gamma.(24)

Obrázek 21 Závislost Bealeova čísla na teplotě



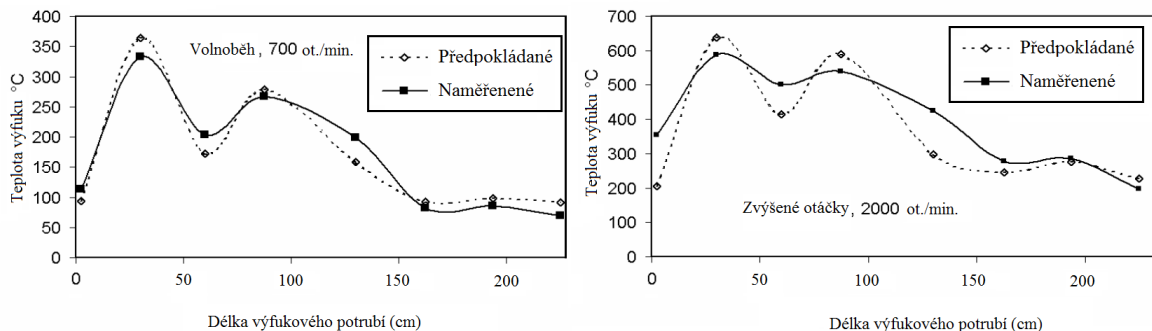
Zdroj: (24)

4.2. Volba umístění a dosahované teploty

Dle dostupných zdrojů bylo provedeno měření teplot výfukových plynů na čtyřválcovém benzínovém spalovacím motoru o objemu 1600 cm³ typu Honda D16Z6, používaného například v modelu Honda Civic. Výkon motoru je 93 kW a disponuje šestnácti ventily. Jedná se o motor podobných parametrů, který byl použit v hybridním automobilu Toyota Prius, proto jsou výsledky měření užitečné pro tuto práci při zjišťování dosažitelných teplot. Při měření bylo dosaženo maximální teploty 427 °C a nejnižší teplota senzoru činila 38 °C. Senzor byl umístěn ve svodovém potrubí. Při měření dosahoval motor konstantních 1500 ot.·min.⁻¹.(27)

V dalším měření byl testován motor z automobilu Toyota LiteACE o objemu 1300 cm³. Jedná se o benzínem poháněný, řadový, čtyřválcový motor. Je to kompaktní motor, jehož obdoba by mohla být vhodně využita v hybridním automobilu. Byla provedena dvě měření teplot výfukových plynů a výfukové soustavy pomocí osmi rovnoměrně rozmístěných tepelných senzorů, přičemž 4 senzory byly umístěny uvnitř soustavy a 4 vně soustavy. První měření bylo provedeno při konstantních otáčkách volnoběhu, konkrétně 700 ot.·min.⁻¹ a druhé při zvýšených otáčkách 2000 ot.·min.⁻¹. Výsledné hodnoty teplot, naměřené v celé výfukové soustavě zobrazuje Obrázek 22.

Obrázek 22 Teplota výfukového potrubí



Zdroj: (28)

Z naměřených hodnot lze usoudit, že nevhodnější lokace pro ohřivač Stirlingova motoru je do 50 cm délky výfukového potrubí od výstupu ze spalovacího motoru. Dosažené teploty zde při volnoběhu překračují 300 °C a při akceleraci se přibližují ke 600 °C, přičemž motor je schopen dosahovat vyšších otáček, například při rychlé jízdě na dálnici a v tomto případě se teplota může ještě zvýšit. Při výběru vhodného umístění je důležité dbát na použitý materiál ohřivače, který může v konečném důsledku ovlivnit cenu zařízení. Limitem pro použití konvenční nerezové oceli je teplota okolo 670 °C. Při vyšším tepelném namáhání je potřeba zvolit mezi vysoce legovanými slitinami a keramikou, což jsou používané

materiály. Keramický ohříváč se však používá v případech, kdy teplota přesahuje 770 °C. Dosáhnutí takových teplot je ale při vhodném navržení a umístění zařízení ve výfukovém potrubí vysoce nepravděpodobné.(24)(28)

