



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

MĚŘENÍ STIRLINGOVA MOTORU MEASUREMENT OF STIRLING ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RICHARD VODIČKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK KAPLAN, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Richard Vodička

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Měření Stirlingova motoru

v anglickém jazyce:

Measurement of Stirling Engine

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a sestavení měřicího řetězce včetně praktické metodiky pro indikaci tlaku ve válci Stirlingova motoru.

Cíle diplomové práce:

Návrh měřicího řetězce včetně praktické metodiky pro měření tlaku ve válci školního modelu Stirlingova motoru v závislosti na úhlu otočení klikového hřídele.

Měření školního modelu Stirlingova motoru, sestavení p-V diagramu a jeho porovnání s p-V diagramem ideálního Stirlingova cyklu a p-V diagramem dle Schmidovy teorie.

Seznam odborné literatury:

Walker, G.: Stirling Engine

Organ, A. J.: The regenerator and Stirling Engine

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 26.11.2012



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan



ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je provést měření daného Stirlingova motoru modifikace γ , kterým se již v minulosti zabýval Ing. Michal Kovář ve své diplomové práci „Indikace tlaku ve válcích Stirlingova motoru“ a vytvořit tak možnou metodiku pro výukové účely.

K laboratornímu měření motoru, jehož vnitřní geometrie byla pozměněna pro ověření jeho funkce, jsem použil software LabVIEW 2010 a byla provedena vyhodnocovací měření dat porovnávána s předpoklady pro ideální cyklus Stirlingova motoru a Schmidovu teorii.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stirlingův motor, Schmidtova teorie, měření tlaku, snímání polohy klikové hřídele.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is carrying-out measurement of Stirling engine, γ version, which were studied by engineer Michal Kovar in his thesis „The Pressure Indication in The Pistons of Stirling Engine“ in recent time and, so create possible principles for teaching purposes.

For laboratory engine measurements, which internal geometry was changed for the testing of its functions was used software LabVIEW 2010. Accomplished measurements were compared with prerequisites for ideal cycle of Stirling engine and Schmidt theory.

KEYWORDS

Stirling engine, Schmidt theory, pressure measurement, detection of crankshaft position.



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VODIČKA, R. *Měření Stirlingova motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Kaplana, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2013

.....

Bc. Richard Vodička



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Kaplanovi, CSc. za jeho nevšední, obětavý přístup a odbornou podporu při konzultacích. Dále bych rád poděkoval svým rodičům, přátelům a blízkým za podporu při studiu.



OBSAH

Úvod	10
1 Obecný přehled	11
1.1 Reverend Robert Stirling	11
1.1.1 Stirlingův patent	11
1.2 Profesor Gustav Schmidt	13
1.3 Historický vývoj	13
1.4 Současné využití Stirlingova motoru	15
2 Stirlingův motor	18
2.1 Princip funkce motoru	18
2.2 Základní konstrukční provedení	18
2.2.1 Zdroj tepla	18
2.2.2 Ohřívač – „horký“ prostor	18
2.2.3 Regenerátor	18
2.2.4 Chladič – „studený“ prostor	19
2.2.5 Přemísťovací píst	19
2.2.6 Pracovní plyn	19
2.3 Základní modifikace Stirlingova motoru	20
2.4 Ideální Stirlingův cyklus	21
3 Laboratorní model Stirlingova motoru	23
3.1 Konstrukce laboratorního modelu	23
3.2 Hlavní rozměry motoru	24
3.3 Základní výpočty objemových prvků	25
3.4 Ideální Stirlingův cyklus	27
3.4.1 Vstupní parametry	27
3.4.2 Fáze ideálního Stirlingova cyklu	28
3.4.3 Práce ideálního Stirlingova cyklu	30
3.5 Schmidtova teorie	31
3.5.1 Objem vnitřního prostoru motoru	31
3.5.2 Teplota pracovního plynu	32
3.5.3 Tlak pracovního plynu	32
4 Laboratorní měřicí přístroje	33
4.1 Hardware	33
4.1.1 Měřicí karta National Instruments	33
4.1.2 Senzor tlaku	34
4.1.3 Optoelektrický snímač polohy	35
4.2 Pomocná měřicí zařízení	36
4.2.1 Topné tělísko	36
4.2.2 Triakový regulátor výkonu	36
4.2.3 Měření teploty	36



4.3	Schéma zapojení	36
4.4	Software	37
4.4.1	Snímání signálu ze senzoru tlaku	37
4.4.2	Snímání signálu optoelektrickým snímačem polohy	38
5	Měření.....	39
5.1	Postup měření	39
5.2	Závislost tlaku na pootočení klikové hřídele	41
5.3	Průběh teplot	42
5.4	Množství pracovního plynu v motoru	43
5.5	Průběh otáček motoru	45
5.5.1	Závislost otáček na teplotě plynu	45
5.5.2	Průběh úhlové rychlosti v závislosti na pootočení hřídele	45
5.6	Závislost tlaku na objemu pracovního plynu	46
5.6.1	Porovnání p-V diagramů jednotlivých měření	51
5.7	Účinnost Stirlingova motoru	52
5.7.1	Účinnost Schmidtova cyklu vztažená na ideální cyklus	54
5.7.2	Účinnost reálného měřeného cyklu vztažená na ideální cyklus	54
6	Diference ideálního a měřeného cyklu	55
6.1	Pracovní médium	55
6.2	Klikový mechanismus.....	55
6.3	Vliv mrtvých objemů	55
6.4	Vliv nedokonalé výměny tepla ve „studené“ a „horké“ části válce přemístovacího pístu	56
6.5	Vliv regenerátoru	56
6.6	Vliv zdroje tepelné energie	56
7	Krouticí momenty.....	57
7.1	Síly působící na hřídel motoru	57
7.2	Úhlová rychlost a úhlové zrychlení.....	58
	Závěr	60
	Literatura	61
	Seznam použitých zkratk a symbolů	63



ÚVOD

Již druhým rokem pracuji v týmu společnosti ZLINER s.r.o., která se více než 40 let zabývá službami v oblasti autobusové dopravy. V rámci vývoje trhu osobní dopravy poskytuje služby od původního zaměření na opravy autobusů až po další činnosti, jako prodej náhradních dílů, servis vozidel, jejich plynofikaci, tedy nabízí svým klientům komplexní služby v oblasti autobusové a trolejbusové dopravy. Společnost je schopna konstrukčně navrhovat a realizovat úpravy vozidel tak, aby plnila mnohdy náročné legislativní podmínky i rozmanitá přání zákazníka.

V poslední době, následkem ekonomické krize, hospodařením s dotacemi na opravy vozidel městských dopravních podniků, zvyšováním nároků zákazníků a jejich tlakem získat co nejlepší možný produkt za nejnižší možnou cenu, je naše společnost nucena jako jedna z mnoha, zabývat se ve vyšší míře vývojem a inovacemi. Je tedy žádoucí neustále nacházet nové způsoby, jak zákazníka oslovit a zaujmout.

Jedním z inovativních návrhů vedení firmy bylo taktéž zabývat se vývojem konstrukce Stirlingova motoru tak, aby jej bylo možné využít efektivně i v autobusové dopravě. Při volbě tématu mé diplomové práce, jsem možnosti zabývat se Stirlingovým motorem velice rád využil, protože si tak mohu prohloubit své znalosti v rámci problematiky, zjistit principy funkce a chodu tohoto motoru a případně nabitě znalosti využít i ve svém povolání.



1 OBECNÝ PŘEHLED

1.1 REVEREND ROBERT STIRLING



Obr. 1.1 Robert Stirling [3]

Dr. Robert Stirling, narozený 25. října 1790 v Gloag, ve Skotsku pocházel z početné rodiny angažující se do té doby převážně v zemědělství. Jeho dědeček byl známý vynálezce. Otec měl snahu Roberta i jeho sourozence již od raného věku vést k inženýrství, bratr Roberta se později stal stavebním inženýrem.

V letech 1805 – 1808 navštěvoval Robert Stirling univerzitu v Edinburghu, kde studoval matematiku, latinu, řečtinu, logiku a práva. Od roku 1809 studoval teologii na univerzitě v Glasgow, následně, 4. července 1815, na základě přezkoušení presbyteriátem v Dunbartonu získal oprávnění kázat evangelium podložené povolením vydaným 26. března 1816. Od tohoto roku pověřením vévody z Portlandu vykonával svou funkci v Kilmarnocku v Ayrshire, u druhého církevního sboru kostela Laigh Kirk.

I přes své povolání projevoval velký zájem o strojírenství, intenzivně se zabýval zkoumáním pohonu strojů, proto nebylo překvapením, když 27. září 1816 po několikaletém výzkumu zažádal o udělení patentu pro jeho alternativu teplovzdušného motoru. Schválení patentu, jehož zápis se uskutečnil 20. ledna 1817 jej celosvětově proslavilo, s teplovzdušnými motory pracoval celý život. Na jeho počest nesou jeho jméno až po současnost.

Za svého působení v Kilmarnocku Robert Stirling několik let spolupracoval s Thomasem Mortonem, synem výrobce cihel, vyučeným brusičem a kolářem, jehož talent se projevil např. několika inovacemi včetně vylepšeného tkalcovského stavu na koberce. Morton měl podobné zájmy jako Stirling, jejich společným koníčkem byla i astronomie, ve které Stirlinga obeznámil se svými zkušenostmi s výrobou optických čoček.

Součástí Stirlingova života se stala Jean Rankinová, se kterou se následně oženil. Vychovali spolu sedm dětí. Synové Patrick, William, Robert a James se stali železničními inženýry. David se vydal po směru otce a stal se duchovním. Dvě dcery Jane a Agnes obětovaly své zájmy rodině. Robert Stirling, nadaný řečník a vědec, zemřel přirozenou smrtí 6. června 1878 v Galstonu, nedaleko Glasgow. O jeho kvalitách svědčí i úspěchy jeho dětí a v neposlední řadě i zástupy lidí, shromažďující se na jeho kázáních.

1.1.1 STIRLINGŮV PATENT

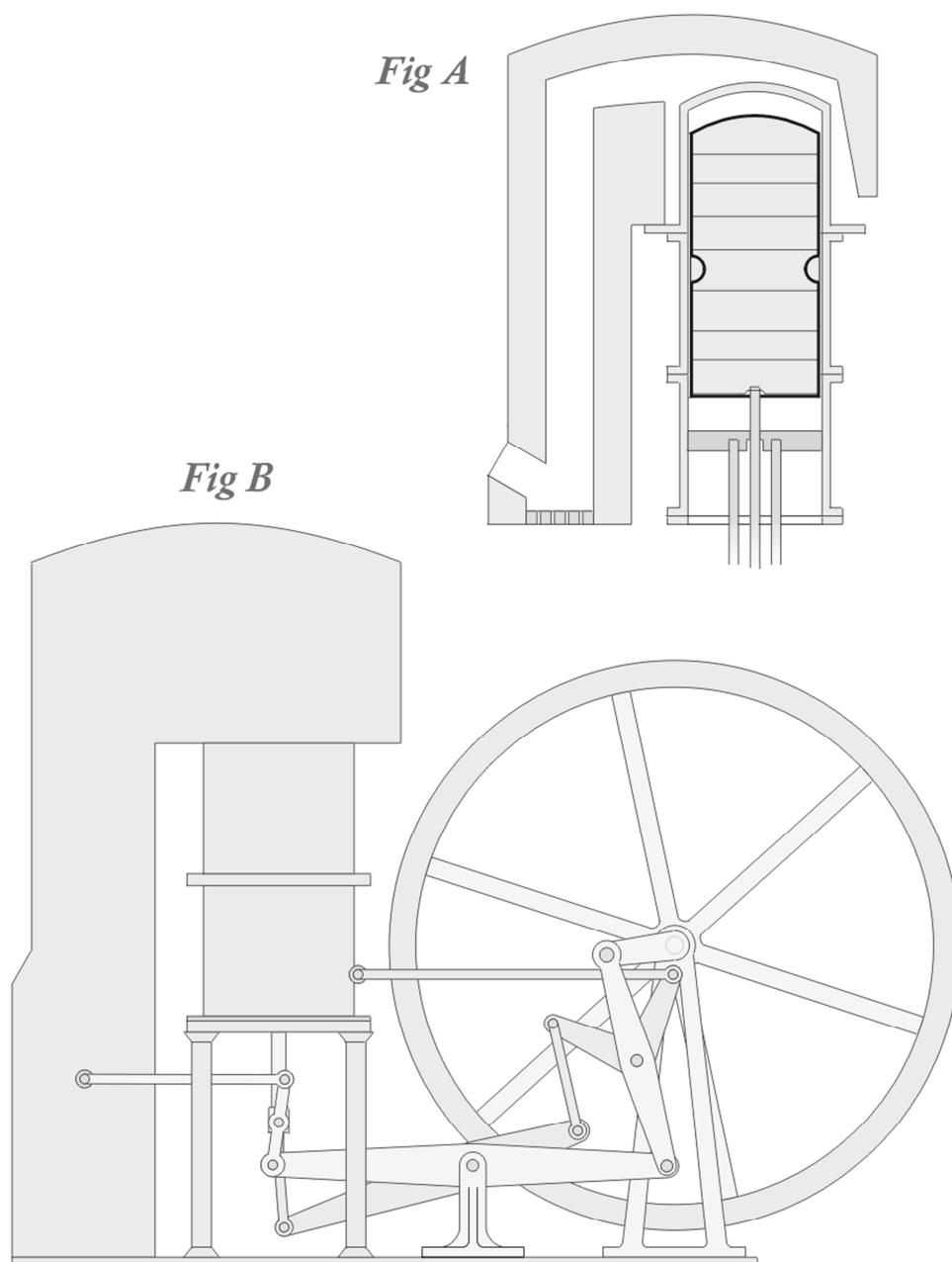
V době, kdy neexistovala teorie tepelných motorů, byly veškeré nové objevy brány vážně, tento patent však dokazuje, že si autor již tehdy plně uvědomoval veškeré nezbytné podmínky pro efektivní přeměnu tepla v mechanickou práci.

Patent, evidovaný pod číslem **GB 4081** byl autorem ručně napsán, jeho součástí jsou i grafické přílohy pro zobrazení autorových myšlenek. Obsah patentové dokumentace se týkal autorova vynálezu, tzv. „tepelného ekonomizéru“. Popisuje v něm také řadu aplikací jeho použití, zmiňuje hnací sílu motoru a uvádí své myšlenky a poznatky.

Motor je navržen pro práci s nižší spotřebou ve srovnání s návrhy konkurenčních parních strojů té doby. Prezentuje všechny prvky toho, co se dnes nazývá Stirlingův cyklický motor, tzn. síla pracovního pístu, přemísťovací píst působící na uzavřené médium mezi



teplým a studeným prostorem jeho válce a také regenerátor umístěný mezi těmito dvěma prostory. Stirling zde uvádí výhody spočívající v použití oleje pro mazání pístu, jenž se nemůže dostat do horkého prostoru, kde by mohl karbonovat. Konstrukce je uvedena v patentových výkresech formou obráceného nosníku motoru.



Obr. 1.2 Schéma motoru ze Stirlingovy patentové dokumentace



1.2 PROFESOR GUSTAV SCHMIDT



Obr. 1.3 Gustav Schmidt [20]

Gustav Johann Leopold Schmidt se narodil 16. září 1826 ve Vídni a zemřel 27. leden 1881 v Praze. Od roku 1864 byl profesorem mechaniky, nauky o strojích a stavby strojů, v akademickém roce 1868-1869 byl také rektorem Pražské Polytechniky. V roce 1871 publikoval analytické řešení pracovního cyklu Stirlingových strojů se sinusovým pohybem pístů. Schmidt ve své analýze také poprvé použil pojem mrtvého objemu. Samotná *Schmidtova analýza* Stirlingova cyklu byla natolik významná, že se úspěšně používá při výkladu problematiky Stirlingových motorů dodnes.

Myšlenky Stirlinga a Schmidta se rozcházejí v těchto tvrzeních. Ideální Stirlingův cyklus předpokládá lineární diskontinuální pohyb pístů, naproti tomu Schmidt ve své analýze vycházel z faktu, že plynulý pohyb pístů v reálném Stirlingově motoru je řízen kruhovým pohybem klikové hřídele a má tudíž sinusový průběh. Tím je vyloučen předpoklad izochorických dějů ve Stirlingově

teplovzdušném motoru.

Celá řada předpokladů izotermické expanze a komprese, nebo perfektní regenerace, vycházejících ze samotného Stirlingova cyklu, však zůstala zachována.

1.3 HISTORICKÝ VÝVOJ

Téměř 2 století uplynula od vzniku Stirlingova motoru, během tohoto období prošel mnoha inovacemi a rozšířila se i oblast jeho využití. Krátce po udělení patentu, roku 1918 postavil Robert Stirling velký motor s výkonem dvou koňských sil (2 hp) za účelem čerpání vody z kamenolomu v Ayrshire ve Skotsku. Konstrukci motoru se snažil inovovat, následně v letech 1827 a 1840 získal Robert Stirling další dva patenty (č. 5456 a 8652) pro modernizované zdokonalené varianty svého stroje.

V průběhu 19. století a počátkem 20. století se tyto motory staly velice populární a využívaly se v různých oborech a průmyslových odvětvích. Pro jejich pohon se v hojně míře využívala paliva kapalná, pevná i plynná. Ve Spojených státech, byly využívány k čerpání vody pro dobytek, působily na železnicích, v dolech, dodávaly vodu mnoha statkům a domácnostem. Menší varianty Stirlingových motorů poháněly zubařské vrtačky, šicí stroje, domácí ventilátory apod., velké motory poháněly např. navijáky.

Několik těchto motorů postavil známý švédský vynálezce John Ericsson. Jako první navrhl a postavil Stirlingův motor poháněný pouze sluneční energií. Pravděpodobně nejznámějším jeho projektem se stala pancéřová bitevní loď Monitor z doby občanské války v USA. Jeho motory zkonstruované na Stirlingově principu sloužily pro obchod, průmysl a zemědělství. Ericsson byl přesvědčen o kvalitách těchto motorů a svými konstrukcemi předběhl dobu.

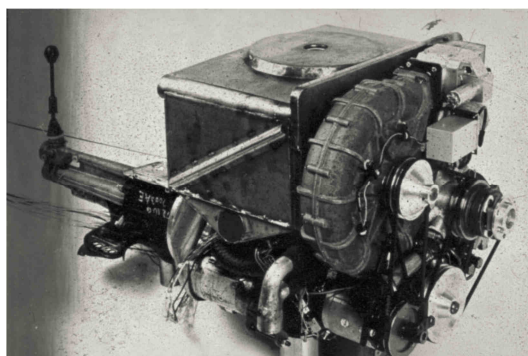
Největší omezení při výrobě těchto motorů spočívaly v metalurgické možnosti technologie výroby v dané době. Vlivem tohoto faktoru i díky jeho vyšší hmotnosti, byly motory využívány méně, a to až do 20. let minulého století. Teprve v roce 1938 vývojem malého Stirlingova motoru s výkonem 200 W, projevil výrobce stolních radiopřijímačů, nizozemec N. V. Philips zájem o tento typ motoru, kdy jej využíval jako zdroj energie



potřebný pro provoz radiopřijímačů. Doposud používané zážehové motory způsobovaly vlivem zapalovacích svíček interferenci radiových vln. Při svých výzkumech, zaměřených na zvýšení výkonových parametrů a účinnosti motoru zjistil, že je výhodnější použít plyných médií s nižší molekulovou hmotností, tedy vzduch nahradit heliem či vodíkem.

Padesátá léta 20. století jsou spojena s pokrokem v oblasti rozvoje technologie výroby materiálu. Již v této době si konstruktéři uvědomují, že zásoby ropy nejsou nevyčerpatelné a s nově vyvstávající otázkou ropné krize se nabízí myšlenka opět využívat i jiné motory, než benzínové či dieselové. Tato skutečnost poskytuje možnost realizací nových, konstrukčně vyspělejších variant Stirlingových motorů. Švédská společnost FVV Group v roce 1968 vytvořila spojení s dalšími společnostmi za účelem zkoumání možností vývoje zdokonaleného Stirlingova motoru. Jejich propojení, tzv. „joint venture“ dostalo jméno United Stirling. Pod licencí N. V. Philipse vyvíjela tato společnost motor o výkonu 200 hp, určený pro autobusovou dopravu, terénní vozidla i ponorky. Novinkou bylo vyvinutí pohonné jednotky pro městský autobus s rombickým mechanismem, o kterou se v letech 1969-1970 zasloužil N. V. Philips. Čtyřválcový motor, jehož zdvihový objem 235 cm^3 na každý válec dosahoval výkonu 200 hp při středním tlaku 22 MPa a otáčkách 3000 min^{-1} , však neměl z důvodu vysokých tlaků předpoklady potřebné životnosti. Proto se v United Stirling rozhodli vyvinout svůj vlastní motor s typovým označením Philips 4-65. Výsledné parametry 200 hp při středním tlaku 15 MPa a otáčkách 1500 min^{-1} byly zajímavé. Spolupráce Philipse s United Stirling pokračovala a vyvíjely se nové varianty. I přes snahu minimalizovat výrobní náklady se podrobnějším výpočtem zjistilo, že z důvodu složitější konstrukce motoru by v plánované sériové výrobě 10 000 ks ročně byly náklady 2,5 krát vyšší, než užitím stejně výkonného vznětového motoru.

