

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

STIRLINGŮV MOTOR

STIRLING ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef BLAHA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk KAPLAN, CSc.

ŘEDITEL ÚSTAVU

DIRECTOR OF INSTITUTE

prof. Ing. Václav PÍŠTĚK, DrSc.

DĚKAN

DEAN

doc. RNDr. Miroslav DOUPOVEC, CSc.

REKTOR

RECTOR

prof. Ing. Karel RAIS, CSc., MBA

BRNO 2008

Oficiální zadání DP

Oficiální zadání DP

LICENČNÍ SMLOUVA

Bc. Josef Blaha,

bytem: **Sídliště 351, 672 01 Moravský Krumlov**

narozen: **7. 2. 1981, ve Znojmě**

(dále jen autor)

a

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 602 00 Brno

IČO 00 216 305

(dále jen nabyvatel)

jehož jménem na základě písemného pověření děkanem fakulty jedná

Prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc., ředitel Ústavu automobilního a dopravního inženýrství

uzavírají za následujících podmínek ohledně užití a šíření:

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ bakalářské práce
- ☒ diplomové práce
- ☐ disertační práce
- ☐ habilitační práce
- ☐ jiné práce, jejíž druh je specifikován jako:

s názvem

Stirlingův motor

jejímž vedoucím/školitelem je

doc. Ing. Zdeněk KAPLAN, CSc.

obhájené dne

3. 11. 2008

na ústavu

Ústav automobilního a dopravního inženýrství,

kterou odevzdal nabyvateli ve formě 2 tiskových rozmnoženin práce (dále jen „dílo“)

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo podle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor tímto poskytuje nabyvateli oprávnění (tj. licenci) k výkonu práva dílo nevýdělečně užit a šířit půjčováním rozmnoženin díla, které odevzdal nabyvateli, třetím osobám k jejich dočasné potřebě a užitím díla pro potřebu nabyvatele (zejména jako studijní a výukový i výzkumný materiál využívaný pracovníky a studenty v rámci plnění úkolů Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a studia na ní, jako materiál pro propagaci FSI VUT v Brně aj.).

2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí (s ohledem na utajení v něm obsažených informací) se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti:
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy .
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.
5. Nabyvatel je oprávněn udělovat podlicence a poskytovat rozmnoženiny díla, které autor odevzdal nabyvateli, jiným osobám v rámci meziknihovní výpůjční služby v České republice i v zahraničí k účelu půjčování rozmnoženin díla těmito osobami dalším osobám k jejich dočasné potřebě. Nabyvatel je oprávněn dílo při užití spojit s jinými díly i zařadit dílo do díla souborného. Nabyvatel je oprávněn postoupit tuto licenci třetí osobě.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
3. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.
4. Smluvní strany se dohodly, že autor licenci poskytuje nabyvateli bezúplatně.
5. Vztahy mezi stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem a občanským zákoníkem, příp. dalšími právními předpisy. Na nakládání s rozmnoženinami díla se vztahují právní předpisy:
 - zákon ČNR č. 97/1974 Sb., o archivnictví, ve znění novely ze dne 29.4.1992 č. 343/1992 Sb.,
 - zákon č. 257/2001 Sb., knihovní zákon, v souladu s opatřením MŠMT ČR ze dne 24. 3. 1993, č.j. 13527/93-33 o poskytování veřejných informačních služeb,
 - § 22 odst.1, písm. c) zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách.

Nesouhlasím s poskytnutím licence

V Brně dne **15. 10. 2008**

V Brně dne **15. 10. 2008**

.....
nabyvatel

.....
autor

Anotace

Tato diplomová práce pojednává o Stirlingově cyklu a jeho studiu různými přístupy. Je zde nastíněn výpočet pomocí Schmidty teorie a poukázány odlišnosti ideálního a reálného cyklu. Na základě mé předchozího rešerše poskytuje podrobný přehled o metodách dnes používaných k simulaci jak samotného Stirlingova cyklu, tak celého motoru. Pozornost je věnována i současnému využití tohoto stroje, který není širší veřejnosti příliš známý.

Klíčová slova

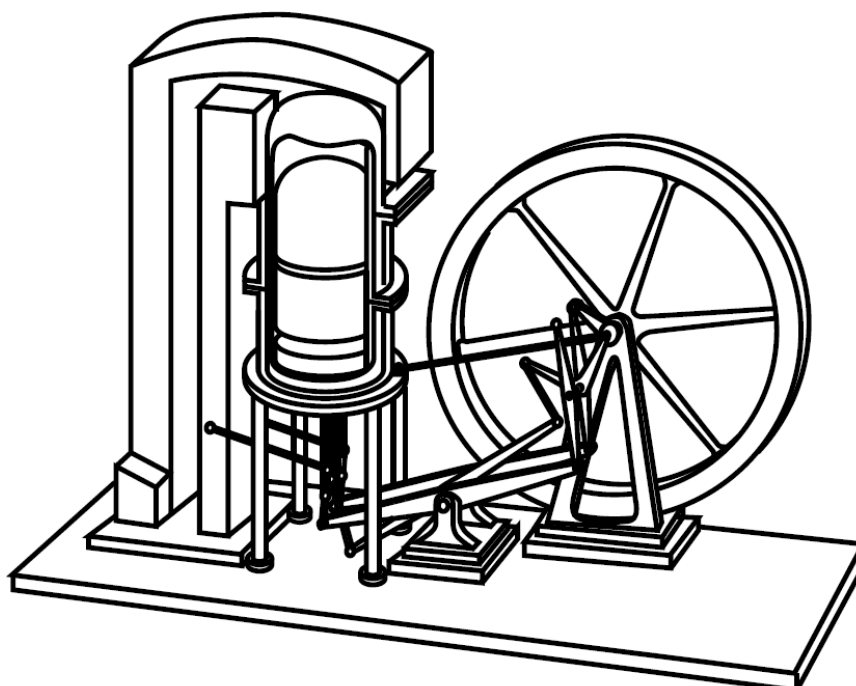
Stirlingův motor, Schmidtova teorie, modelování Stirlingova cyklu

Annotation

This dissertation discusses Stirling's cycle and its contribution using different approaches. There are calculation of Schmidt's theory and distinctiveness between ideal and real cycle described. Based on my previous research, this work provides a detailed summary of different methods which are used to stimulate Stirling's cycles as well as the motor as a whole. Attention is particularly dedicated to current utilization of this machine which is not broadly known within general public.

Key words

Stirling engine, Schmidt theory, simulation of Stirling cycle



Bibliografická citace této diplomové práce

BLAHA, Josef. *Stirlingův motor*. [s.l.], 2008. 80 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk KAPLAN, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, dle pokynů vedoucího diplomové práce. Všechny podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 15. října 2008

Josef Blaha

Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Zdeňku KAPLANOVI, CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytl při jejím zpracování .

V Brně dne 15. října 2008

Josef Blaha

OBSAH

OBSAH	x
SEZNAM OBRÁZKŮ	xi
1 ÚVOD	- 12 -
2 HISTORIE	- 13 -
3 STIRLINGŮV CYKLUS	- 19 -
3.1 Ideální Stirlingův cyklus	- 19 -
3.1.1 Jednotlivé modifikace Stirlingova motoru	- 21 -
3.1.2 Termická účinnost γ – modifikace ideálního Stirlingova cyklu	- 24 -
3.2 Reálný Stirlingův cyklus	- 26 -
3.3 Regenerátor	- 28 -
4 SCHMIDTOVA TEORIE	- 31 -
4.1 Schmidtova analýza	- 31 -
4.1.1 Předpoklady Schmidtovy teorie	- 31 -
4.1.2 Samotná analýza	- 32 -
4.1.3 Využití analýzy u γ modifikace nízkoteplotního Stirlingova motoru	- 34 -
5 ADIABATICKÁ ANALÝZA CYKLU	- 40 -
6 PŘENOS TEPLA U STIRLINGOVA MOTORU	- 47 -
6.1 Matematický model s tepelnými ztrátami konvekci	- 48 -
6.2 Relace vyjadřující tepelné toky modelu	- 49 -
7 MODELOVÁNÍ STIRLINGOVA MOTORU	- 52 -
7.1 Analýzy nultého řádu, Bealeovo číslo	- 53 -
7.2 Analýzy prvního řádu, izotermický děj	- 53 -
7.3 Analýzy druhého řádu, adiabatický děj	- 54 -
7.3.1 Ztráty přenosem tepla	- 54 -
7.3.2 Ztráty výkonu prouděním	- 55 -
7.3.3 Berchowitzův dynamický a termodynamický uzavřený tvar	- 55 -
7.3.4 Martini-Weiss program	- 55 -
7.3.5 Altmanův software SNAPpro	- 55 -
7.3.6 Thomasův software PROSA	- 56 -
7.4 Analýzy třetího řádu	- 57 -
7.4.1 Základní metody výpočtu	- 58 -
7.4.2 Elementární diferenciální rovnice	- 58 -
7.4.3 Srovnání některých metod třetího řádu	- 62 -
7.5 Analýzy čtvrtého řádu, 2D a 3D CFD modelace	- 69 -
7.5.1 CFD modelování v NASA (CAST, CFD-ACE+)	- 69 -
7.5.2 3D CFD modelování ve Fluentu od Mahkamova	- 70 -
8 DNEŠNÍ A BUDOUCÍ VYUŽITÍ STIRLINGOVA STROJE	- 71 -
9 ZÁVĚR	- 76 -
10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 77 -

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1	Rev Dr Robert Stirling (1790-1878)	- 13 -
Obr. 2.2	Laigh Kirk v Kilmarnocku	- 14 -
Obr. 2.3	Stirlingův motor v anglickém patentu	- 15 -
Obr. 2.4	Stirlingova palma – historie a předpokládané budoucí rozšíření	- 16 -
Obr. 2.5	Stirlingův motor V4X35 v automobilu Ford Taunus	- 18 -
Obr. 3.1	Ideální p-v a T-s diagram Stirlingova motoru	- 19 -
Obr. 3.2	Schéma pracovního cyklu solárního Stirlingova motoru ⁷	- 20 -
Obr. 3.3	α – modifikace Stirlingova motoru	- 22 -
Obr. 3.4	β – modifikace Stirlingova motoru	- 23 -
Obr. 3.5	Termická účinnost γ – modifikace ideálního Stirlingova motoru	- 25 -
Obr. 3.6	Důsledky sinusového pohybu	- 26 -
Obr. 3.7	Reálný Stirlingův cyklus	- 28 -
Obr. 3.8	Rozložení teplot regenerátoru	- 29 -
Obr. 4.1	Znázornění průběhu objemů v časové ose při fázovém posunutí 90° ..	- 33 -
Obr. 4.2	Popis objemů	- 35 -
Obr. 4.3	Součet jednotlivých objemů	- 36 -
Obr. 6.1	Termické proudění energie u Stirlingova motoru	- 48 -
Obr. 7.1	Ideální adiabatický model ¹⁰	- 54 -
Obr. 7.2	Ukázka prostředí SNAPpro ¹⁰	- 56 -
Obr. 7.3	Ukázka prostředí PROSA	- 57 -
Obr. 8.1	mikro-KWK firmy SOLO	- 72 -
Obr. 8.2	Ponorka třídy Gotland firmy Kockums	- 72 -
Obr. 8.3	Stirlingův motor v projektu Dish Stirling	- 73 -
Obr. 8.4	Elektrárna v Mohavské poušti	- 74 -
Obr. 8.5	Senfův motor	- 75 -

1 ÚVOD

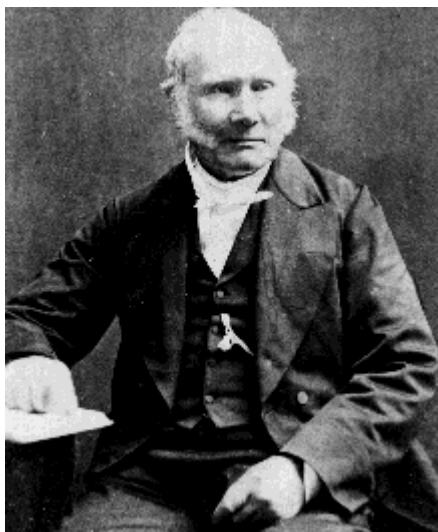
S rostoucím si uvědomováním vyčerpatelnosti našich zdrojů a ostatních ekologických dopadů dnešního světa se lidstvo pokouší objevovat nové technologie, ale přezkoumává i ty poněkud zapomenuté. Jedním z takových patentů je i Stirlingův motor, nazvaný podle svého objevitele již od roku 1817. V dané době, století páry, docházelo k častým nehodám parních strojů a evoluce si nejen proto žádala nových objevů.

Já sám jsem o motoru nikdy neslyšel a velmi mne zaujala přednáška na které jsem měl tu čest se s tímto strojem blíže seznámit. Zanedlouho jsem oslovil přednášejícího a zvolil si toto téma pro svoji diplomovou práci.

V ní bych se rád zaměřil na problematiku modelací Stirlingova motoru. Východiskem bude Schmidtova izotermická analýza, kterou se pokusím rozšířit a vymezit některé další aspekty Stirlingova cyklu a přiblížit se k reálnějšímu modelu. Mezi cíle této práce patří také sestavení přehledu metod užívaných pro výpočet a modelování Stirlingova motoru. Cíli odpovídá i členění kapitol této práce. Z důvodu lepšího uvedení do problematiky je nutné se poohlédnout do historie. Následuje obecné pojednání o Stirlingově cyklu se zaměřením na ideální a reálný oběh. V dalších kapitolách se zaměřuji na Schmidtovu teorii a předkládám postup výpočtů při ději adiabatickém. Jedna kapitola je věnována přenosu tepla vztaženého na Stirlingův motor. Poté jsem zařadil zevrubný popis dostupný modelů, které mohou být pro analýzu Stirlingova motoru použity. V poslední kapitole se nachází některé příklady použití Stirlingova motoru v dnešní, moderní době.

2 HISTORIE

Robert Stirling, Obr. 2.1, vynálezce Stirlingova motoru, se narodil v Gloag, Methvin, Perthshire 25. října, 1790 jako v pořadí třetí dítě rodiny s osmi dětmi. Jeho otec byl Patrick Stirling, syn Michaela Stirlinga proslaveného vynálezem mlátičky. Poprvé vysvětlil jednoduchost a eleganci dynamiky motoru roku 1850 profesor McQuorne Rankine. Přibližně o sto let později, se termín Stirlingův motor vžil díky Rolfu Meijerovi k tomu, aby označoval všechny typy rekuperačních plynových motorů s uzavřeným cyklem. Snad nejdůležitější vynález Roberta Stirlinga byl regenerátor nebo jeho vlastními slovy ekonomizér. Ten je dnes používán nejen u Stirlingových motorů ale i u mnoha jiných průmyslových procesů k tomu, aby spořil teplo a dělá tak průmysl efektivnější. Stirlingovy motory jsou unikátní tepelné motory, poněvadž jejich teoretická účinnost je téměř rovna jejich teoretické maximální



účinnosti, známé jako účinnost Carnotova cyklu. Stirlingovy motory jsou poháněné expanzí ohříváného plynu následovanou kompresí plynu ochlazeného. Stirlingův motor obsahuje pevné množství plynu, který je přenášen opakovaně mezi studeným koncem (často pokojová teplota) a horkým koncem (často zahřátý petrolejem nebo lihovým kahanem). Přemísťovací píst pohybuje plynem mezi dvěma konci a vlastní práci konající píst mění vnitřní objem v závislosti na tom, jak plyn expanduje a kontrahuje.

Obr. 2.1 Rev Dr Robert Stirling (1790-1878)

zdroj: <http://www.cse.iitk.ac.in/~amit/courses/371/abhishe/stirli.gif>

V současnosti jsou Stirlingovy motory studované v NASA pro použití k pohánění kosmických lodí sluneční energií.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stirlingův motor

Historie

Robert byl bystrý chlapec, od roku 1805 do roku 1808, navštěvoval Edinburgh University, kde studoval latinu, řečtinu, logiku, matematiku a právo. Jeho mladší bratr James později nastoupil na tuto univerzitu ve věku pouhých 14 let a stal se známým stavebním inženýrem.

Robert se zapsal jako student bohosloví na univerzitu v Glasgow v listopadu 1809 a dokončil pět semestrů. Byl vzorný student. Dne 15. listopadu 1814, se zapsal na univerzitu v Edinburghu opět jako student bohosloví, kde byl znovu jeho postoj příkladný. Roku 1815 byl Robert Stirling přezkoušen presbyterstvem v Dunbartonu, které ho po obvyklých prověrkách shledalo kompetentním k tomu, aby kázal slovo boží. Povolení je pro tento účel vydané 26. března 1816. Roku 1816 byl zmocněncem vévody z Portlandu přidělen do Laigh Kirk, Obr. 2.2, v Kilmarnock ke druhému církevnímu sboru. Presbytář Irvineu jednohlasně souhlasil s jeho vhodností a po vyhovujícím výkonu při různorodých zkouškách měl být ustanoven ministrem druhého církevního sboru v Laigh Kirk 19. září 1816.

Již v ranném věku byl Robert veden ke strojírenství jeho otcem Patrickem Stirlingem, který pomáhal svému vlastnímu otci Michaelovi v údržbě mlátiček. Vždy ukazoval horlivý zájem o mechaniku a zvláště ve zdrojích síly pro strojní zařízení. 27. září 1816 požádal o udělení patentu pro jeho nyní dobře známý motor. Jeho patent byl zapsán 20. ledna 1817¹. Pracoval na tomto motoru po několik let ještě před přestěhováním do Kilmarnocku a jeho výzkum pokračoval i tam.



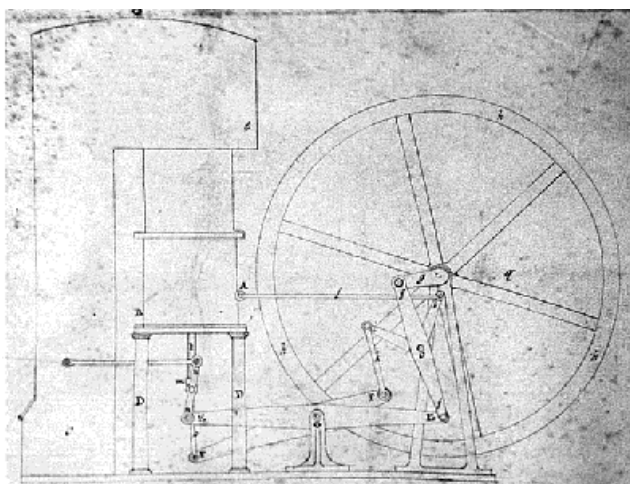
Obr. 2.2 Laigh Kirk v Kilmarnocku

zdroj: <http://www.ayrshirepaths.org.uk/images/kilmchurch.jpg>

¹ Robert Stirling : Significant Scots [online]. [2002] [cit. 3. 9. 2007]. Dostupný z WWW: < http://www.electricscotland.com/history/men/stirling_robert.htm >.

V Kilmarnocku se setkal s jistým Thomasem Mortonem, který měl podobný zájem o nové myšlenky. Thomas, syn výrobce cihel, se vyučil brusičem a kolářem a potom začal sám podnikat v tomto řemesle. Byl odpovědný za několik inovací, včetně vylepšeného tkalcovského stavu na koberce. Byl to on, kdo postavil v roce 1818 původní observatoř ve svém sídle.

Když se tito dva lidé dali dohromady, důstojný pán Robert Stirling domluvil s Mortonem nové prostory, kde jejich experimentování pokračovalo. Tyto pro ně byly speciálně postaveny. Stirling je užíval asi 20 let. Jeho experimenty zahrnovaly víc než jen Stirlingův



tepelný motor. Robert Stirling se stejně jako Morton zajímal také o astronomii.

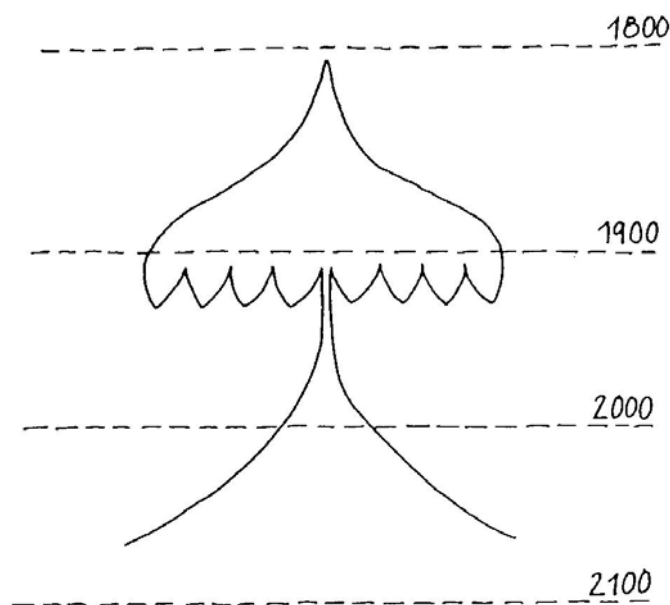
Pastor si zanedlouho osvojil od Mortona mnoho zkušeností s výrobou optických čoček. Jeho bratr James experimenty pozorně sledoval a velmi povzbuzoval další výzkum.