Pro zajištění vhodné teploty chladiče lze použít několik typů chlazení. Prvním typem je vlastní chladicí soustava. Stirlingův motor by tedy disponoval vlastním chladícím okruhem, včetně chladiče. Výhodou tohoto řešení je dobrá regulovatelnost teploty. Nevýhodou je zvýšení váhy celého systému a vyšší komplikovanost. V konečném důsledku by došlo také ke zvýšení ceny zařízení. Další variantou je náporové chlazení vzduchem při pohybu automobilu. Výhodou tohoto řešení je nízká cena a jednoduchost. Nevýhodou může být omezený chladicí účinek. Automobil se nepohybuje konstantní rychlostí, ani prostředím s konstantní teplotou. V jistých podmínkách, nebo při vysoké prioritě zachování nízké ceny systému na úkor výkonnosti by se jednalo o ideální řešení. Dalším alternativním řešením je využít vhodně dimenzovaný chladicí oběh spalovacího motoru, který by zároveň chladil i Stirlingův motor. Výhodou je jednoduchost a dobrá chladicí schopnost při zachování menší ceny a váhy. Nevýhodou mohou být vyplývající speciální požadavky na chladicí systém, které zahrnují například instalaci výkonnějšího chladiče, použití jiného typu chladicí kapaliny, nebo výměna chladicího potrubí v teplotně vysoce namáhaných místech.

4.3. Teoretický výpočet Stirlingova motoru

Na základě měření a teoretických znalostí lze vypočítat energii, ztracenou ve formě výfukových plynů. Výpočtem hodnoty této energie lze zjistit maximální teoretický výkon Stirlingova motoru a přínos ve formě produkce elektrické energie, její využití a uchování v hybridním automobilu. Prvním krokem je určení objemového průtoku výfukových plynů podle vzorce pro čtyřtákní spalovací motor (5).

$$Q_v = L \cdot \frac{R}{60} \quad (5)$$

Kde:

Q_v – objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

L – zdvihový objem motoru [m^3]

R – otáčky motoru [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$]

Pro výpočet byl vybrán motor z automobilu Toyota LiteACE o objemu 0,0013 m^3 , z důvodu malého objemu a teoretické využitelnosti v hybridním automobilu. Výhodou je také provedené měření teploty výfuku a výfukových plynů v závislosti na otáčkách motoru.

Pro zjištění využitelnosti zařízení byly zvoleny otáčky motoru 2000 ot. \cdot min.⁻¹. Jedná se o rozsah otáček, využívaných pro standardní kontinuální jízdu po rovině. Hodnota objemového průtoku je 0,02167 m³ \cdot s⁻¹ viz. Příloha 1.(29)

Objemový průtok lze přepočítat na hmotnostní průtok pomocí vzorce (6).

$$m_a = \mu_\gamma \cdot \rho \cdot Q_V \quad (6)$$

Kde:

m_a – hmotnostní průtok vzduchu [kg \cdot s⁻¹]

μ_γ – objemová účinnost (dosahuje hodnot 0,8 až 0,9)

ρ – hustota vzduchu [kg \cdot (m³)⁻¹]

Hustota vzduchu ve výfukovém potrubí je ovlivněna vysokou teplotou. Závislost hustoty vzduchu a teploty zobrazuje Obrázek 23. Teplota ve výfukovém potrubí při zmíněných otáčkách dosahuje stabilní teploty až 500 °C. Při této teplotě je hustota vzduchu 0,4565 kg \cdot (m³)⁻¹. Hodnota objemové účinnosti byla zvolena 0,85, což je střední hodnota. Výsledný hmotnostní průtok je 0,00841 kg \cdot s⁻¹ viz. Příloha 1.(30)