V 70. letech 20. století se United Stirling intenzivně zabývala vývojem pohonné jednotky pro osobní automobily. Jako výchozí byla použita konstrukce motoru Philips 4-65 s naklápěcí deskou, která prošla dlouhodobým vývojem. Jeden z následujících motorů s typovým označením V4X2 představila roku 1974 v prototypu osobního automobilu Ford Pinto s automatickou převodovkou společnost Ford. Pravděpodobně nejzajímavější byla verze Stirlingova motoru V4X35 (obr. 1.4), která byla stejného roku zastavěna do vozu Ford Taurus s manuální převodovkou. Výkon motoru dosahoval 40 kW, pracovním médiem byl vodík. Při jízdách zkouškách v rozsahu 10 000 km se projevil problém s manuální převodovkou vyžadující rychlou změnu výkonu, která se projevila jako slabina daného motoru. I když ostatní požadavky na akceleraci i deceleraci (90% z výkonu za 0,5s) byly uspokojivé, přesto se sériová výroba kvůli vysokým nákladům spojených s použitím nutného systému regulace výkonu pohonné jednotky neuskutečnila a od užití těchto motorů se v automobilové dopravě upustilo.



Obr. 1.4 Motor V4X35 [8]



Následující prototyp V4X36 instalovaný do odlehčené karoserie závodního automobilu Porsche Bergspider překvapil při jízdách zkouškách na kontrolním úseku dlouhém 10 km, kde dosahoval průměrné rychlosti $135,88 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Zapsal se taktéž svou maximální rychlostí, jejíž hodnota $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ je pravděpodobně i v současnosti rychlostní rekord automobilu se Stirlingovým motorem.

Od 80. let 20. století se v United Stirling se svými poznatky na základě předchozích zkušeností zabývali vývojem agregátu pro stacionární aplikace s označením United Stirling V 161, což je α – modifikace (viz kapitola 2.3) s uspořádáním válců do „V“ o objemu každého válce 161 cm^3 . Motor, jehož pracovní médium bylo helium s výkonem 10 kW splňoval podmínky pro plynulou regulaci výkonu změnou tlaku a teploty pracovního plynu. V současnosti patří k technologicky nejvyspělejším motorům svého druhu na trhu.

1.4 SOUČASNÉ VYUŽITÍ STIRLINGOVA MOTORU

V posledních desetiletích v rámci modernizace a vylepšení se Stirlingovými motory zabývají po celém světě stovky výzkumných ústavů, škol a i několik desítek firem. Pro jejich nákladnou výrobu i v případě sériové výroby několika tisíc kusů, která představuje 2-3 krát vyšší pořizovací hodnotu oproti spalovacím motorům s vnitřním spalováním, je nutné je využívat účelově. Pracovní náplní válců většinou není vzduch, ale některých z lehkých plynů (vodík či helium), které vlivem jejich nižší hustoty lépe proudí v rozvodech stroje. Těchto typů motorů se dnes využívá i v jiných průmyslových odvětvích, např. při výrobě elektřiny a tepla v malých centrálních pro domácnosti nazývaných kogenerační jednotky. Výhodou oproti tradičním motorům s vnitřním spalováním je jejich tišší chod a nižší vibrace.



Obr. 1.5 Kogenerační jednotka Cleanenergy se Stirlingovým motorem V161[14]

Další způsob uplatnění našli výrobci u segmentu malých jednotek využívajících obnovitelných zdrojů o výkonu do 50 kWe. Tyto motory se využívají např. i v teplárnách na biomasu, kde s výhodou vyšší elektrické účinnosti konkurují stejně výkonným klasickým teplárnám s parním oběhem. Na obr. 1.6 vidíme prototyp SM3D, dvojitý čtyřválcový motor rozsáhlého Dánsko – Švédského projektu vývoje Stirlingova motoru pro využití biomasy o elektrickém výkonu 35 kWe, středním tlaku plynu 4,5 MPa s pracovním plynem



heliem, jehož elektrický generátor je součástí tlakového prostoru z důvodu eliminování požadavků na těsnost ucpávek pístních tyčí.



Obr. 1.6 Prototyp SM3D [14]

Za zmínku stojí i výroba elektrické energie ze slunečního záření s aplikací motoru společně s elektrickým generátorem pomocí jednoho nebo více ramen na zrcadlovou parabolou do jejího ohniska, ve kterém se koncentruje sluneční záření. Většina těchto projektů je momentálně ještě ve vývojovém stádiu. Jejich výkony se pohybují v rozmezí od 5 do 50 kWe. Pro optimální výkon vyžaduje soustava parabola – jednotka natáčení za slunečními paprsky. Nejvyšší teplota nacházející se v ohnisku, ve kterém je umístěný ohřívák (kaverna), dosahuje hodnot od 800 do 900 °C. Chladič a ventilátor umístěný na odvrácené straně motoru, nebo speciální chladicí okruh, zajišťují chlazení motoru prostřednictvím chladicí kapaliny, která proudí potrubím připevněným k ramenu. Vyskytují se komplikace s mazáním a těsněním pístních tyčí v závislosti na poloze motoru, který není v rovnováze a také možné přehřátí ohříváku. Na obr. 1.7 vidíme příklad aplikace Stirlingova motoru ve zkušební solární jednotce EuroDish, v jejímž ohnisku se nachází upravená verze jednotky SOLO se Stirlingovým motorem V 161 dosahující maximálního výkonu 7,9 kW při slunečním záření $850 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a adekvátní účinnosti 15,3 %.



Obr. 1.7 Solární jednotka EuroDish [14]



V České republice se vývojem Stirlingova motoru od roku 2001 zabývá firma TEDOM s.r.o. Jejich zájem spočívá ve vývoji kogenerační jednotky. S podporou Ministerstva průmyslu a obchodu byl výzkum prováděn v letech 2002 a 2003 v rámci projektu s názvem „Výzkum a vývoj zařízení na kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla ve výkonové třídě mikrokogenerace na bázi Stirlingova motoru s možností spalování biomasy“. Celkové náklady vynaložené na financování projektu značně přesahují v dnešní době částku 40 milionů korun. Hlavní parametry předpoklady celého projektu:

- výkon motoru 11 kW při otáčkách 1500 min^{-1}
- elektrická účinnost při teplotách 650/60 °C (teplota žárové hlavy/vstupní teplota do motoru) přesahující hodnotu 25 %
- maximální střední tlak pracovního plynu 14 MPa
- servisní interval 2 roky
- minimální životnost do generální opravy 25 000 hodin
- poměrně nízká pořizovací hodnota zajišťující odbyt

Pro svoji jednoduchou konstrukci a s tím spočívající předpoklad nižších pořizovacích nákladů, se jeví jako správné řešení použití α -modifikace se zdvihovým objemem $1,83 \text{ dm}^3$.

Ve společnosti TEDOM s.r.o. se v posledních letech zabývali prototypem, na kterém v provozu při zkouškách v rozsahu stovek hodin dosáhli výsledků:

- výkon motoru 7,4 kW při 1500 min^{-1}
- elektrická účinnost motoru 22,1 % při teplotách 620/40 °C
- střední tlak provozního plynu helia 14 MPa
- použité palivo – zemní plyn
- nejdelší provozní zkouška 700 hodin
- celková provozní doba zkoušeného motoru 1200 hodin

I přes nesplnění plánovaných předpokladů pokračuje vývoj dále. Veškeré nové poznatky jsou aplikovány na konstrukci jednotlivých podskupin motoru a zkouškami se ověřují. Materiály použité k výrobě - převážně odlitky z tvárné a šedé litiny (80%), popř. ocel, na horké straně motoru, žárovevné a žáruvzdorné materiály, udávají celkovou hmotnost 110kg. I přes snahu konstruktérů zmenšit rozměry, zachovaná robustní konstrukce klikové skříně tlumí mechanický hluk celého mechanismu.



2 STIRLINGŮV MOTOR

2.1 PRINCIP FUNKCE MOTORU

Stirlingův motor se řadí do kategorie tepelných motorů. Motor se skládá z dlouhého válce, v němž vykonává posuvný pohyb přemístovací píst. Přemístovací píst rozděluje válec na dvě části – „horkou“ a „studenou“. „Horkou“ stranu válce ohřívá alternativní zdroj tepelné energie, „studená“ část je pak chlazena (např. vodou). Ve válci je uzavřený pracovní plyn. Přivedením tepla ohříváním „horké“ strany válce má pracovní plyn snahu se rozpínat. Vzduch obtéká přemístovací píst a proniká dle dané modifikace do pracovního válce motoru, kde působí tlakem na pracovní píst a přes klikový mechanismus roztáčí setrvačnick. Plyn začíná konat práci. Na klikový hřídel pracovního mechanismu je rovněž uložena ojnice pohybující přemístovacím pístem, zpravidla s natočením o 90°. Pracovní píst se pohybuje k dolní úvratí, před jejím dosažením se přemístovací píst přesouvá a vytlačuje tak ohřátý vzduch, který proudí do studené části válce. Dochází k ochlazení a následnému podtlaku pod úroveň okolního atmosférického tlaku. V celém válci nastává podtlak, ten proniká i do pracovního válce a působí na pracovní píst, stroj koná práci a roztáčí se setrvačnick. První pracovní cyklus proběhl, setrvačnick vykonává dále pohyb, a přesouvá přemístovací píst do „studené“ části válce. Tím vytlačí ochlazený plyn do „horké“ části válce, kde se ohřívá, rozpíná a zvyšuje svůj tlak. Celá situace se periodicky opakuje a motor je v chodu.

2.2 ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ

2.2.1 ZDROJ TEPLA

Pro pohon motoru, využívající tepelnou energii ke svému chodu se nabízí široké spektrum tepelných zdrojů. Jedním z nich jsou paliva. Jelikož tento motor pracuje na principu vnějšího spalování, může pracovat i s takovými palivy, jako skládkové plyny s obsahem siloxanu, které by jiné motory mohly poškodit. Další alternativními zdroji jsou solární energie, geotermální energie, jaderná energie, odpadní teplo z technologických procesů a bioenergie.

2.2.2 OHŘÍVAČ – „HORKÝ“ PROSTOR

Funkci ohříváče může u malých, málo výkonných motorů plnit stěna „horkého“ pracovního prostoru. Výkonnější stroje potřebují pro optimální zajištění přenosu tepla do pracovního plynu rozměrnější plochu, kterou zabezpečuje koncepce s vnitřními a vnějšími žebry, popřípadě velké množství malých trubic. Jednotlivé ohříváče musí být materiálově i konstrukčně vhodně navrženy pro zajištění vysokého tepelného přenosu s malými tlakovými ztrátami a s minimalizovaným mrtvým prostorem, což je vnitřní prostor nevyužitý pro zdvih pístu.

2.2.3 REGENERÁTOR

Hlavní součást stroje - regenerátor, je tepelný výměník a dočasný zásobník tepla vhodně umístěný mezi „horkým“ a „studeným“ prostorem aby přes něj pracovní médium mohlo procházet střídavě v jednom a opačném směru. Funkcí zařízení je akumulovat teplo v systému na teplotě v rozmezí mezi minimální a maximální teplotou oběhu tak, aby nedocházelo k jeho nežádoucí výměně s okolím a tím tak navýšit tepelnou účinnost motoru, na níž je závislý výkon motoru. Ve skutečnosti je problematické navýšený výkon využít z důvodu nárůstu objemu mrtvého prostoru a tlakových ztrát spojených s aplikací regenerátoru. Při jeho konstrukci je proto snahou eliminovat objem mrtvého prostoru a odpor



proudění tak, aby bylo dosaženo dostatečného tepelného výkonu a tepelné kapacity využíváním vysoce porézního materiálu. Vnitřní strukturu regenerátoru nejčastěji tvoří vzájemně spečené dráty průměru menšího než 0,1 mm uspořádané chaoticky, případně do mřížky. Vyskytují se i regenerátory vytvořené z tenkých plechů.



Obrázek 2.1 Vnitřní struktura regenerátoru, dráty uspořádané do mřížek [14]

2.2.4 CHLADIČ – „STUDENÝ“ PROSTOR

Obdobně jako u ohřívače může u rozměrově menších strojů s nižším výkonem plnit funkci chladiče stěna „studeného válce“. V tomto případě zde dochází k tepelné výměně s okolním prostředím a teplota ve studené části válce se přibližuje hodnotám teploty okolního prostředí. Pro zvýšení výkonu je nezbytné docílit co možná nejvyššího rozdílu teplot mezi „studenou“ a „horkou“ částí prostoru. Chladič tvoří tepelný výměník chlazený kapalinou.

2.2.5 PŘEMISŤOVACÍ PÍST

Pracovní médium přesunuje z „horkého“ prostoru do studeného a zpětně přemísťovací píst. Konstrukčně lze přemísťovací píst umístit do válce s vůlí a zajistit tak proudění pracovního plynu mezi jeho stěnami a stěnou válce, nebo těsným vložením přesunovat plyn přes tepelné výměníky a regenerátor. Dle dané modifikace stroje může být umístěn ve stejném válci jako pracovní píst (modifikace β), nebo ve vlastním válci (modifikace α , γ).

2.2.6 PRACOVNÍ PLYN

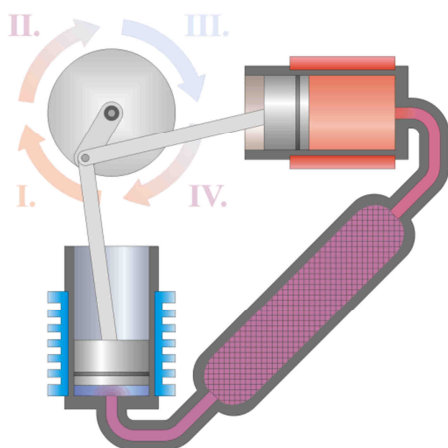
V minulosti byl používaným pracovním plynem vzduch, avšak v rámci vývoje Stirlingových motorů na základě poznatků a měření se zjistilo, že optimální volbou pro zvýšení účinnosti motoru a jeho měrného výkonu je aplikace plynů s nižší molekulovou hmotností a vysokou tepelnou vodivostí.

Jako nejvhodnější pracovní plyn pro dosažení nejlepších výsledků výkonových parametrů se jeví vodík, pro svou nízkou viskozitu a vysokou tepelnou vodivost, avšak nastává riziko spojené s jeho nestálostí v případě úniku. Dobré parametry poskytuje i helium, přibližující se svými parametry vodíku. Nevýhodou je možnost úniku těchto pracovních plynů vlivem netěsnosti motoru a jejich nákladné doplňování. Některé motory využívají jako pracovní plyn dusík, u kterého v případě úniku z vnitřního prostoru motoru nejsou náklady na doplnění vysoké.



2.3 ZÁKLADNÍ MODIFIKACE STIRLINGOVA MOTORU

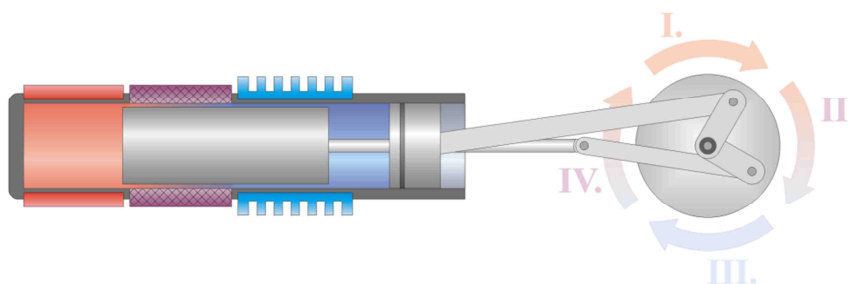
Rozlišujeme tři konstrukční varianty Stirlingova motoru, tzv. modifikace, které se vzájemně svou koncepcí odlišují. Jejich společnou charakteristickou vlastností je užití „horkého“ a „studeného“ výměníku, mezi nimiž je umístěn regenerátor.



Obr. 2.2 Modifikace α

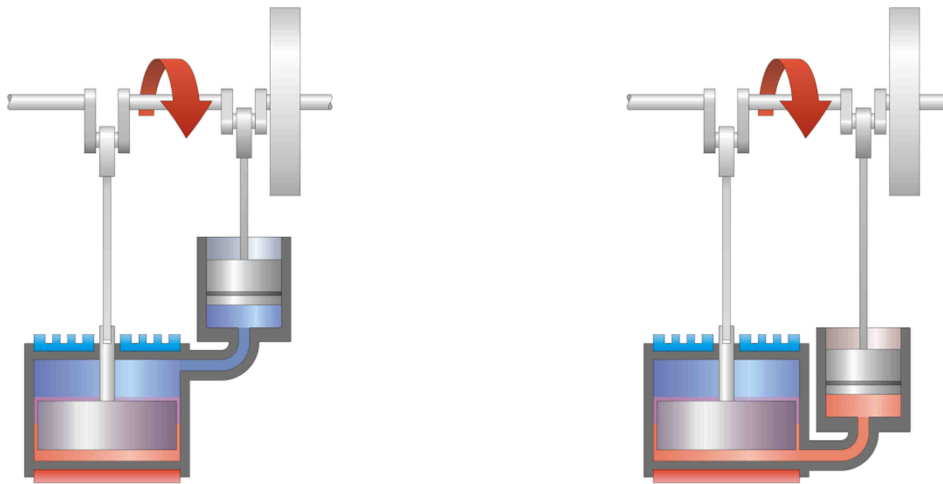
α - modifikace motoru (obr. 2.2) se skládá ze dvou pístů, jeden „horký“ a druhý „studený“, umístěných ve dvou nezávislých válcích. Mezi těmito válci se nachází nízkoteplotní výměník, regenerátor a vysokoteplotní výměník. Horký píst se nachází za vysokoteplotním výměníkem a studený za nízkoteplotním. I přes vyskytující se problémy s vysokými teplotami „horkého“ pístu a tím docházejícímu namáhání těsnění, patří mezi nesporné výhody této modifikace její velmi příznivý poměr výkon/hlučnost a v praxi se také nejvíce využívá. Pro eliminaci nežádoucích jevů spojených s přehříváním je potřeba používat na těsnící prvky speciální materiály, odolné extrémně vysokým teplotám.

β - modifikace se liší od předchozí verze dvěma pracovními prostory umístěnými v jednom válci oddělenými od sebe přemísťovacím pístem přemísťujícím pracovní plyn z teplého pracovního prostoru do studeného a opačně. K výhodám tohoto seskupení patří oproti předchozí modifikaci menší zatížení „horké“ části pracovního prostoru a tím vyplývající požadavky na použité těsnící materiály. Komplikovanější, konstrukčně složitější mechanismus motoru a netěsnosti pístní tyče přemísťovacího pístu patří k nevýhodám tohoto uspořádání.



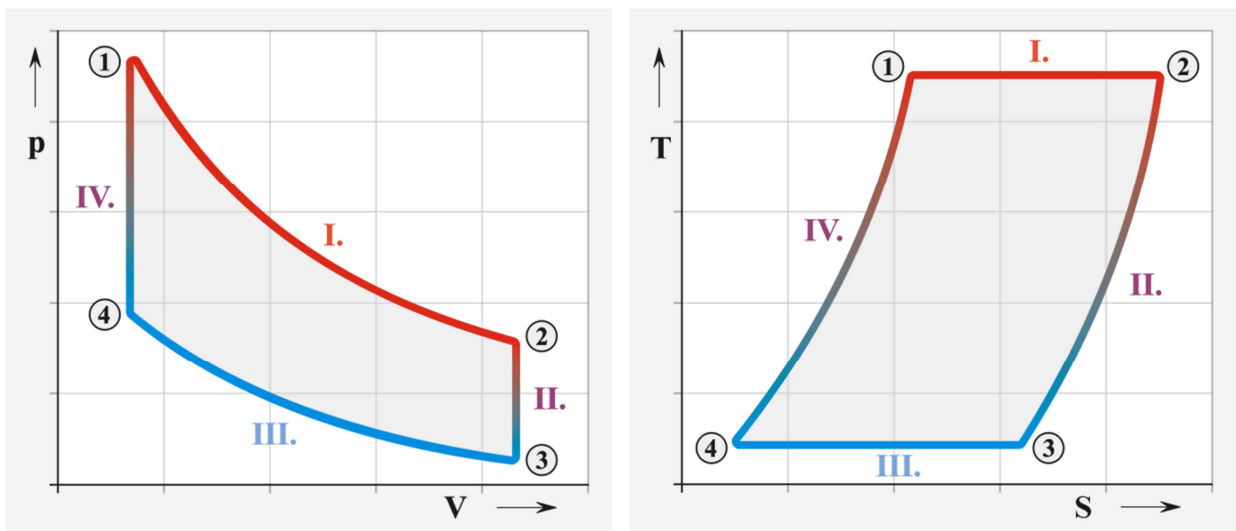
Obr. 2.3 Modifikace β

γ - modifikace s koncepčním uspořádáním dvou pístů, přemísťovacího a pracovního-každého ve vlastním válci je podobná verzi β . U této koncepce nemůže nastat situace nulového objemu „studeného“ pracovního prostoru. Využívá se především pro stavbu malých motorů do výkonu několika set Wattů nebo modelů motorů. Tato modifikace má dvě varianty. Pracovní válec může být připojen na straně studeného výměníku, nebo na straně horkého výměníku podle toho, která teplota je výhodnější pro provoz pracovního pístu.