Obr. 2.3 Stirlingův motor v anglickém patentu

zdroj: <http://www.stirlingengines.org.uk/gifs/pioneer/18pat.gif>

Robert Stirling si 10. června 1819 vzal Jean Rankinovou, dceru Williama Rankina, obchodníka s vínem v Kilmarnocku, a Jeany McKayové. Narodila se v Kilmarnocku 27. června 1800. Její rodina byla nakloněna k inženýrství stejně jako Stirlingův otec. Měl sedm dětí. Jeho synové Patrick, William, Robert a James se věnovali drážnímu inženýrství, David následoval otce cestou víry. Dcery Jane a Agnes obětovaly svůj veškerý čas rodině.

Robert Stirling byl talentovaný řečník, který byl svými věřícími milován. Zemřel v Galstonu 6. června 1878. Zanechal dědictví ve svém motoru, který ještě neukázal svůj plný potenciál.



Obr. 2.4 Stirlingova palma – historie a předpokládané budoucí rozšíření

zdroj: <http://theorie.physik.uni-wuerzburg.de/~kinzel/statphys/stirling.pdf>

V průběhu 19. století a na počátku 20. století se objevovaly nejrůznější aplikace Stirlingových motorů. V roce 1818 postavil pastor Robert Stirling velký motor s výkonem 2 HP (1,49 kW), aby čerpal vodu z kamenolomu v Ayrshire ve Skotsku. Jiné pumpovaly vodu pro dobytek na vyprahlém západě Spojených států, na železnicích, v dolech a dodávaly vodu bezpočtu sídlům a statkům. Malé Stirlingovy motory poháněly zubařské vrtačky, domácí ventilátory, šicí stroje atp.. Velké typy byly používány k pohonu navijáků a v dalších průmyslových aplikacích. Používala se kapalná, pevná i plynná paliva. Mnohé z těchto motorů byly vyvinuty švédským vynálezcem Johnem Ericssonem. Uvědomoval si výhody Stirlingova motoru a svými konstrukcemi předběhl svou dobu. Postavil například Stirlingův motor poháněný pouze sluneční energií. Stirlingův motor byl v 19. století limitován hlavně metalurgickými možnostmi své doby. Právě z těchto důvodů a z důvodu vyšší hmotnosti byl nakonec vytlačen nově vyvinutými spalovacími motory a elektromotory. Stirlingův motor byl téměř zapomenut až do 20. let minulého století. Zájem o tento typ motoru znovu podnítil až v roce 1938 N.V. Philips z Nizozemí, když začal s vývojem malého Stirlingova motoru s výkonem 200W. Philips, výrobce dobře známých stolních radiopřijímačů, používal tento motor jako kompaktní tichý zdroj energie, který na rozdíl od zážehových motorů nepoužívá zapalovací svíčky a tudíž nevytváří interferenci radiových vln. Při hledání možností, jak

zvýšit měrný výkon a účinnost zjistil, že plyny s nižší molekulovou hmotností, jako helium či vodík, jsou výhodnější než vzduch. Rychlý rozvoj technologie výroby materiálů, který nastal v padesátých letech minulého století, otevřel nové perspektivy i pro Stirlingův motor. V roce 1968 švédská FFV Group vytvořila joint venture (společné podnikání) s dalšími švédskými společnostmi, aby prozkoumaly možnosti vývoje zdokonalené sériové verze moderního Stirlingova motoru. Tato nová joint venture dostala jméno United Stirling. K tomuto kroku přispěla velkým dílem hlavně blížící se ropná krize, která vyvolala snahu používat do motorových vozidel jiná paliva, než je benzín či nafta. Za použití licence N.V. Philips začala tato společnost s vývojem motoru o výkonu 200 HP (149 kW), určeného pro městské autobusy, terénní vozidla a ponorky. V průběhu let 1969-1970 Philips vyvinul pohonnou jednotku s rombickým mechanismem pro městský autobus. Motor byl čtyřválec se zdvihovým objemem 235 cm^3 na každý válec a při středním tlaku 22 MPa a 3000 min^{-1} dosahoval 200 HP (149 kW). Motor však při tak vysokém tlaku neskýtal předpoklad dosažení očekávané životnosti. United Stirling se proto rozhodl vyvinout svůj vlastní motor s označením 4-65. Tento motor dosahoval stejného výkonu jako motor Philips už při 15 MPa a otáčkách 1500 min^{-1} . Následovaly další verze společného vývoje Philips a United Stirling s cílem minimalizovat výrobní náklady. Podrobným výpočtem se nakonec ukázalo, že i v sérii 10 000 ks ročně bude cena stále 2,5 krát vyšší než stejně výkonný vznětový motor, a to z důvodu značné komplikovanosti motoru.

V 70. letech 20. století United Stirling intenzivně pracoval na vývoji pohonné jednotky pro osobní automobily². Po zkušenostech s problematickou výrobou motorů řady 4-615 se rozhodl pro tento účel použít konstrukci motoru Philips 4-65 s naklápěcí deskou. Tento motor prošel dlouhým vývojem, který byl směřován do použití v osobních automobilech. Jeden z následných typů V4X2 byl v roce 1974 zastavěn do osobního vozidla Ford Pinto s automatickou převodovkou a předveden představitelům společnosti Ford. Vůz přesvědčil komfortem a tichostí jízdy, avšak do výroby se nedostal. Vývoj dále pokračoval až do finálního typu V4X35, který byl v roce 1974 zastavěn do vozu Ford Taunus s manuální převodovkou!!! Tři vykřičníky proto, že největší slabinou Stirlingova motoru je právě rychlá

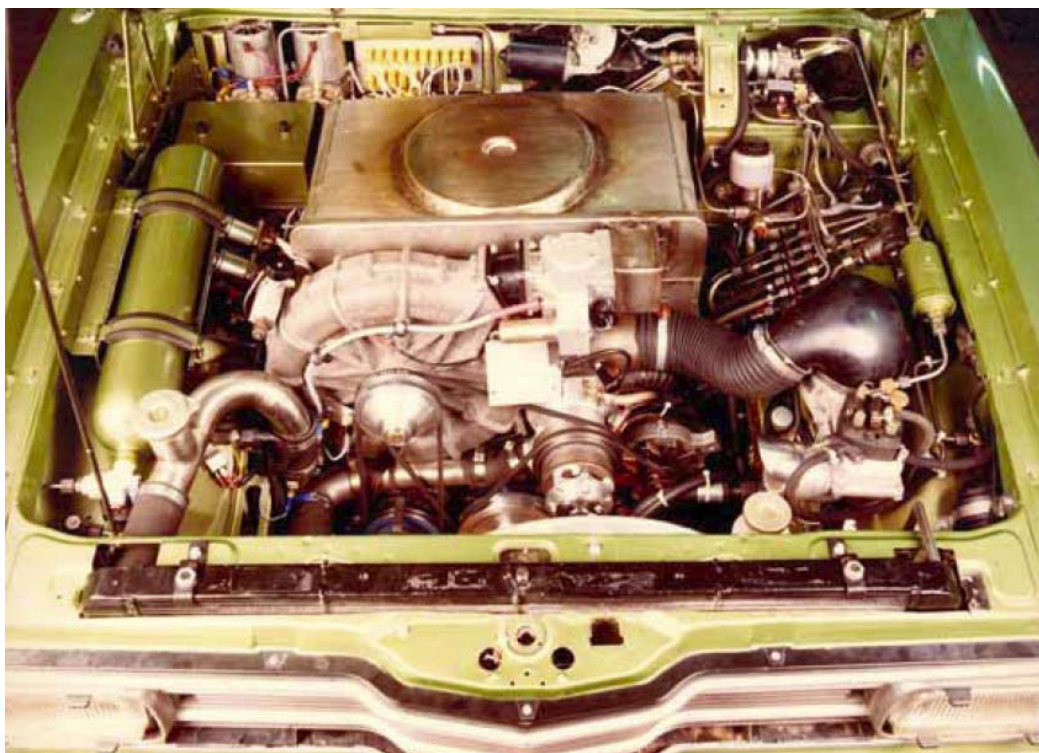
² LUNDHOLM, G. . < Gunnar.Lundholm@vok.lth.se > *The experimental V4X Stirling engine – a pioneering development*. [pdf dokument]. Lund - Sweden: Department of Heat & Power Engineering, Lund University, October, 2000 [cit. 3. 9. 2007]. Dostupný z: < http://www.vok.lth.se/~ce/Research/stirling/papers/ST_TA2_1.pdf >.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stirlingův motor

Historie

změna výkonu, kterou manuální převodovka vyžaduje mnohem více než automatická. Přes uspokojivé jízdní zkoušky v rozsahu 10 000 km a splnění veškerých požadavků na akceleraci i deceleraci (90% výkonu za 0,5 s) nebyla sériová výroba nikdy zahájena z důvodů ceny pohonné jednotky, kterou značně prodražil právě systém regulace výkonu³.



Obr. 2.5 Stirlingův motor V4X35 v automobilu Ford Taunus

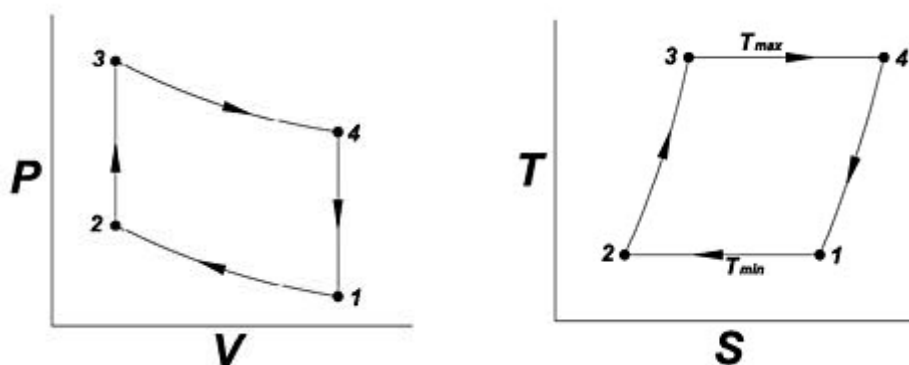
zdroj: http://www.vok.lth.se/~ce/Research/stirling/papers/ST_TA2_1.pdf

³ TEDOM. Historie Stirlingova motoru [online]. [2004] [cit. 3.9.2007]. Dostupný z WWW: < <http://www.stirling.cz/tedom-stirlinguv-motor-historie.html> >.

3 STIRLINGŮV CYKLUS

3.1 Ideální Stirlingův cyklus

Ideální Stirlingův cyklus se skládá ze dvou izoterm a dvou izochor. Obr. 3.1 ukazuje ideální cyklus Stirlingova motoru v p - v a T - s diagramu.



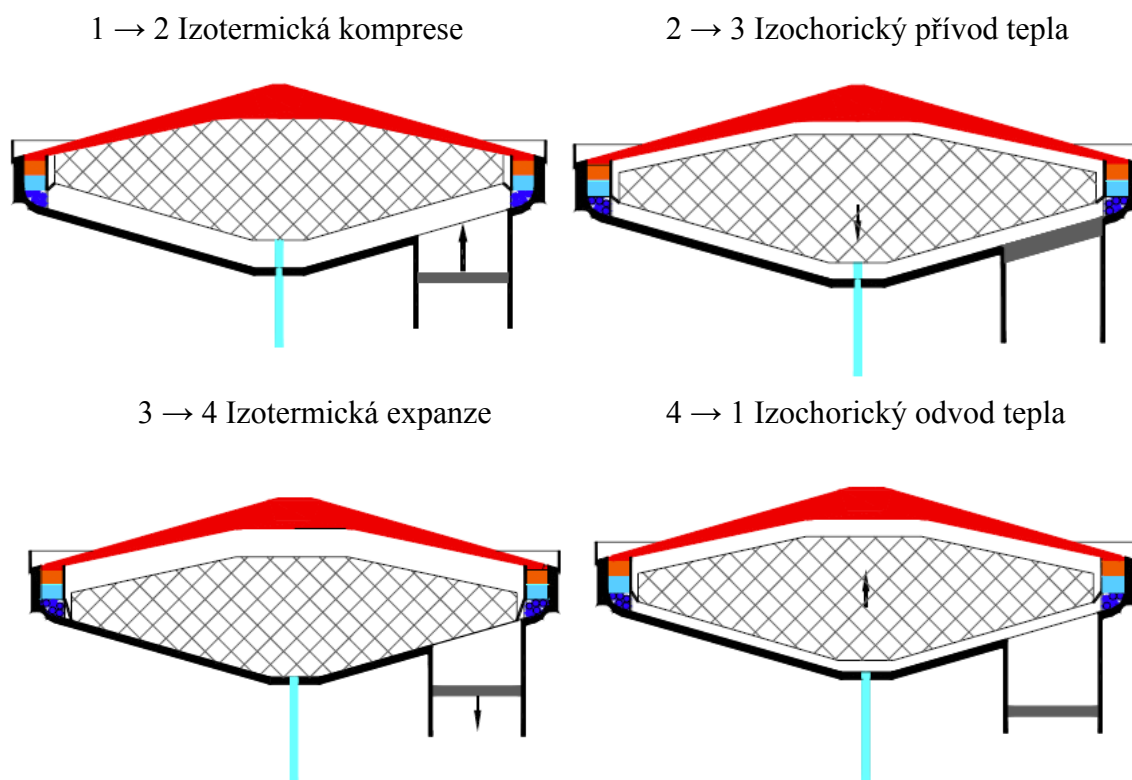
Obr. 3.1 Ideální p - v a T - s diagram Stirlingova motoru

zdroj: http://www.stirling.cz/images/obr_12.jpg , http://www.stirling.cz/images/obr_13.jpg

Stirlingův motor je horkovzdušný nebo obecně „horkoplynný“ motor pracující s vnějším přívodem tepla. To znamená, že zdroj tepla se nachází mimo jeho pracovní válec. Proto mohou být použity různé primární zdroje energie jako například uhlí, ropné frakce, biomasa, solární energie apod. Schematický motor na Obr. 3.2 je Stirlingův motor, přesněji γ modifikace Stirlingova motoru, který využívá například solární energii. Je zde zobrazen ideální způsob fungování tohoto motoru.

Cyklus je možné dělit do čtyř fází:

- 1 → 2 Izotermická komprese
- 2 → 3 Izochorický přívod tepla z regenerátoru
- 3 → 4 Izotermická expanze
- 4 → 1 Izochorický odvod tepla do regenerátoru



Obr. 3.2 Schéma pracovního cyklu solárního Stirlingova motoru

Izotermická komprese pracovního média se děje ve studeném prostoru Stirlingova motoru. Zatímco pracovní píst shromažďuje pracovní médium, setrvává výtlačný, tzv. přemísťovací píst, přímo pod pohlcovačem solární energie. Tímto se zmenšuje objem plynu, což samozřejmě doprovází nárůst jeho hustoty. Tlak pracovního plynu roste. Aby mohla zůstat teplota pracovního plynu konstantní, musí plyn teplo odevzdat.

Po izotermické kompresi následuje izochorický ohřev pracovního média. Pracovní píst zůstává zcela nahoře a přemísťovací píst se pohybuje směrem dolů. Objem v expanzi

komoře se zvětšuje přesně o tolik, o kolik se zmenšuje objem v kompresní komoře, ale celkový objem plynu zůstává nezměněn. Pracovní plyn přijímá teplo při průtoku regenerátorem.

Poté dochází k ohřevu a k izotermickému rozpínání pracovního plynu v horkém prostoru. Zatímco přemísťovací píst zůstává na spodní straně skříně, pohybuje se pracovní píst dolů, takže se objem pracovního plynu zvětšuje a současně ztrácí na hustotě. V tuto chvíli koná plyn práci na pracovním pístu. Současně musí být z důvodu zachování konstantní teploty pracovnímu plynu přiváděno teplo.

Na závěr dochází k izotermickému ochlazení. Pracovní píst zůstává dole a přemísťovací píst se pohybuje směrem nahoru. Přitom se teplo od pracovního plynu zachycuje na regenerátoru. Pracovní plyn dosáhne opět teploty chladného kompresního prostoru. Práce odevzdávaná pracovním plynem je větší než přivedená, takže motor může pracovat také jako hnací stroj.

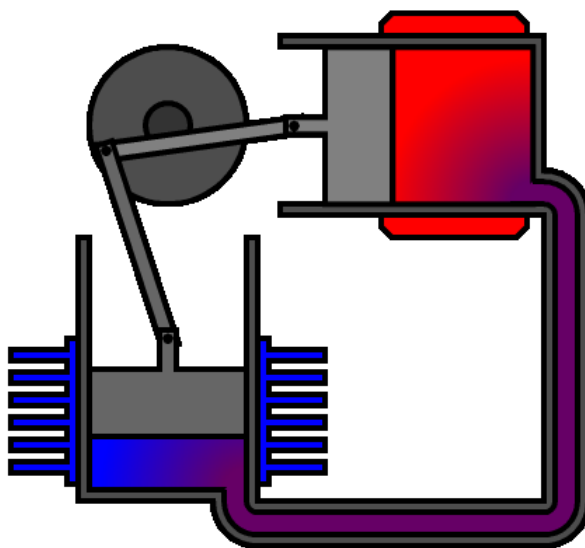
Termická účinnost ideálního Stirlingova cyklu je shodná jako účinnost Carnotova cyklu:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (3.1)$$

3.1.1 Jednotlivé modifikace Stirlingova motoru

3.1.1.1 α – modifikace

Tato modifikace motoru se skládá ze dvou pístů ve dvou oddělených válcích, jednoho horkého pístu a jednoho studeného pístu. Horký píst je umístěn ve válci, což je vlastně tepelný výměník a tento má vyšší teplotu, než studený píst. Tento typ motoru má velmi vysoký poměr výkon / objem motoru, ale musí řešit problémy s vysokou teplotou horkého konce a trvanlivostí těsnění.

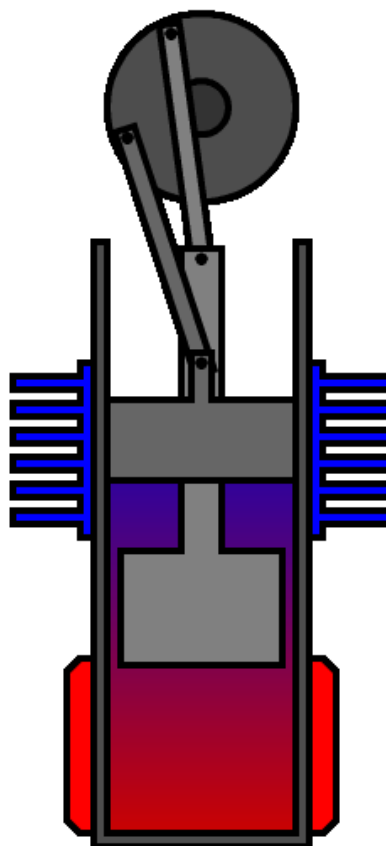


Obr. 3.3 α – modifikace Stirlingova motoru

zdroj: http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine

3.1.1.2 β – modifikace

Tato modifikace Stirlingova motoru má jeden pracovní píst, který je umístěn na stejném dřívku jako píst přemísťovací. Přemísťovací píst je neutěsněný a nepřijímá žádnou energii od expandujícího plynu, tento slouží pouze k přemístění pracovního plynu od horkého tepelného výměníku k výměníku chladnějšímu. Pokud je pracovní plyn nucen k pohybu do horkého konce, teplem expanduje a koná práci na pracovním pístu. Ke kompresi ve studeném konci dochází nejčastěji za pomoci setrvačníku. Stejně jako předchozí typ motoru, musí i tento řešit problémy s vysokou teplotou horkého konce a trvanlivostí těsnění.



Obr. 3.4 β – modifikace Stirlingova motoru

zdroj: http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine

3.1.1.3 γ – modifikace

Gama modifikace je prakticky stejná jako beta, pouze s tím že pracovní píst je umístěn v jiném válci než píst přemísťovací, ale oba zůstávají připojeny ke stejné hřídeli a setrvačníku. Tato konfigurace má nižší kompresní poměr, ale je mechanicky jednodušší.