Obrázek 23 Závislost hustoty vzduchu na teplotě

Teplota (°C)	Hustota ρ (kg/m ³)
90	0.9721
100	0.9461
200	0.7461
300	0.6159
400	0.5243
500	0.4565
1000	0.2772

Zdroj: (30)

Pro výpočet celkového hmotnostního průtoku výfukových plynů ve vzorci (8) je potřeba zjistit hmotnostní průtok paliva ze vzorce (7).

$$m_f = \frac{m_a}{\left(\frac{A}{F}\right)} \quad (7)$$

Kde:

m_f – hmotnostní průtok paliva [kg \cdot s⁻¹]

A/F – poměr vzduchu a paliva v plynu

U standardních benzinových motorů je poměr vzduchu a paliva 14,7:1. Hmotnostní průtok paliva tedy dosahuje 0,00057 kg \cdot s⁻¹ viz. Příloha 1. Celkový hmotnostní průtok se poté

zjistí součtem hmotnostního toku vzduchu a paliva. Výsledná hodnota součtu je $0,00898 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ viz. Příloha 1.(31)

$$m_e = m_a + m_f \quad (8)$$

Posledním krokem pro určení výkonu, ztraceného ve formě výfukových plynů je vzorec tepelných ztrát (9), který je závislý na hmotnostním průtoku výfukových plynů, rozdílu teplot výfukových plynů a nezapálené směsi.

$$Q = m_e \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (9)$$

Kde:

Q – ztráta tepla [$\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$]

c_p – měrná tepelná kapacita výfukových plynů [$\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]

ΔT – teplotní rozdíl

Měrná tepelná kapacita při teplotě výfukových plynů přibližně $500 \text{ }^\circ\text{C}$ dosahuje hodnoty $1,185 \text{ kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$. Za předpokladu venkovní teploty, dosahující $15 \text{ }^\circ\text{C}$ je rozdíl teplot $485 \text{ }^\circ\text{C}$. Po dosazení vychází ztráta tepla výfukových plynů $5,16 \text{ kJ}\cdot\text{s}^{-1}$, tuto hodnotu lze přímo převést na $5,16 \text{ kW}$ viz. Příloha 1.(32)

Účinnost Stirlingova motoru dosahuje až 45% . Tuto hodnotu tedy můžeme považovat za teoretickou maximální hodnotu, vyžadující adekvátní konstrukci a vývoj jednotky. Pokud Stirlingův motor při této účinnosti využije teplo výfukových plynů, dosáhne výkonu $2,32 \text{ kW}$.(24)

Vyprodukovaná energie Stirlingova motoru je zachycena alternátorem a přeměněna na elektrickou energii. Alternátory jsou schopny dosahovat vysoké účinnosti až 95% . Dle instrukcí řídicí jednotky automobilu bude energie přímo využita, nebo uchována v bateriích. Po započtení účinnosti alternátoru je výstupní výkon $2,2 \text{ kW}$.(33)

Dominantním typem baterií na trhu hybridních vozů je Ni-MH. Jedná se o zkratku, označující Nikl-metal hydridový akumulátor. Tento typ baterie dokáže uchovat a využít elektrickou energii s účinností více než 90% za předpokladu, že energie bude využita krátce po dobití. Čím déle je baterie nevyužívána, tím více se účinnost snižuje. Očekává se tedy, že automobil, do kterého je Stirlingův motor teoreticky umístěn je aktivně využíván. Pokud tedy baterie uchová elektrickou energii s účinností 90% a automobil se bude hodinu konstantně pohybovat při neměnných otáčkách motoru, dobije alternátor do baterie $1,98 \text{ kWh}$. Tuto hodnotu je nutno interpretovat s jistou rezervou kvůli teoretickým podmínkám, ve kterých je kalkulace provedena. Velikost dodané energie v reálném provozu

dosáhne nižších hodnot a bude se lišit kvůli proměnnému stylu a rychlosti jízdy, vnějším podmínkám, reálné účinnosti Stirlingova motoru a mnoha dalším parametrům. (20)