Obr 2.4 Modifikace γ

2.4 IDEÁLNÍ STIRLINGŮV CYKLUS

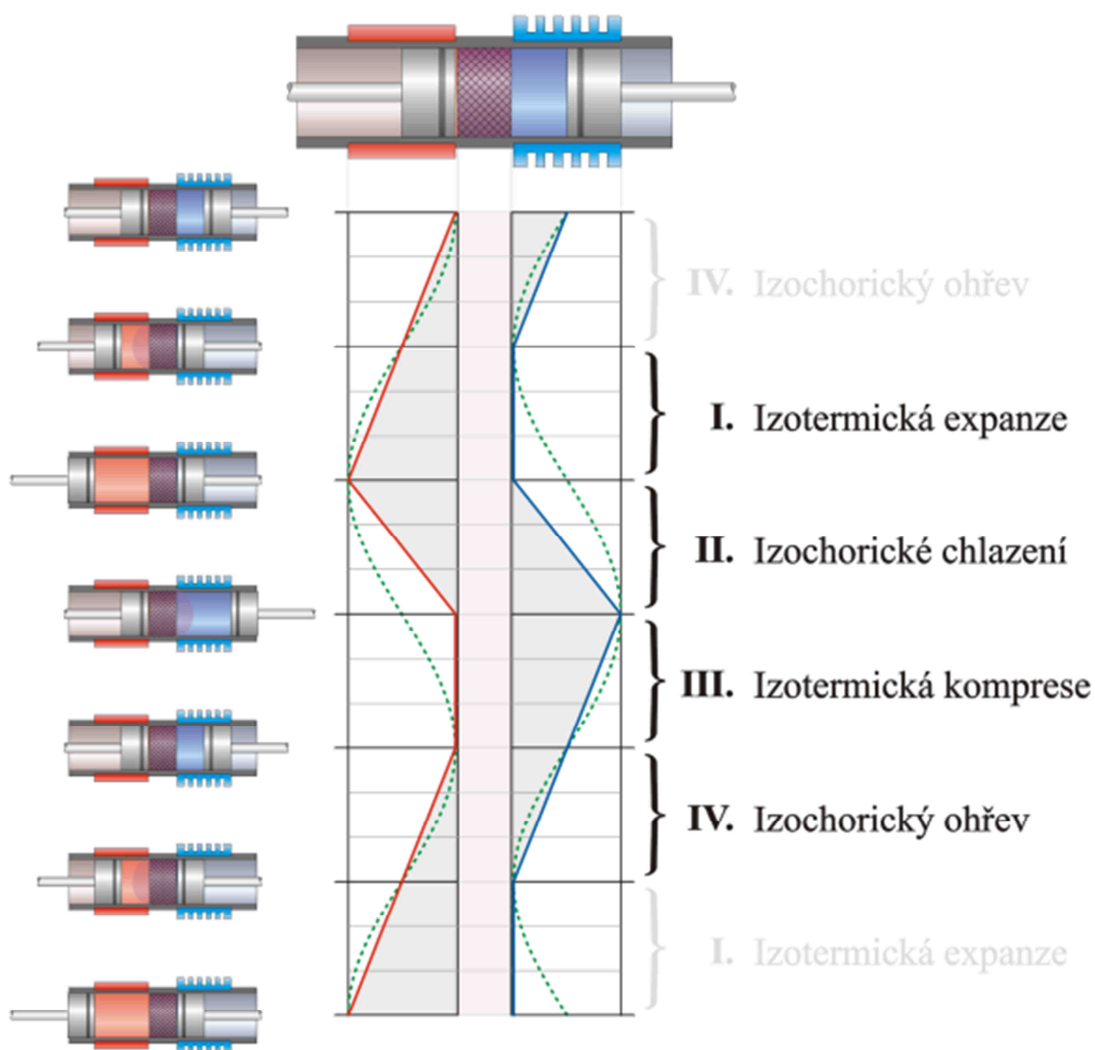
Pracovní cyklus Stirlingova motoru se za ideálních podmínek skládá ze čtyř procesů, tvořících společně uzavřený cyklus. Dva děje probíhají izotermicky a zbylé dva izochoricky. Na obrázcích níže jsou uvedeny v diagramech p-V (tlak-objem) a T-S (teplota-entropie). Pracovní prostor tvoří dva prostory (prostor kompresní a expanzní) a tři teplené výměníky (ohříváč, regenerátor, chladič), celý prostor je neustále propojen. Teploty T_{\min} je dosaženo v chladiči a kompresním prostoru a nejvyšší teploty celého cyklu T_{\max} v ohříváči a expanzním prostoru, teplota v regenerátoru nabývá proměnných hodnot. Vykonaná práce, kterou v ideálním Stirlingově cyklu představuje v p-V diagramu plocha ohraničená body 1-2-3-4, se musí rovnat celkovému teplu, které prošlo systémem během jednoho pracovního cyklu - charakterizující plocha v T-s diagramu ohraničená body 1-2-3-4. Ideální Stirlingův oběh tvoří čtyři termodynamické děje (viz obr. 2.3).



Obr. 2.5 p-V diagram a T-S diagram ideálního Stirlingova cyklu



- Děj 1 – 2 :** *Izotermická expanze.* Objem plynu v pracovním prostoru horkého válce je prostřednictvím tepelného zdroje udržován na konstantní vysoké teplotě a expanduje, koná se práce.
- Děj 2 – 3 :** *Izochorické ochlazování.* Objem pracovního plynu zůstává konstantní. Plyn proudí z „horkého“ pracovního prostoru přes regenerátor do „studeného“ prostoru. Regenerátor akumuluje teplo pracovního plynu a využije jej v následujícím cyklu.
- Děj 3 – 4 :** *Izotermická komprese.* Při kompresi za konstantního objemu plynu se pohybuje pracovní píst ve „studené“ části pracovního válce, kde je udržovaná stále konstantní nejnižší teplota, práce se spotřebovává, teplo se odvádí.
- Děj 4 – 1 :** *Izochorický ohřev.* Plynné médium za konstantního nejmenšího objemu proudí do ohřívací části, kde dochází k ohřevu na maximální teplotu.



Obr. 2.6 Ideální cyklus Stirlingova motoru modifikace a



3 LABORATORNÍ MODEL STIRLINGOVA MOTORU

3.1 KONSTRUKCE LABORATORNÍHO MODELU

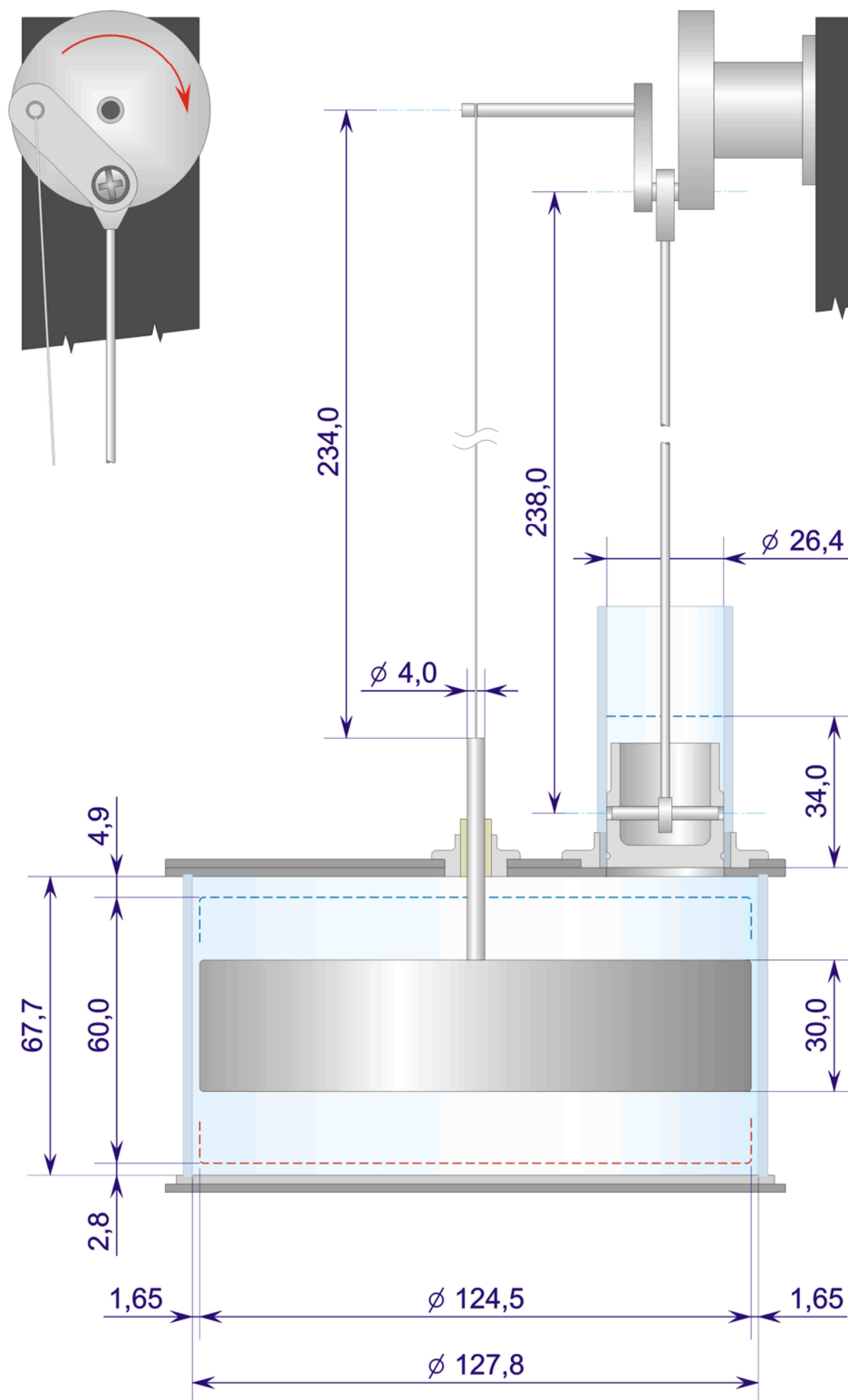
Měřený model Stirlingova motoru díky svému návrhu a koncepci spadá do kategorie teplovzdušných motorů modifikace γ . Pracovním plynem je vzduch. Motor se skládá ze dvou skleněných válců, jeden malého průměru s pracovním pístem, druhý velkého průměru s přemísťujícím pístem uvnitř. Oba písty nese společný klikový hřídel, na kterém jsou prostřednictvím ojníc vzájemně pootočený. Funkci ojnice přemísťovacího pístu zastává u tohoto modelu silonové vlákno. Pro dynamický, vyvážený běh motoru nahrazuje setrvačník ocelová trubička opatřená na protilehlých koncích závažím. Zdrojem tepla pro běh motoru je elektrický ohřívač, umístěný ze spodní strany válce přemísťovacího pístu. V rámci měření je motor opatřen senzory pro měření tlaku v motoru, teploty a natočení klikové hřídele.



Obr. 3.1 Stirlingův motor



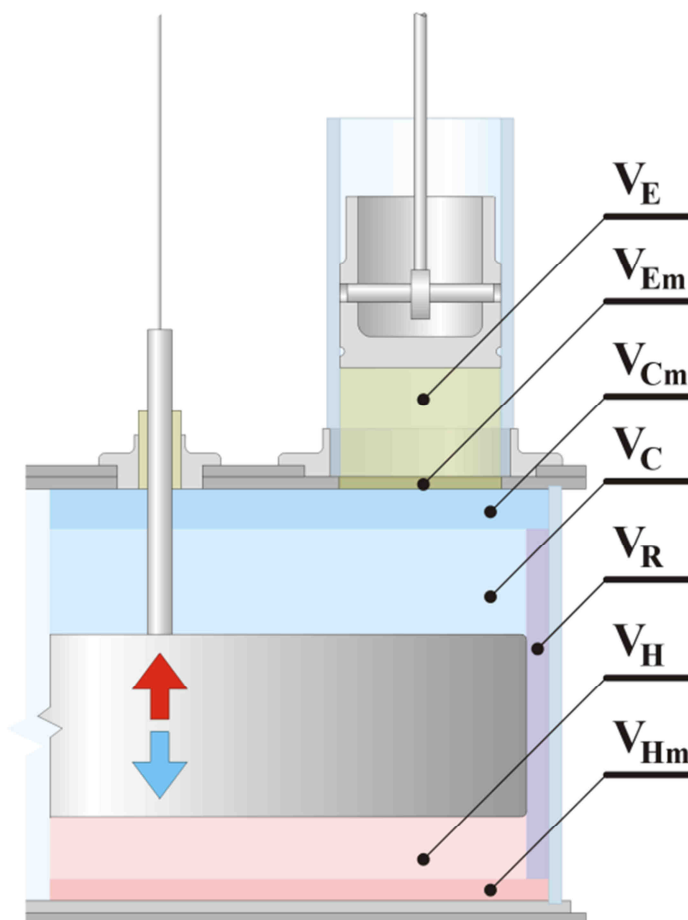
3.2 HLAVNÍ ROZMĚRY MOTORU



Obr. 3.2 Hlavní rozměry měřeného modelu Stirlingova motoru



3.3 ZÁKLADNÍ VÝPOČTY OBJEMOVÝCH PRVKŮ



Obr. 3.3 Objemové prvky motoru

Výpočet objemů daných částí motoru

Objemy jednotlivých částí motoru rozlišujeme na stálé a proměnné. Stálé objemy jsou mrtvé objemy a objem regenerátoru. Proměnných hodnot dosahují objemy prostoru pracovního válce, prostoru „studené“ části válce přemístovacího pístu a prostoru „horké“ části válce přemístovacího pístu měnící se průběžně při provozním chodu motoru.

Stálé objemy

Mrtvý objem prostoru pracovního válce, obr. 3.3 tmavě zelená barva

$$V_{Em} = \frac{\pi \cdot D_E^2}{4} \cdot z_E = \frac{\pi \cdot 26,40^2}{4} \cdot 34 = 18611,29753 \text{mm}^3 \cong 18,611 \text{cm}^3 \quad (3.1)$$



Mrtvý objem „studeného“ prostoru válce přemíst'ovacího pístu, obr. 3.3 tmavě modrá barva

$$V_{Cm} = \frac{\pi \cdot D_V^2}{4} \cdot h_C = \frac{\pi \cdot 127,80^2}{4} \cdot 4,90 = 62856,13444 \text{ mm}^3 \cong 62,856 \text{ cm}^3 \quad (3.2)$$

Mrtvý objem „horkého“ prostoru válce přemíst'ovacího pístu, obr.3.3 tmavě růžová barva

$$V_{Hm} = \frac{\pi \cdot D_V^2}{4} \cdot h_H = \frac{\pi \cdot 127,80^2}{4} \cdot 2,80 = 35917,79111 \text{ mm}^3 \cong 35,918 \text{ cm}^3 \quad (3.3)$$

Objem regenerátoru, obr. 3.3 fialová barva

$$V_R = \frac{\pi \cdot (D_V^2 - D_P^2)}{4} \cdot h_R = \frac{\pi \cdot (127,80^2 - 124,50^2)}{4} \cdot 60 = 39234,8796 \text{ mm}^3 \cong 39,235 \text{ cm}^3 \quad (3.4)$$

Proměnné objemy

Zmiňované objemy se mění v závislosti na poloze pracovního a přemíst'ovacího pístu, kterou určuje natočení klikového hřídele o daný úhel α . Pro danou situaci počítáme proto vždy **okamžitý** objem daného prostoru. Proto zde uvádím celkové (maximální) objemy jednotlivých prostor.

Celkový objem prostoru pracovního válce, obr. 3.3 světle zelená barva

$$V_E = \frac{\pi \cdot D_E^2}{4} \cdot z_E = \frac{\pi \cdot 26,40^2}{4} \cdot 34 = 18611,29573 \text{ mm}^3 \cong 18,611 \text{ cm}^3 \quad (3.5)$$

Celkový objem „studeného“ prostoru přemíst'ovacího válce, obr. 3.3 světle modrá barva

$$V_C = \frac{\pi \cdot D_P^2}{4} \cdot z_P = \frac{\pi \cdot 124,50^2}{4} \cdot 30 = 365216,03647 \cong 365,216 \text{ cm}^3 \quad (3.6)$$

Celkový objem „horkého“ prostoru přemíst'ovacího válce, obr. 3.3 světle růžová barva

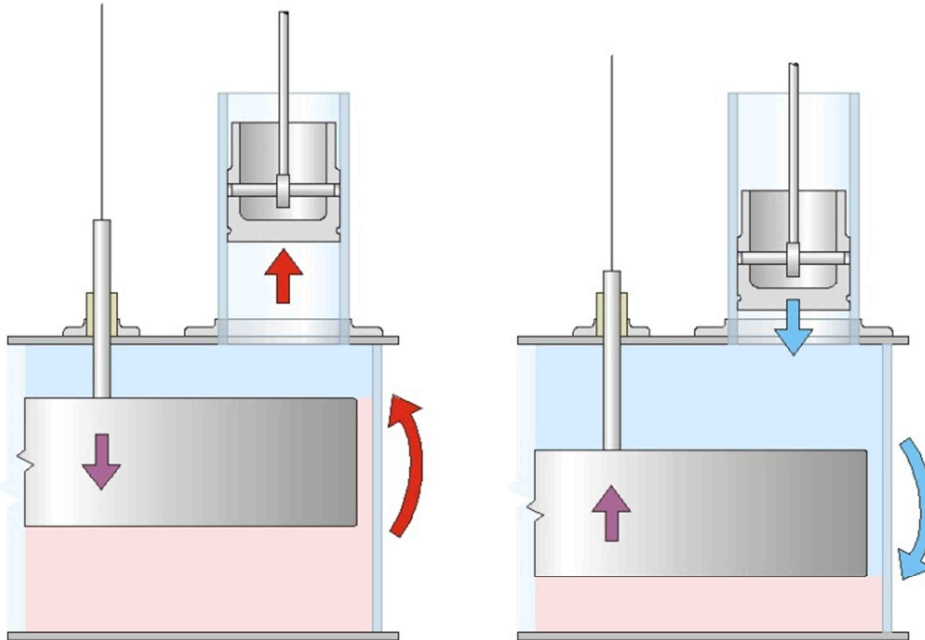
$$V_H = \frac{\pi \cdot D_P^2}{4} \cdot z_P = \frac{\pi \cdot 124,50^2}{4} \cdot 30 = 365216,03647 \cong 365,216 \text{ cm}^3 \quad (3.7)$$

Celkový objem prostoru přemíst'ovacího válce

$$V_P = V_C = V_H = \frac{\pi \cdot D_P^2}{4} \cdot z_P = \frac{\pi \cdot 124,50^2}{4} \cdot 30 = 365216,03647 \cong 365,216 \text{ cm}^3 \quad (3.8)$$



Objem „studené části válce přemísťovacího pístu se mění přímo úměrně se změnou objemu „horké“ části válce přemísťovacího pístu. To znamená, že o objem, o který se zmenší/zvětší „studená“ část válce přemísťovacího pístu během chodu motoru se adekvátně zvětší/zmenší „horká“ část válce přemísťovacího pístu.



Obr. 3.4 Změna objemů „studeného“ a „horkého“ prostoru válce přemísťovacího pístu

3.4 IDEÁLNÍ STIRLINGŮV CYKLUS

Předpoklady ideálního Stirlingova cyklu jsou pro svá striktní kritéria ve vztahu k měřenému modelu Stirlingova motoru při laboratorním měření prakticky nesplnitelná. Už jen předpoklad užití ideálního plynu během pracovního cyklu motoru se neslučuje s realitou. Přesto budu předpokládat, že tento cyklus je proveditelný a provedu jeho rozbor.

3.4.1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Aplikace Ideálního Stirlingova cyklu na měřený motor spočívá v měření, na jehož základě dostaneme data, hodnoty jednotlivých měřených veličin, které se následně aplikují do rovnic popisující jednotlivě všechny čtyři fáze ideálního cyklu. Měřené hodnoty teplot, tlaku a objemů motoru se zpracují a následně vynesou do p-V diagramu charakterizujícího průběh cyklu motoru.