3.1.2 Termická účinnost γ – modifikace ideálního Stirlingova cyklu

V této práci jsem se zaměřil hlavně na Stirlingův nízkoteplotní motor, přesněji γ – typ Stirlingova motoru. Jeho pracovní válec se obecně nachází na studené straně. Ve 3. fázi ideálního Stirlingova cyklu (při izotermické expanzi) nemůže teplota plynu v každém místě dosáhnout teploty horké strany, protože je v pracovním válci stále ještě plyn s nízkou teplotou chladné strany. U typického ideálního Stirlingova cyklu zůstává teplota plynu v této fázi konstantní a odpovídá teplotě horkého konce. Proto se bude termická účinnost $\eta_{t,\gamma}$

γ – modifikace ideálního Stirlingova cyklu a termická účinnost Carnotova cyklu odlišovat. Získaná práce u popsaného kruhového děje se vypočítá dle Obr. 3.1 jako:

$$W_o = \int_1^2 p dV + \int_3^4 p dV \quad (3.2)$$

současně $pV = mRT$,

Přivedené teplo definujeme:

$$Q_{in} = \int_3^4 p dV . \quad (3.3)$$

Tlak plynu při 3. fázi se vypočte jako:

$$p \left(\frac{V_{min}}{T_H} + \frac{V - V_{min}}{T_C} \right) = mR , \quad (3.4)$$

takže přivedená energie ve formě tepla a energie z cyklu získaná lze vypočítat následovně:

$$Q_{in} = \int_{V_{min}}^{V_{max}} \frac{mR}{\frac{V_{min}}{T_H} + \frac{V - V_{min}}{T_C}} dV = mRT_C \int_{V_{min}}^{V_{max}} \frac{dV}{V - V_{min} \frac{T_H - T_C}{T_H}} = mRT_C \ln \frac{\varepsilon - \eta_t}{1 - \eta_t} \quad (3.5)$$

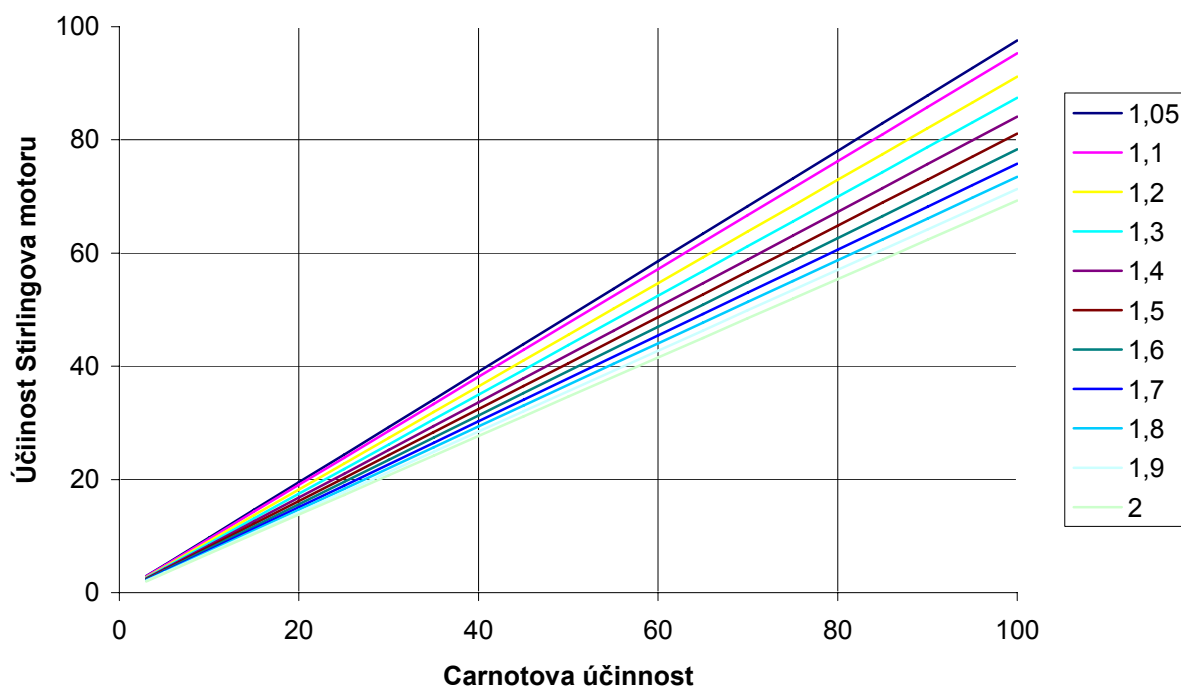
$$W_o = Q_{in} + \int_{V_{max}}^{V_{min}} \frac{mRT_C}{V} dV = mRT_C \ln \frac{\varepsilon - \eta_t}{1 - \eta_t} - mRT_C \ln \varepsilon \quad (3.6)$$

kde $\varepsilon = V_{max} / V_{min}$.

Termická účinnost $\eta_{t,\gamma}$ γ – modifikace ideálního Stirlingova cyklu se vypočítá jako podíl získané (odvedené) a přivedené energie:

$$\eta_{t,\gamma} = \frac{W_o}{Q_{in}} = 1 - \frac{\ln \varepsilon}{\ln \frac{\varepsilon - \eta_t}{1 - \eta_t}} \quad (3.7)$$

Obr. 3.5 znázorňuje návaznost termické účinnosti γ – modifikace ideálního Stirlingova motoru na termické účinnosti Carnotova cyklu při různých kompresních poměrech ε dle rovnice (3.7).



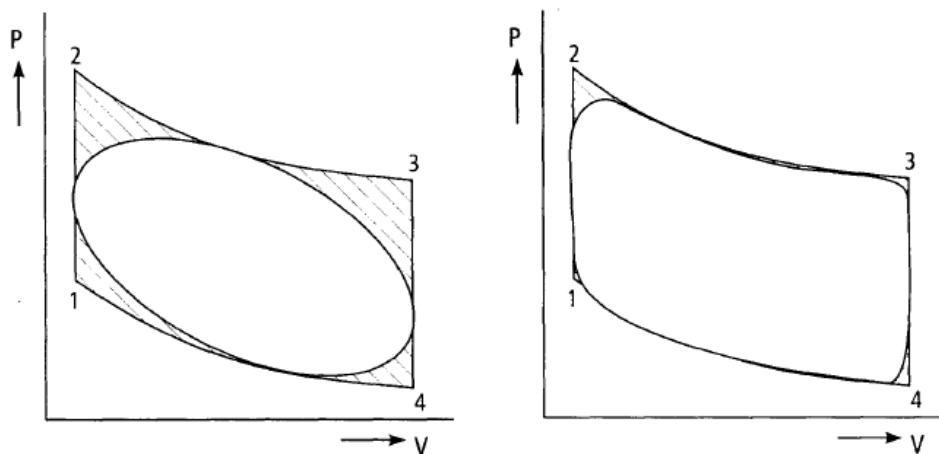
Obr. 3.5 Termická účinnost γ – modifikace ideálního Stirlingova motoru

3.2 Reálný Stirlingův cyklus

Ideální Stirlingův cyklus nebyl dodnes realizován. Uskutečněné cykly Stirlingových motorů se od ideálního cyklu odlišují. Reálný motor pracuje za následujících podmínek:

a) kontinuální pohyb

Sinusový, kontinuální pohyb pístu je za pomoci konvenčního klikového převodu velmi snadno realizovatelný. Umožňuje také relativně klidný chod motoru při vysokých otáčkách. Z toho důvodu je v praxi takto také kontinuální pohyb pístu realizován. Na Obr. 3.6 je zobrazen důsledek takového sinusového pohybu - vlevo sinusový pohyb, vpravo diskontinuální pohyb.



Obr. 3.6 Důsledky sinusového pohybu

b) účinnost regenerátoru

Samozřejmě je nemožné, aby regenerátor pracovní médium ohřál nebo ochladil aniž by došlo ke změně jeho vlastní teploty. Kromě toho vzniká také teplotní rozdíl mezi pracovním plynem a jednotlivými body v materiálu regenerátoru. To vše znamená, že u regenerátoru není možné dosáhnout stoprocentní účinnosti. V praxi je realizovatelná účinnost regenerátoru přibližně 95% .

c) mrtvý objem

Reálné Stirlingovy motory mají mrtvý objem, který se během jednoho cyklu nemění. Vzniká většinou díky přenašeči tepla (ohřívač, chladič) a regenerátoru. Kromě toho tu zůstává mezera v kompresním a expanzním prostoru motoru, která

nemůže být pístem překryta. Mrtvý objem snižuje kompresní poměr ε a tím poměr tlaků $p_{\max}/p_{\min}$. Dopadem toho je samozřejmě také úbytek výkonu motoru.

d) stavová změna neprobíhá izotermicky

Přestup tepla z pracovního plynu na chladicí médium nebo ze zdroje tepla na pracovní plyn probíhá ve výměnících tepla. Protože je pro přenos tepla k dispozici jen velmi krátká doba, dochází k expanzi, respektive kompresi, téměř adiabaticky, což výkon motoru rovněž snižuje.

e) úniky plynu

Kvůli únikům plynu v motoru se snižuje poměr tlaků $p_{\max}/p_{\min}$ a tím bohužel zároveň dochází k výraznému snížení výkonu motoru.

f) ztráty prouděním

Když pracovní plyn proudí výměníkem tepla a regenerátorem, vznikají ztráty prouděním. Tím je tlak plynu v každém pracovním prostoru rozdílný. Poněvadž má například solární Stirlingův motor velmi velký přemísťovací píst, vzniká u něj velký odpor.

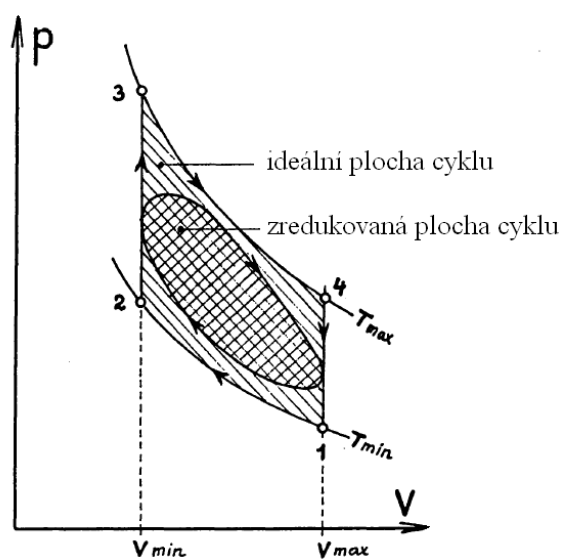
g) tepelné ztráty

V reálném motoru dochází k vedení tepla podél stěn válce a pístu, což vede k tepelným ztrátám.

h) tření

Stejně jako u všech ostatních strojů, dochází i u Stirlingova motoru k mechanickému tření.

Důsledek všech výše jmenovaných ztrát vůči ideálnímu procesu je zobrazen na Obr. 3.7 .

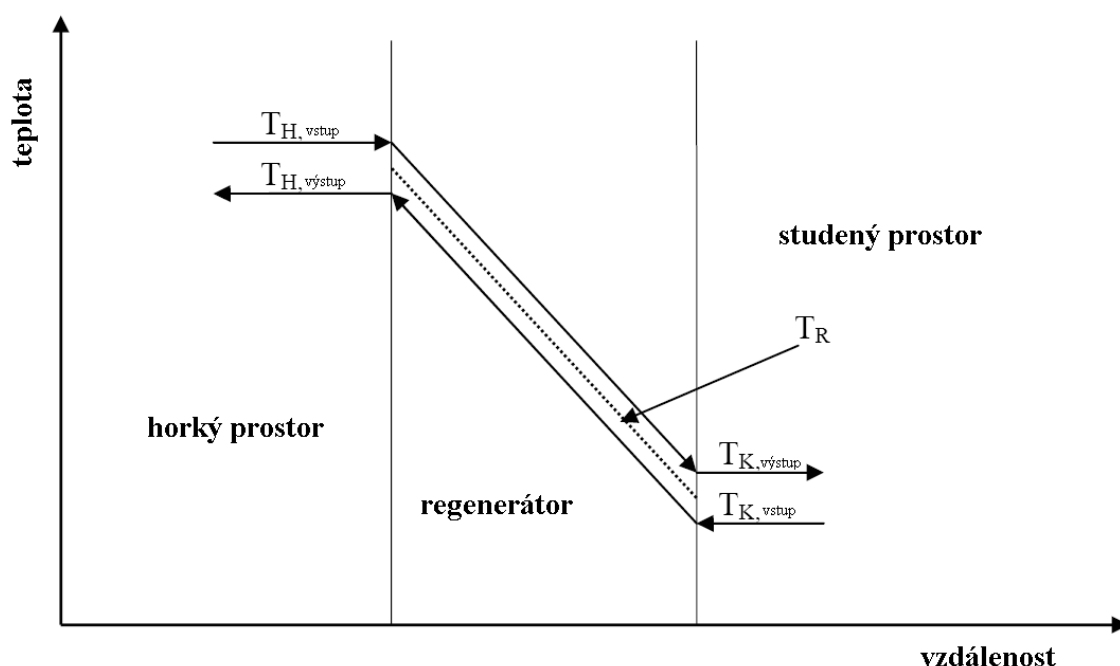
Obr. 3.7 Reálný Stirlingův cyklus⁴

3.3 Regenerátor

Regenerátor je akumulátor tepla, díky kterému může dojít ke zvýšení účinnosti Stirlingova motoru. Jeho úloha spočívá v tom, že během jednoho cyklu Stirlingova procesu odevzdává teplo z pracovního plynu materiálu regenerátoru a naopak. Bez regenerátoru by muselo být toto „dodatečné“ teplo přivedeno přes ohřívák a odváděno přes chladič.

Regenerátor musí zprostředkovávat výměnu velkého množství tepla. Přestože přijímá a odvádí teplo ve velmi krátkém časovém intervalu, mění se jeho funkční teplota jen nepatrně a může se tedy jednat o dlouhodobý regenerátor. Obr. 3.8 ukazuje rozložení teploty v prostorech motoru a regenerátoru.

⁴ KOLIN, Ivo. *Stirling motor, history – theory – practice*. 1st ed. Dubrovnik: Zagreb University Publications Ltd., 1991. 288 p.



Obr. 3.8 Rozložení teplot regenerátoru

Energetická bilance pro regenerátor uvádí tu skutečnost, že pokud nejsou přítomny žádné tepelné ztráty, tak vydané i přijaté teplo pracovního plynu regenerátoru je stejné. Tudíž se může pro tok plynu napsat:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p (T_{H,vstup} - T_{C,výstup}) = \dot{m}c_p (T_{H,výstup} - T_{C,vstup}) \quad (3.1)$$

Pro přenos tepla od pracovního plynu do regenerátoru a od regenerátoru na studený pracovní plyn platí:

$$\dot{Q}_R = \alpha S_R (T_{H,plyn} - T_R) = \alpha S_R (T_R - T_{C,plyn}) \quad (3.2)$$

Dle Hausena⁵ můžeme účinnost regenerátoru vypočítat následovně:

$$\eta^+ = \frac{NTU}{2 + NTU} \quad (3.3)$$

přičemž NTU je tzv. čistá přenosová jednotka vyjadřující účinnost tepelného výměníku. Jedná se o poměr tepla převedaného k teple pro výměnu dostupnému.

⁵ HAUSEN, H. *Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom*. 2. Neubearbeitete Auflage. Berlin: Springer – Verlag, 1976. 429 s. ISBN 3540075526.

Organ⁶ popsal účinnost regenerátoru takto:

$$\eta^+ = 1 - \frac{1 - e^{-NTU}}{2 + NTU} \quad (3.4)$$

$$\eta^+ = \frac{NTU - 1}{NTU} \quad (3.5)$$
$$NTU \gg 1$$

kde $NTU = \frac{\alpha S_R}{c_p \dot{m}}$

Dokonalý regenerátor by neměl žádný objem, žádné tlakové ztráty a měl by 100 % účinnost. Proto je vhodné při konstruování regenerátoru a výběru jeho materiálu zvážit následující požadavky:

- vysoká tepelná kapacita
- dobrý přechod tepla
- co největší plocha
- optimální profil matrice
- nízká tepelná vodivost podél směru toku
- malý hydraulický průřez
- nízké ztráty prouděním
- velmi malý "mrtvý objem" ve Stirlingově motoru

Pro nízkoteplotní Stirlingův motor je regenerátor obzvláště důležitý. Bez regenerátoru není schopen provozu.

⁶ ORGAN, Allan J. *The Regenerator and the Stirling Engine*. 1st edition. Great Britain : J. W. Arrowsmith Ltd., 1997. 623 s. ISBN 1860580106.

4 SCHMIDTOVA TEORIE

4.1 Schmidtova analýza

4.1.1 Předpoklady Schmidty teorie

Schmidtova teorie představuje matematickou analýzu Stirlingova motoru. Roku 1871 bylo profesorem Gustavem Schmidtem odvozeno analytické řešení pro cyklus Stirlingova motoru se sinusovitým pohybem pístu. Základem Schmidty teorie jsou následující hypotézy:

1. Pracovní plyn je ideální plyn.
2. Ve stroji nejsou žádné tlakové ztráty, tzn. že je kteroukoliv chvíli v každém místě stejný tlak.
3. Regenerátor je ideální a jeho účinnost je 100% .
4. Nevyskytují se zde žádné ztráty při přenosu tepla, tzn. že veškeré přiváděné teplo přijme plyn.
5. V každém místě motoru je teplota časově konstantní.
6. Teplota se při přechodu regenerátorem mění lineárně.
7. Objemy kompresního a expanzního prostoru se mění sinusově.
8. Množství uzavřeného plynu zůstává konstantní.
9. V motoru nevzniká žádné mechanické tření.

Téměř všechny hypotézy, které byly přijaty při odvození ideálního Stirlingova cyklu, byly u Schmidty teorie zachovány. Důležité je, že Schmidtova teorie sinového pohybu pístu a mrtvého objemu je pro některé typy strojů správná, ale pro většinu představuje ještě přijatelnou aproximaci. Proto je ještě dnes Schmidtova teorie využívána k dimenzování Stirlingových motorů.

4.1.2 Samotná analýza

Základním stavebním kamenem Schmidtovy teorie je α - modifikace Stirlingova motoru a výchozím bodem Schmidtovy teorie je termomechanická stavová rovnice ideálního plynu

$$pV = mRT \quad (4.1)$$

a konstantní množství pracovního plynu

$$m = \sum_i m_i = m_H + m_C + m_R + m_{MH} + m_{MC} \quad (4.2)$$

Následující veličiny jsou definovány takto:

T_H ... teplota plynu na horkém konci

T_C ... teplota plynu na studeném konci

T_R ... střední teplota plynu v regenerátoru

V_R ... objem plynu v regenerátoru

V_{MH} ... mrtvý objem na horké straně

V_{MC} ... mrtvý objem na studené straně

V_{HPoh} ... maximální proměnný objem expanzní komory

V_{CPoh} ... maximální proměnný objem kompresní komory

m ... úhrnné množství plynu obsaženého v motoru

R ... plynová konstanta pracovního média

α ... fázové posunutí

Podle rovnic (4.1) a (4.2) pak dostaneme:

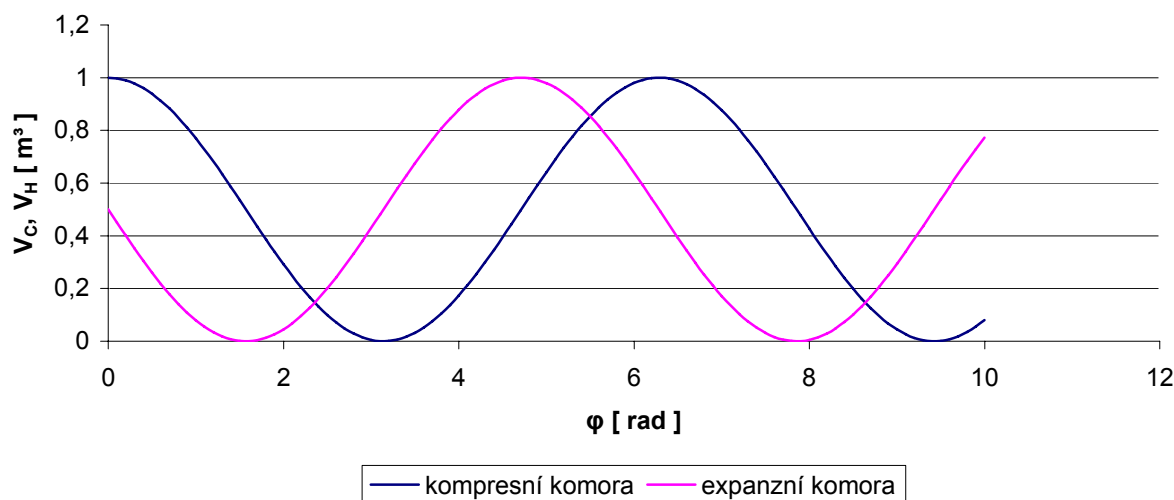
$$p = mR \left(\frac{V_H}{T_H} + \frac{V_C}{T_C} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_{MH}}{T_H} + \frac{V_{MC}}{T_C} \right)^{-1} \quad (4.3)$$

při

$$T_R = \frac{1}{2}(T_H + T_C) \text{ a}$$

$$V_C = V_{CPoh} (1 + \cos \varphi) / 2 \quad (4.4)$$

$$V_H = V_{HPoh} [1 + \cos(\varphi + \alpha)] / 2 \quad (4.5)$$



Obr. 4.1 Znáznornění průběhu objemů v časové ose při fázovém posunutí 90°

Odvození objemu v závislosti na natočení klikového hřídele φ má tvar

$$\frac{dV_C}{d\varphi} = -\frac{1}{2} V_{CPoh} \sin \varphi \quad (4.6)$$

$$\frac{dV_H}{d\varphi} = -\frac{1}{2} V_{HPoh} \sin(\varphi + \alpha) \quad (4.7)$$

Na tomto základě lze formulovat práce plynu W_H a W_C na horké a studené straně

$$W_H = \int_0^{2\pi} p dV_H = -\frac{1}{2} V_{HPoh} \int_0^{2\pi} p \sin(\varphi + \alpha) d\varphi \quad (4.8)$$

$$W_C = \int_0^{2\pi} p dV_C = -\frac{1}{2} V_{CPoh} \int_0^{2\pi} p \sin \varphi d\varphi \quad (4.9)$$

Vykonaná práce se u kruhového děje vypočte

$$W_o = W_H + W_C \quad (4.10)$$

Účinnost motoru definuje vztah

$$\eta = \frac{W_o}{W_H} \quad (4.11)$$

4.1.3 Využití analýzy u γ modifikace nízkoteplotního Stirlingova motoru

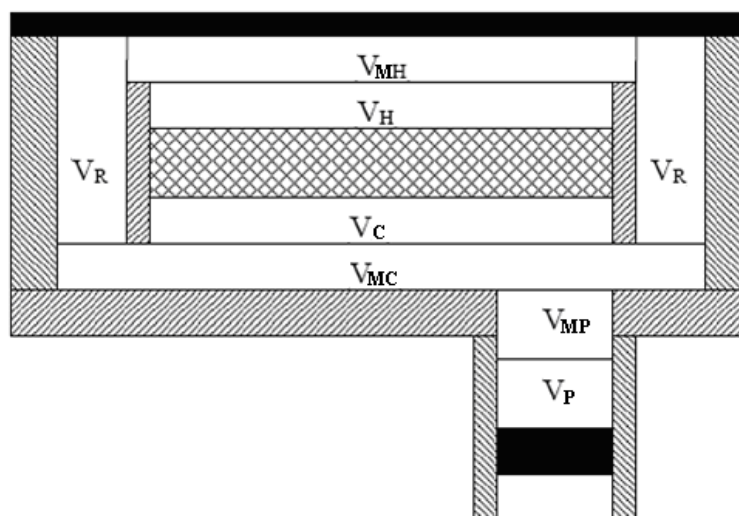
γ modifikaci nízkoteplotního Stirlingova motoru z hlediska rozdělení objemů znázorňuje Obr. 4.2 . V prostoru celého motoru je rozlišeno sedm objemů, z nichž čtyři jsou objemy škodné (mrtvé). Jejich objemy jsou popsány pomocí proměnných V_{MH} , V_{MC} , V_{MP} a V_R . Funkce objemů u horkého a studeného konce, jakož i v pracovním válci jsou brány následovně:

$$V_H = V_{PrPoh} [1 + \cos(\varphi + \alpha)]/2 \quad (4.12)$$

$$V_C = V_{PrPoh} [1 - \cos(\varphi + \alpha)]/2 \quad (4.13)$$

$$V_H = V_{PPPh} [1 + \cos \varphi]/2 \quad (4.14)$$

přičemž V_{PrPoh} je pohyblivý objem přemísťovacího pístu a V_{PPPh} je pohyblivý objem pracovního pístu. Změny objemů během jednoho cyklu jsou vyobrazeny na Obr. 4.3 .