Jeden z parametrů může být elektrický motor hybridního automobilu. Pro příklad motor automobilu Toyota Prius z roku 2004 je schopen pracovat s účinností až 94 % v optimálních otáčkách. Nejnižší zaznamenaná účinnost je 86 % mezních otáčkách. Při provozu v optimálních podmínkách ale motor přesahuje 90% účinnost. Tím lze potvrdit vliv otáček na výslednou účinnost využití energie.(34)

4.4. Ekonomická analýza přínosů a ztrát

Následující část se bude zabývat zhodnocením aplikovaného řešení z hlediska rentability. Porovnány budou přibližné náklady na vývoj, implementaci a masovou produkci elektrické jednotky, využívající Stirlingův motor. Na straně druhé budou v porovnání přibližné výnosy a přidaná hodnota pro potenciální zákazníky. Jako relevantní projekt pro odhad ceny Stirlingova zařízení lze použít program firmy Sunpower Inc. Jedná se o elektrický generátor pro využití ve vesmíru, vyvinutý pro agenturu NASA. Cílem programu je zařízení s výkonem 1 kW, váhou nižší než 150 kg, účinností přibližně 40 % a životností více než 10 let kontinuálního provozu. Odhadovaná spotřebitelská cena by při produkci 100 000 jednotek činila přibližně 70 000 Kč. Lze odhadnout, že jednotka pro využití v hybridním automobilu by dosahovala obdobné, případně nižší ceny z důvodu aplikace levnějších materiálů a nižší výsledné hmotnosti. Do pořizovací ceny by se promítly náklady na vývoj, který je v případě dosažení vysoké efektivity nutný. Z provedených výpočtů je zřejmé, že za ideálních podmínek by kontinuální vícehodinový provoz postačoval k dostatečnému nabití baterie pro následné využití. Implementace tohoto řešení by tedy mohla být pro potenciální zájemce lukrativní volbou i při zahrnutí vyšší ceny zařízení v pořizovací ceně automobilu, oproti které je ale v porovnání relativně nízká.(35)

5. Závěr

Cílem práce bylo zhodnotit možné teoretické využití Stirlingova motoru, jako systému pro využití odpadního tepla spalovacího motoru v hybridním automobilu. Práce se skládala z teoretické rešerše a vlastní práce. V první části byla popsána stručná historie Stirlingova motoru a základní funkce. Následovalo vyjmenování základních typů motoru a možných výpočtů. Bylo popsáno praktické využití Stirlingova motoru. V další části byly popsány typy hybridních automobilů a rozděleny do jednotlivých kategorií. Dále bylo zhodnoceno odpadní teplo spalovacího motoru, jeho lokace a dosahovaná teplota.

Vlastní práce se zabývala výběrem vhodného typu Stirlingova motoru a jeho umístění pro maximální využití tepla. Z hlediska dosahovaných teplot byl vybrán možný použitý materiál pro tepelně namáhané části a byly zhodnoceny varianty chlazení chladné části zařízení. Pro určení teplot byl vybrán vhodný spalovací motor a konstantní otáčky motoru pro zjednodušení výpočtů.

Následující část vlastní práce se zabývala výpočty teoretického výkonu Stirlingova motoru na základě hodnoty energie, uvolněné výfukovými plyny a hodnotou energie, uchované v baterii automobilu. Za hodinu jízdy byla vypočtena hodnota energie, uložená v bateriích 1,98 kWh.

Tím bylo prokázáno, že pečlivě navržený a umístěný systém, využívající Stirlingův motor pro regeneraci tepla spalovacího motoru je schopen tuto energii efektivně měnit na energii elektrickou a tím snížit tepelné ztráty spalovacího motoru. Vypočtenou hodnotu je potřeba interpretovat s jistou rezervou kvůli ideálním podmínkám, zahrnutým do výpočtů. Reálné využití je tedy možné po průzkumu reálné účinnosti všech prvků a prostudování ztraceného tepla a výstupního výkonu zařízení při měnících se otáčkách spalovacího motoru.