Základní předpoklady

Použité pracovní médium je ideální plyn

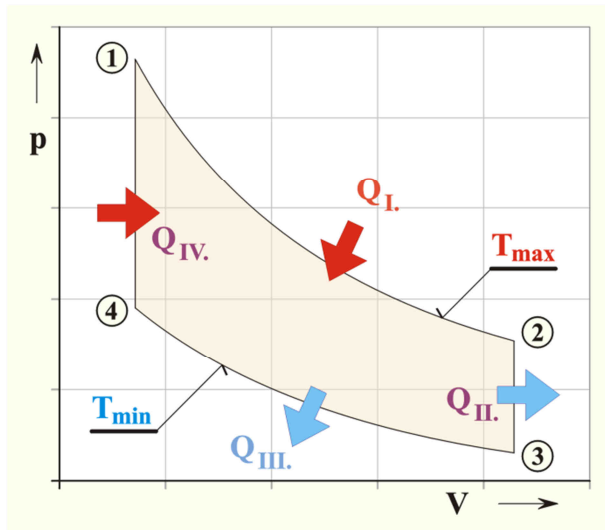
$$V_{max} = V_E + V_P + V_{Em} + V_{Cm} + V_{Hm} + V_R \quad (3.9)$$



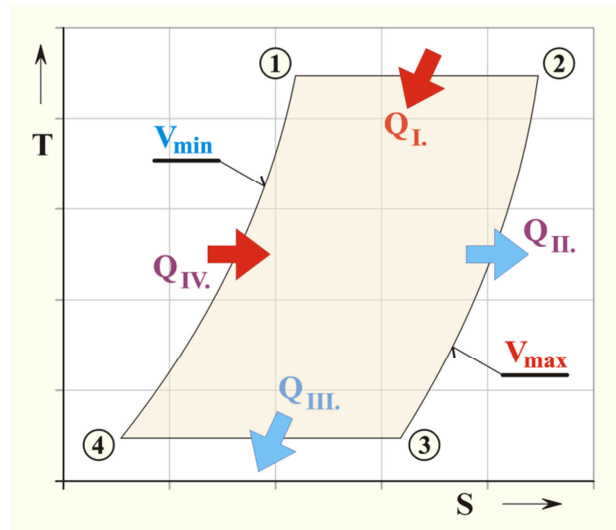
$$V_{min} = V_P + V_{Em} + V_{Cm} + V_{Hm} + V_R \quad (3.10)$$

3.4.2 FÁZE IDEÁLNÍHO STIRLINGOVA CYKLU

Pro názornou představu uvádím ilustrační p-V diagram s ideálním cyklem Stirlingova motoru, kde jsou označeny jednotlivé fáze cyklu a jejich tepelné toky.



Obr. 3.5 p-V diagram ideálního cyklu



obr. 3.6 T-S diagram ideálního cyklu

1) Izotermická expanze - oblast I

Během této fáze cyklu se dodává teplo Q_I (viz obr. 3.5) do systému při maximální teplotě pracovního plynu T_{max} . Vnitřní energie zůstává konstantní, roste entropie pracovní látky, koná se práce.

Tlak v bodě 2

$$p_2 = p_1 \frac{V_1}{V_2} = p_1 \frac{1}{\frac{V_{max}}{V_{min}}} \quad (3.11)$$

Teplota v bodě 2

$$T_2 = T_1 = T_{max} \quad (3.12)$$

Vykonaná práce je rovna množství tepla přivedeného do systému.

$$W = Q = p_1 V_1 \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} = n R T_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (3.13)$$



2) Izochorické chlazení – oblast II

Při této fázi probíhá ochlazování pracovního plynu. Jeho teplo se přenáší a akumuluje do regenerátoru. Teplota plynu klesá z maximální teploty T_{max} na minimální teplotu T_{min} . Nekoná se žádná práce, zmenšuje se vnitřní energie a entropie.

Tlak v bodě 3

$$p_3 = p_2 \frac{T_2}{T_3} = p_3 \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (3.14)$$

Objem v bodě 3

$$V_3 = V_2 \quad (3.15)$$

Vykonaná práce

$$W = 0 \text{ J} \quad (3.16)$$

Odvod tepla do regenerátoru

$$Q = m c_v (T_{max} - T_{min}) \quad (3.17)$$

3) Izotermická komprese – oblast III

Pracovní plyn při této fázi cyklu předává své teplo do „studené“ části válce přemísťovacího pístu. Nepochází ke změně vnitřní energie. Spotřebovává se práce, hodnota entropie se snižuje.

Tlak v bodě 4

$$p_4 = p_3 \frac{V_3}{V_4} = p_3 \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (3.18)$$

Teplota v bodě 4

$$T_4 = T_3 = T_{min} \quad (3.19)$$

Práce je rovna přenášenému teplu

$$W = Q = p_3 V_3 \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} = n R T_{min} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (3.20)$$

4) Izochorický ohřev – oblast IV

V této oblasti předává regenerátor akumulované teplo pracovnímu plynu. Teplota stoupá z počáteční hodnoty T_{min} na hodnotu T_{max} . Nekoná se žádná práce, roste entropie a vnitřní energie pracovního plynu.



Tlak v bodě 1

$$p_1 = p_4 \frac{T_1}{T_4} = p_4 \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (3.21)$$

Objem v bodě 1

$$V_1 = V_4 \quad (3.22)$$

Vykonaná práce

$$W = 0 \text{ J} \quad (3.23)$$

Přívod tepla z regenerátoru

$$Q = m c_v (T_{max} - T_{min}) \quad (3.24)$$

3.4.3 PRÁCE IDEÁLNÍHO STIRLINGOVA CYKLU

Mechanickou práci jednoho cyklu Stirlingova motoru charakterizuje součet jejich složek v daných fázích cyklu motoru.

$$W = W_I + W_{II} + W_{III} + W_{IV} \quad (3.25)$$

V ideálním Stirlingově cyklu nedochází ve fázích cyklu II a IV ke změně objemu, tzn. že práce v průběhu těchto dvou stavových změn je nulová, $W_{II} = W_{IV} = 0$. Z toho vyplývá, že celková práce ideálního cyklu motoru je rovna součtu složek prací W_I a W_{III} , respektive rozdílu větší expanzní práce rozpínajícího se pracovního plynu a menší kompresní práce potřebné na stlačení pracovního plynu.

$$W = \int_3^4 p dV + \int_1^2 p dV \quad (3.26)$$

Následně, úpravou stavové rovnice $pV = nRT$ a jejím dosazením za složku tlaku viz níže s naměřenými teplotami izotermické expanze T_{max} a izotermické komprese T_{min} dostáváme:

$$W = \int_3^4 \frac{nRT_{min}}{V} dV + \int_1^2 \frac{nRT_{max}}{V} dV = nrT_{min} \ln \frac{V_4}{V_3} + nrT_{max} \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3.27)$$

Z p-V diagramu ideálního Stirlingova cyklu (obr. 3.5) vyplývá, že objemy $V_1 = V_4$ a $V_2 = V_3$ proto se rovnice zjednoduší:

$$W = -nrT_{min} \ln \frac{V_2}{V_1} + nrT_{max} \ln \frac{V_2}{V_1} = nR(T_{max} - T_{min}) \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3.28)$$

Práci, kterou vykoná Stirlingův motor během jedné své otáčky, udává plocha v p-V diagramu, zobrazenou uzavřenou křivkou průběhu jednotlivých fází cyklu.



3.5 SCHMIDTOVA TEORIE

Stirlingovým motorem a procesem dokonalé regenerace energie se zabýval profesor Gustav Schmidt, který v roce 1871 představil svou teorii na Německém vysokém učení technickém v Praze. Teorie dále vychází ze základních předpokladů izotermické komprese a expanze.

Podmínky Schmidty teorie

- Pracovní látka je ideální plyn, platí stavová rovnice $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$
- Proces regenerace je dokonalý
- Okamžitý tlak je v celém cyklu stejný
- Dochází k dokonalému promíšení plynu v pracovních prostorech
- Motor pracuje konstantní rychlostí, jeho provozní režim je ustálený
- Ve výměnících tepla nedochází k teplotním rozdílům
- Množství pracovní látky je konstantní během celého provozu, nedochází ke ztrátám
- Objemové změny v pracovním prostoru probíhají sinusoidálně
- Teplota pracovního pístu a stěny válce se nemění
- Teplota pracovní látky v prostorech mimo pracovní válec je konstantní

3.5.1 OBJEM VNITŘNÍHO PROSTORU MOTORU

Pro odvození Schmidty teorie a sestrojení p-V diagramu je nutné znát okamžitý objem pracovního plynu v daných vnitřních prostorech motoru. Jeho velikost závisí na natočení klikového hřídele o úhel α . Pro výpočet vlastních objemů je důležité znát nejprve okamžitou výšku počítaného válcového prostoru.

Okamžitá výška prostoru pracovního válce h_E

$$h_E = (r_E + l_e) - \left[r_E(1 - \cos(\alpha)) + \sqrt{l_E^2 - (r_E \sin(\alpha))^2} \right] \quad (3.29)$$

Okamžitá výška „horké“ části válce přemístovacího pístu h_H

$$h_H = (r_P + l_P) - \left[r_P(1 - \cos(\alpha + \beta_P)) + \sqrt{l_P^2 - (r_P \sin(\alpha + \beta_P))^2} \right] \quad (3.30)$$

Okamžitá výška „studené“ části válce přemístovacího pístu h_C

$$h_C = z_p - h_H \quad (3.31)$$

Po výpočtu daných veličin je možné dosadit do rovnic pro výpočet objemů plynu jednotlivých vnitřních prostor. Okamžitý objem plynu v pracovním válci, viz rovnice

$$V_E = S_E \cdot h_E \quad (3.32)$$

Okamžitý objem plynu „horké“ části válce přemístovacího pístu

$$V_H = S_P \cdot h_H + V_{Hm} \quad (3.33)$$



Okamžitý objem plynu „studené“ části válce přemístovacího pístu

$$V_C = S_P \cdot h_C + V_{Cm} \quad (3.34)$$

3.5.2 TEPLOTA PRACOVNÍHO PLYNU

Předpoklady pro teploty pracovních prostor jsou následující:

$$T_E = T_{min} \quad (3.35)$$

$$T_C = T_{min} \quad (3.36)$$

$$T_H = T_{max} \quad (3.37)$$

$$T_R = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} \quad (3.38)$$

3.5.3 TLAK PRACOVNÍHO PLYNU

Odvození vzorce pro výpočet tlaku plynu v motoru vychází z předpokladu konstantního látkového množství plynové náplně uvnitř motoru, které popisuje rovnice udávající součet jeho jednotlivých složek uvnitř motoru.

$$n = n_E + n_C + n_H + n_R \quad (3.39)$$

Následně použijeme stavovou rovnici ideálního plynu

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.40)$$

Úpravou stavové rovnice dosadíme do rovnice za látkové množství n

$$n = \frac{p \cdot V_E}{R \cdot T_E} + \frac{p \cdot V_C}{R \cdot T_C} + \frac{p \cdot V_H}{R \cdot T_H} + \frac{p \cdot V_R}{R \cdot T_R} \quad (3.41)$$

Rovnici dále upravíme

$$n \cdot R = \frac{p \cdot V_E}{T_E} + \frac{p \cdot V_C}{T_C} + \frac{p \cdot V_H}{T_H} + \frac{p \cdot V_R}{T_R} \quad (3.42)$$

Následně, úpravou rovnice a vytknutím složky tlaku p dostaneme konečnou verzi pro výpočet tlaku pracovního plynu.

$$p = \frac{n \cdot R}{\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_C}{T_C} + \frac{V_H}{T_H} + \frac{V_R}{T_R}} \quad (3.43)$$



4 LABORATORNÍ MĚŘÍCÍ PŘÍSTOJE

Měření Stirlingova motoru probíhalo v laboratořích Ústavu automobilového a dopravního inženýrství na fakultě strojínského inženýrství VUT v Brně. Potřebné laboratorní měřicí zařízení a prostory pro měření poskytnul doc. Ing Zdeněk Kaplan, CSc.

4.1 HARDWARE

Pro měření laboratorního modelu byly použity přístroje a senzory kompatibilní s dostupným softwarem. Jednotlivé zařízení a jejich technické parametry jsou uvedeny níže.

4.1.1 MĚŘÍCÍ KARTA NATIONAL INSTRUMENTS

Snímání provozních dat motoru zajišťovala měřicí karta firmy National Instruments s typovým označením NI USB-6009, umožňující přenosné měření a laboratorní experimenty. Zařízení, měřicí napětí tvoří 8 analogových vstupních kanálů (AI – Analog Input), 2 analogové výstupní kanály (AO – Analog Output) 12 obousměrných digitálních linek (DIO – Digital Input/Output) a jeden 32 bitový čítač (C – Counter). Připojení zajišťuje komunikační rozhraní USB 2.0 full-speed.



Obr. 4.1 Měřicí karta NI USB-6009

Pro sběr dat při měření Stirlingova motoru prostřednictvím senzoru tlaku Freescale Semiconductor MPX4250DP a optoelektrického snímače polohy HEDS 9040 s clonkou připojených k měřicí kartě jsou důležité následující parametry měřicí karty:

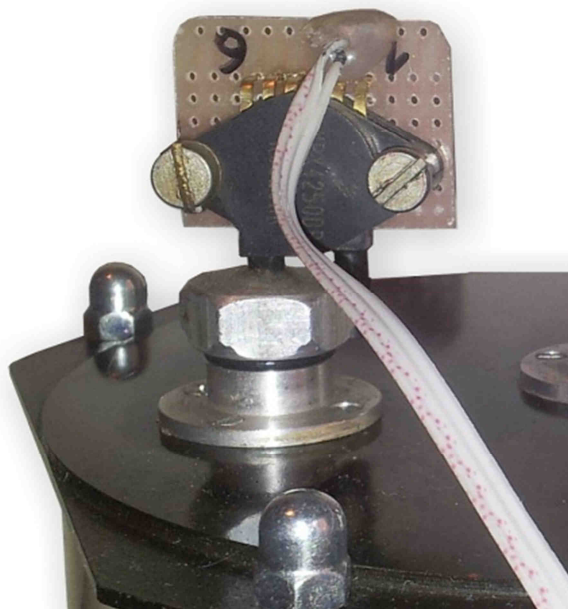
Tab. 4.1 Technické parametry měřicí karty

Funkce	Hodnota	Jednotka
Maximální rozsah napětí	-10 ÷ 10	V
Rozlišení AI – diferenciálně	14	bit
Rozlišení AI – RSE (na společnou zem)	13	bit
Max. vzorkovací rychlost pro 1 kanál	48	kS/s
Max. vzorkovací rychlost pro více kanálů	42	kS/s
Max. rozsah napětí (-10V, 10V) - přesnost	7,73	mV
Min. rozsah napětí (-1V, 1V) - přesnost	1,53	mV



4.1.2 SENZOR TLAKU

Použitý piezoelektrický křemíkový senzor tlaku MPX4250DP, umístěný na laboratorním modelu Stirlingova motoru na vrchní části válce přemísťovacího pístu snímá hodnoty tlaku pracovního plynu vnitřní části motoru. Umístění senzoru předpokládá konstantní tlak pracovního plynu ve všech pracovních prostorech motoru.



Obr. 4.2 Tlakový senzor MPX4250DP

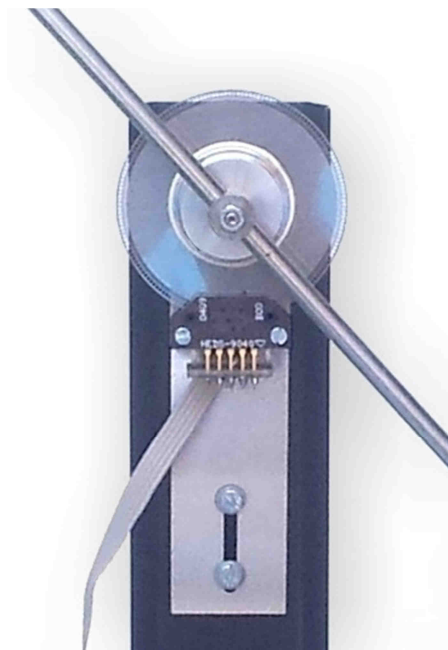
Tab. 4.2 Technické parametry senzoru tlaku

Funkce	Označení	Hodnota	Jednotka
Rozsah měření provozního tlaku	P_{OP}	0 – 250	kPa
Minimální přírůstek tlaku (0°C – 85°C)	V_{off}	0,139 – 0,269	Vdc
Napájecí proud	I_O	7	mA
Rozsah vstupního napětí	V_s	4,85 – 5,35	V
Plné měřicí rozpětí		4,705	Vdc
Výstupní napětí při max. tlaku	V_{FSO}	4.844 - 4.974	Vdc
Počet pinů		6	
Citlivost V/kPa	$\Delta V/\Delta P$	18,8	mV/kPa
Stabilita přírůstku		$\pm 0,5$	% V_{FSS}
Provozní teplota		-40 - 125	°C
Doba odezvy	t_R	1	ms
Přesnost (0°C – 85°C)		$\pm 1,4$	% V_{FSS}



4.1.3 OPTOELEKTRICKÝ SNÍMAČ POLOHY

Snímání polohy natočení klikové hřídele zajišťuje tříkanálový optický inkrementální snímací modul HEDS-9040 a měřící clonka 1000 CPR umístěné na rámu motoru na protilehlé straně klikového hřídele. Snímací modul i clonku je možné seřadit. Modul lze seřadit vzhledem k poloze clonky vertikálně. Clonka se seřizuje v závislosti na poloze klikového hřídele a celý senzor tak v mém případě snímá polohu v horní úvrati pracovního pístu.



Obr. 4.3 Optoelektrický snímač HEDS-9040

Tab.4.3 Technické parametry optoelektrického snímače polohy

Funkce	Označení	Hodnota	Jednotka
Rychlost otáčení		max. 30000	ot/min
Rozlišení snímání		1000	
Napájecí napětí	V_{CC}	4,5 – 5.5	V
Nízká úroveň výstupního napětí	V_{OL}	0,4	V
Vysoká úroveň výstupního napětí	V_{OH}	2,4	V
Napájecí proud	I_{CC}	30 - 85	mA
Frekvence	f	max. 100	kHz
Doba náběhu	t_r	80	ns
Doba klesání	t_f	80	ns
Provozní teplota	T_A	-40 - 100	°C



4.2 POMOCNÁ MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ

4.2.1 TOPNÉ TĚLÍSKO

Přísun tepelné energie pro chod motoru zajišťuje topné tělísko o maximálním výkonu 100 W, zasunuté ze spodní části motoru do ohřívacího ocelového segmentu umístěného z vnější strany dna válce přemísťovacího pístu (viz obr. 5.19). Napájení je realizováno síťovým napětím 230 V / 50 Hz. Segment akumuluje z tělíska dané množství energie a vyhříváním spodní části válce motoru tak umožňuje jeho plynulý chod.

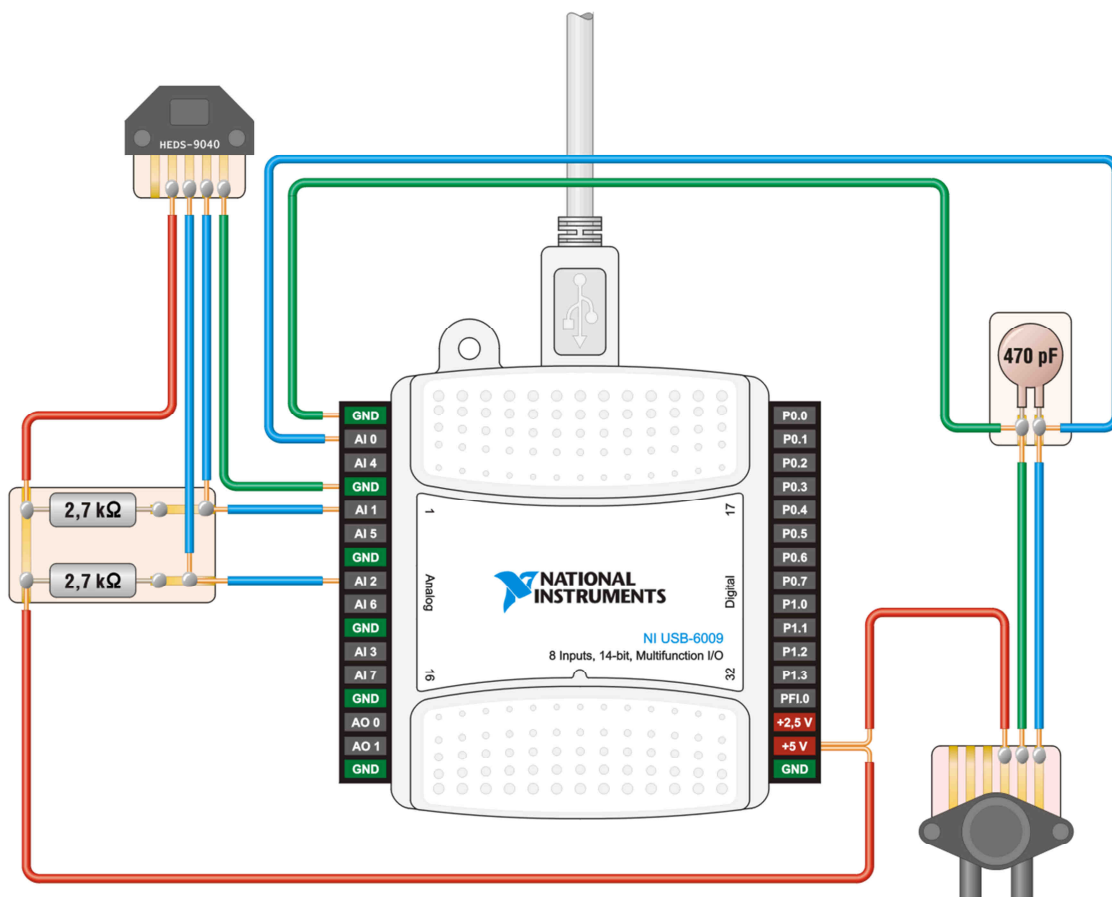
4.2.2 TRIAKOVÝ REGULÁTOR VÝKONU

Laboratorní měření chodu motoru se vztahuje na snímání provozních dat při daném množství dodané tepelné energie, ovlivňující provozní otáčky motoru. Z důvodu plynulé regulace množství dodané tepelné energie je součástí měřicího systému triakový regulátor výkonu, na kterém lze pomocí potenciometru nastavit konkrétní příkon topného tělíska v rozmezí 0 - 100 W.