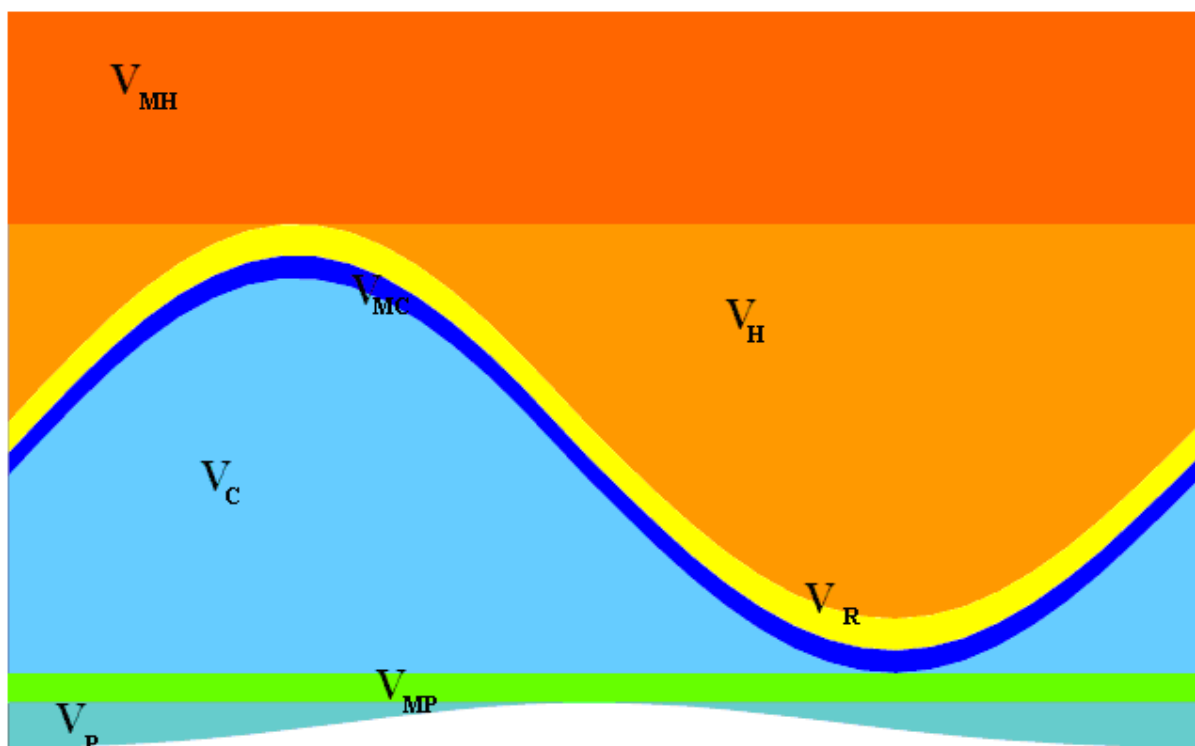
Obr. 4.2 Popis objemů

V_{MH} ... mrtvý prostor na horké straně, V_H ... pracovní prostor na horké straně, V_R ... prostor regenerátoru, V_C ... pracovní prostor na studené straně, V_{MC} ... mrtvý prostor na studené straně, V_{MP} ... mrtvý prostor pracovního pístu, V_P ... pracovní prostor pístu⁷

Neměnné množství pracovního plynu znamená, že

$$m = \sum_i m_i = m_H + m_C + m_P + m_R + m_{MH} + m_{MC} + m_{MP} \quad (4.15)$$

⁷ CHEN, Dejin. *Untersuchungen zur Optimierung eines solaren Niedertemperatur-Stirlingmotors*. [pdf dokument]. TU Dresden, Dresden, November, 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Dostupný z: < http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=974523542&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=974523542.pdf >.



Obr. 4.3 Součet jednotlivých objemů

V_{MH} ... mrtvý prostor na horké straně, V_H ... pracovní prostor na horké straně, V_R ... prostor regenerátoru, V_C ... pracovní prostor na studené straně, V_{MC} ... mrtvý prostor na studené straně, V_{MP} ... mrtvý prostor pracovního pístu, V_P ... pracovní prostor pístu

Z čehož následuje výpočet tlaku:

$$p = mR \left(\frac{V_H}{T_H} + \frac{V_C}{T_C} + \frac{V_P}{T_C} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_{MH}}{T_H} + \frac{V_{MC}}{T_C} + \frac{V_{MP}}{T_C} \right)^{-1} \quad (4.16)$$

kde $T_R = \frac{1}{2}(T_H + T_C)$

Dosazením rovnic (4.12) - (4.14) do (4.16) dostaneme

$$p = mR \left[k + \left(\frac{V_{PrPoh}}{2T_H} \cos \alpha - \frac{V_{PrPoh}}{2T_C} \cos \alpha + \frac{V_{PPPh}}{2T_C} \right) \cos \varphi + \left(\frac{V_{PrPoh}}{2T_C} - \frac{V_{PrPoh}}{2T_H} \right) \sin \alpha \sin \varphi \right]^{-1},$$

kde $k = \frac{V_{PrPoh}}{2T_H} + \frac{V_{PrPoh}}{2T_C} + \frac{V_{PPPh}}{2T_C} + \frac{2V_R}{T_H + T_C} + \frac{V_{MH}}{T_H} + \frac{V_{MC}}{T_C} + \frac{V_{MP}}{T_C}.$

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stirlingův motor Schmidtova teorie

Jestliže definujeme

$$A \sin \beta = \frac{V_{PřPoh}}{2} \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_H} \right) \sin \alpha , \quad (4.17)$$

$$A \cos \beta = \frac{V_{PPPh}}{2T_C} - \frac{V_{PřPoh}}{2} \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_H} \right) \cos \alpha , \quad (4.18)$$

$$A = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{V_{PřPoh}}{T_C} \right)^2 + \left(\frac{V_{PřPoh}}{T_H} - \frac{V_{PřPoh}}{T_C} \right)^2 - 2 \frac{V_{PPPh}}{T_C} \left(\frac{V_{PřPoh}}{T_C} - \frac{V_{PřPoh}}{T_H} \right) \cos \alpha \right]^{1/2} , \quad (4.19)$$

$$\tan \beta = \frac{\left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_H} \right) \sin \alpha}{\frac{V_{PPPh}}{V_{PřPoh} T_C} - \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_H} \right) \cos \alpha} , \quad (4.20)$$

lze definovat tlak jako

$$p = \frac{mR/k}{1 + k_1 \cos(\varphi - \beta)} \quad (4.21)$$

přičemž $k_1 = A/k$.

Rovnice (4.21) je kalorická přímka G. Schmidta.

Práce plynu na horké a studené straně a na pracovním pístu W_H , W_C a W_P dostaneme jako

$$W_H = \int_0^{2\pi} p dV_H = -\frac{1}{2} V_{PřPoh} \int_0^{2\pi} p \sin(\varphi + \alpha) d\varphi \quad (4.22)$$

$$W_C = \int_0^{2\pi} p dV_C = -\frac{1}{2} V_{PřPoh} \int_0^{2\pi} p \sin(\varphi + \alpha) d\varphi \quad (4.23)$$

$$W_P = \int_0^{2\pi} p dV_P = -\frac{1}{2} V_{PPPh} \int_0^{2\pi} p \sin \varphi d\varphi \quad (4.24)$$

Práci vykonanou během kruhového děje vypočteme následovně⁸:

$$W_o = W_H + W_C + W_P$$

$$W_o = W_P = V_{PPPoH} \frac{\pi m R}{k k_1} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - k_1^2}} - 1 \right) \sin \beta = V_{PPPoH} \frac{\pi m R}{A} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - k_1^2}} - 1 \right) \sin \beta \quad (4.25)$$

Výkon motoru lze tak vyjádřit:

$$P = W_o \frac{n}{60} = V_{PPPoH} \frac{n}{60} \cdot \frac{\pi m R}{A} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - k_1^2}} - 1 \right) \sin \beta . \quad (4.26)$$

Abychom mohli pomocí Schmidtovy teorie spočítat výkon motoru, je třeba určit teploty studeného a horkého konce T_C a T_H .

⁸ REKTORYS, Karel et al. *Přehled užití matematiky*. 6. vyd. Praha: Nakladatelství Prometheus, 1995. 1594 s. ISBN 80-85849-72-0.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stirlingův motor

Schmidtova teorie



5 ADIABATICKÁ ANALÝZA CYKLU

Tato metoda je hodně výjimečná mezi ostatními adiabatickými metodami, neboť nevyžaduje řešení diferenciálních rovnic. Postačuje pouze řešení algebraických rovnic, které jsou implicitní s neznámým tlakem v každém časovém kroku.

Obecně se celkové množství plynu v motoru v časovém přírůstku i dá vypočítat jako:

$$m = \frac{p(i) \cdot V_{ex}(i)}{R \cdot T_{ex}(i)} + \frac{p(i) \cdot V_{komp}(i)}{R \cdot T_{komp}(i)} + \frac{p(i) \cdot V_{ex} \cdot y}{R \cdot 2 \cdot E \cdot T} \quad (5.1)$$

kde první člen reprezentuje hmotu v expanzním prostoru, druhý člen hmotu v kompresním prostoru a třetí hmotu v mrtvém objemu:

$$m = m_{ex}(i) + m_{komp}(i) + p(i) \cdot k_1 \quad (5.2)$$

m	celková hmotnost plynu, g
$p(i)$	základní tlak plynu, MPa
$V_{ex}(i)$	objem expanzního prostoru, cm ³
R	plynová konstanta – např. pro He 2,0785 J/kgK
$T_{ex}(i)$	teplota plynu v expanzním prostoru, K
$V_{komp}(i)$	objem kompresního prostoru, cm ³
$T_{komp}(i)$	teplota plynu v kompresním prostoru, K
$V_{ex}(i)$	celkový zdvihový objem expanzního prostoru, cm ³
y	bezrozměrný, teplotně korigovaný opravný faktor
E	poměr absolutních teplot tepla přijatého a odevzdaného
T	teplota stěn válce a tepelného výměníku při expanzním prostoru, K
$m_{ex}(i)$	hmotnost plynu v expanzním prostoru, g

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Adiabatická analýza cyklu

$m_{komp}(i)$ hmotnost plynu v kompresním prostoru, g

k_1 konstanta, $k_1 = \frac{V_{ex} \cdot \gamma}{R \cdot 2 \cdot E \cdot T}$

v čase $i+1$ pak bude vypadat rovnice (5.1):

$$m = \frac{p(i+1) \cdot V_{ex}(i+1)}{R \cdot T_{ex}(i+1)} + \frac{p(i+1) \cdot V_{komp}(i+1)}{R \cdot T_{komp}(i+1)} + \frac{p(i+1) \cdot V_{ex} \cdot \gamma}{R \cdot 2 \cdot E \cdot T} \quad (5.3)$$

neboli

$$m = m_{ex}(i+1) + m_{komp}(i+1) + p(i+1) \cdot k_1 \quad (5.4)$$

V rovnicích (5.1) a (5.3) jsou známé veličiny m , $V_{ex}(i)$, $V_{ex}(i+1)$, R , $V_{komp}(i)$, $V_{komp}(i+1)$, V_{ex} , γ , E , T . Neznámé jsou $T_{ex}(i)$, $T_{komp}(i)$ a $p(i)$ v rovnici (5.1) a $T_{ex}(i+1)$, $T_{komp}(i+1)$ a $p(i+1)$ v rovnici (5.3). První krok je nutné začít přiřazením $T_{ex}(0) = T$ a $T_{komp}(0) = E \cdot T$ a pak je možné dopočítat $p(0)$ z rovnice (5.1). Rovnice (5.3) má stále tři neznámé. Pro nalezení řešení je třeba zákon adiabatické komprese:

$$\frac{T_{ex}(i+1)}{T_{ex}(i)} = \left[\frac{p(i+1)}{p(i)} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = PQ \quad (5.5)$$

a taktéž platí:

$$\frac{T_{komp}(i+1)}{T_{komp}(i)} = \left[\frac{p(i+1)}{p(i)} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = PQ \quad (5.6)$$

přičemž $\kappa = c_p / c_v$, což je Poissonova konstanta.

Rovnice (5.5) ani (5.6) nezávisí na hmotnosti plynu, která se může měnit. Pokud $m_{ex}(i+1) < m_{ex}(i)$, pak plyn právě opouští expanzní prostor. Na plyn v expanzním prostoru aplikujeme rovnici (5.5), takže po úpravě s použitím rovnic (5.3), (5.4) a (5.5) dostaneme:

$$m_{ex}(i+1) = \frac{p(i+1) \cdot V_{ex}(i+1)}{R \cdot T_{ex}(i+1) \cdot PQ} \quad (5.7)$$

I když může být hmotnost plynu úměrná objemu, nemusí toto tvrzení platit doslova. Například objem expanzního prostoru se může zmenšovat, takže předpokládáme že plyn by měl proudit směrem odtud. Ale pokud se zmenšuje celkový objem plynu vyšší rychlostí, může plyn proudit namísto ven i dovnitř.

Pokud $m_{ex}(i+1) > m_{ex}(i)$, plyn vstupuje do expanzního prostoru. V tomto případě jsou k dispozici dva druhy plynu, plyn který tam již určitou dobu byl a plyn, který do tohoto prostoru teprve vstupuje. V tomto případě je objem tedy rozdělen do dvou částí:

$$V_{ex}(i+1) = AV_{ex}(i+1) + BV_{ex}(i+1) \quad (5.8)$$

kde první člen reprezentuje původní plyn a druhý člen plyn nový.

Pro původní plyn můžeme psát:

$$AV_{ex}(i+1) = \frac{m_{ex}(i) \cdot R \cdot AT_{ex}(i+1)}{p(i+1)} \quad (5.9)$$

přičemž $AT_{ex}(i+1)$ je nová teplota původního plynu.

Dosazením do rovnice (5.5) dostaneme:

$$AV_{ex}(i+1) = \frac{m_{ex}(i) \cdot R \cdot T_{ex}(i) \cdot PQ}{p(i+1)} \quad (5.10)$$

a objem nového plynu můžeme určit jako:

$$BV_{ex}(i+1) = \frac{[m_{ex}(i+1) - m_{ex}(i)] \cdot R \cdot BT_{ex}(i+1)}{p(i+1)} \quad (5.11)$$

přičemž $BT_{ex}(i+1)$ je nová teplota vstupujícího plynu. Jestliže plyn začíná na teplotě T , tak aplikací rovnice (5.5) získáme:

$$BV_{ex}(i+1) = \frac{[m_{ex}(i+1) - m_{ex}(i)] \cdot R \cdot T \cdot PQ}{p(i+1)} \quad (5.12)$$

Kombinací rovnic (5.8), (5.10) a (5.12) dostáváme:

$$V_{ex}(i+1) = \frac{m_{ex}(i) \cdot R \cdot T_{ex}(i) \cdot PQ}{p(i+1)} + \frac{[m_{ex}(i+1) - m_{ex}(i)] \cdot R \cdot T \cdot PQ}{p(i+1)} \quad (5.13)$$

která po úpravě přejde na tvar:

$$m_{ex}(i+1) = \frac{V_{ex}(i+1) \cdot p(i+1)}{R \cdot PQ} - m_{ex}(i) \cdot T \cdot [T_{ex}(i) - T] \quad (5.14)$$

Podobně pro kompresní prostor, pokud plyn proudí z něj:

jestliže $m_{komp}(i+1) < m_{komp}(i)$, pak:

$$m_{komp}(i+1) = \frac{V_{komp}(i+1) \cdot p(i+1)}{R \cdot T_{komp}(i) \cdot PQ} \quad (5.15)$$

Pokud plyn proudí dovnitř, tzn. $m_{komp}(i+1) > m_{komp}(i)$:

$$V_{komp}(i+1) = \frac{m_{komp}(i) \cdot R \cdot T_{komp}(i) \cdot PQ}{p(i+1)} + \frac{[m_{komp}(i+1) - m_{komp}(i)] \cdot R \cdot E \cdot T \cdot PQ}{p(i+1)} \quad (5.16)$$

což lze zredukovat:

$$m_{komp}(i+1) = \frac{\frac{V_{komp}(i+1) \cdot p(i+1)}{R \cdot PQ} - m_{komp}(i) \cdot [T_{komp}(i) - E \cdot T]}{E \cdot T} \quad (5.17)$$

Pro výpočet $m_{ex}(i+1)$ a $m_{komp}(i+1)$ není třeba počítat následující teploty $T_{ex}(i+1)$ a $T_{komp}(i+1)$, neboť tyto vystupují v rovnicích (5.7) - (5.17). Nicméně musí být tyto teploty vyčísleny, protože budou použity pro další přírůstek. Pokud $m_{ex}(i+1) > m_{ex}(i)$, pak plyn vstupuje do expanzního prostoru. Teplota plynu, který se tam již nacházel se změní na :

$$T_{ex}(i+1) = T_{ex}(i) \cdot PQ \quad (5.18)$$

a teplota plynu vstupujícího do expanzní komory je:

$$T'_{ex}(i+1) = T \cdot PQ \quad (5.19)$$

Průměrná teplota plynu je hmotnostním průměrem těchto dvou hmot, takže:

$$T_{ex}(i+1) = \frac{T_{ex}(i) \cdot PQ \cdot m_{ex}(i) + T \cdot PQ \cdot [m_{ex}(i+1) - m_{ex}(i)]}{m_{ex}(i+1)} \quad (5.20)$$

Pokud $m_{ex}(i+1) < m_{ex}(i)$, pak je $T_{ex}(i+1)$ možné spočítat dle rovnice (5.18).

Teploty v kompresním prostoru jsou vypočteny opět podobnou cestou. Jestliže $m_{komp}(i+1) > m_{komp}(i)$, pak:

$$T_{komp}(i+1) = \frac{T_{komp}(i) \cdot PQ \cdot m_{komp}(i) + T \cdot E \cdot PQ \cdot [m_{komp}(i+1) - m_{komp}(i)]}{m_{komp}(i+1)} \quad (5.21)$$

Jestliže $m_{komp}(i+1) < m_{komp}(i)$, pak:

$$T_{komp}(i+1) = T_{komp}(i) \cdot PQ \quad (5.22)$$

Další výpočet je pak prováděn v následujícím pořadí:

1. Nastřelí se $p(0)$ ze známých počátečních podmínek daných měřením tlaku nebo tlaku vypočteného dle teploty okolního kovu.
2. Pro další časový krok se vybere $p(i+1)$ stejné jako $p(i)$, tzn. $p(0)$ v prvním kole.
3. Pokud $V_{ex}(i+1) > V_{ex}(i)$ je možné $m_{ex}(i+1)$ vypočítat podle rovnice (5.14), jinak dle rovnice (5.7).
4. Pokud $V_{komp}(i+1) > V_{komp}(i)$ je možné vypočíst $m_{komp}(i+1)$ dle rovnice (5.15), v opačném případě podle rovnice (5.17).