Vyvinutý Stirlingův motor lze využít nejen v hybridních automobilech, ale například v autobusech, nákladních automobilech, užitkových vozech apod. V těchto případech může vytvořená elektrická energie sloužit k udržení teploty v interiéru vozu, přepravního prostoru při převozu nákladu, citlivého na teplotní změny, nebo pohánět jiný elektrický stroj v závislosti na daném použití.

Další část se zabývala ekonomickým zhodnocením navrženého řešení z hlediska pořizovací ceny a nákladů, spojených s implementací do automobilu při výrobě a přidané hodnoty z pohledu potenciálního zákazníka ve formě vyšší efektivity celého automobilu. Maximální odhadovaná cena pro pořízení referenčního zařízení činila 70 000 Kč při výrobě

100 000 jednotek a v porovnání s pořizovací cenou automobilu lze považovat dané řešení za lukrativní. V pořizovací ceně je nutné zohlednit náklady na vývoj, výrobu, montáž systému, použité materiály, lokaci výroby, ale také náklady spojené s dopravou do místa montáže, kdy některé tyto náklady jsou obtížně odhadnutelné a závisí na mnoha faktorech., které lze v případě této práce obtížně určit. Při vhodném navržení a implementování těchto parametrů se však neočekává významný negativní cenový dopad.

6. Seznam použitých zdrojů

1. Our technologies. *Sunpower Inc.* [online]. [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://www.sunpowerinc.com/>
2. DARLINGTON, Roy a Keith STRONG. *Stirling and Hot Air Engines*. 2005. ISBN 9781861266880
3. KARABULUT, Halit. *Dynamic analysis of a free piston Stirling engine working with closed and open thermodynamic cycles* [online]. 2011. ISBN 0442292732. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2010.12.006
4. FARRET, Felix A. a M. Godoy SIMÕES. *Integration of Alternative Sources of Energy* [online]. B.m.: JOHN WILEY & SONS, INC., 2006. ISBN 9780471712329. Dostupné z: doi:10.1002/0471755621
5. S.S., Narain a Vikas GUPTA. REVIEW OF WORKING OF STIRLING ENGINES. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*. 2016, 55.
6. NORMANI, Franco. A Review of Design of Stirling Engines. 2015, 18–26.
7. WALKER, G. a J.R. SENFT. *Free-Piston Stirling Engines* [online]. 1985. ISBN 9783540154952. Dostupné z: doi:10.1007/9783642825262
8. THOMBARE, D. G. a S. K. VERMA. Technological development in the Stirling cycle engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2008, 1–38. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2006.07.001
9. ARANDA, Denisse, Kevin LAMOTT a Stephen WOOD. *Solar Stirling Engine for Remote Power and Disaster Relief Final Report*. 2010.
10. NIGHTINGALE, Noel P. *Mod II Design Report* [online]. 1986. Dostupné z: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880002196_1988002196.pdf
11. ZHU, Shunmin, Guoyao YU, Kun LIANG, Wei DAI a Ercang LUO. A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology. *Applied Energy* [online]. 2021, 24. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2021.116965
12. MOHAMMED SHIBIL KURIKKAL MP. Air Independent Propulsion; Silent Submarines with Stirling Engines. *International Journal of Engineering Research and* [online]. 2016, 240–242. Dostupné z: doi:10.17577/ijertv5is090242
13. NILSSON, H. Submarine Power Systems Using the V4-275R Stirling Engine.