4.2.3 MĚŘENÍ TEPLoty

Pro měření teplot „horké“ a „studené“ části prostoru válce přemísťovacího motoru a teploty laboratorní místnosti byl použit digitální termometr VOLTcraft K101/K102.

4.3 SCHÉMA ZAPOJENÍ



Obr. 4.4 Schéma zapojení měřicího zařízení



4.4 SOFTWARE

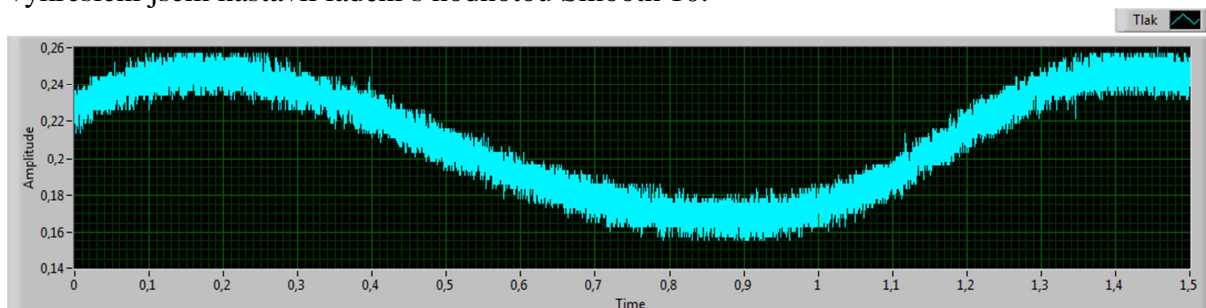
Pro laboratorní měření byl zvolen software firmy National Instruments, verze LabVIEW 2010, kompatibilní s danými měřicími prvky.

LabVIEW (z anglického Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) tedy „laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů“ je programovací a vývojové prostředí. Toto prostředí, někdy zvané také jako G-jazyk jsem využil k programování systému pro měření a analýzu signálů. Program vykresluje dle snímaných dat do grafu (obr. 4.5) průběh tlaku snímaného tlakovým senzorem. Dále jsem využil funkci Smooth, která dle nastavení vyhlazuje danou křivku do druhého grafu (obr. 4.6). Naměřená data je následně možné z grafického prostředí uložit do souboru a pracovat s nimi dále. Software rovněž umožňuje snímat data natočení klikového hřídele z optoelektrického snímače polohy. Data se rovněž ukládají do souboru a lze s nimi dále pracovat.

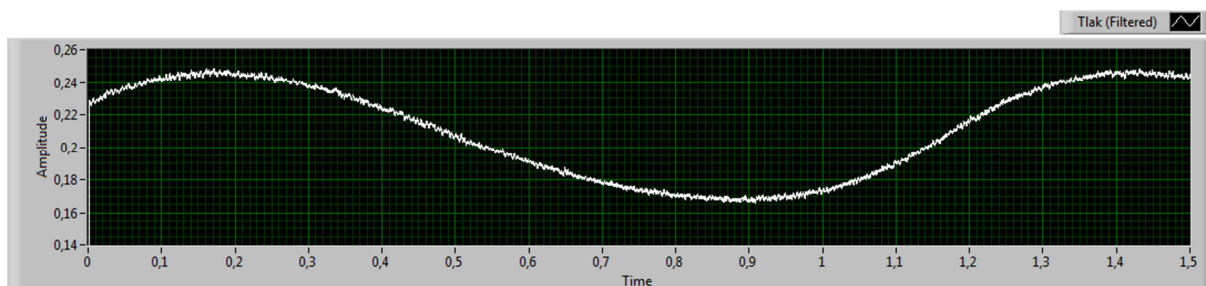
4.4.1 SNÍMÁNÍ SIGNÁLU ZE SENZORU TLAKU

Měřený napěťový signál snímaný senzorem tlaku zpracovává měřící karta pomocí A/D převodníku na tlakovou funkci udávající hodnotu tlaku. Měřící karta, dle nastavení udává vzorkovací frekvenci a snímá počet vzorků za vykonaný cyklus. Program má za úkol sejmutí 1000 hodnot tlaku během jednoho cyklu motoru. Vzorkovací frekvenci je možné upravovat pro optimální vykreslování funkce.

Při snímání signálu dochází k znetelným výkyvům při vykreslování signálu do grafu. Pro korekci a vyladění signálu je nutné zavedení vyhlazovací funkce Smooth. Pro optimální vykreslení jsem nastavil ladění s hodnotou Smooth 10.



Obr. 4.5 Průběh měřeného tlaku



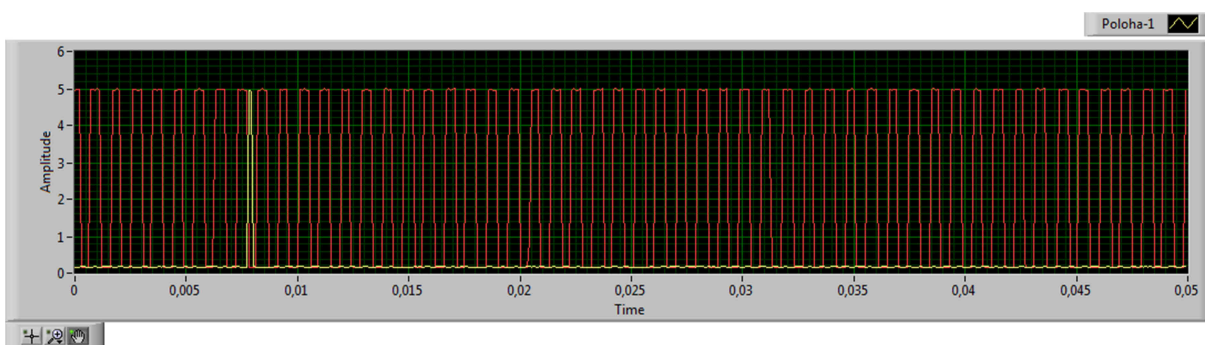
Obr. 4.6 Průběh měřeného tlaku vyhlazený funkcí Smooth s hodnotou 10



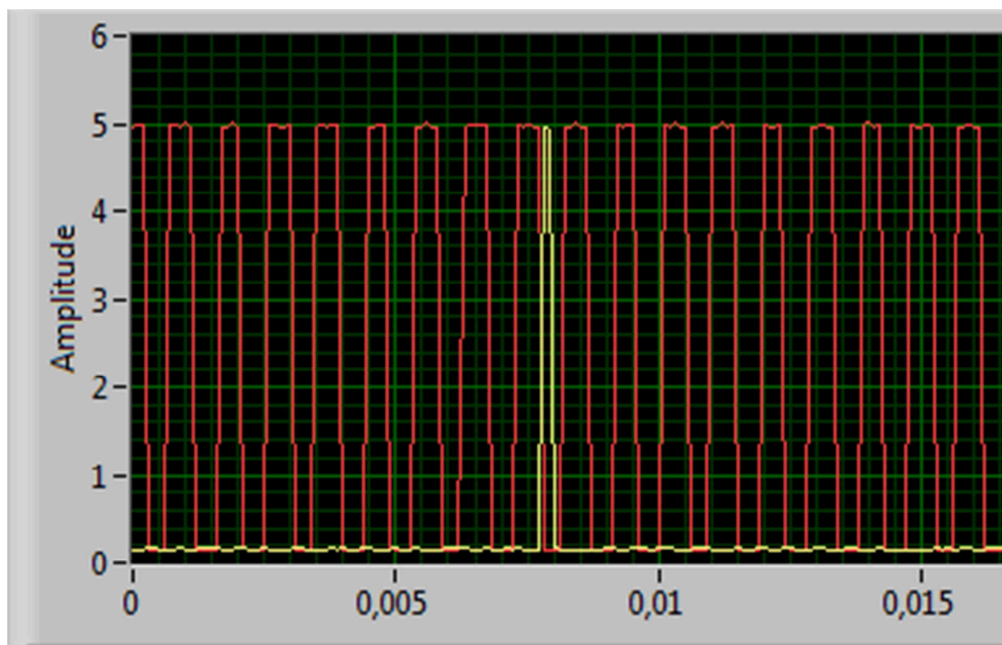
4.4.2 SNÍMÁNÍ SIGNÁLU OPTOELEKTRICKÝM SNÍMAČEM POLOHY

Optoelektrický snímač pro snímání natočení klikového hřídele zpracovává dva druhy signálů. První signál vydává 1 pulz za jednu otáčku klikového hřídele. Vysílání tohoto pulsu ovlivňuje clonka optoelektrického snímače, která je v případě měřeného motoru nastavena pro polohu horní úvratí pracovního pístu. Charakteristická je náběžná hrana signálu, prostřednictvím které po dosažení stanoveného napětí začíná snímání 1000 hodnot dat druhého signálu a také 1000 hodnot tlaku průběhu snímání senzoru tlaku.

Druhý signál vydává 1000 pulzů za jednu otáčku klikového hřídele. Umožňuje tak rozlišit hodnoty snímání senzoru tlaku na snímanou hodnotu za 1/1000 otočení klikového hřídele. Vstupním okamžikem pro sběr dat je rovněž náběžná hrana signálu, u které se stanoví vstupní hodnota napětí pro počátek snímání dat. Signály znázorňuje obr. 4.7 a obr. 4.8, kde je žlutě zobrazen první signál a červeně signál druhý.



Obr. 4.7 Signály vysílané optoelektrickým snímačem polohy



Obr. 4.8 Detail snímaného signálu optoelektrického snímače



5 MĚŘENÍ

5.1 POSTUP MĚŘENÍ

Před vlastním měřením bylo nutné eliminovat některé možné nežádoucí vlivy, které by mohly narušit optimální chod motoru, zejména odhalit možné netěsnosti motoru. Proto jsem demontoval pracovní píst a kompletně jej včetně pracovního válce očistil a motorovým olejem zakonzervoval. Stejný úkon jsem následně provedl i u ojnice přemíst'ovacího pístu, v místě jejího průchodu vrchní plochou válce přemíst'ovacího pístu.

Po propojení měřících zařízení a jejich testovacím odzkoušení následovalo měření. Topné tělísko zasunuté do ohřívacího segmentu v průchozím otvoru bylo nutné umístit tak, aby bylo celým svým vyhřívacím objemem vloženo v segmentu a mělo co možná nejvyšší vyhřívací účinnost. Měření probíhalo v určitých časových relacích s přesně stanoveným příkonem topného tělíska. Nastavitelný příkon tělíska zajistil s ním propojený triakový regulátor výkonu s potenciometrem, do kterého byl zapojený měřící mezičlen s digitálním ukazatelem proudu, napětí a příkonu. Tělíska tak bylo možné regulovat od hodnoty příkonu 0 až do 100 W. Pro porovnání jsem provedl dva druhy provozních měření - jedno měření probíhalo při ochlazování „studené“ části válce přemíst'ovacího pístu pouze volným prouděním vzduchu v místnosti v době, kdy se ustálila teplota pracovního plynu uvnitř motoru, druhé měření probíhalo s malým ventilátorem, který ochlazoval při stejném příkonu do topného tělíska vrchní plochu válce přemíst'ovacího pístu nuceným prouděním až do doby, kdy se ustálila teplota plynu ve vnitřním prostoru motoru. Pak opět následovalo snímání dat.

Časový průběh měření

Stirlingův motor, umístěný do laboratoře bylo nutné nejdříve zahřát na provozní teplotu. Motor byl po stanovený čas 30 minut ohříván topným tělískem o příkonu 40 W, určeném pro první měření. Po optické kontrole přístroje, měřícího teploty vnitřního prostoru „horké“ a „studené“ části válce přemíst'ovacího pístu a ujištění se, že jsou ustálené, bylo spuštěno první měření. Proběhlo snímání dat a teplot. Následně se při stejném příkonu do topného tělíska vrchní plocha válce přemíst'ovacího pístu ochlazovala ventilátorem tak dlouho, než došlo k opětovnému ustálení teplot pracovního plynu a zaznamenaly se jejich hodnoty a data z měřícího senzoru a snímače znovu. Dále se snížila hodnota příkonu na 30 W a pokračovalo se v měření. Tímto způsobem byla provedena všechna měření se stanovenými příkony 10, 20, 30 a 40 W. Během jednotlivých měření byl přístroj po celou dobu v provozu bez přerušení chodu.

Během celé doby měření byly průběžně kontrolovány hodnoty teploty a tlaku okolního prostředí v laboratoři. Tyto hodnoty byly stabilní po celou dobu měření. Laboratorní teplota činila 21,5 °C a laboratorní tlak byl 100,45 kPa.

Celkem bylo zaznamenáno 8 souborů naměřených hodnot; 4 úrovně příkonu a 2 způsoby chlazení. Každé měření obsahovalo 1200 hodnot s naměřeným tlakem a 1200 hodnot s časovým údajem pro každou polohu hřídele. Při jedné otáčce hřídele bylo generováno 1000 hodnot a dále bylo zaznamenáno 100 hodnot navíc před startem cyklu a 100 po dokončení cyklu. Tyto nadbytečné hodnoty sloužily pro případné dodatečné vyhlazování křivek, a to hlavně při výpočtu úhlové rychlosti a úhlového zrychlení. Vzhledem k ohromnému množství dat budou v této diplomové práci prezentovány výsledky měření téměř výhradně ve formě grafů.



Měřené a nastavované veličiny

Tab. 5.1 Veličiny užívané při měření

Veličina	Symbol	Jednotka
Příkon topného tělesa	P	Watt
Teplota laboratorního prostředí	T_{lab}	°C
Minimální teplota pracovního plynu	T_{min}	°C
Maximální teplota pracovního plynu	T_{max}	°C
Tlak laboratorního prostředí	p_{lab}	kPa
Tlak v závislosti natočení klikového hřídele α	p	kPa
Natočení klikového hřídele α	α	°
Čas	t	s

Tab. 5.2 Základní naměřené a vypočítané hodnoty při pasivním chlazení

Příkon	T_{min}	T_{max}	$T_{\text{stř}}$	ΔT	Množství plynu	Čas	Otáčky
10 W	32,5 °C	62,1 °C	47,3 °C	29,6 °C	0,019440 mol	1,543 s	38,9 min ⁻¹
20 W	41,1 °C	81,2 °C	61,2 °C	40,1 °C	0,018660 mol	0,883 s	68,0 min ⁻¹
30 W	49,3 °C	100,9 °C	75,1 °C	51,6 °C	0,017951 mol	0,610 s	98,3 min ⁻¹
40 W	58,5 °C	119,7 °C	89,1 °C	61,2 °C	0,017277 mol	0,510 s	117,6 min ⁻¹

Tab. 5.3 Základní naměřené a vypočítané hodnoty při aktivním chlazení

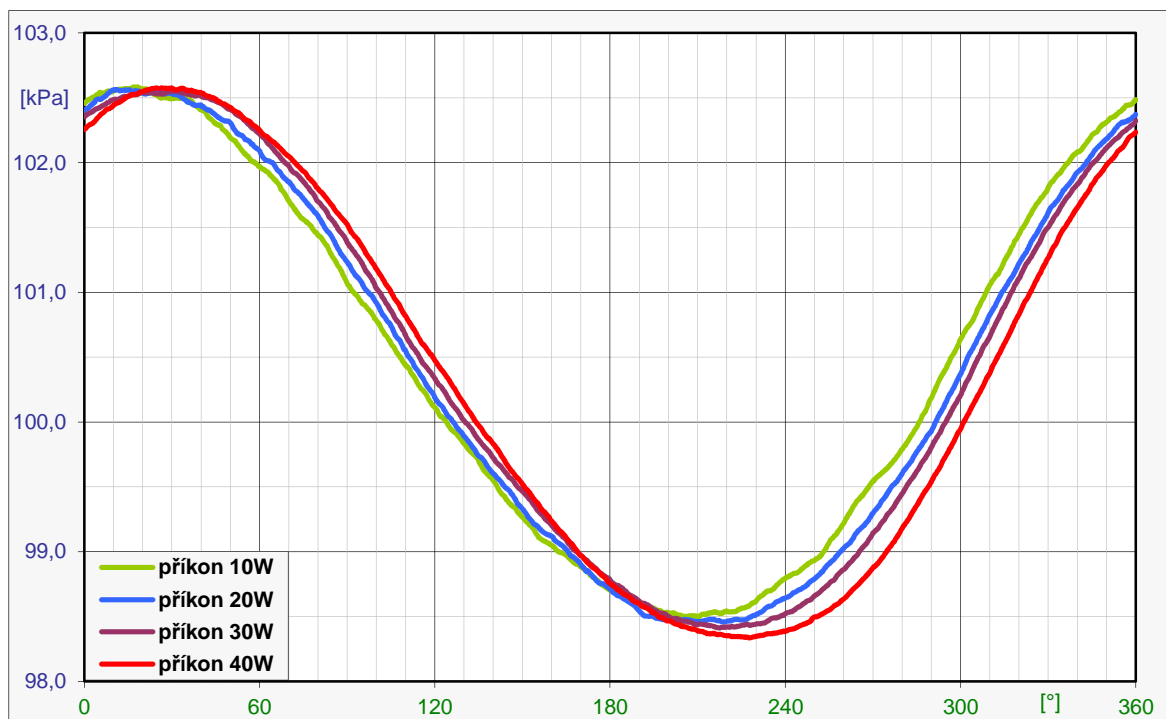
Příkon	T_{min}	T_{max}	$T_{\text{stř}}$	ΔT	Množství plynu	Čas	Otáčky
10 W	24,3 °C	56,2 °C	40,3 °C	31,9 °C	0,019906 mol	1,455 s	41,2 min ⁻¹
20 W	27,6 °C	71,6 °C	49,6 °C	44,0 °C	0,019359 mol	0,841 s	71,4 min ⁻¹
30 W	31,6 °C	87,0 °C	59,3 °C	55,4 °C	0,018847 mol	0,612 s	98,0 min ⁻¹
40 W	38,1 °C	106,3 °C	72,2 °C	68,2 °C	0,018185 mol	0,476 s	126,0 min ⁻¹

Hodnoty ve sloupci „čas“ udávají dobu jedné otáčky, tedy trvání jednoho pracovního cyklu Stirlingova motoru při daném příkonu.

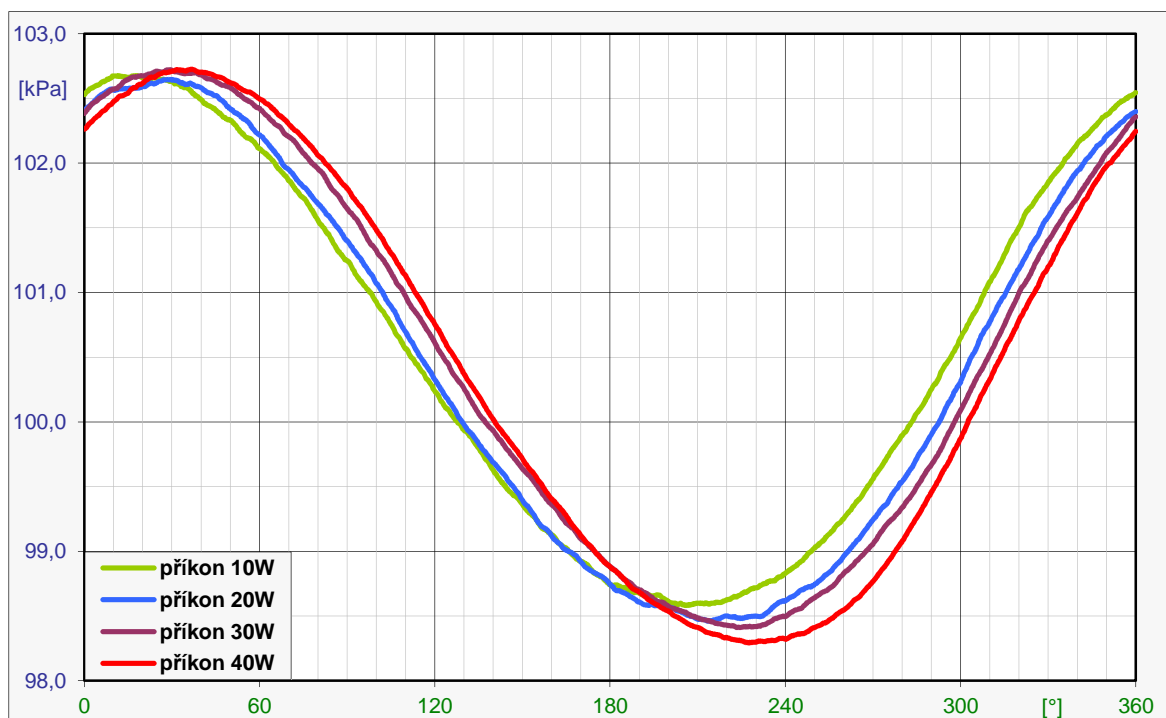


5.2 ZÁVISLOST TLAKU NA POTOČENÍ KLIKOVÉ HŘÍDELE

Na následujících grafech vidíme závislost průběhu tlaku na natočení klikového hřídele. Uvedené příkony slouží pouze k identifikaci jednotlivých měření.