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Adiabatická analýza cyklu

5. Nyní je nutné určit chybu v rovnováze hmotností dle následující relace:

$$chyba = m_{ex}(i+1) + m_{komp}(i+1) + p(i+1) \cdot k_1 - m \quad (5.23)$$

6. Následně se zvolí odlišný $p(i+1)$ a to takový, že bude o 1% větší než $p(i)$.
7. Pokud je již vypočtená $m_{ex}(i+1) > m_{ex}(i)$, pak se vypočte $m_{ex}(i+1)$ dle rovnice (5.14), jinak dle (5.7) – za použití $p(i+1)$ z kroku 6. .
8. Pokud je již vypočtená $m_{komp}(i+1) > m_{komp}(i)$, pak se vypočte $m_{komp}(i+1)$ dle rovnice (5.15), jinak dle (5.17) – za použití $p(i+1)$ z kroku 6. .
9. Opět je třeba vypočíst chybu dle rovnice (5.23).
10. Metodou sečen se rozhodne, která hodnota $p(i+1)$ může být extrapolována nebo interpolována ze dvou chyb a dvou tlaků, abychom určili, který tlak bude dávat nulovou chybu.
11. Kroky 7., 8., 9. a 10. opakujeme tak dlouho, dokud se nepřiblížíme konvergenci a chyba z rovnice (5.23) není menší jak 1ppm .
12. Vyčíslí se integrál $VV(i) = V_{ex}(i) + V_{komp}(i)$ v závislosti na $p(i)$ pro určení vykonané práce během jednoho cyklu.
13. Vyčíslí se integrál $V_{ex}(i)$ v závislosti na $p(i)$ pro určení přivedené práce během jednoho cyklu.
14. Pokud je $m_{ex}(i+1) > m_{ex}(i)$, pak se vypočte $T_{ex}(i+1)$ podle rovnice (5.20), jinak dle rovnice (5.18).
15. Pokud je $m_{komp}(i+1) > m_{komp}(i)$, pak se vypočte $T_{komp}(i+1)$ podle rovnice (5.21), jinak dle rovnice (5.22).
16. Přesuneme se na další sadu kompresních a expanzních prostorů a pokračujeme od kroku 2. znovu.
17. Po jedné celé otáčce je nutné zkontrolovat tlaky otočení 0° a 360° a pokud se liší o více než 0,1% , je nutné opakovat celý cyklus.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Adiabatická analýza cyklu

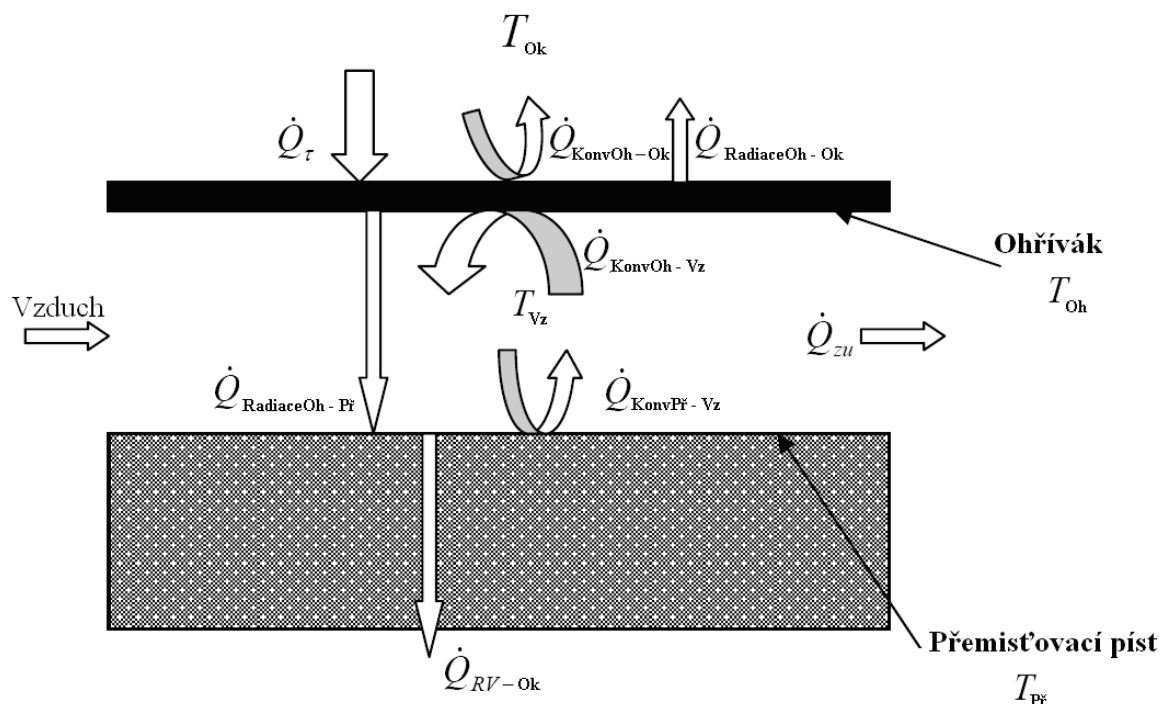
Pozn.: chybu výpočtu je možné ovlivnit i volbou většího počtu časových kroků během jednoho cyklu.

6 PŘENOS TEPLA U STIRLINGOVA MOTORU

Přenos tepla je u Stirlingova motoru velmi komplikovaný proces a pro snazší výpočet musíme zavést určitá zjednodušení. Výpočet je založen na následujících hypotézách:

- Stavové veličiny vzduchu budou počítány pouze jako funkce teploty a ne tlaku.
- Je předpokládán stacionární přenos tepla.
- Teplota plynu na horké straně Stirlingova motoru a teplota ohříváku je konstantní a homogenní.
- Skříň motoru je adiabatická a tím zanedbávány tepelné ztráty.
- Pokud je pohyb pístu kontinuální, lze předpokládat, že píst zůstává mezi horní a dolní úvratí, tzn. že výška vzduchové mezery je vždy polovina zdvihu.
- Tepelný tok přijímaný Stirlingovým motorem předpokládáme stejný jako v případě ideálního Stirlingova cyklu.
- Teplota plynu na studené straně Stirlingova motoru je stejná jako teplota okolního prostředí.

6.1 Matematický model s tepelnými ztrátami konvekcí



Obr. 6.1 Termické proudění energie u Stirlingova motoru

Energetické bilance pro ohřívák, přemísťovací píst a vzduch pak můžeme psát:

Ohřívák:

$$\dot{Q}_\tau - \dot{Q}_{KonvOh-Ok} - \dot{Q}_{RadiaceOh-Ok} - \dot{Q}_{KonvOh-Vz} - \dot{Q}_{RadiaceOh-Př} = 0 \quad (6.1)$$

Vzduch:

$$\dot{Q}_{KonvOh-Vz} + \dot{Q}_{KonvPř-Vz} - \dot{Q}_{použitý} = 0 \quad (6.2)$$

Přemísťovací píst:

$$\dot{Q}_{RadiaceOh-Př} - \dot{Q}_{KonvPř-Vz} - \dot{Q}_{ztráty-Ok} = 0 \quad (6.3)$$

6.2 Relace vyjadřující tepelné toky modelu

1. Teplo přijaté ohřívákem z vnějšího zdroje $\dot{Q}_r$
2. Ztráty tepla konvekcí na vnější straně ohříváku jsou určeny Newtonovým ochlazovacím zákonem:

$$\dot{Q}_{KonvOh-Ok} = \alpha_{KonvOh-Ok} \cdot S \cdot (T_{Oh} - T_{Ok}) , \quad (6.4)$$

kde koeficient přestupu tepla α je definován⁹:

$$\alpha_{KonvOh-Ok} = \frac{\lambda}{l} Nu \quad (6.5)$$

a Nu je Nusseltovo číslo.

a) při velmi malé rychlosti větru

pro $10^4 < Ra < 10^7$

$$Nu = 0,76 Ra^{1/4} \quad (6.6)$$

pro $10^7 < Ra < 3 \cdot 10^{10}$

$$Nu = 0,15 Ra^{1/3} \quad (6.7)$$

Mezi Rayleighovým číslem a Grashofovým číslem platí následující vztah:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (6.8)$$

a

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot l^3}{\nu^2} \quad (6.9)$$

b) při rychlosti větru v_v

pro $Re < 10^6$

$$Nu = 0,94 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (6.10)$$

kde je Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{v_v \cdot l}{\nu} \quad (6.11)$$

3. Přenos tepla konvekcí na vzduch pod ohřívákem

$$\dot{Q}_{KonvOh-Vz} = \alpha_{KonvOh-Vz} \cdot S \cdot (T_{Oh} - T_{Vz}) \quad (6.12)$$

⁹ ELSNER, Norbert, et al. Grundlagen der Technischen Thermodynamik. 6. bearb. u. erw. Auflage. Berlin : Akademie Verlag, 1985. 641 s., 4 tabulky. Bestellnummer 7623758.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Přenos tepla u Stirlingova motoru

součinitel přestupu tepla $\alpha_{KonvOh-Vz}$ se vypočte dle (6.5) za pomoci Nusseltova čísla:

$$Nu = \left[\left\{ \frac{a}{1-n} \left(\frac{1}{L^*} \right)^n \right\}^3 + Nu_{\infty}^3 \right]^{1/3} \quad (6.13)$$

kde $Nu_{\infty} = 8,235$, $f_1 = 1,18$, $f_2 = 1$, $f_3 = 0,8$ a

$$a = \left(1,1 - \frac{1}{3,4 + 0,0667 \cdot Pr} \right) \cdot f_1 \quad (6.14)$$

$$n = 0,35 \cdot f_2 + \frac{1}{7,825 + 2,6 \cdot \sqrt{Pr}} \cdot f_3 \quad (6.15)$$

$$L^* = \frac{L}{Re \cdot Pr \cdot \delta} \quad (6.16)$$

4. Ztráty tepla zářením do okolí $\dot{Q}_{RadiaceOh-Ok}$ se vypočtou:

$$\dot{Q}_{RadiaceOh-Ok} = \varepsilon_{Oh1} \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_{Oh}^4 - T_{Ok}^4) \quad (6.17)$$

kde ε je tzv. poměrná zářivost, která říká jak efektivní je záření v porovnání s ideálním zářičem – absolutně černým tělesem a σ je Stefan – Boltzmannova konstanta:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} .$$

Koeficient přestupu tepla zářením $\alpha_{RadiaceOh-Ok}$ můžeme tedy definovat:

$$\alpha_{RadiaceOh-Ok} = \varepsilon_{Oh1} \cdot \sigma \cdot (T_{Oh} + T_{Ok}) \cdot (T_{Oh}^2 + T_{Ok}^2) \quad (6.18)$$

a potom platí pro přestup tepla zářením:

$$\dot{Q}_{RadiaceOh-Ok} = \alpha_{RadiaceOh-Ok} \cdot S \cdot (T_{Oh} - T_{Ok}) . \quad (6.19)$$

5. Přenos tepla zářením mezi ohřívákem a přemísťovacím pístem $\dot{Q}_{RadiaceOh-Př}$

$$\dot{Q}_{RadiaceOh-Př} = \alpha_{RadiaceOh-Př} \cdot S \cdot (T_{Oh} - T_{Př}) \quad (6.20)$$

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Přenos tepla u Stirlingova motoru

Koeficient přestupu tepla zářením $\alpha_{RadiaceOh-Př}$ získáme:

$$\alpha_{RadiaceOh-Př} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{Př}} + \left(\frac{1}{\epsilon_{Oh2}} - 1 \right) \cdot \frac{S_{Př}}{S_{Oh}}} \cdot \sigma \cdot (T_{Oh} + T_{Př}) \cdot (T_{Oh}^2 + T_{Př}^2) \quad (6.21)$$

6. Přenos tepla konvekcí mezi přemísťovacím pístem a vzduchem $\dot{Q}_{KonvPř-Vz}$:

$$\dot{Q}_{KonvPř-Vz} = \alpha_{KonvPř-Vz} \cdot S \cdot (T_{Př} - T_{Vz}) \quad (6.22)$$

součinitel přestupu tepla $\alpha_{KonvPř-Vz}$ se vypočte dle (6.5), (6.13), (6.14), (6.15) a (6.16).

7. Tepelný tok Stirlingovým motorem spotřebovaný

$$\dot{Q}_{použitý} = \dot{m} \cdot R \cdot T_{Vz} \cdot \ln \epsilon + \dot{m} \cdot c_v \cdot (T_{Vz} - T_{Ok}) (1 - \eta_R) \quad (6.23)$$

8. Tepelné ztráty na okolí

$$\dot{Q}_{ztráty-Ok} = \alpha_{ztráty-Ok} \cdot S \cdot (T_{Př} - T_{Ok}) \quad (6.24)$$

7 MODELOVÁNÍ STIRLINGOVA MOTORU

K navrhování a optimalizaci Stirlingových motorů je už několik desetiletí používána počítačová simulace. První simulační modely byly omezovány právě svou komplexností. Na soudobých počítačích byly výpočty nesmírně náročné na operační paměť a především čas. Rozvojem techniky se tyto metody stávaly stále silnějšími. V současné době vědci simulují průtoky plynu uvnitř celého Stirlingova motoru s využitím dnes již komerčně dostupných softwarů pro trojrozměrnou modelaci dynamiky tekutin 3D CFD (trojrozměrná numerická mechanika proudění).

Jen některé z jednodušších a rychlejších modelových přístupů, které byly provedené desítky let před nástupem 3D CFD nebyly příchodem této novější a ještě více komplexnější metody překonány. Naopak, simulační programy založené na jednoduchých a rychlých krocích jsou stále komerčně požadované a tedy i vyvíjené. Jedním z důvodů je také ta skutečnost, že simulace jednoho cyklu Stirlingova motoru za použití 3D CFD stále ještě vyžaduje mnoho hodin počítání na velmi výkonných strojích. To dělá metodu velice těžkopádnou pro řadu návrhových a optimalizačních procesů, obzvláště pokud je zapotřebí periodických řešení ustálených stavů.

Jednodušší modely mohou přinést v závislosti na přesnosti a použitém přístupu výsledky během pouhých milisekund. Rovněž množství vstupních hodnot potřebných k simulaci stroje inklinuje ke zvyšování složitosti modelu. Je také nutné rozumět numerickým metodám, bez toho není možné dosáhnout úspěšného výsledku. Z toho důvodu jsou jednoduché a rychlé modelace implementovány tak, že vyžadují ze strany uživatele poměrně malé úsilí, znalosti a trpělivost. To je činí atraktivními pro řadu simulací. Jednoduchými a velmi rychlými modely je někdy možné dosáhnout velmi dobré shody s experimentálními daty skutečných strojů. Toto není ale ani při použití komplexnější a výpočtově intenzivnější metody zaručeno.

Složitější modely dovolují studovat i takové efekty a jevy, které jsou u jednoduchých přístupů zanedbávány. Takové úkazy zahrnují například efekty spojené s rozdělením teploty

nebo geometrické detaily spojené s nejrůznějšími ztrátami. Dobře implementovaný komplexní model může indikovat velmi dobré výkonnostní předpovědi pouze pokud není použit pro analýzu tam, kde se vyskytne nějaký důležitý nespočítaný fenomén. Žádná analýza Stirlingova motoru se nejeví jako nadřazená nebo dokonce vhodná pro všechny úkoly simulace. To je pravděpodobně hlavní důvod, proč je v současnosti taková rozmanitost a koexistence v metodách používaných pro modelaci Stirlingových strojů.

7.1 Analýzy nultého řádu, Bealeovo číslo

William Beale pozoroval, že nejmodernější motory pracují za podobných podmínek parametrických poměrů: podíl mrtvých objemů, teplotní podíl, podíl zdvihových objemů, fázové posunutí přemísťovacího pístu¹⁰. Korelací dostupných experimentálních dat z různých motorů zjistil, že výkon motoru je možné reprezentovat jako:

$$P = 0,015 p_{mean} \cdot V_{sw} \cdot f \quad (7.1)$$

kde P ... výkon motoru [W], p_{mean} ... hlavní tlak cyklu [bar], V_{sw} ... zdvihový objem pracovního pístu [cm³], f ... frekvence otáček motoru [Hz].

Většina vysoce výkonných Stirlingových motorů rovnici (7.1) splňuje a koeficient 0,015 se nazývá Bealeovo číslo. Toto číslo charakterizuje výkon daného motoru.

Pozn. U tlaku není použita jednotka dle SI z důvodu zachování původnosti relace a hodnoty Bealeova čísla.

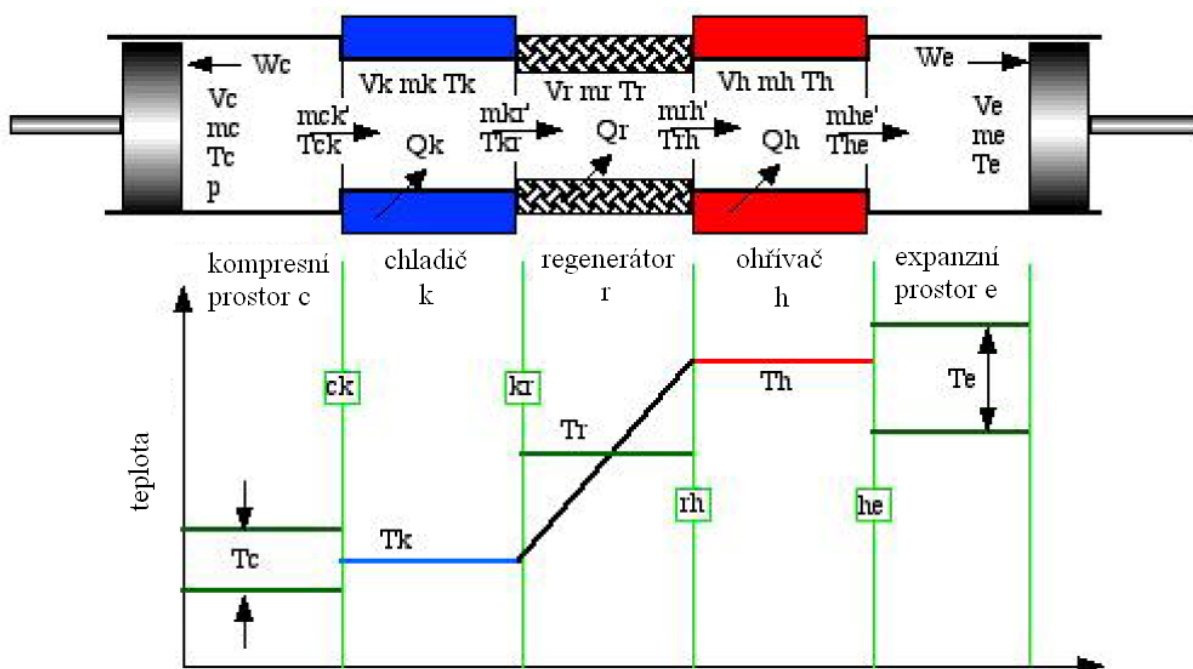
7.2 Analýzy prvního řádu, izotermický děj

První analýza Stirlingova motoru byla provedena Gustavem Schmidtem r. 1871. Získal řešení v uzavřeném tvaru pro sinusový pohyb pístu mezi izotermickými horkými a studenými objemy. Viz. kapitola 4.1.2 .

¹⁰ DYSON, Rodger W.; WILSON, Scott D.; TEW, Roy C.. <Rodger.W.Dyson@grc.nasa.gov> *Review of Computational Stirling Analysis Methods*. [pdf dokument]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, October, 2004 [cit. 31. 3. 2007]. Dostupný z: <<http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2004/TM-2004-213300.pdf>>.

7.3 Analýzy druhého řádu, adiabatický děj

Tato úroveň analýzy je založena na adiabatické analýze která odečítá ztráty způsobené přenosem tepla a ztrátové výkony prouděním. Opírá se o upravenou Schmidtovu analýzu a vyžaduje nelineární časové integrace modelových rovnic. Předpokládá adiabatické kompresní a expanzní pole jak je naznačeno na Obr. 7.1 .



Obr. 7.1 Ideální adiabatický model

7.3.1 Ztráty přenosem tepla

Ztráty přenosem tepla nastávají v celém systému, ale významně se projevují v prostoru mezi přemíst'ovacím pístem a tepelnými výměníky kvůli následujícím procesům:

- Kyvadlový přenos tepla kdy je ztráta vedením mezi pracovním nebo přemíst'ovacím pístem a přidruženým válcem zvětšována kmitavým pohybem stěny.
- Kolísání entalpie
- Hysterezní přenos tepla, který je čistý přenos tepla z plynu k válci kvůli teplotním gradientům vyvolaným změnami tlaku v expanzním prostoru.

Navíc musí být dopočítány ztráty vedením mezi stěnami a přemíst'ovacím pístem.