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power and Process Engineering* [online]. 1988, 257–267. Dostupné z: doi:10.1243/PIME_PROC_1988_202_036_02
14. SINGH, Uday Raj a Anil KUMAR. Review on solar Stirling engine: Development and performance. *Thermal Science and Engineering Progress* [online]. 2018, 244–256. ISSN 24519049. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsep.2018.08.016
 15. DENTON, Tom. *Electric and hybrid vehicles*. B.m.: Routledge, 2016. ISBN 9781315731612.
 16. EHSANI, Mehrdad, Yimin GAO, Stefano LONGO a Kambiz EBRAHIMI. *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*. B.m.: Taylor & Francis Group, 2018. ISBN 9781498761772.
 17. Mercedes Benz GLC F-CELL. *Mercedes-Benz.com* [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.com.sg/passengercars/mercedes-benz-cars/electromobility/f-cell/f-cell-intro.module.html>
 18. VAN VLIET, Oscar P.R., Thomas KRUIHOF, Wim C. TURKENBURG a André P.C. FAAIJ. Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in hybrid, fuel cell and regular cars. *Journal of Power Sources* [online]. 2010, 6570–6585. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2010.04.077
 19. BAI, Shengxi a Chunhua LIU. Overview of energy harvesting and emission reduction technologies in hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2021, 17. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2021.111188
 20. ZHU, Wenhua H., Ying ZHU, Zenda DAVIS a Bruce J. TATARCHUK. Energy efficiency and capacity retention of Ni-MH batteries for storage applications. *Applied Energy* [online]. 2013, 307–313. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.12.025
 21. INGEGNERIA, Facoltà, Prof ING, Paolo DI, Prof Vincent AYEL a Manno V. *Visualisation of Flow Patterns in a Flat Plate Pulsating Heat Pipe (FP-PHP) for Automotive Applications : Influence of Hydraulic Behaviour on Thermal Performances* [online]. B.m., 2014. b.n. Dostupné z: <https://etd.adm.unipi.it/t/etd-04272014-024120/>
 22. CATAPANO, Francesco, Carmela PEROZZIELLO a Bianca Maria VAGLIECO. Heat transfer of a Stirling engine for waste heat recovery application from internal

- combustion engines. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2021, 12. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117492
23. ROBERTS, Andrew, Richard BROOKS a Philip SHIPWAY. Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions. *Energy Conversion and Management* [online]. 2014, 327–350. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2014.03.002
 24. ALADAYLEH, Wail a Ali ALAHMER. Recovery of Exhaust Waste Heat for ICE Using the Beta Type Stirling Engine. *Journal of Energy* [online]. 2015, 1–8. ISSN 2356-735X. Dostupné z: doi:10.1155/2015/495418
 25. THOMBARE, Dhananjay a Colin COPELAND. Review on Exhaust Gas Heat Recovery for I . C . Engine Related papers Review on Exhaust Gas Heat Recovery for I . C . Engine. 2018.
 26. ABUELYAMEN, Ahmed a Rached BEN-MANSOUR. Energy efficiency comparison of Stirling engine types (α , β , and γ) using detailed CFD modeling. *International Journal of Thermal Sciences* [online]. 2018, 411–423. ISSN 12900729. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.026
 27. MOREY, Francis a Patrice SEERS. Comparison of cycle-by-cycle variation of measured exhaust-gas temperature and in-cylinder pressure measurements. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2010, 487–491. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2009.10.011
 28. EHSAN, M, Mz SHAH, M HASAN a Smr HASAN. Study of Temperature Profile in automotive exhaust systems for retrofitting catalytic converters. *Proceedings of the International ...* [online]. 2005, 28–30. Dostupné z: <http://buet.ac.bd/me/icme2013/icme2005/Proceedings/PDF/ICME05-TH-34.pdf>
 29. SINGH, Gurjap. Calculation of Exhaust Gas Flow Rate in an Internal Combustion Engine [online]. 2019. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.25594.13764
 30. BLEVINS, R. D. *Applied fluid dynamics handbook*. [online]. 1984. ISSN 08941777. Dostupné z: doi:10.1016/0894-1777(94)90012-4
 31. MELO QUEIROZ BARBOSA, Lucas, Lucas TANNÚS a Alexandre ZUQUETE GUARATO. Injection System Analysis for a Variable Compression Rotary-Piston Engine [online]. 2019. Dostupné z: doi:10.26678/abcm.cobem2019.cob2019-0899
 32. LIU, J. P., J. Q. FU, C. Q. REN, L. J. WANG, Z. X. XU a B. L. DENG. Comparison and analysis of engine exhaust gas energy recovery potential through various bottom