Obr. 5.1 Závislost tlaku na natočení klikové hřídele, pasivní chlazení

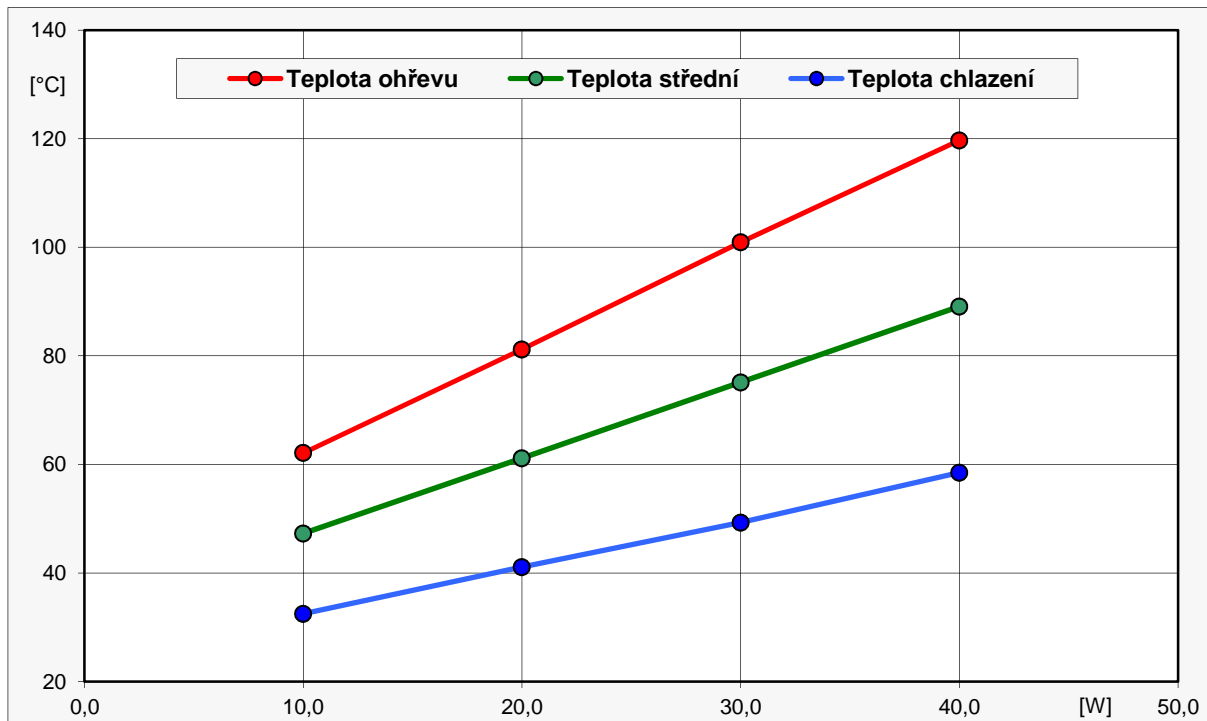


Obr. 5.2 Závislost tlaku na natočení klikové hřídele, aktivní chlazení

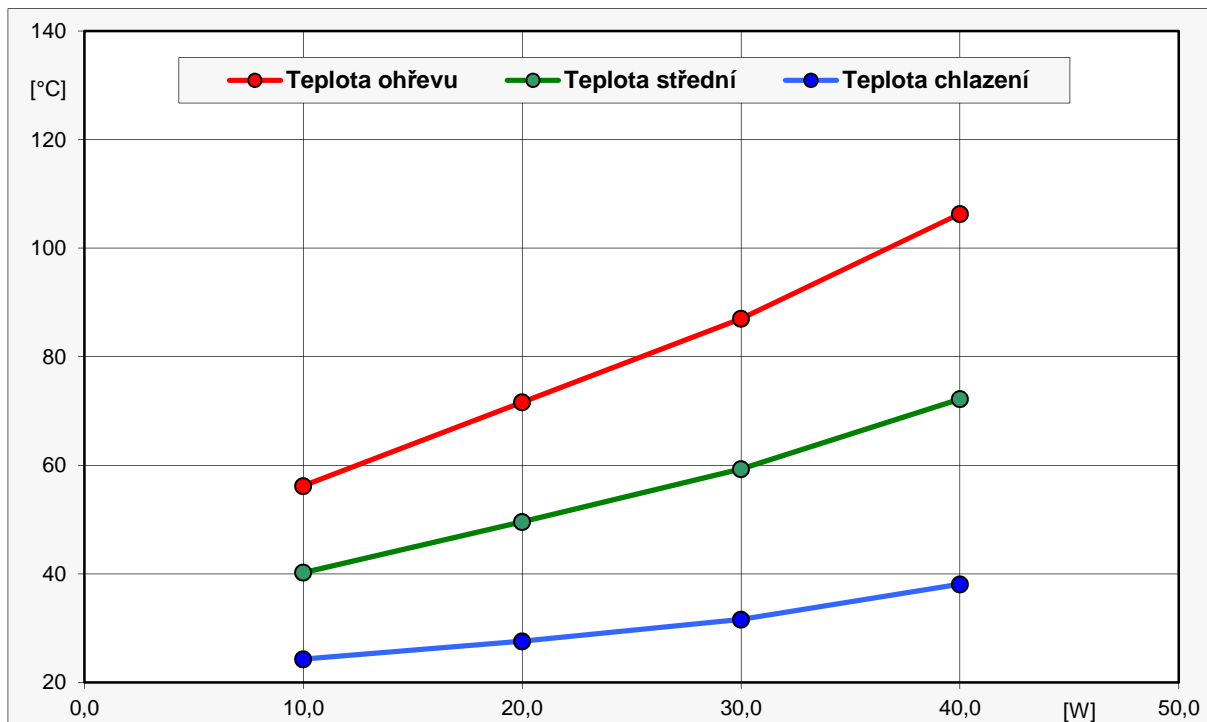


5.3 PRŮBĚH TEPLOT

Ohřívání Stirlingova motoru topným tělískem při pasivním i aktivním chlazení udává rovnoměrný nárůst teploty „horké“ a „studené“ části válce přemísťovacího pístu.



Obr. 5.3 Nárůst teploty při stanoveném příkonu topného tělíska, pasivní chlazení



Obr. 5.4 Nárůst teploty při stanoveném příkonu topného tělíska, aktivní chlazení

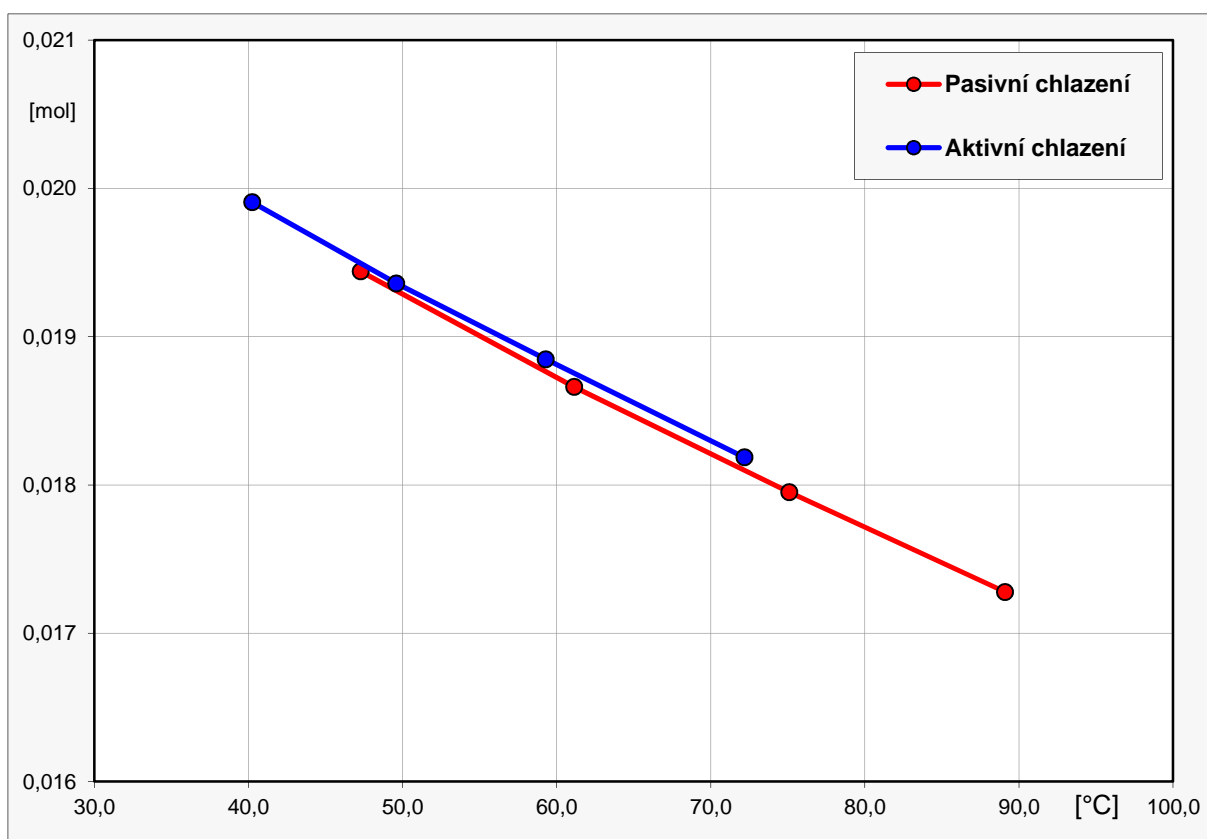


U aktivního chlazení vrchní plochy „studené“ části válce přemístovacího pístu není technicky možné izolovat „horkou“ a „studenou“ část. Vlivem toho dochází k částečnému ochlazení plynu i v „horké“ části. Tento pokles teploty je však menší než pokles teploty na straně ochlazované. Z toho vyplývá, že teplotní diference je při aktivním chlazení větší než u pasivního chlazení.

Teploty jsou vyneseny v závislosti na příkonu, ten však slouží spíše jako identifikace jednotlivých sad naměřených hodnot. Jako vztažná veličina je příkon nevhodný, neboť je obtížné stanovit, jak velké množství tepla bylo dodáno do samotného motoru. Topné zařízení je umístěné vně motoru a většina jeho povrchu je v kontaktu s okolním prostředím (viz obrázek 5.19 v kapitole 5.7). Kromě úniku tepla do okolní atmosféry se část tepelné energie dostane do horní ochlazované části motoru kondukcí přes kovovou kostru motoru. Pro tyto značné a těžko vyčíslitelné ztráty je použití příkonu jako vztažné veličiny nevhodné. Proto, pokud to bude nezbytné, budou naměřené a vypočtené hodnoty vztahovány na **střední teplotu plynu** v motoru, protože ta je ukazatelem energie, která skutečně prošla přes tepelné výměníky vnitřním prostorem měřeného zařízení.

5.4 MNOŽSTVÍ PRACOVNÍHO PLYNU V MOTORU

Množství pracovního plynu v motoru se vlivem netěsností pracovních prostor s rostoucí se teplotou mění, (viz obr. 5.5). S rostoucí teplotou se zvyšuje tlak v motoru a vlivem toho dochází k většímu úniku plynu z pracovního prostoru motoru, látkové množství pracovního plynu se snižuje. U pasivního chlazení se pracovní plyn zahřívá v oblasti „horké“ části válce pracovního pístu na vyšší hodnoty teploty a tudíž dochází k větším ztrátám pracovního plynu.



Obr. 5.5 Látkové množství unikajícího plynu v závislosti na jeho teplotě



Z obrázku 5.5 je patrné, že průběh křivek, vyjadřující množství pracovního plynu ve vnitřním prostoru motoru u pasivně chlazeného a aktivně chlazeného měření je v rozsahu společných teplot prakticky shodný.

Látkové množství plynu v motoru vypočítáme z podílu středního tlaku plynu a středního parciálního tlaku 1 molu plynu. Střední tlak plynu \bar{p} získáme numerickou integrací tlaku změřeného během pracovního cyklu (viz rovnice 5.1). Průběh tlaku v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele byl uveden v kapitole 5.2 a je znázorněn na obrázku 5.1 pro pasivní chlazení resp. 5.2 pro aktivní chlazení.

Střední parciální tlak \bar{p}_1 odvodíme ze Schmidty teorie dosazením rovnice 3.45 do rovnice 5.1. Získáme vztah 5.2, pro který použijeme stejnou numerickou integraci jako při předchozím výpočtu středního tlaku.

$$\bar{p} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(\alpha) d\alpha \quad (5.1)$$

$$\bar{p}_1 = \frac{R}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{\sum_{i=1}^k \frac{V_i}{T_i}} \quad (5.2)$$

Hodnota k udává počet pracovních zón, které byly uvažovány při odvozování Schmidty teorie.

$$n = \frac{\bar{p}}{\bar{p}_1} \quad (5.3)$$

Dřívější metody výpočtu předpokládaly rozvinutí integrálních vztahů odvozených ze Schmidty teorie do řad a zanedbání členů vyšších řádů. S využitím výpočetní techniky můžeme vztah 3.45 zpracovávat numericky a vyhneme se tak potížím se složitým matematickým aparátem. Navíc i samotné odvození teoretického modelu by v budoucnu mohlo být provedeno detailněji a s využitím iteračních metod by mohla být Schmidty teorie zbavena některých nedostatků, které plynou z prostého faktu, že v polovině devatenáctého století nebyla k dispozici výpočetní technika. Proto se také s řadou údajů v této teorii pracuje jako s konstantami, ačkoli se zjevně jedná o proměnné hodnoty.

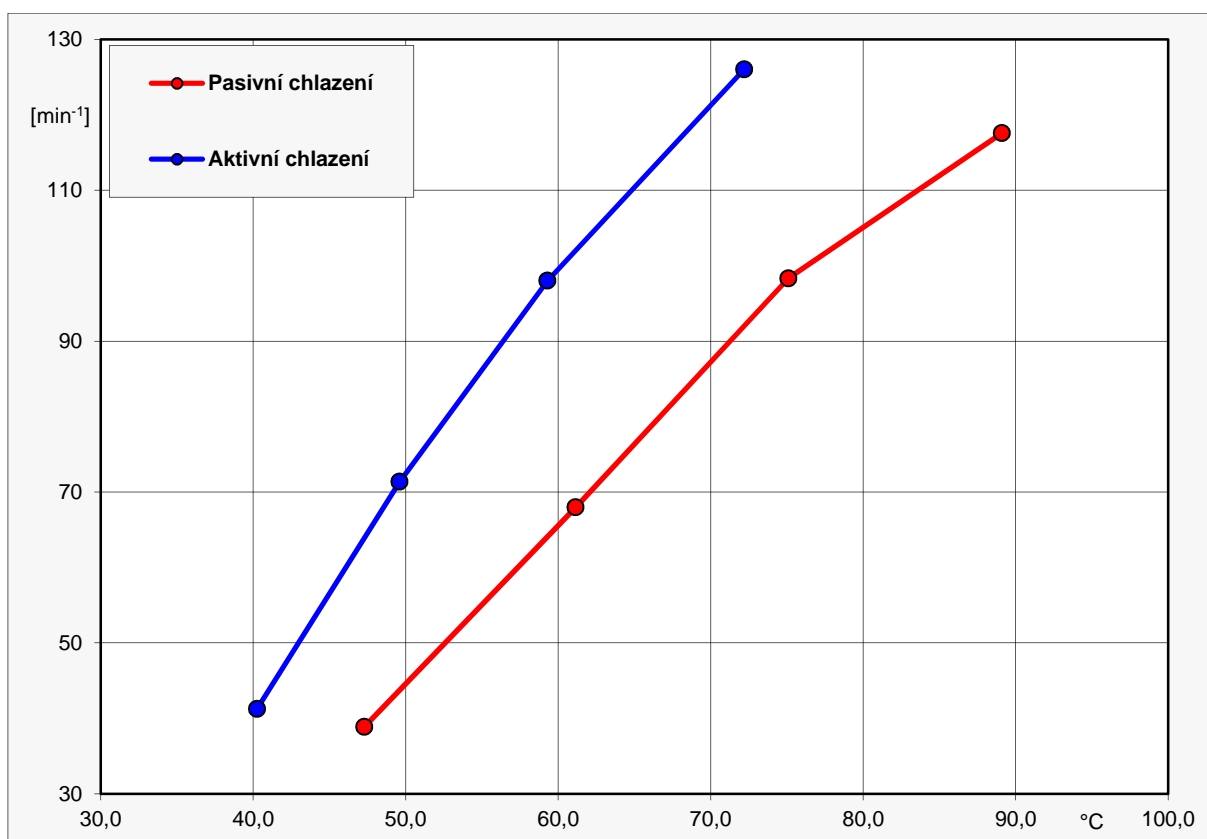


5.5 PRŮBĚH OTÁČEK MOTORU

Provozní otáčky Stirlingova motoru závisí na množství dodané tepelné energie do cyklu. Nárůst teploty pracovního plynu logicky zvyšuje otáčky motoru (obr. 5.6). Z obrázku je rovněž patrné, že se zvyšující se teplotou plynu se nárůst otáček snižuje. Tento jev ovlivňují rostoucí valivé odpory ložisek klikového mechanismu, aerodynamický odpor při pohybu setrvačnicku, tření pracovního pístu a tření pístní tyče přemíst'ovacího pístu. Všechny tyto negativní jevy rostou se zvyšujícími se otáčkami motoru.

5.5.1 ZÁVISLOST OTÁČEK NA TEPLOTĚ PLYNU

Ze závislosti na obrázku 5.6 je zřejmé, že při aktivním chlazení došlo i přes pokles teploty plynu k nárůstu otáček motoru.



Obr. 5.6 Nárůst otáček motoru s rostoucí teplotou pracovního plynu

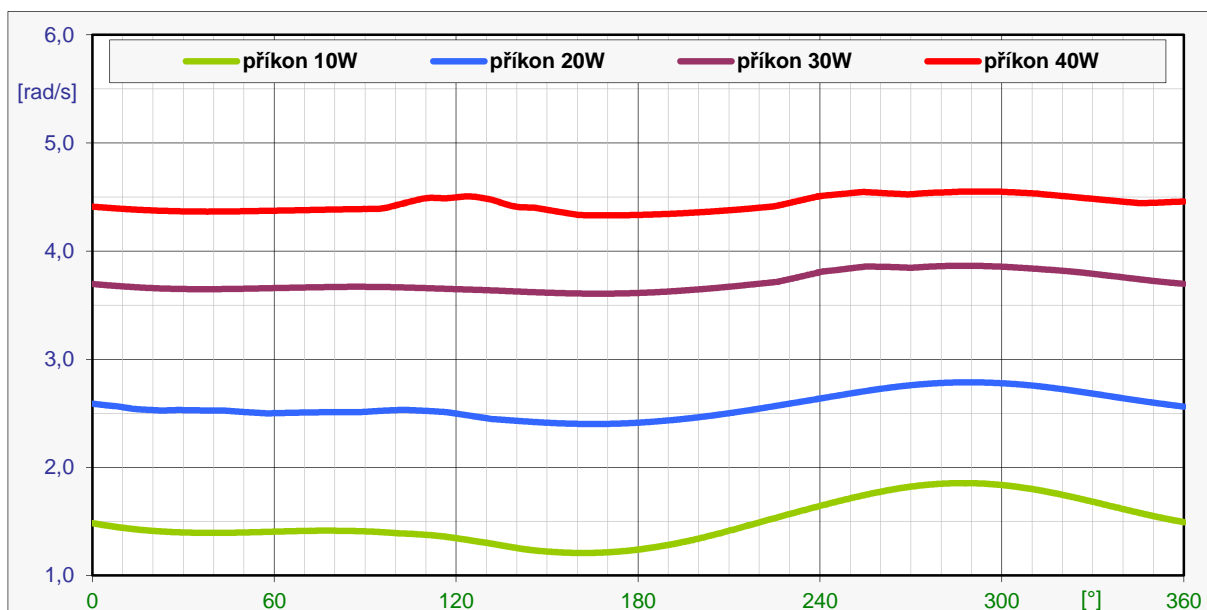
5.5.2 PRŮBĚH ÚHLOVÉ RYCHLOSTI V ZÁVISLOSTI NA POTOČENÍ HŘÍDELE

Kromě počtu otáček motoru je důležité sledovat i průběh úhlové rychlosti během jedné otáčky, tedy během jednoho pracovního cyklu. Měřicí optoelektrický snímač poskytuje 1000 hodnot na jednu otáčku. To nám umožní detailní rozbor pohybu klikového hřídele v průběhu pracovního cyklu Stirlingova motoru. Na obrázcích 5.7 a 5.8 jsou znázorněny závislosti úhlových rychlostí na úhlu natočení klikového hřídele pro jednotlivá měření.