7.3.2 Ztráty výkonu prouděním

Ztráty výkonu prouděním se většinou vyskytují v oblasti regenerátoru kvůli poklesu tlaku při průchodu přes těleso regenerátoru (které mohou být zvýšeny nerovnoměrným prouděním). Viskozita pracovního plynu a hysterezní ztráty díky stlačitelnosti plynu musí být rovněž dopočítány.

7.3.3 Berchowitzův dynamický a termodynamický uzavřený tvar

Uzavřený tvar výrazu zahrnujícího hmoty pro dynamickou ale i termodynamickou analýzu byl odvozen Berchowitzem.

7.3.4 Martini-Weiss program

Martini - Weiss program, občas zkracovaný na MarWeiss, je simulační program pro Stirlingovy motory vyvinutý na University of Calgary Martinim a později rozšířený Weissem. Program je založen na Martiniho modelaci druhého řádu. Byl vytvořen i program k simulaci kryogenního chladiče, zařízení schopného vytvořit velmi nízké teploty (méně než -150°C), který byl nazván CryoWeiss. Experimentálními hodnotami úspěšně potvrzený program Martini - Weiss byl komerčně dostupný koncem minulého století, poté byl překonán novějšími simulačními programy.

7.3.5 Altmanův software SNAPpro

Označení SNAPpro je zkratkou pro Stirling Numerical Analysis Program, což je komerční simulační program pro Stirlingovy motory. Altman jej představil na konferenci roku 2003 a od roku 2005 jej propaguje na internetu. Program je založen na Martiniho práci a opět se jedná o analýzu druhého řádu. SNAPpro je napsán v programu MS Excel a používá jeho možnosti k poskytnutí rozsáhlých vyhodnocení. Program simuluje uživatelem navržený Stirlingův motor, vykonává studie parametrů a optimalizuje za použití genetických algoritmů. Principem práce genetického algoritmu je postupná tvorba generací různých řešení daného problému. Při řešení se uchovává tzv. populace, jejíž každý jedinec představuje jedno řešení daného problému. Jak populace probíhá evolucí, řešení se zlepšují.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stirlingův motor

Modelování Stirlingova motoru

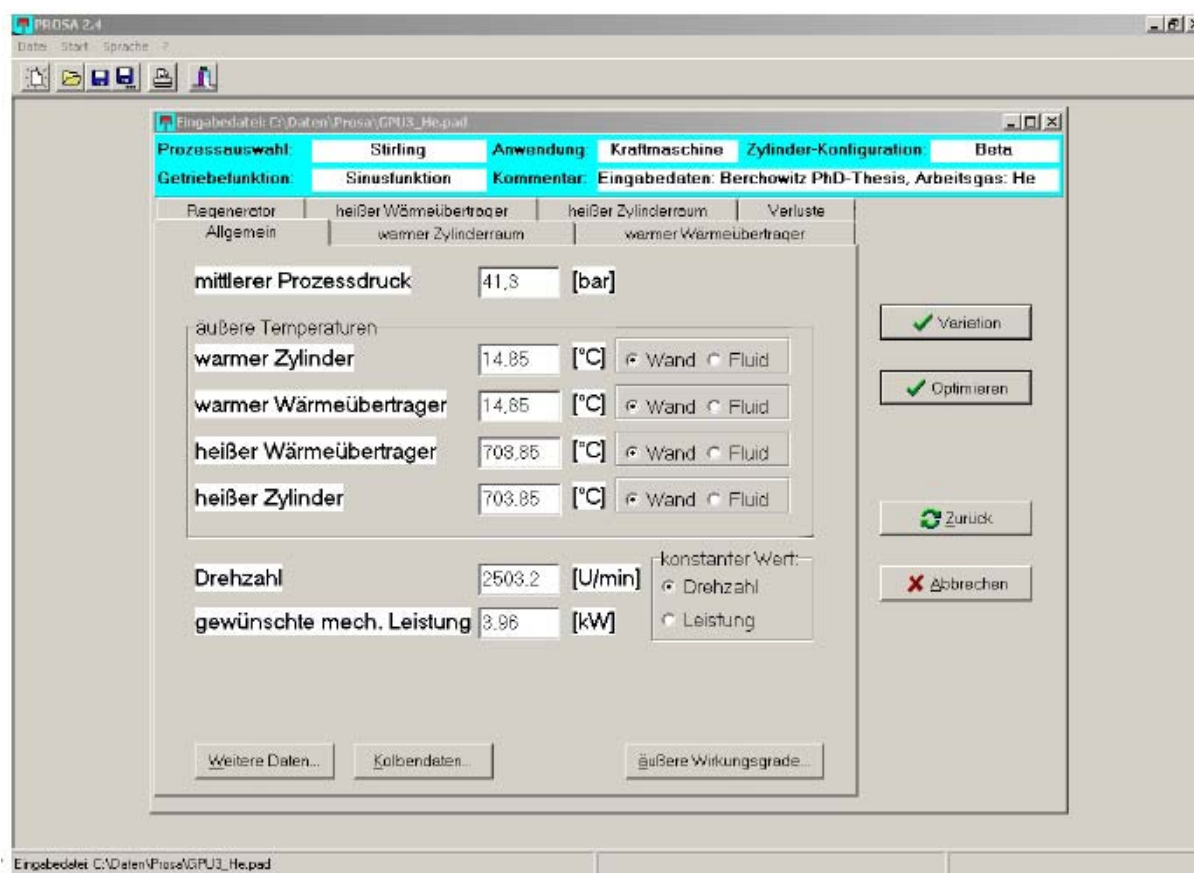
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Stirling Numerical Analysis Program Pro Version © 2001-2003 Alan Altman All Rights Reserved								
2	Notes and work area				Gas temperature CLOSED LOOP				
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9	1.0 Which measurement system?								
10	METRIC								
11									
12									
13									
14									
15	2.0 Operating Conditions								
16	HELIUM								
17	Working fluid in engine								
18									
19	Working mean pressure in engine - gauge								
20									
21	Hot end metal temperature								
22	Cold end water cooling temperature								
23	Cooling water flow rate								
24									
25									
26									
27									
28	3.0 Engine configuration								
29	BETA								
30	N/A								
31	N/A								
32									
33	ID of displacer bore								
34	Stroke of displacer								
35	ID of power piston bore								
36	N/A								
37	Displacer rod diameter								
38									
39									
40									

Obr. 7.2 Ukázka prostředí SNAPpro

7.3.6 Thomasův software PROSA

Označení PROSA je zkratkou Program for second order analysis. Opět se jedná o komerční program k simulaci Stirlingova motoru. Verze programu do 2.4 jsou analýzy druhého řádu, ale nová verze 3.0 bude již analýzou třetího řádu, která využívá časový krok namísto uzavřené formy řešení. Verze 3.0 je v současné době vyvíjena. Systém umožňuje tedy samotnou analýzu, má grafické uživatelské rozhraní, umožňuje různé parametrické studie, optimalizaci a automatickou kalibraci zadáním experimentálních hodnot. Program byl úspěšně ověřen a to jak s kalibrací, tak bez kalibrace.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Modelování Stirlingova motoru



Obr. 7.3 Ukázka prostředí PROSA¹¹

7.4 Analýzy třetího řádu

Výpočty třetího řádu podotýkají, že u mnoha procesů kde je předpokládána simultánnost a nezávislost u metod druhého řádu, ve skutečnosti dochází k významné interakci. To, zda je tato myšlenka pravdivá nebo ne, není známo a žádné důkazy v dostupné literatuře na tuto otázku definitivně neodpovídají. Qvale a Rios publikovali důkazy¹² o velmi dobré shodě mezi jejich zdokonalenou metodou druhého řádu a experimentálním měřením. Metody třetího řádu se pokoušejí o komplexní výpočet celého procesu u Stirlingova motoru. Finkelstein tento směr vývoje velmi propagoval a přiměl tak řadu dalších lidí k práci na takových analýzách. Pokud je metoda třetího řádu experimentálně potvrzena, pak by mohla

¹¹ BERND, Thomas. Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas [online]. [2006] [cit. 2007-10-31]. Dostupný z WWW: < http://userserv.fh-reutlingen.de/~thomas/prosa_direct.html >.

¹² MARTINI, William R. *Stirling Engine Design Manual*. 2nd ed. Honolulu: University Press of the Pacific, 2004. 409 p. ISBN 1-4102-1604-7.

mnohé říci o pracujících motorech, které nemohou být spolehlivě změřeny. Analýzy třetího řádu začínají sepsáním rovnic popisujících zákony na zachování energie, hmoty a hybnosti. Tyto vztahy jsou příliš složité pro všeobecné analytické řešení a proto jsou řešeny numericky. Diferenciální rovnice jsou redukovány na jejich jednorozměrné formy. Pak závisí na autorově formulaci a dodatečných zjednodušeníh. V této práci není možné popsat tyto metody detailně, nicméně jsou zde zmíněny základní předpoklady jednotlivých výpočtových postupů.

7.4.1 Základní metody výpočtu

V širokém přehledu základních metod je postup výpočtu následující:

1. Specifikace rozměrů a provozních stavů jako například teploty, plnicího tlaku, pohybu částí, atd. Rozdělení motoru do jednotlivých kontrolních objemů.
2. Konverze diferenciálních rovnic vyjadřujících zákony zachování energie, hmoty a hybnosti do rovnic diferenčních. Je třeba též zohlednit kinetickou energii plynu a empiricky formulovat koeficienty tření a součinitele přenosu tepla.
3. Nalezení matematicky stabilní metody řešení parametrů motoru po určitém časovém kroku za podmínek stanovených na začátku tohoto kroku.
4. Při počátku v libovolném výchozím stavu a proběhnutí několika cyklů motoru se musí pracovní výkon ustálit a během jednotlivých cyklů zůstat konstantní.
5. Výpočet tepelného výkonu.

7.4.2 Elementární diferenciální rovnice

Dle Urieliho musí platit pro každý element rovnice:

1. Kontinuity
2. Hybnosti
3. Energie
4. Stavová rovnice

Tyto vztahy nejdříve vyjadřuje slovně a potom symboly u jím používaného kontrolního objemu.

7.4.2.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity pouze vyjadřuje skutečnost, že hmota nevzniká z ničeho a nezaniká v nic. Čili:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{hodnota úbytku hmoty} \\ \text{v kontrolním prostoru} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{čistý tok hmoty} \\ \text{vyvedený z kontrolní oblasti} \\ \text{přes její povrch} \end{array} \right\}$$

Urieli vyjádřil tento vztah jako:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + V \frac{\partial g}{\partial x} = 0 \quad (7.2)$$

kde:

$$m = \tilde{m}/M$$

$\tilde{m}$... hmotnost plynu v kontrolním prostoru [kg], M ... hmotnost plynu v motoru v [kg],

t ... čas v [s]

$$V = \tilde{V}/V_s$$

$\tilde{V}$... objem kontrolního prostoru [m³], V_s ... celkový zdvihový objem stroje [m³]

$$g = \tilde{g}/M\sqrt{RT_C}/V_s$$

$\tilde{g}$... hustota toku hmoty [kg/m².s], R ... plynová konstanta pracovního plynu [

J/Kg.K], T_C ... absolutní teplota studené strany [K]

$$x = \tilde{x}/(V_s)^{\frac{1}{3}}$$

$\tilde{x}$... vzdálenost [m]

7.4.2.2 Rovnost hybností:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{hodnota změn hybností} \\ \text{v kontrolním prostoru} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{čistý tok hybnosti} \\ \text{vyvedený z kontrolní oblasti} \\ \text{přes její povrch} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{čistá povrchová síla} \\ \text{působící na tekutinu} \\ \text{v kontrolním prostoru} \end{array} \right\}$$

Urieli vyjádřil tento vztah jako:

$$\frac{\partial}{\partial t}(gV) + V \frac{\partial}{\partial x}(g^2 v) + V \frac{\partial p}{\partial x} + F = 0 \quad (7.3)$$

kde přibývá:

$$v = \tilde{v} / (V_s / M)$$

$\tilde{v}$... měrný objem [m³/kg]

$$p = \tilde{p} / MRT_c / V_s$$

p ... tlak [N/m²]

$$F = \tilde{F} / MRT_c / (V_s)^{\frac{1}{3}}$$

$\tilde{F}$... síla vznikající třením [N]

7.4.2.3 Rovnost energií:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{hodnota přenosu tepla} \\ \text{do pracovního plynu} \\ \text{přes kontrolní povrch} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{hodnota akumulované energie} \\ \text{v rámci} \\ \text{kontrolního prostoru} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{čistý tok energie vyvedený} \\ \text{pracovním plynem z kontrolní} \\ \text{oblasti přes její povrch} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{čistý tok práce povrchem kontrolní} \\ \text{oblasti potřebné ke stlačení hmoty} \\ \text{pracovního plynu} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{čistá mechanická práce vykonaná} \\ \text{pracovním plynem na okolí} \\ \text{následkem změn amplitudy} \\ \text{kontrolního prostoru} \end{array} \right\}$$

Urieli vyjádřil tento vztah jako:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{mT}{\gamma-1} \right) + V \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\gamma T g}{\gamma-1} \right) - g v \left(V \frac{\partial p}{\partial x} + F \right) + \frac{\partial W}{\partial t} \quad (7.4)$$

kde přibývá:

$$Q = \tilde{Q} / MRT_C$$

$\tilde{Q}$... přenesené teplo [J]

γ ... poměr měrných tepelných kapacit kontrolního objemu

$$\gamma = c_p / c_v$$

$$T = \tilde{T} / T_C$$

$\tilde{T}$... teplota pracovního plynu v kontrolním objemu [K]

$$W = \tilde{W} / MRT_C$$

$\tilde{W}$... vykonaná mechanická práce [J]

7.4.2.4 Stavová rovnice:

V důsledku normalizovaných parametrů používá Urieli stavovou rovnici ve tvaru:

$$pV = mT \quad (7.5)$$

7.4.3 Srovnání některých metod třetího řádu

7.4.3.1 Urieli

Tato metoda výpočtu je podrobně popsána v disertační práci Israele Urieliho. Používá svou metodu u experimentálního Stirlingova motoru se dvěma písty. Horký válec je připojený k studenému válci řadou paralelních trubiček. Části každé z nich jsou ohřívány, chlazeny nebo si hledají svoji vlastní teplotní hladinu v regenerátorové části. Tento typ motoru vybral Urieli ze dvou hlavních důvodů. Jednak lze hovořit o určité jednoduchosti v programování, ale především proto, že pro trubice je problematika proudění tekutin, včetně přenosu tepla a s tím spojených korelací dobře známá. Tento motor byl sestaven a pracuje na Witwatersrandské univerzitě v Jihoafrickém Johannesburgu. Záměrem bylo získat experimentální ověření Urieliho výpočtů. Urieli sestavil z výše uvedených parciálních diferenciálních rovnic systém obyčejných diferenciálních rovnic převedením všech diferenciálů na diferenční kvocienty. Výjimkou byla časová proměnná. Tyto obyčejné diferenciální rovnice řešil metodou Runge-Kutta čtvrtého řádu se stacionárními počátečními podmínkami. Jeho teze obsahuje i výpočtový program pro FORTRAN.

7.4.3.2 Schock

Al Schock, Fairchild Industries, Germantown, Maryland použil stejné diferenciální rovnice jako Urieli, ale jeho počítačové modelování bylo odlišné, avšak nedefinované. Svůj program nazval *SNAP* (Stirling Nodal Analysis Program). Potvrdil Urielova slova, že časový krok musí být menší než doba potřebná k tomu, aby zvuk dorazil v daném plynu od jednoho bodu ke druhému. Al Shock se zaměřil na vývoj a vylepšování počítačového programu pro Stirlingův motor s volným přemísťovacím pístem postaveným firmou Sunpower pro DOE. Tento motor měl velmi porézní regenerátor. Přestože byly tlaky v kompresním a expanzním

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Modelování Stirlingova motoru

prostoru odlišné, nebylo toto při vykreslení v závislosti na čase rozlišitelné. Autor spoléhal na korelaci, kterou chtěl zavést na základě experimentálních dat. Shock úspěšně použil počítačem vykreslovanou grafiku k simulaci dějů ve stroji s volným pístem. Program je velmi precizní a poskytuje i možnost zjednodušení výpočtu zanedbáním efektů spojených s akcelerací plynu.

7.4.3.3 Vanderbrug

Finegold and Vanderbrug svůj program pro všeobecnou analýzu Stirlingova motoru zveřejnili včetně zdrojového kódu. V roce 1979 ukázali srovnání svého programu *SCAM* s experimentálním měřením a Schmidtovou analýzou. Toto srovnání ukazuje Tab. 7.1. Za povšimnutí stojí to, že jednoduchý Schmidtův cyklus předpovídá téměř stejně dobře jako program *SCAM*.

Tab. 7.1 Přehled experimentálních a analytických výsledků

	teplota motoru [°C]		pracovní tlak [kPa]		indikovaný výkon [kW]		výkon systému [kW]	
	chladič	ohřívač	expanze	komprese	expanze	komprese	indikovaný	dynamometr
Experimentální hodnoty	40,56	704,44	2247,07	2136,79	6,70	-3,23	3,47	-1,42
Schmidtův cyklus	40,56	704,44	2191,93	2191,93	5,41	-1,74	3,68	---
SCAM	40,56	704,44	2247,07	2136,79	5,70	-2,18	3,50	-0,97

7.4.3.4 Finkelstein

Ted Finkelstein sestavil program, pro který je třeba motor optimalizovat tak, že se nastaví teplota některých kovových částí motoru tak, aby teplota kovu na konci cyklu byla téměř shodná jako jejich teplota na začátku cyklu. Urieli i Finkelstein užívají stejné metody při výpočtu regenerátoru a to, že vodivost z jednoho bodu regenerátoru k dalšímu bodu závisí na směru proudění. Finkelstein řeší stejné rovnice, které prezentuje Urieli, ale zanedbává kinetickou energii proudícího plynu. Tím je schopen podstatně zvětšit časový krok. Zanedbání kinetické energie má za následek chyby v prognózách tlaků během cyklu. Avšak na výpočtu výstupního výkonu a účinnosti se tento zjednodušující předpoklad nepromítne. Pro porovnání je třeba použít stejné korelace pro tření a součinitele přenosu tepla a musí být zaručena geometrická identita. Autor tvrdí že jeho program byl experimentálně ověřen, ale výsledky si chrání.

7.4.3.5 Lewis Research Center (LeRC)

William R. Martini se pokusil formulovat procedury výpočtu založené na konceptech používaných M. Mayerem a McDonnell Douglasem. Jeho pokus selhal v rozšíření výpočtu na reálný regenerátor se škodným prostorem a přenosem tepla jako funkce proudění tekutin. Výpočet byl stabilní a snižováním časového kroku se blížil mezním hodnotám . Ale pokud byly nastaveny koeficienty přenosu tepla velmi vysoké a nemělo docházet ke ztrátám v regenerátoru výpočet zkolaboval, protože plyn vždy vstupoval do horkého konce s tou teplotou, jakou měl nejteplejší prvek regenerátoru. Určité problémy se vyskytly i při stanovování správných teplot elementů regenerátoru.

Paralelně a nezávisle na Martinim vyvinuli v LeRC velmi podobný počítačový program Roy Tew, Kent Jefferies a Dave Miao. Navíc našli způsob jak zacházet s regenerátorem, který činil právě Martinimu potíže. LeRC předpokládá, že rovnost hybností nemusí být uvažována společně s rovnicí kontinuity a stavovou rovnicí. Předpokládali, že tlak je stejný v celém prostoru motoru a kolísá během cyklu motoru. LeRC kombinuje rovnici kontinuity, rovnici energií se stavovou rovnicí a vzniká jedna jediná rovnice (7.6), kde jednotlivé sčítance reprezentují postupně přenos tepla, tok dovnitř, tok ven a změny tlaku.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{hA}{mC_p}(T_w - T) + \frac{w_i}{m}(T_i - T) + \frac{w_o}{m}(T_o - T) + \frac{V}{mC_p} \frac{dp}{dt} \quad (7.6)$$

Tato rovnice může být řešena jak numerickou integrací prvního řádu, tak technikami vyššími, například metodou Runge-Kuta čtvrtého řádu. LeRC tyto postupy nepoužil.

LeRC použil specifický přístup separace a postupného řešení. V předchozím kroku obdrželi hmoty, teploty a objemy pro všech 13 použitých plynových uzlů. Odtud vypočítají nový základní tlak. S využitím starého i tohoto nového tlaku a za předpokladu žádného přenosu tepla během tohoto stupně, spočítají novou teplotu pro každý plynový uzel s použitím důvěrně známého vzorce pro adiabatickou kompresi. Dalším krokem je určení objemů, které se změní v nové hodnoty založené na rombickém pohybu. Pro každý z těchto objemů jsou dopočítány i hmoty. Jakmile je známo nové rozložení hmoty, jsou dopočítány opět za pomoci starých hmot hodnoty toků. Nová teplota plynu je již upravena k tomu, aby zohledňovala to, že se během časového kroku plyn přemísťuje mezi kontrolními objemy. Během výpočtů se předpokládá, že každý kontrolní objem regenerátoru má svůj teplotní gradient a ten je stejný jako teplotní gradient paralelního kovu a že teplota tekutiny, která teče daným polem je rovna průměrné teplotě tekutiny než do tohoto pole vstoupila. Kontrolní objemy chladiče a ohříváče

jsou pokládány za jeden celek a mají jeho průměrnou teplotu. Navíc jsou lokální součinitele přenosu tepla počítány v závislosti na proudění. Teplotní rovnováha s kovovými stěnami a tělem je nyní počítána pro jednotlivé časové kroky za konstantního tlaku. U exponenciální rovnice nezáleží jak velký je součinitel přenosu tepla a teplota plynu se nemůže změnit o hodnotu větší než je rozdíl teplot stěny a plynu. Přenos tepla v rámci tohoto vyrovnávání je již spočítán.