- cycles. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2013, 1219–1234. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.05.031
33. QIU, Songgang, Yuan GAO, Garrett RINKER a Koji YANAGA. Development of an advanced free-piston Stirling engine for micro combined heating and power application. *Applied Energy* [online]. 2019, 987–1000. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.11.036
34. V, Jivkov a Draganov D. The Kinetic Energy Storage as an Energy Buffer for Electric Vehicles. *Advances in Automobile Engineering* [online]. 2017. Dostupné z: doi:10.4172/2167-7670.1000165
35. COLLINS, Josh a John STANLEY. Sunpower Robust Stirling Convertor (SRSC) Dynamic Power Convertor Technology for Space Power Generation Technical Interchange Meeting. 2018.
36. GANAPATHY, Veanuga. Design and development of stirling engine car [online]. 2015. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.4646.0241
37. RANIERI, Salvatore, Gilberto A.O. PRADO a Brendan D. MACDONALD. Efficiency reduction in stirling engines resulting from sinusoidal motion. *Energies* [online]. 2018, 1–14. ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en11112887
38. FERNÁNDEZ, Roberto Álvarez, Fernando Beltrán CILLERUELO a Iñaki Villar MARTÍNEZ. A new approach to battery powered electric vehicles: A hydrogen fuel-cell-based range extender system. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2016, 4808–4819. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2016.01.035

7. Přílohy

Příloha 1 Výpočty

Objemový průtok vzduchu

Zdvihový objem motoru- $L = 0,0013 \text{ m}^3$

Otáčky motoru- $R = 2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

$$Q_V = L \cdot \frac{R}{60}$$

$$Q_V = 0,0013 \cdot \frac{2000}{60}$$

$$Q_V = 0,02167 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

hmotnostní průtok vzduchu

Objemová účinnost- $\mu_\gamma = 0,85$

Hustota vzduchu- $\rho = 0,4565 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$

$$m_a = \mu_\gamma \cdot \rho \cdot Q_V$$

$$m_a = 0,85 \cdot 0,4565 \cdot 0,02167$$

$$m_a = 0,00841 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

hmotnostní průtok paliva

Poměr vzduchu a paliva- $A:F = 14,7:1$

$$m_f = \frac{m_a}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

$$m_f = \frac{0,00841}{14,7}$$

$$m_f = 0,00057 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

hmotnostní tok vzduchu a paliva

$$m_e = m_a + m_f$$

$$m_e = 0,00841 + 0,00057$$

$$m_e = 0,00898 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tepelné ztráty výfukových plynů

Měrná tepelná kapacita výfukových plynů-

$$c_p = 1,185 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$$

Teplotní rozdíl plynu- $\Delta T = 485 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q = m_e \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$Q = 0,00898 \cdot 1,185 \cdot 485$$

$$Q = 5,16 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výstupní výkon Stirlingova motoru

Účinnost Stirlingova motoru- $\eta_s = 0,45$

$$P_s = \eta_s \cdot Q$$

$$P_s = 0,45 \cdot 5,16$$

$$P_s = 2,32 \text{ kW}$$

Výstupní výkon alternátoru

Účinnost alternátoru- $\eta_a = 0,95$

$$P_a = \eta_a \cdot P_s$$

$$P_a = 0,95 \cdot 2,32$$

$$P_a = 2,2 \text{ kW}$$

Uložená energie v baterii

Čas- $t = 1 \text{ hodina}$

Účinnost baterie- $\eta_b = 0,9$

$$E = P_a \cdot t \cdot \eta_b$$

$$E = 2,2 \cdot 1 \cdot 0,9$$

$$E = 1,98 \text{ kWh}$$