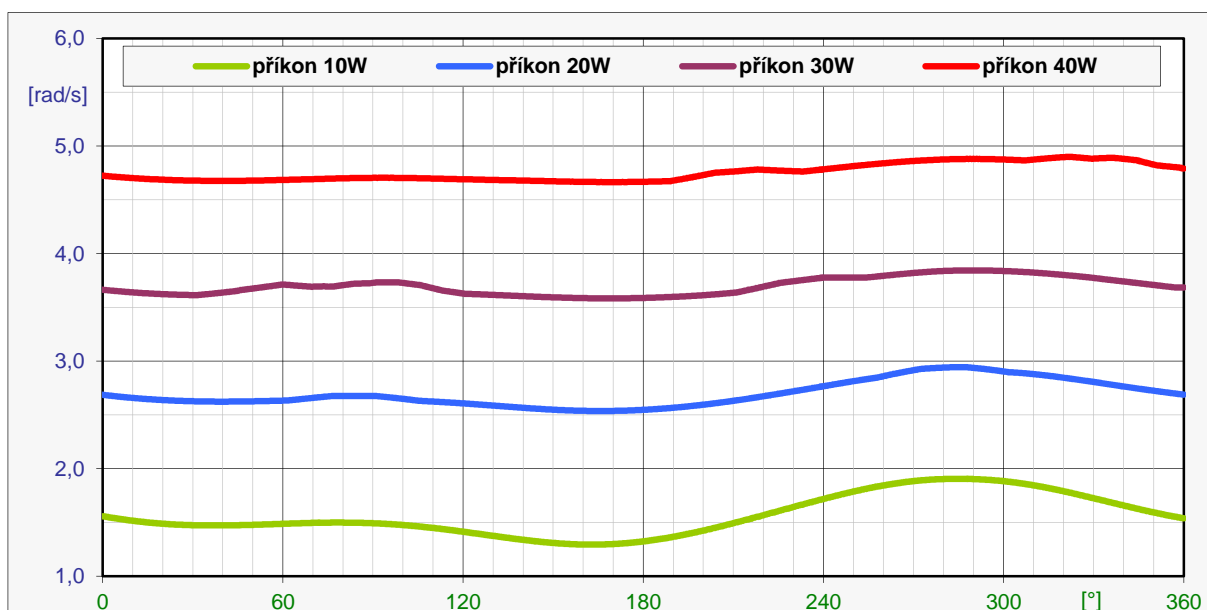
Podrobněji se analýzou úhlové rychlosti a úhlového zrychlení budeme zabývat v kapitole „Kroučící momenty“. Pro podrobnou analýzu chodu motoru byly vybrány údaje



naměřené při nejnižším výkonu resp. při nejnižší teplotě, protože rychlost motoru byla nejnižší. Právě při pomalém chodu se nejvíce projeví nerovnoměrnosti v rychlosti otáčení v závislosti na fázi pracovního cyklu.



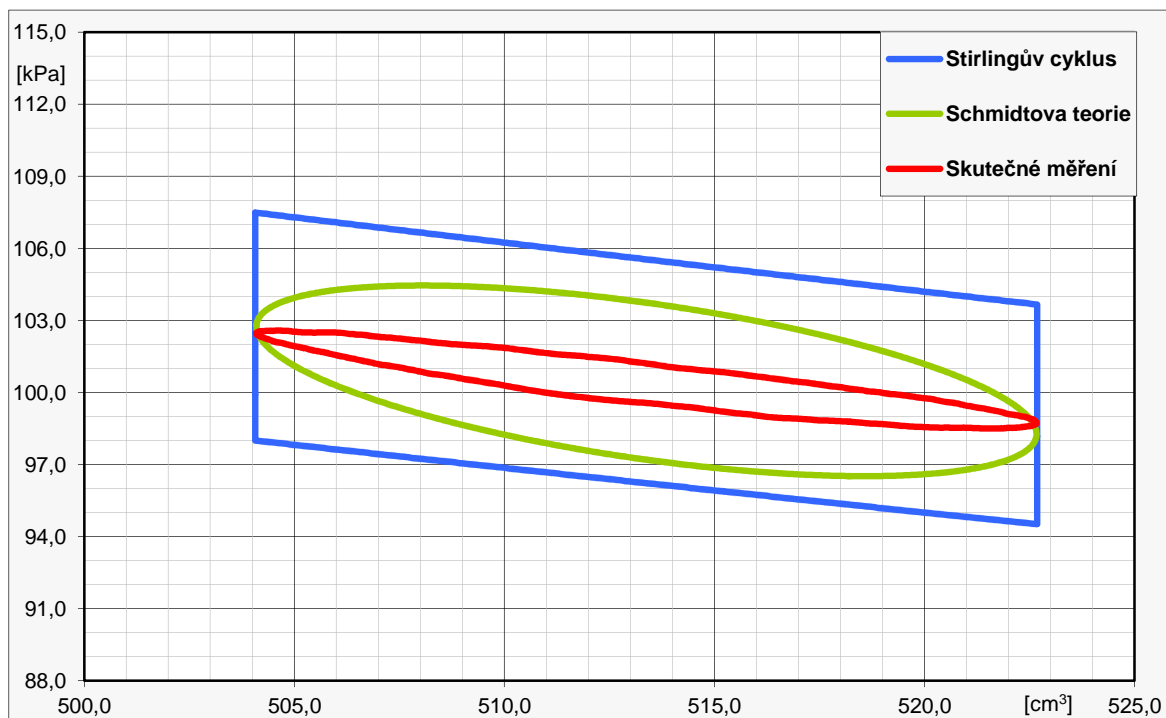
Obr. 5.7 Závislost úhlové rychlosti na natočení klikového hřídele, pasivní chlazení



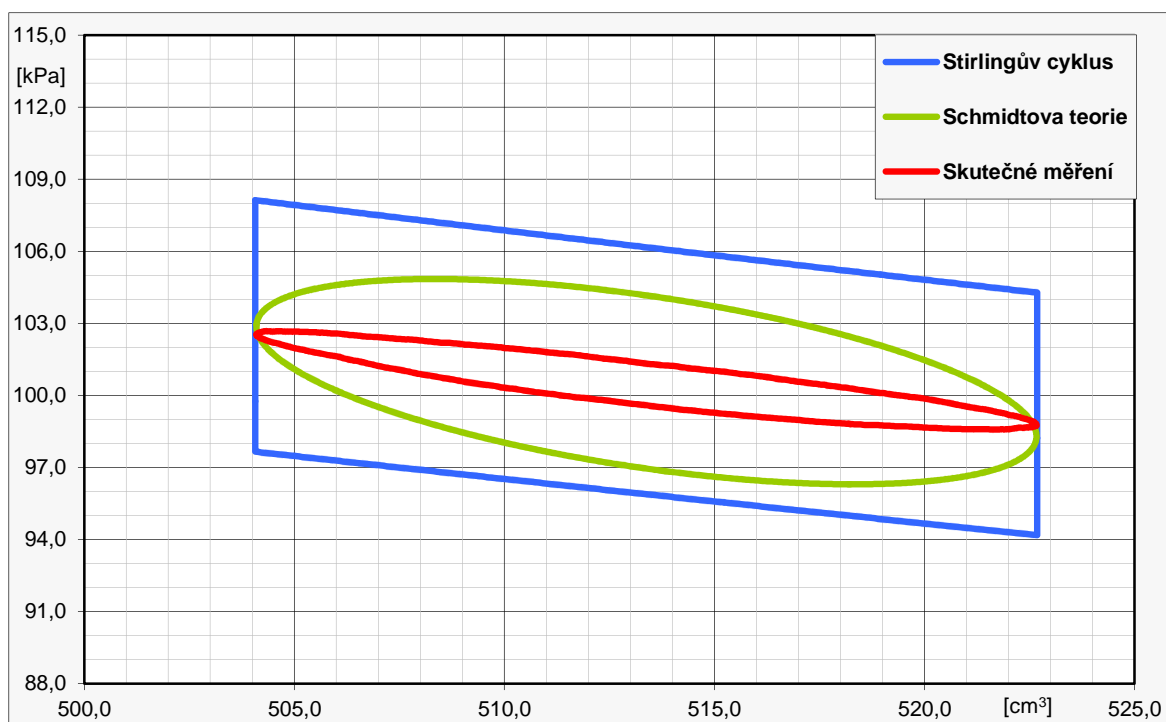
Obr. 5.8 Závislost úhlové rychlosti na natočení klikového hřídele, aktivní chlazení

5.6 ZÁVISLOST TLAKU NA OBJEMU PRACOVNÍHO PLYNU

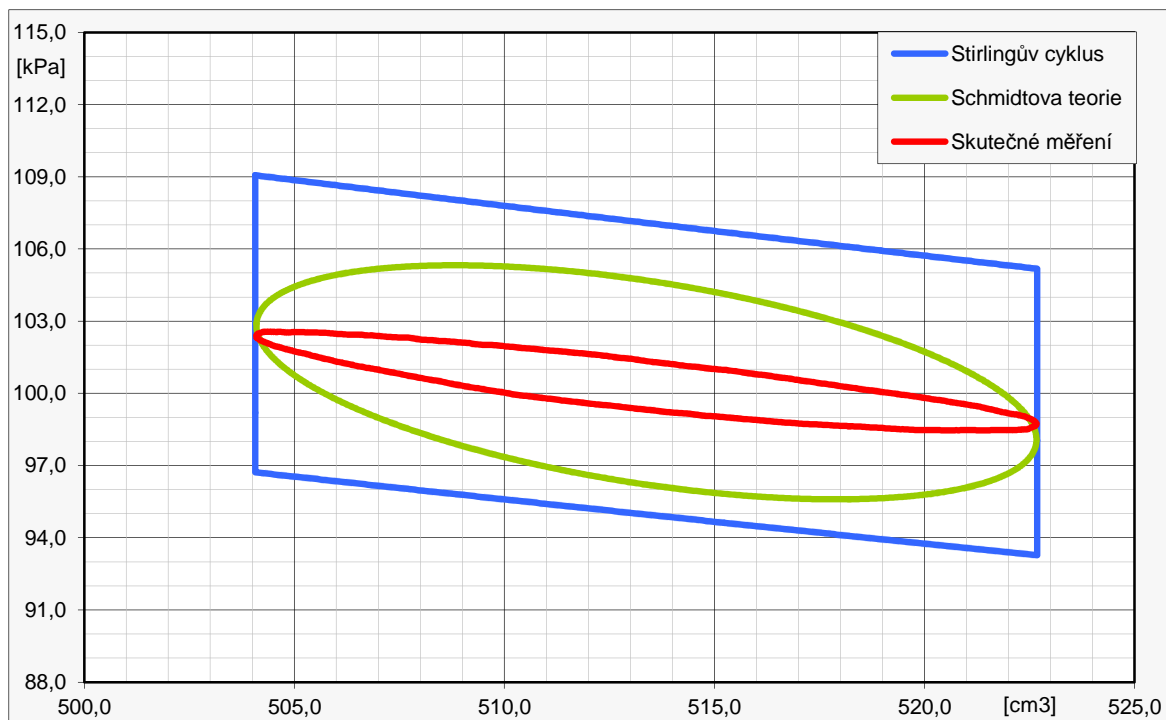
Na následujících stranách jsou p-V diagramy pro všechna provedená měření. Pro srovnání jsou na jedné stránce uvedeny grafy souborů měřených při stejném příkonu. Horní graf je vždy měření s pasivním chlazením a dolní s aktivním chlazením.



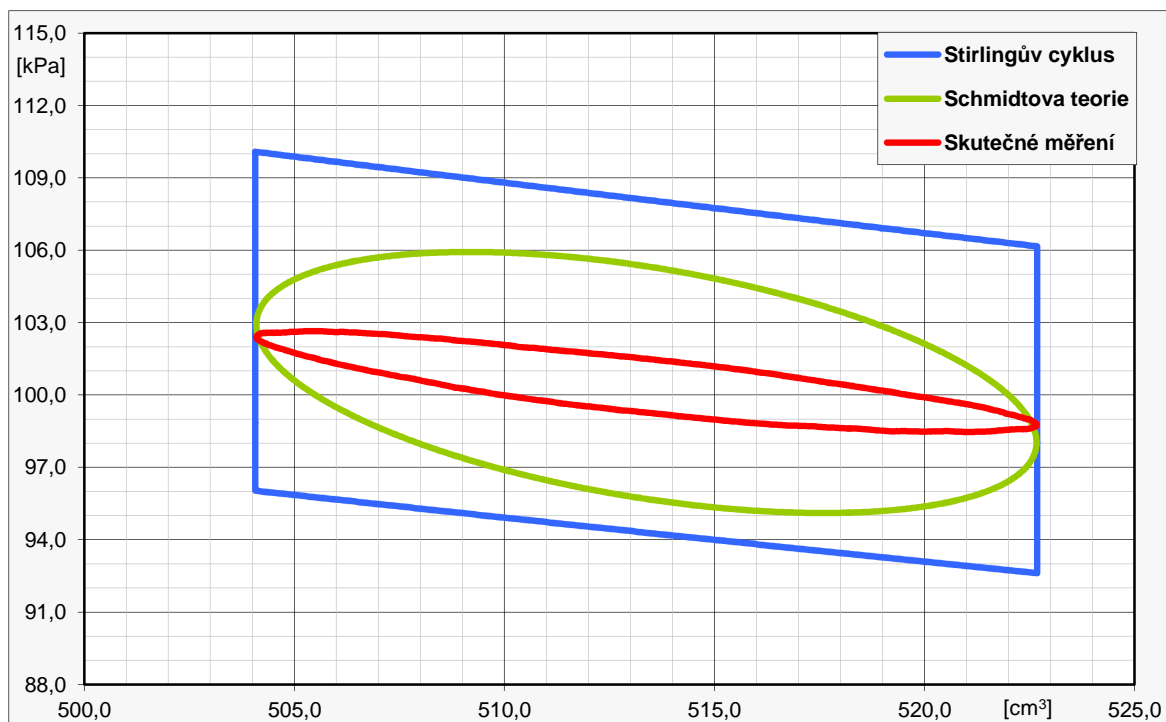
Obr 5.9 Porovnávací p-V diagram, střední teplota 47,3 °C, pasivní chlazení



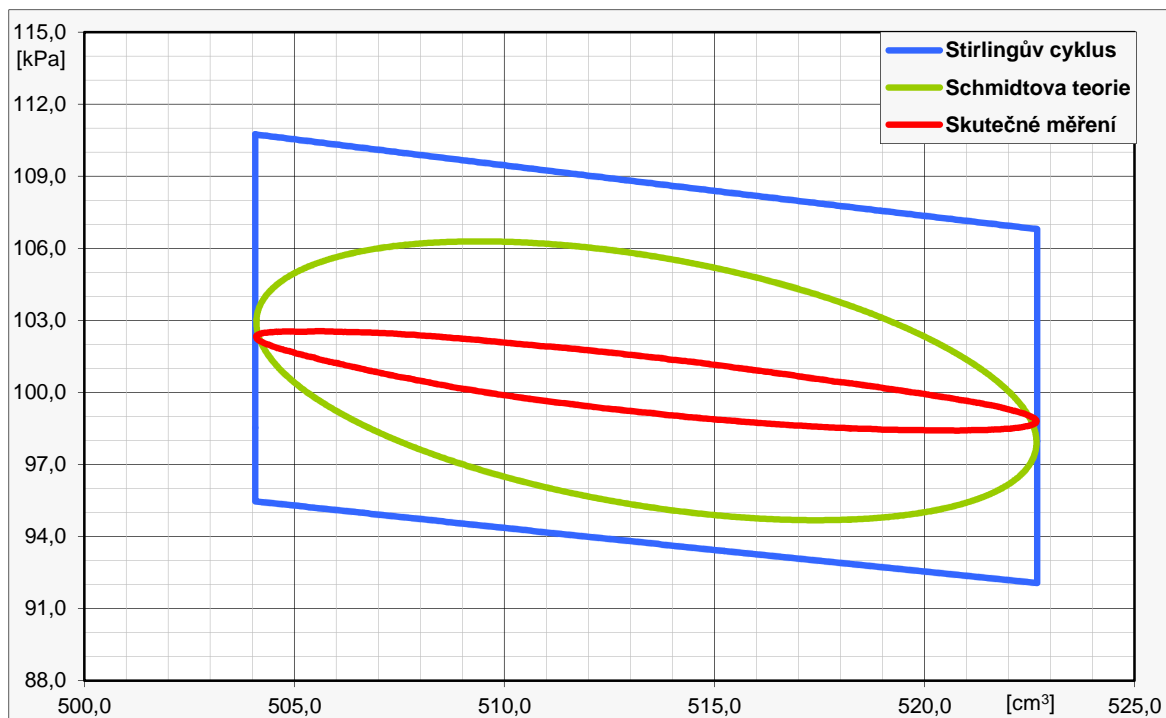
Obr. 5.10 Porovnávací p-V diagram motoru, střední teplota 40,3 °C, aktivní chlazení



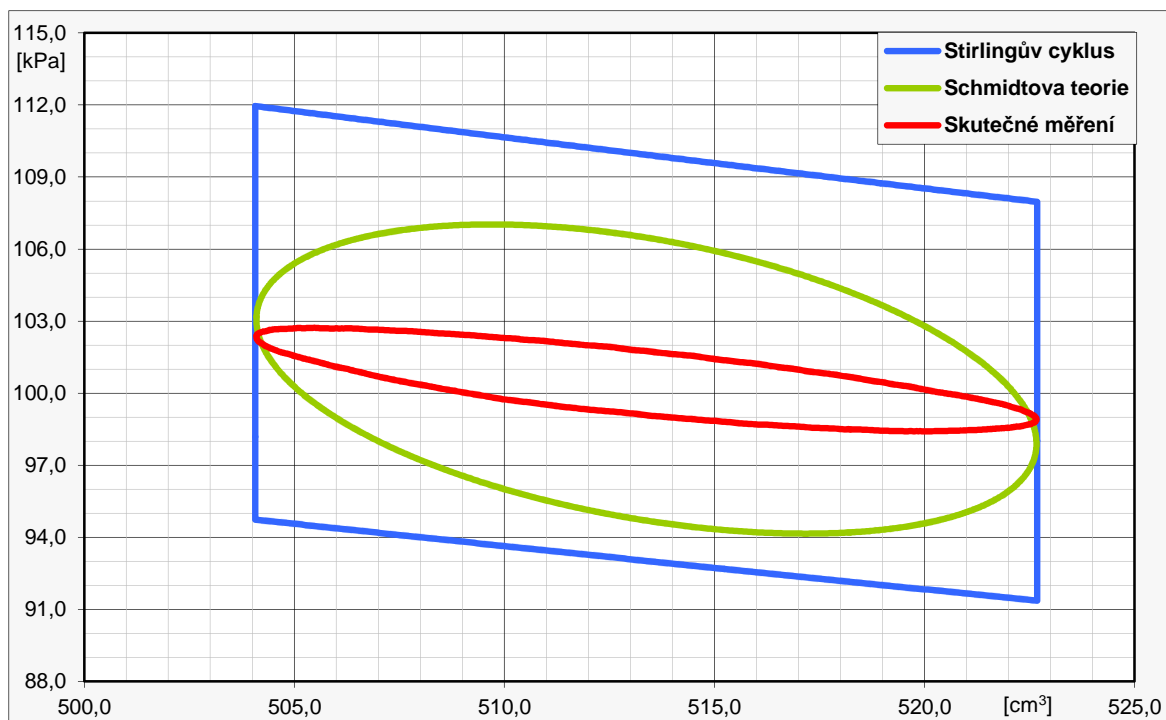
Obr. 5.11 Porovnávací p-V diagram motoru, střední teplota 61,2 °C, pasivní chlazení