V uzlech regenerátoru je přenos tepla použit ke změně teploty kovu v souladu se svou tepelnou kapacitou. V ostatních uzlech kde je kontrolována teplota je přenos tepla sčítán tak, aby byl obdržen základní tepelný výkon a účinnost. Všechny tyto hodnoty pak slouží jako výchozí parametry pro další časový krok.

Model je sestaven tak, aby bral v úvahu i možné úniky tekutiny. LeRC také vyvinul propracovanou metodu urychlující sblížování teploty kovových uzlů regenerátoru s teplotou ustáleného stavu. V posledním cyklu bere LeRC v potaz také tekutinové tření, které využívá k redukci indikované práce během cyklu.

Pro dosažení shody mezi experimentálními a vypočtenými hodnotami je nutné vypočtený koeficient tření v regenerátoru vynásobit konstantou specifickou pro každý plyn.

7.4.3.6 Bauwensův kód MS*2

Zmínky o MS*2, Bauwensově simulačním kódu, se v literatuře objevují až roce 1995. MS*2 byl model třetího řádu, který byl založen na konečném rozdílu diskretizace v jednorozměrné dimenzi. Model využíval Eulerův souřadný systém, to je systém s nepohybujícími se uzly. Periodická řešení ustáleného stavu byla nalezena pochody časových řešení z daného souboru počátečních hodnot do té doby, než se řešení neopakovalo. Spolehlivé numerické schopnosti tohoto kódu, stejně tak shoda s experimentálními daty byly doloženy v několika odborných článcích. Koncem minulého století byly ke zjemňování diskretizace času a polohy a s tím spojené vyšetření a prokázání správnosti kódu třeba velmi výkonné pracovní stanice se superpočítači.

7.4.3.7 Kühlův simulační program

Kühl napsal simulační program *kpsim*, který je schopný provádět jak analýzy druhého, tak třetího řádu plynových strojů s regenerací tepla. Program připouští pouze modely sestavené z knihovny předdefinovaných součástí. Tyto součásti byly diskretizovány v jeden rozměr Eulerových souřadnic. Program vykonával s modely vystupujícími v simulaci časové

kroky. Metoda, která byla založena na porozumění fyzice regenerátoru v periodickém ustáleném stavu, se užívala ke zrychlení konvergence axiálních matic teplotních rozdělení směrem k ustálenému stavu. Vypovídací schopnost programu byla úspěšně potvrzena pro Vuilleumierovo tepelné čerpadlo (zde i u vysokorychlostního měření okamžitých teplot plynu) a dva stirlingovy motory.

7.4.3.8 Další simulace se vztahem k NASA (HFAST, GLIMPS, and SAGE)

NASA je zapojena do výzkumů Stirlingova motoru od počátku 70. let minulého století a je významným sponzorem vývoje programů pro simulaci Stirlingova motoru. NASA vyvinula vlastní 1D metodu konečných diferencí počátkem 80. let minulého století. Později NASA získala neomezená práva k simulačnímu programu *HFAST*, který byl sestaven firmou Mechanical Technology, Inc. ve městě Albany, státu New York. NASA rovněž zakoupila Gedeonův program *GLIMPS*. Oba tyto programy byly časově efektivnější a uživatelsky příjemnější než kód sestavený NASA. *HFAST* a *GLIMPS* byly společně s *MS*2* v roce 1994 považovány za nejlepší.

V roce 1994 Gedeon představil simulační program pojmenovaný *Sage*. *Sage* je přímý potomek programu *GLIMPS*.

HFAST

HFAST byl potomek *Harmonic Stirling Cycle Analysis Code (HSCAC)*. Vývoj *HSCAC* začal v roce 1978, aby uspokojil potřebu rychlého a přiměřeně přesného nástroje pro návrh a optimalizaci.

Základní představou bylo pro *HSCAC* vytvořit dostatečně simplifikující předpoklady o řídicích rovnicích pro hmotu, energii, a hybnost které mohou již být pro harmonickou funkci řešeny analyticky. Proces řešení začíná tvorbou počátečního odhadu pro teplotní distribuci. Řešení pak iteruje následující čtyři stupně:

1. Řešení rovnice kontinuity pro tlakovou vlnu a hmotnostní tok. Zde se předpokládá, že teploty plynu jsou v regenerátoru a výměnících konstantní a že komprese a expanze probíhá adiabaticky.
2. Řešení rovnice hybnosti pro pokles tlaku. Pokles tlaku je pak používán pro korekce tlaků v jednotlivých objemech modelu.

3. Řešení rovnosti energií pro teploty plynu. Zde se předpokládá, že průtok pracovního plynu tam a zpět přes výměníky tepla probíhá ve dvou ustálených rázech.

4. Řešení doplňkových energetických rovnic pro teploty stěn. Když iterace konvergují, je výsledné řešení korigováno parazitními ztrátami pro prosakování kolem pístu, tepelnou hysterezi v expanzních a kompresních prostorech a pro kyvadlový jev podél přemísťovacího pístu.

HSCAC byl několikrát zrevidovaný. Jméno bylo změněné na *FAST** což značilo, že tato metoda řešení byla potenciálně mnohem rychlejší než různé alternativní metody, které potřebovaly časový krok. Testování ukázalo, že k tomu aby se metoda stala výkonným nástrojem pro rozmanité předpovědi, potřebuje další upgrade ve smyslu snížení předpokladů v řešení řídicích rovnic. Program se tak dostal až k *HFAST 2.0* zveřejněném koncem 90. let 20. století. V nové verzi, jednorozměrné diskretizaci založené na rovnoměrně rozložené síti kontrolních objemů, byly použité metody zcela zrevidované. Řešení nyní zahrnuje časově se měnící teplotu, která se pro průtoky plynu řídila zákonem zachování energie. Kolem roku 1992 již metoda dosahovala plného potenciálu v harmonické analýze.

GLIMPS

GLIMPS je zkratka pro *Globally Implicit Stirling Cycle Simulation*. Gedeon popsal program, který vyvinul s cílem zhotovení modelu Stirlingova stroje s 1D diskretizací prostoru proveditelnou na osobním počítači. *GLIMPS* použil 1D síť konečných rozdílů prostoru pro řídicí rovnice hmoty, energie a hybnosti plynu a energie pevných látek Stirlingova motoru. Řídicí rovnice byly rovněž discretizovány časem, takže kompletní discretizace vytvořila 2D síť konečných rozdílů. Pro každý bod v čase v 2D síti konečných rozdílů měla síť uzly korespondujícími se všemi uzly v 1D diskretizaci prostoru. Každý uzel v 2D síti konečných rozdílů proto měl jak časovou, tak prostorovou souřadnici. V každém uzlu 2D sítě je odpovídající vrchol řešení pro každou z řídicích rovnic.

V programu byly spojeny dvě protikladné strany 2D sítě konečných diferencí a byla přidána doplňková podmínka zvaná střední tlak. To vyprodukovala globálně vyplývající soustava rovnic, která mohla být vyřešena pro periodické řešení ustáleného stavu. To vyloučilo potřebu simulace mnoha cyklů s procesem časových kroků. Metoda řešení použitá v *GLIMPS* byla výhodná v tom, že klidně umožňovala použití jen 10 časových uzlů a stále byla udržena stabilita numerického schématu. Toto udržovalo celkový počet rovnic v globální

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Modelování Stirlingova motoru

soustavě a tím i požadované výpočetní vstupní veličiny na snesitelné úrovni. Tato možnost použití tak malého počtu uzlů činila *GLIMPS* velmi rychlým nástrojem. Ale použití pouze velmi mála uzlů s sebou přináší i negativní dopad na přesnost řešení. *GLIMPS* požaduje ale k tomu, aby udělal soustavu rovnic řešitelnou menší předpoklady a zjednodušení pro řídicí rovnice.

Sage

Sage byl vyvinutý Gedeonem z programu *GLIMPS*. Gedeon popsal výpočtové jádro *Sage* v matematickém modelu Stirlingova procesu jako v podstatě *GLIMPS* kód s několika málo změnami. Pouze grafické uživatelské rozhraní a cesta vedoucí k vygenerování soustavy rovnic byly nové. Modely byly nyní konstruované tažením ikon představujících předdeklarované modely součástí na pracovní ploše grafického uživatelského rozhraní. Přenosové kanály hmoty a cesty vedení tepel mezi součástmi byly pak ustanoveny kliknutími myši v uživatelských rozhraních. Grafické uživatelské rozhraní umožní uživatelům tvorbu nekonečných permutací možných strojů přidáváním nebo odstraněním součástí a spojováním součástí různým způsobem.

Sage je pravděpodobně nejlepší (a zároveň jediný) komerčně dostupný nástroj pro simulace třetího řádu Stirlingova motoru, pulse tube (kryogenní chlazení), a podobných strojů. Protože *Sage* je drahý komerční software, jsou o něm pouze omezeně dostupné informace. *Sage* má velmi působivé uživatelské rozhraní a zdá se že uživatelé budou potřebovat pouze malou zkušenost k tomu, aby modifikovali modely a mohli vykonávat simulace. Grafické uživatelské rozhraní programu *Sage* dovoluje vysoce složité modely zkonstruovat relativně jednoduše. Proces řešení je poměrně robustní, ale *Sage* je výpočtově velmi intenzivní pokud jsou požadována přesná řešení. Program má velké požadavky na paměť a CPU, obzvláště pokud jsou kladeny vysoké nároky na počty prostorových a časových uzlů. Převážná část zpracovacího času je strávena tvorbou rozptýlené dekompozice jakobiánu pro velmi velkou globálně předpokládanou soustavu rovnic, která vyplývá z požadavku mít mnoho časových a prostorových uzlů v modelu.

Metoda konečných rozdílů v *Sage* je formulovaná tak, že uzly v dočasných diskretizacích odstraní harmonické složky postupně vyšších řádů. Dva uzly jsou požadované k

tomu, aby byla přidána jedna harmonická složka, to jest kosinus s amplitudou i fázovým posunutím na frekvenci která je násobkem pracovního kmitočtu stroje. Takže k tomu, aby jsme dostali například prvních 7 harmonických složek je zapotřebí 14 časových uzlů. Obvykle při pohledu na harmonickou řadu pro individuální proměnné v řešeních převládá několik prvních harmonických složek kmitů.

7.5 Analýzy čtvrtého řádu, 2D a 3D CFD modelace

7.5.1 CFD modelování v NASA (CAST, CFD-ACE+)

CFD modelace Stirlingova motoru se začaly objevovat koncem 90. let minulého století. Roku 1989 přišel Gedeon s kódem MANIFEST (což je zkratka Manifold and Estimate - potrubí a výpočet), kterým modeloval proudění plynu v regenerátoru Stirlingova motoru na supervýkonném počítači zvaném Cray. Ibrahim, Tew a Dudenhoefer začali v roce 1989 s modelací tepelného výměníku 2D a v roce 1990 oznámili použití jejich kódu k modelaci komponent na NASA's Space Power Research Engine. Ibrahim vyvinul 2D CFD kód nazvaný CAST, který modeloval součásti stirlingova motoru a zmínil se o simulaci s využitím komerčního CFD balíčku CFD-ACE+. V roce 2001 Ibrahim popsal, jakým způsobem lze CAST využít k tvorbě empirických metod pro předpovědi přechodů mezi laminárním a turbulentním prouděním ve Stirlingových strojích. Tuto metodu nyní používá Sage. NASA dospěla ke kompletnímu 2D CFD modelu Stirlingova motoru v roce 2003. Model byl vyvinut na Clevelandské státní universitě v rámci grantu poskytnutého NASA pro využívání balíčku CFD-ACE+. V řešeních, kde nebylo dosaženo ustáleného stavu, byly v proudění pozorovány takové úkazy jako tok různými směry v paralelních trubicích tepelných výměníků. Takové jevy by mohly být velmi významnými mechanismy vzniku ztrát u periodicky ustálených stavů skutečného motoru. A tyto jevy nemohou být odhaleny přísným 1D modelem třetího řádu bez paralelních proudových cest.

Tew upozorňuje na několik problémů CFD modelace Stirlingova motoru. Problémy zahrnují potřebu simulovat mnoho cyklů za účelem dosažení periodicky ustáleného řešení pro teplotní profil regenerátoru. Pro tyto simulace používal NASA 32 procesorový stroj.

7.5.2 3D CFD modelování ve Fluentu od Mahkamova

Mahkamov a Ingham zveřejnili v roce 2000 používání 2D CFD (numerická mechanika proudění) modelu kompletního Stirlingova motoru s použitím vlastního CFD kódu. V řešení 2D CFD modelů bylo pozorované, že teplota plynu uvnitř prostoru válců studovaného 1 kW Stirlingova motoru významně kolísá a to v obou směrech, jak radiálně tak i axiálně. V roce 2003 přišel Mahkamov s oznámením, že použil 3D CFD modelaci u dvou různých Stirlingových motorů. Využil komerčního CFD balíku *Fluent*. Zdůrazňuje, že výsledky z 3D CFD kalkulací mohou být použity pro rozpoznání odporů proudění, které vedou k významným ztrátám. Ukázal například, že u jím testovaných motorů je píst částečně blokován nedostatečným průtokem spojovací trubicí. Chow and Mahkamov v roce 2005 doložili že úspěšně dokončili projekt na 3D CFD simulaci společného systému hořáku a Stirlingova motoru. Mahkamov úspěšně simuloval cykly 64 motorů a získal pouze pomalou změnu řešení. Výsledky ukázaly , že rozdělení teploty na hlavě ohřívače Stirlingova motoru ve spalovací komoře bylo nerovnoměrné.

8 DNEŠNÍ A BUDOUCÍ VYUŽITÍ STIRLINGOVA STROJE

Když pomineme dnešní oblíbenost Stirlingových motorů ve formě nejrůznějších zmenšenin a modelů, zbývá jejich použití jako skutečné motory, Stirlingovy chladicí stroje a Stirlingova tepelná čerpadla. Jak už bylo zmíněno, jedná se o stroje s vnějším přívodem tepla. Jako zdroj tohoto tepla se nabízí použití nejrozmanitějších látek. Provoz je možný například díky biogenním palivům jako dřeva, slámy a různých rostlinných peletek, samozřejmě fosilních paliv, ale i díky solární energii. Pro Stirlingův motor mluví i určitá jednoduchost konstrukce vlastního motoru. Není třeba žádný ventilový rozvod ani složité vstřikovací soustavy. Motor nevyžaduje v dnešní ekologické době katalyzátor a není nutné například ani měnit olej. Abych pouze nechválil, musím se zmínit i o nedostacích, kterými jsou především problematická dynamika regulace. Negativní je rozhodně i vysoká hmotnost na jednotku výkonu, z čehož plyne i nevhodnost pro mobilní použití.

Přes tyto problémy si motor našel své použití i v dnešní době. Používá se jako tzv. mikro-KWK, Obr. 8.1 (Kraft – Wärme – Kopplung = kombinovaná výroba tepla a elektřiny) pro rodinné domy cca. 1-40 kW elektrických, KWK na biogenní/organická paliva ale i na výrobu elektřiny ze sluneční energie. Zajímavostí je určitě i fakt, že Švédské námořnictvo vybavuje nenukleární ponorky mimo hlavního motoru i Stirlingovým pohonem. Firma Kockums Švédsko, dceřiná společnost HDW staví lodě a největší nenukleární ponorky světa. Stirlingův motor se také používá jako chladicí stroj ke chlazení infračervených senzorů v termokamerách nebo například ke zkapalňování vzduchu. NASA vyvíjí Stirlingův generátor k vesmírným misím například na Mars.

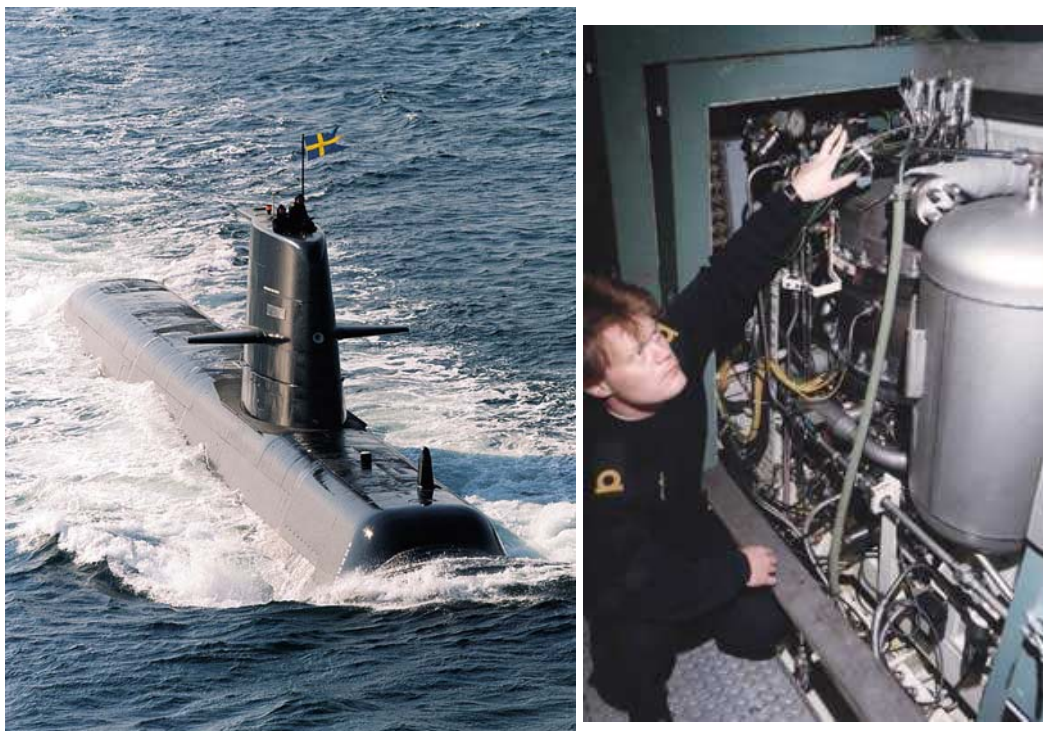
Důležitým průkopníkem Stirlingova motoru byla firma Philips, která se od roku 1938 do roku 1978 intenzivně zabývala vývojem stirlingova motoru přerušovaně 60 inženýry a vědci. Philips zamýšlel rozšíření elektronkových rádií i do Afriky a Asie. Roku 1947 díky zavedení tranzistorů drasticky klesla spotřeba elektrické energie a tak se vývoj stirlingova motoru odsunul k méně preferovaným zájmům. Philips ale přesto s vývojem pokračoval a dosáhl pozoruhodných výsledků.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Dnešní a budoucí využití stirlingova stroje



Obr. 8.1 mikro-KWK firmy SOLO

zdroj: http://www.energytech.at/kwk/fotos/projekte_mainova.jpg

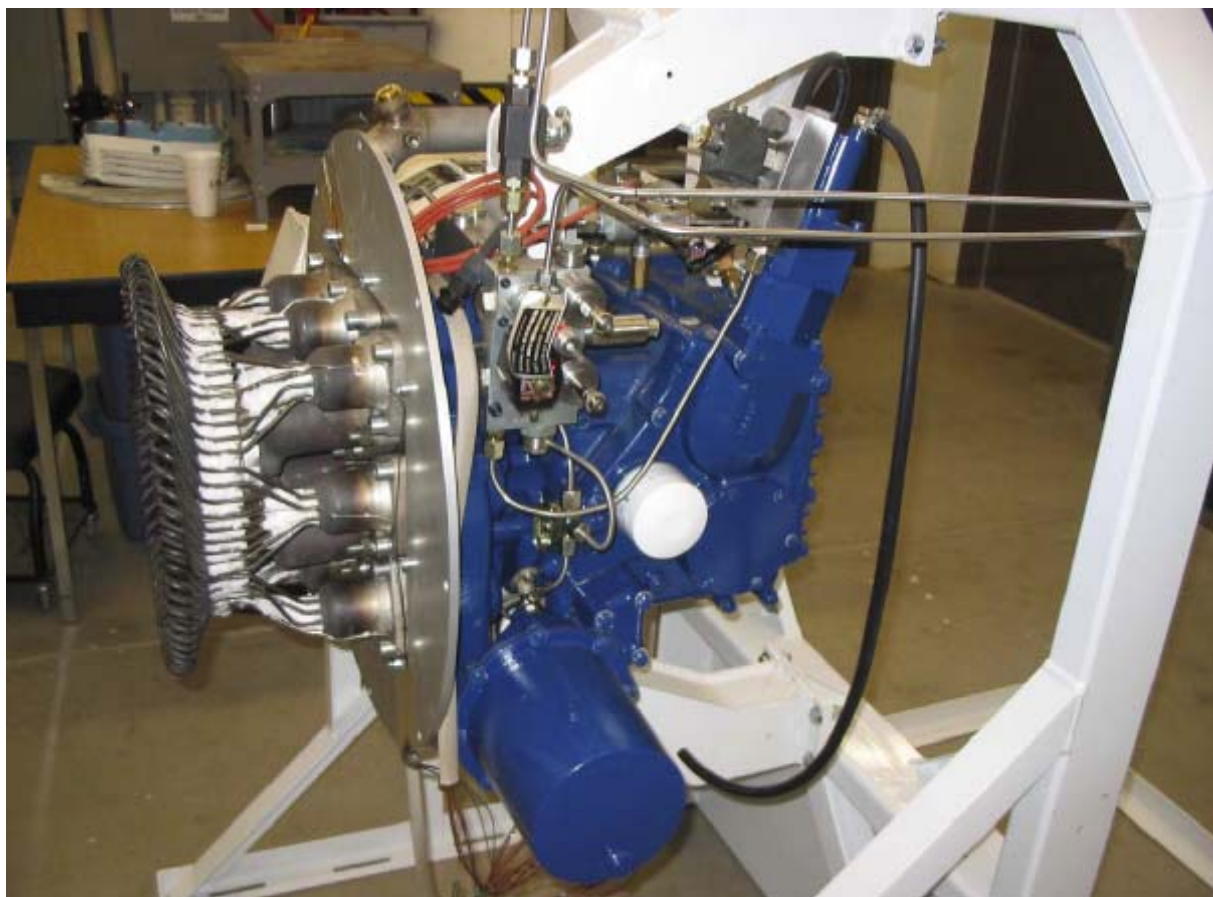


Obr. 8.2 Ponorka třídy Gotland firmy Kockums

zdroj: <http://www.kockums.se/submarines/gotland.html>

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Dnešní a budoucí využití stirlingova stroje

Dalším projektem je Dish Stirling Obr. 8.3, který umí dodat 9kW elektrických. Jedná se o Stirlingův motor „vytápěný“ solární energií. Průměr zrcadla je 8,5 metrů. Jedná se o nejefektivnější technologii výroby elektrické energie ze slunečního záření, s účinností 20 – 30 %. V blízkosti České republiky se takový stroj nachází v německém Würzburgu. Pohonnou jednotku vyrábí několik firem mezi nimiž nechybí například ani Bosch.



Obr. 8.3 Stirlingův motor v projektu Dish Stirling

zdroj: http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/liden_ses_dish_stirling.pdf

Dish Stirling je i součástí veleprojektu solární elektrárny v USA. Southern Kalifornia Edison (SCE), jeden z největších výrobců elektrické energie v USA a Stirling Energy Systems se dohodli na stavbě Dish-Stirling elektrárny s výkonem 500 MW 110 km

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Dnešní a budoucí využití stirlingova stroje

severovýchodně od Los Angeles v Mohavské poušti. Ta by měla být v provozu od roku 2011 . Zrcadla zde koncentrují sluneční energii na jeden výměník Stirlingova motoru, druhý výměník předává nevyužitou tepelnou energii atmosféře. Stirlingův motor pohání elektrogenerátor. Dvacet tisíc těchto jednotek zabere plochu 19 km². Účinnost konverze sluneční energie na elektrickou je větší než účinnost fotovoltaiických článků bez koncentrátorů slunečního záření (a srovnatelná s účinností fotovoltaiických článků s koncentrátory). Pro Kalifornii je to jeden z reálných alternativních zdrojů energie.



Obr. 8.4 Elektrárna v Mohavské poušti

zdroj: <http://internationalrivers.org/en/node/2613>

Další firmy pohybující se ve vývoji a výrobě Stirlingova motoru jsou například Sunmachine, Sunwell, Weber-solartechnik, Whispertech (tato novozélandská firma uzavřela s firmou Powergen, dceřinou společností EON – UK velkou zakázku na dodávku více než 80.0000 Stirling – BHKW jednotek – což je vlastně 4-válcový dvojčinný Stirlingův motor

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Stirlingův motor
Dnešní a budoucí využití stirlingova stroje

s 1,2 kW elektrickými, kdy náklady na vývoj byly více než 21 miliónů EUR a prodejní cena jedné jednotky se pohybuje kolem 4500,- EUR).

Na závěr se bych ještě rád zmínil o velmi zajímavém modelu Stirlingova motoru. Dle autora se nazývá Senfův motor a pracuje již při teplotním rozdílu 0,5 K.



Obr. 8.5 Senfův motor

zdroj: http://badhardware.blogspot.com/2008_05_01_archive.html

9 ZÁVĚR

V této diplomové práci jsem se pokusil proniknout do termomechanických zákonitostí Stirlingova motoru. Rozebral jsem Schmithovu teorii, problematiku tepelné výměny vně i uvnitř motoru a pokusil se vytvořit algoritmus výpočtu Stirlingova cyklu v případě děje adiabatického. Pro ověření správnosti uvedených relací by bylo vhodné mít možnost změřit hodnoty u reálného motoru a porovnat výpočet s naměřenými hodnotami. Tuto možnost jsem bohužel neměl.

V průběhu vypracovávání této práce jsem bohužel zjistil, že v České republice není postačující literatura a bylo ji proto nutné objednávat pomocí MVS z knihoven po celém světě, případně osobní výpůjčky na TU Wien. S touto skutečností je rovněž spojen fakt, že prakticky veškerá literatura je psaná anglicky, případně německy. Významným zdrojem informací je též internet. Rozhodně je škoda, že se u nás Stirlingovu motoru nevěnujeme více.

Přestože by se zdálo že vývoj zaspal dobu, není tomu tak. Například firma Philips se touto problematikou zajímala dlouhá léta. Stirlingův motor má rozhodně budoucnost, neboť je nutné myslet především na životní prostředí a v tomto ohledu je Stirling velice šetrný.

Považuji za zajímavé pokračovat například dalšími diplomovými pracemi nebo ještě lépe prací disertační v dalším vývoji analýzy, třeba i pomocí CFD.

Domnívám se, že jsem všechny vytyčené cíle splnil.

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1 .] ALTMAN, Alan. SNAPpro Stirling Numerical Analysis Program. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. University of Zagreb, Saettle (USA); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_23.pdf.
- [2 .] ANDERSEN, Stig Kildegård.< ska@mek.dtu.dk > *Numerical Simulation of Cyclic Thermodynamic Processes*. [pdf dokument]. Lyngby: Technical University of Denmark, Dept. of Mech. Eng., Energy Eng. Section, March, 2006 [cit. 31. 3. 2007]. Dostupný z: < <http://orbit.dtu.dk/getResource?recordId=195886&objectId=1&versionId=1> >.
- [3 .] BERND, Thomas. *Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas* [online]. [2006] [cit. 2007-10-31]. Dostupný z WWW: < http://userserv.fh-reutlingen.de/~thomas/prosa_direct.html >.
- [4 .] BERNDT, Thomas. Calibration routine for Stirling engine simulation program PROSA and comparison of results to experimental data. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. Mechanical Engineering, Reutlingen University, Reutlingen (Germany); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_5.pdf.
- [5 .] BERNDT, Thomas. New Function for Evaluation of Regenerator Temperature Swing Loss. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. Mechanical Engineering, Reutlingen University, Reutlingen (Germany); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_4.pdf.
- [6 .] BOER, P. C. T. de. Basic Limitations on the Performance of Stirling Engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2007, vol. 129, issue.1, pp. 104-113. ISSN 0742-4795.
- [7 .] BUSHENDORF, Jeffrey D..< brey@uwstout.edu > Low Temperature Differential Stirling Engines. [pdf dokument]. *Journal of Student Research*, University of Wisconsin Stout, April, 2002 [cit. 1. 4. 2007]. Dostupný z: < <http://www.uwstout.edu/rs/uwsjsr/bushendorf.pdf> >.
- [8 .] CASTORPH, Dietram; KOLLERA, Max; WAAS, Peter. < dietram.castorph@fhm.edu > *Technische Thermodynamik*. [pdf dokument]. München: Fachhochschule München, Juli 1999 [cit. 24. 10. 2006]. Dostupný z: < <http://www.fh-muenchen.de/fb03/labore/waas/skripten/> >.
- [9 .] CIPRI, K; LUCENTINI, Marco; KOLIN, Ivo et al. Stroke volume depending upon working temperature. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM].

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stirlingův motor

Seznam použité literatury

- University of Rome (Rome); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007].
Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_26.pdf.
- [10 .] COLMANT, Th.; DELEDICQUE, V.; SQUILBIN, O. et al. Quasi steady flow modelling of a small stirling engine: comparison between calculated and measured instantaneous temperatures. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. Unité TERM, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve (Belgique); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_20.pdf.
- [11 .] DARLINGTON, Roy; STRONG, Keith. *Stirling and Hot Air Engines, Designing and Building Experimental Model Stirling Engines*. 1st ed. Wiltshire: Crowood Press Ltd., 2005. 240 p. ISBN 1-86126-688-X.
- [12 .] DYSON, Rodger W.; WILSON, Scott D.; TEW, Roy C.. < Rodger.W.Dyson@grc.nasa.gov > *Review of Computational Stirling Analysis Methods*. [pdf dokument]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, October, 2004 [cit. 31. 3. 2007]. Dostupný z: < <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2004/TM-2004-213300.pdf> >.
- [13 .] DYSON, Rodger W.; WILSON, Scott D.; TEW, Roy C. et al. < Rodger.W.Dyson@grc.nasa.gov > *Fast Whole-Engine Stirling Analysis*. [pdf dokument]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, October, 2005 [cit. 31. 3. 2007]. Dostupný z: < <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2005/TM-2005-213960.pdf> >.
- [14 .] ELSNER, Norbert, et al. *Grundlagen der Technischen Thermodynamik*. 6. bearb. u. erw. Auflage. Berlin : Akademie Verlag, 1985. 641 s., 4 tabulky. Bestellnummer 7623758.
- [15 .] FINKELSTEIN, Theodor; ORGAN, Allan J. *Air Engines, the History, Science and Reality of the Perfect Engine*. 1st ed. New York: Professional Engineering Publishing Ltd., 2001. 261 p. ISBN 0-7918-0171-3.
- [16 .] GROTH, Klaus; HAGE, Friedhelm; RINNE, Gerhart. *Verbrennungskraftmaschinen*. 1.Aufl. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1994. 160 s. ISBN 3-528-06588-5.
- [17 .] HAKENESCH, Peter R. < peter.hakenesch@nexgo.de > *Technische Thermodynamik*. [pdf dokument]. München: Fachhochschule München, März 2002 [cit. 19. 3. 2007]. Dostupný z: < http://www.lrz-muenchen.de/~hakenesch/skript_thermo/skript_thermo.pdf >.
- [18 .] HAUSEN, H. *Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom*. 2. Neubearbeitete Auflage. Berlin: Springer –Verlag, 1976. 429 s. ISBN 3540075526.
- [19 .] HIRATA, Koichi.< khirata@gem.bekkoame.ne.jp > *Schmidt theory for Stirling Engines*. [pdf dokument]. Tokyo: National Maritime Research Institute, January, 1997 [cit. 31. 3. 2007]. Dostupný z: < http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/schmidt/schmidt_e.pdf >.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stirlingův motor

Seznam použité literatury

- [20 .] HIRATA, Koichi; IWAMOTO, Shoichi. < khirata@gem.bekkoame.ne.jp > *Study on Design and Performance Prediction Methods for Miniaturized Stirling Engine*. [pdf dokument]. Tokyo: Society of Automotive Engineers, Inc., September, 1999 [cit. 31. 3. 2007]. Dostupný z: < <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/list/ecoboy/99setc42.pdf> >.
- [21 .] CHEN, Dejin. *Untersuchungen zur Optimierung eines solaren Niedertemperatur-Stirlingmotors*. [pdf dokument]. TU Dresden, Dresden, November, 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Dostupný z: < http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=974523542&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=974523542.pdf >.
- [22 .] INCROPERA, Frank P., DEWITT, David P. *Introduction to Heat Transfer*. 4th edition. USA : John Willey & Sons, Inc., 2002. 892 s. ISBN 0471386499.
- [23 .] IWAMOTO, Shoichi; HIRATA, Koichi; TODA, Fujio.< khirata@gem.bekkoame.ne.jp > *Performance of Stirling Engines(Arranging Method of Experimental Results and Performance Prediction Method)*. [pdf dokument]. Tokyo: Japan Society of Mechanical Engineers, February, 2001 [cit. 31. 3. 2007]. Dostupný z: < http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/list/ecoboy/jsmepaper_eng2001.pdf >.
- [24 .] IWAMOTO, Shoichi; TODA, Fujio; HIRATA, Koichi.< ftoda@mech.saitama-u.ac.jp > *Comparison of low and high temperature differential stirling engine*. [pdf dokument]. Saitama: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama University, 1997 [cit. 31. 3. 2007]. Dostupný z: < <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/list/ecoboy/lowtemp.pdf> >.
- [25 .] KOLIN, Ivo. *Stirling motor, history – theory – practice*. 1st ed. Dubrovnik: Zagreb University Publications Ltd., 1991. 288 p.
- [26 .] KOLIN, Ivo. Thermodynamical meaning of mathematical analysis for wire mesh regenerator. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. University of Zagreb, Zagreb (Croatia); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_27.pdf.
- [27 .] KOLIN, Ivo; KOŠČAK – KOLIN, S.; NASO, Vincenzo et al. Crucial parametres for wire mesh regenerator. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. University of Zagreb, Zagreb (Croatia); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_6.pdf.
- [28 .] KŘÍŽ, Rudolf. *Strojnické tabulky II. – pohony, hřídele, ozubené převody, řetězové a řemenové převody*. 1. vyd. Ostrava: Montanex, 1997. 213 s. ISBN 80-85780-51-8.
- [29 .] LEIVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Albra, 2003. 865 s. ISBN 80-86490-74-2.
- [30 .] LUNDHOLM, G. . < Gunnar.Lundholm@vok.lth.se > *The experimental V4X Stirling engine – a pioneering development*. [pdf dokument]. Lund - Sweden: Department of Heat & Power Engineering, Lund University, October, 2000 [cit. 3. 9. 2007]. Dostupný z: < http://www.vok.lth.se/~ce/Research/stirling/papers/ST_TA2_1.pdf >.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stirlingův motor

Seznam použité literatury

- [31 .] MARTINI, William R. *Stirling Engine Design Manual*. 2nd ed. Honolulu: University Press of the Pacific, 2004. 409 p. ISBN 1-4102-1604-7.
- [32 .] ORGAN, Alan J. *Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine*. 1st ed. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1992. 415 p. ISBN 0-521-41363-X.
- [33 .] ORGAN, Allan J. *The Regenerator and the Stirling Engine*. 1st edition. Great Britain : J. W. Arrowsmith Ltd., 1997. 623 s. ISBN 1860580106.
- [34 .] PARADISSIS, Emmanuel A.. A new power control method for beta type stirling engines. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. The Technical Chamber of Greece, Athens (Greece); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_12.pdf.
- [35 .] PAVELEK, Milan et al. *Termomechanika*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 286 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [36 .] PTÁČEK, Luděk et al. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
- [37 .] REKTORYS, Karel et al. *Přehled užití matematiky*. 6. vyd. Praha: Nakladatelství Prometheus, 1995. 1594 s. ISBN 80-85849-72-0.
- [38 .] Robert Stirling : *Significant Scots* [online]. [2002] [cit. 3. 9. 2007]. Dostupný z WWW: < http://www.electricscotland.com/history/men/stirling_robert.htm >.
- [39 .] SENF, James R. Extended Mechanical Efficiency Theorems for Engines and Heat Pumps. *International Journal of Energy Research* 2000, vol. 24, issue.8, pp. 679 - 693. ISSN 0363-907X.
- [40 .] SENF, James R. *Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engines*. 1st ed. River Falls: Moriya Press, 1996. 88 p. ISBN 0-9652455-1-9.
- [41 .] SENF, James R. Optimum Stirling engine geometry. *International Journal of Energy Research* 2002, vol. 26, issue.12, pp. 1087-1101. ISSN 0363-907X.
- [42 .] SENF, James R. Theoretical limits on the performance of Stirling engines. *International Journal of Energy Research* 1998, vol. 22, no.11, pp. 991-1000. ISSN 0363-907X.
- [43 .] SENFT, James. Stirling engines with force linear mechanisms. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. University of Wisconsin, River Falls (USA); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_22.pdf.
- [44 .] SCHABER, Karlheinz. < schaber@ttk.uni-karlsruhe.de > *Technische Thermodynamik für Studierende des Chemieingenieurwesens, der Verfahrenstechnik und des*

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stirlingův motor

Seznam použité literatury

- Bioingenieurwesens, Technische Thermodynamik II.* [pdf dokument]. Karlsruhe: Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik der Universität Karlsruhe, Juli 2005 [cit. 19. 3. 2007]. Dostupný z: < <http://www.ttk.uni-karlsruhe.de/download/thermoII.pdf> >.
- [45 .] SCHIEFELBEIN, Kai; SIEGEL, André; WINNESBERG, Björn. *Stirling – Maschinen – Technik, Grundlagen, Konzepte und Chancen.* 1.Aufl. Heidelberg: Müller, 1996. 462 s. ISBN 3-7880-7583-X.
- [46 .] SCHLEDER, Frank. *Stirlingmotoren, Thermodynamische Grundlagen, Kreisprozessrechnung und Niedertemperaturmotoren.* 2.Aufl. Würzburg: Vogel, 2002. 139 s. ISBN 3-8023-1900-7.
- [47 .] SICRE, Benoit; HENCKES, Laurent. Environmental impact and economical potential of small – scale Stirling – CHP units for distributed heat and power supply to residential buildings. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg (Germany); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_28.pdf.
- [48 .] STEFANOVSKIY, Alexei B. Similarity – based and efficiencies – oriented assessment of the simplest stirling engine heater basic parameters. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. Division of Tractors and Automobiles, Tavriya State Agritechnical Academy, City of Melitopol (Ukraine); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_1.pdf.
- [49 .] TEDOM. *Historie Stirlingova motoru* [online]. [2004] [cit. 3.9.2007]. Dostupný z WWW: < <http://www.stirling.cz/tedom-stirlinguv-motor-historie.html> >.
- [50 .] TEW, Roy C., Jr.. < Roy.C.Tew@grc.nasa.gov > *Progress of Stirling Cycle Analysis and Loss Mechanism Characterization.* [pdf dokument]. Dearborn – Michigan: National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Center, October, 1986 [cit. 31. 3. 2007]. Dostupný z: < http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19870003926_1987003926.pdf >.
- [51 .] URIELI, Izrael; BERCHOWITZ, David M. *Stirling Cycle Engine Analysis.* 1st ed. Bristol: Adam Hilger Ltd., 1984. 256 p. ISBN 0-85274-435-8.
- [52 .] VAN ARSDELL, Brent H. *Around the World by Stirling Engine, Environmentally friendly Stirling engines, their applications worldwide and into space.* 1st ed. San Diego: American Stirling Company, 2003. 125 p. ISBN 0-9713918-0-7.
- [53 .] VIEBACH, Dieter. *Der Stirlingmotor, einfach erklärt und leicht gebaut.* 3. Aufl. Staufen bei Freiburg: Ökobuch, 2001. 104 s. ISBN 3-922964-70-2.
- [54 .] VDI - Wärmeatlas : *Berechnungsblätter für den Wärmeübergang.* 3. Auflage. Düsseldorf : VDI - Verlag GmbH, 1977. 492 s. ISBN 318400373.
- [55 .] WALKER, Graham. *Stirling Engines.* 1st ed. New York: Oxford University Press, 1980. 532 p. ISBN 0-19-856209-8.

- [56 .] WALKER, Graham. *Stirling-cycle machines*. 1st ed. Oxford: Clarendon Press, 1973. 156 p. ISBN 0-19-856112-1.
- [57 .] WEI, Dong; NASO, Vincenzo; LUCENTINI, M.. Development of Thermal and hydraulic Parametric Resonance Model of Stirling Engine. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. Department of Power Engineering, Southeast University, Nanjing (China); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_29.pdf.
- [58 .] WERDICH, Martin; Kübler, Kuno. *Stirling-Maschinen, Grundlagen – Technik – Anwendungen*. 9. Aufl. Staufen bei Freiburg: Ökobuch, 1998. 174 s. ISBN 3-922964-96-6.
- [59 .] WILSON, Scott D.; DYSON, Rodger W.; TEW, Roy C. et al < Scott.D.Wilson@grc.nasa.gov > *Experimental and Computational Analysis of Unidirectional Flow Through Stirling Engine Heater Head*. [pdf dokument]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, April, 2006 [cit. 31. 3. 2007]. Dostupný z: < <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2006/TM-2006-214246.pdf> >.
- [60 .] YOUNGMIN, Kim; DONGKIL, Shin; JANGHEE, Lee et al. Noble Stirling Engine Employing Scroll Mechanism. *11th International Stirling Engine Conference 2003* [CD-ROM]. Korea Institute of Machinery & Materials, Changwon (Korea); Rome: University of Rome 2003 [cit. 1. 4. 2007]. Adresář: /Papers/Topic_01/ST_TA1_11.pdf.