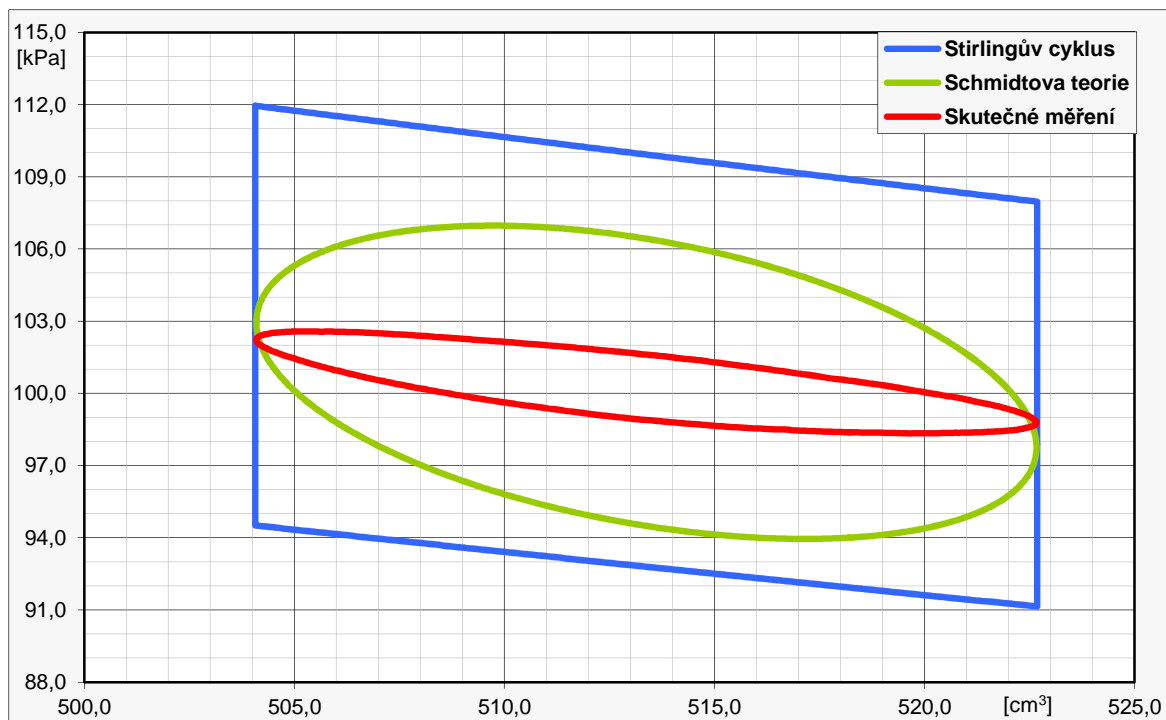
Obr. 5.12 Porovnávací p-V diagram motoru, střední teplota 49,6 °C, aktivní chlazení



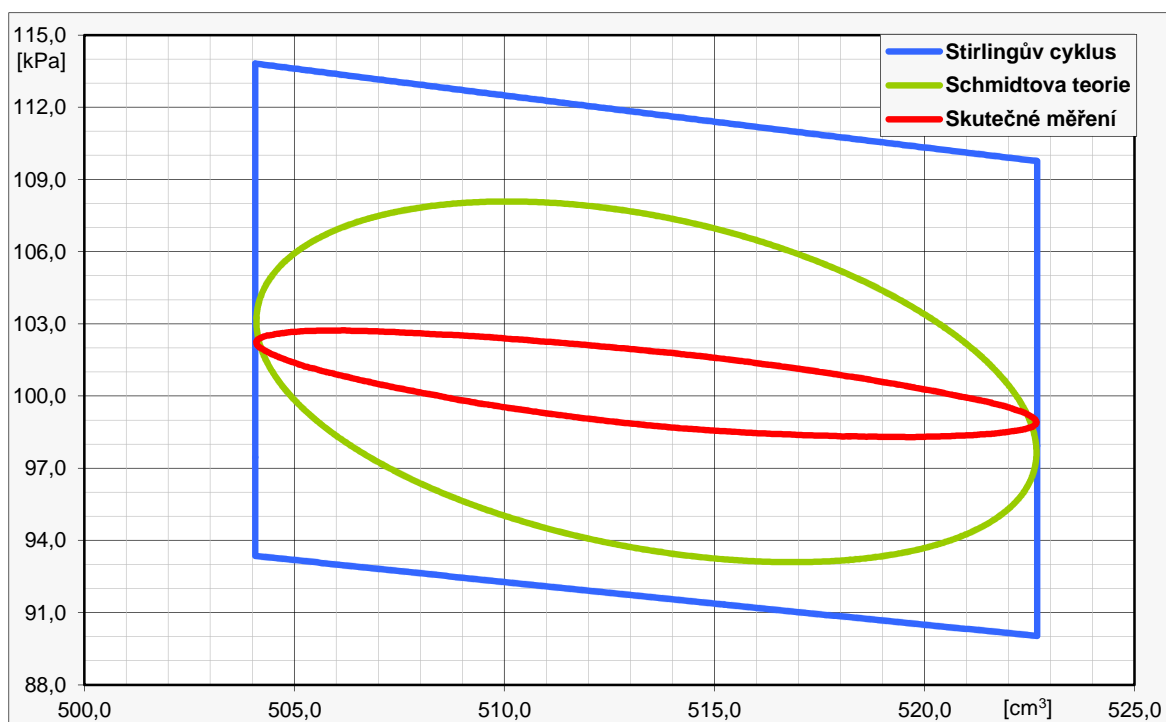
Obr. 5.13 Porovnávací p-V diagram motoru, střední teplota 75,1 °C, pasivní chlazení



Obr. 5.14 Porovnávací p-V diagram motoru, střední teplota 59,3 °C, aktivní chlazení



Obr. 5.15 Porovnávací p-V diagram motoru, příkon 89,1 °C, pasivní chlazení

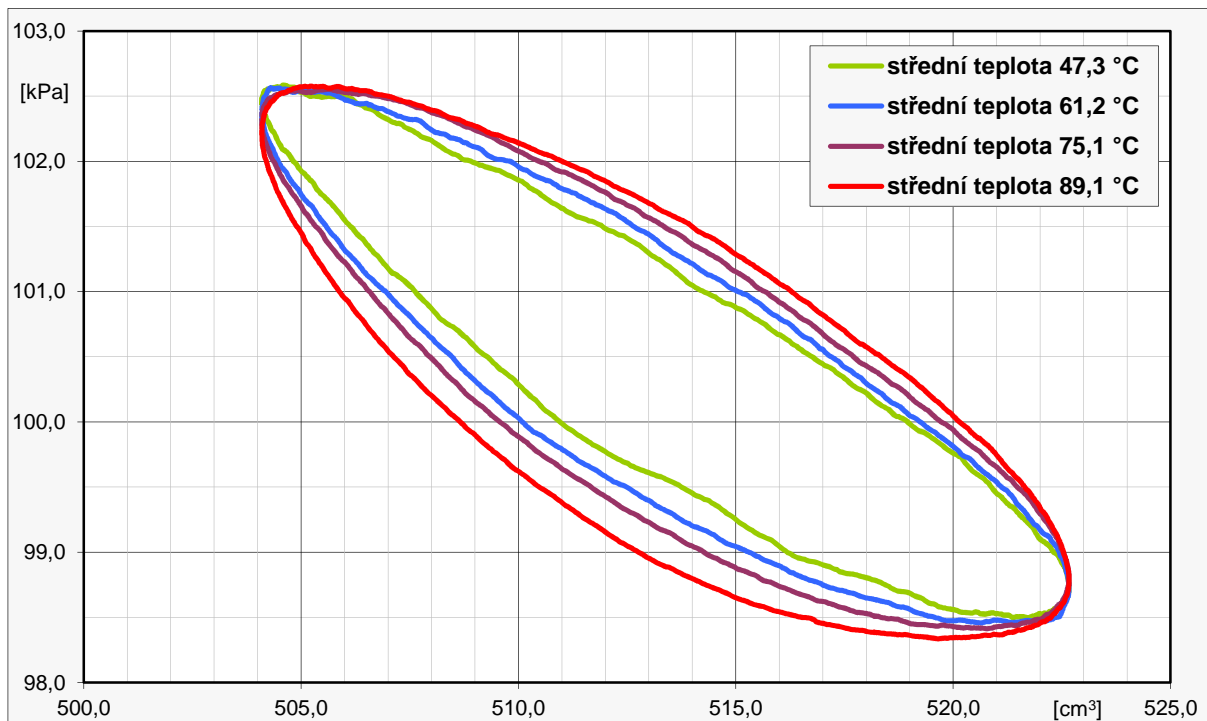


Obr. 5.16 Porovnávací p-V diagram motoru, střední teplota 72,2 °C, aktivní chlazení

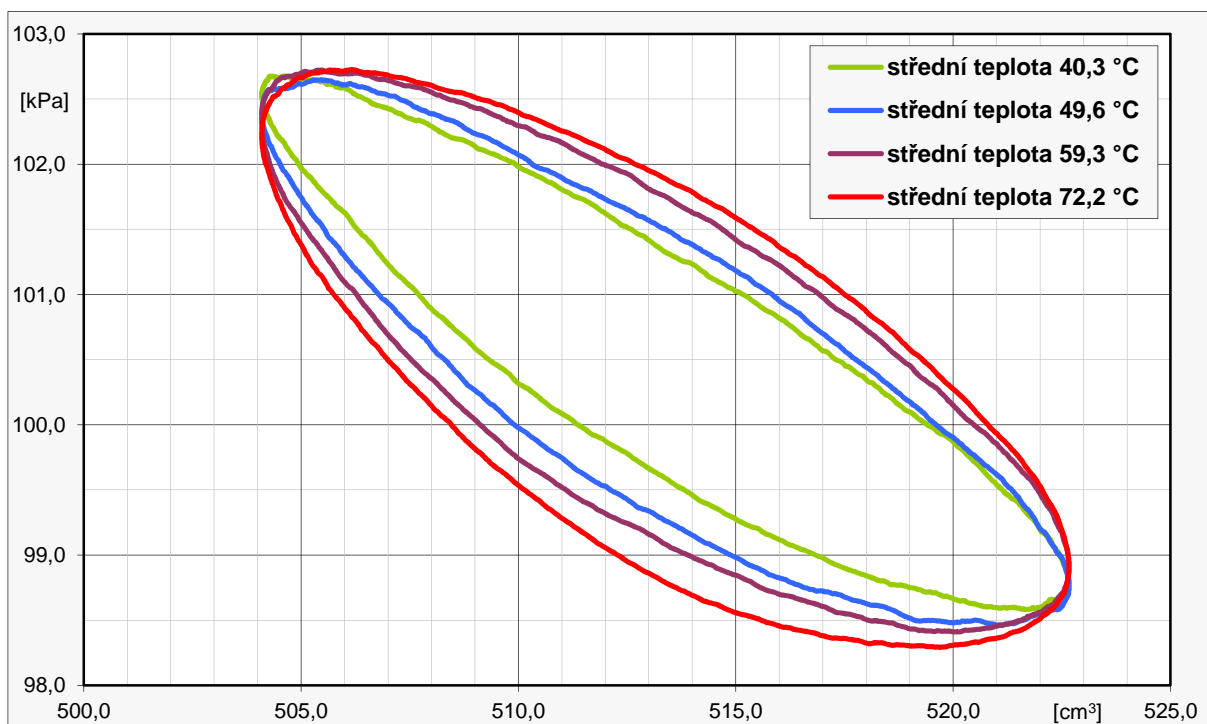


5.6.1 POROVNÁNÍ P-V DIAGRAMŮ JEDNOTLIVÝCH MĚŘENÍ

Při porovnání obrázků 5.17 a 5.18 je zřejmý nárůst ploch jednotlivých křivek při aktivním chlazení.



Obr. 5.17 Porovnání p-V diagramů jednotlivých měření, pasivní chlazení

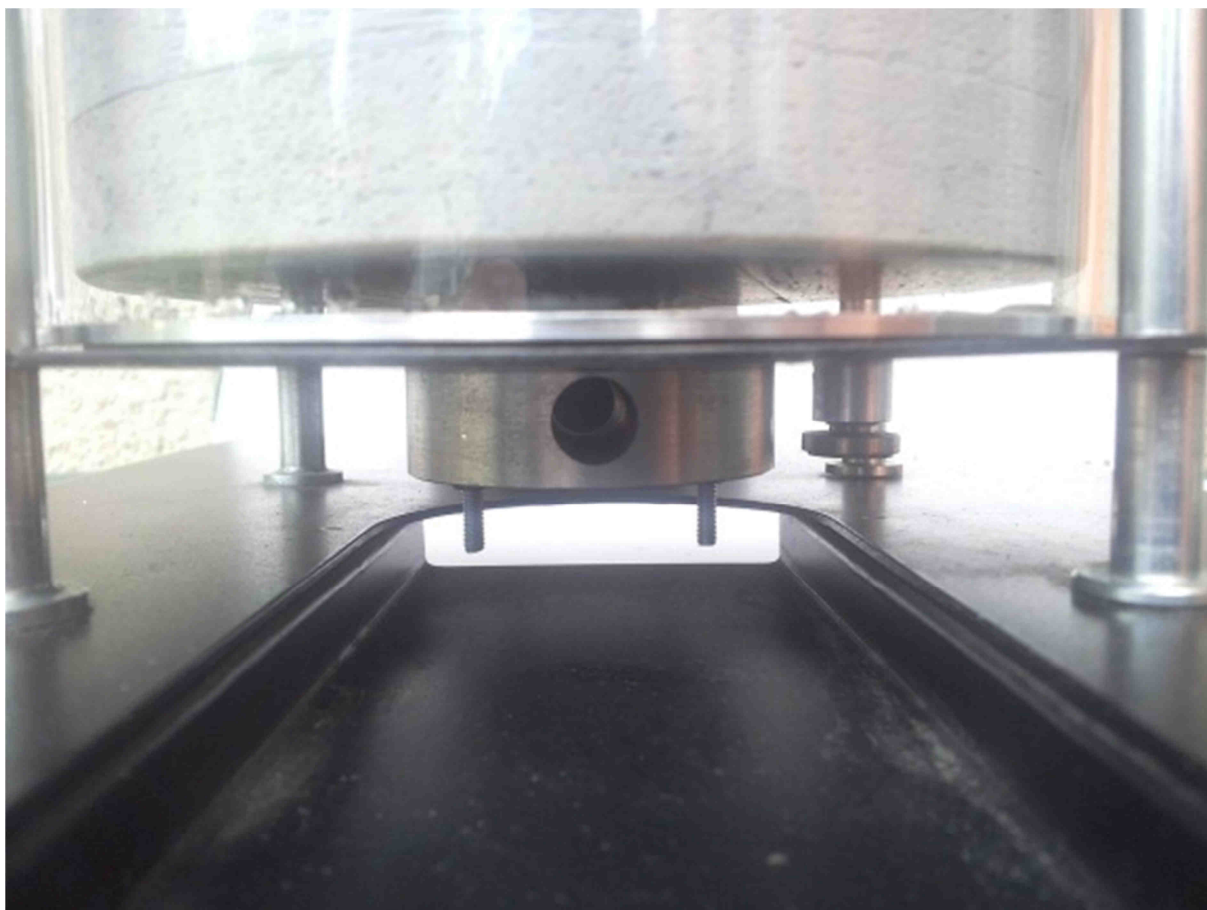


Obr. 5.18 Porovnání p-V diagramů jednotlivých měření, aktivní chlazení



5.7 ÚČINNOST STIRLINGOVA MOTORU

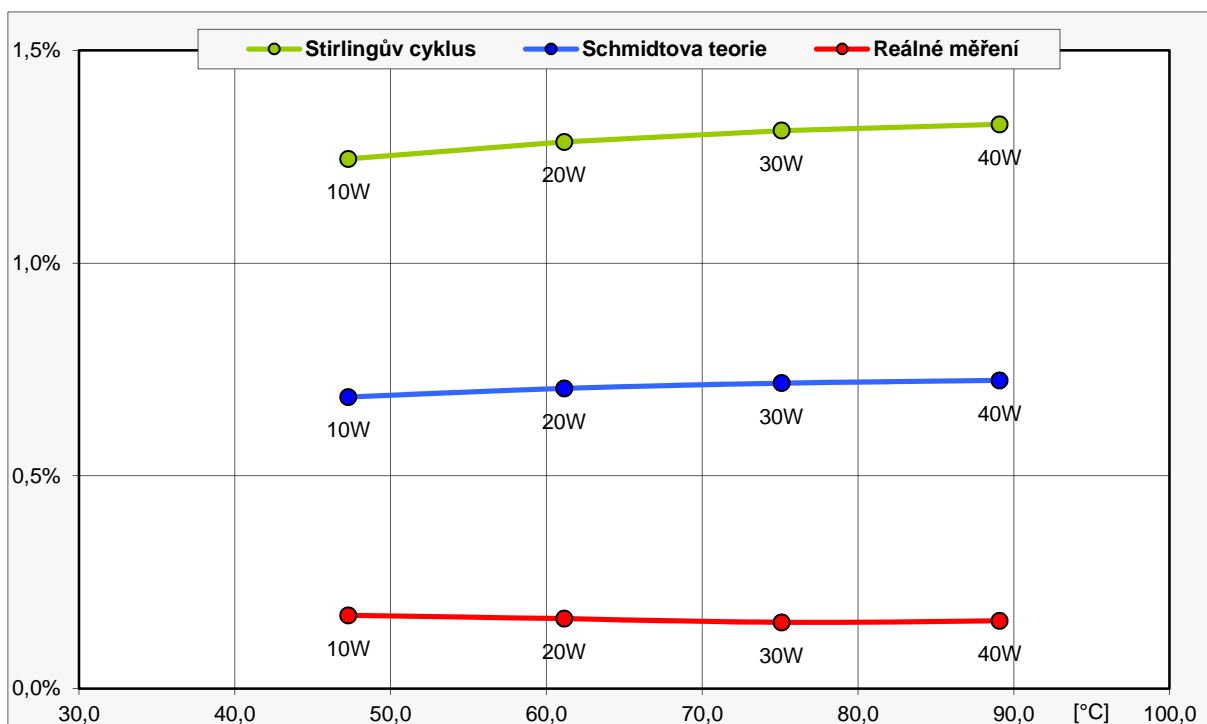
V této kapitole jsem se zabýval účinností jednotlivých cyklů při uvažovaném přivedeném množství tepla, při příkonu topného tělíska 10W, 20W, 30W, 40W.



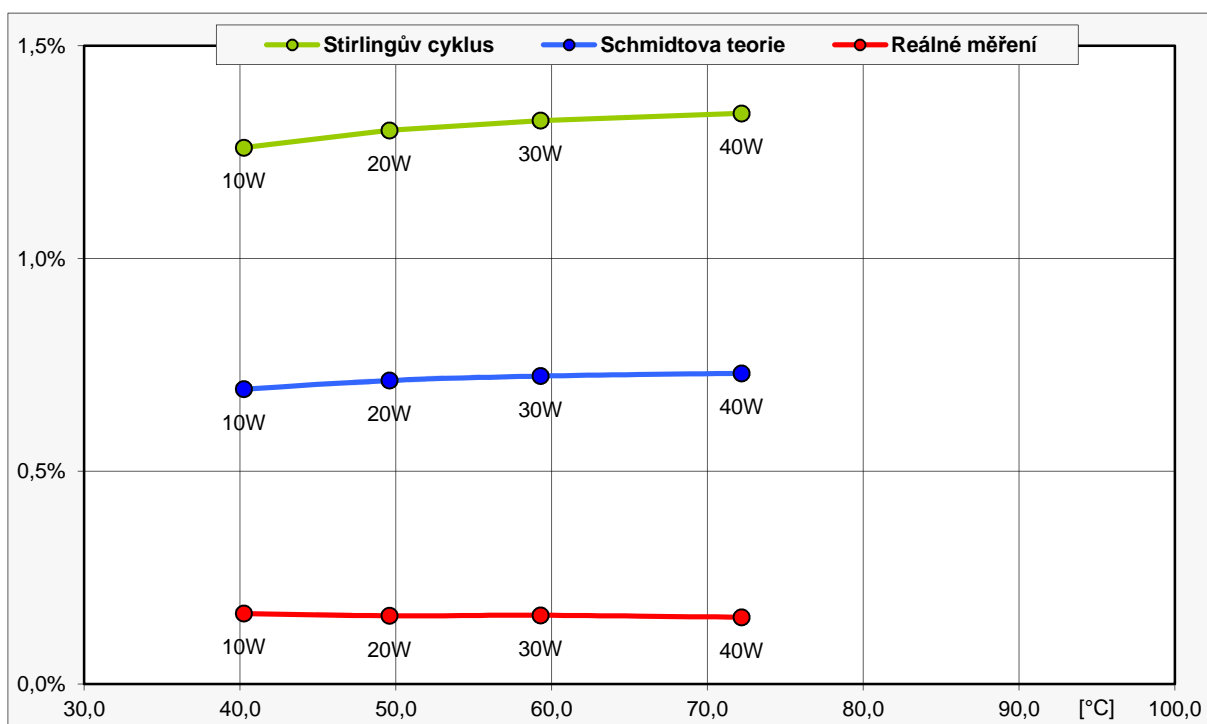
Obr. 5.19 Vyhřívací ocelový segment

Z obrázků 5.20 a 5.21 je patrné, že výsledné účinnosti cyklů dosahují poměrně nízkých hodnot. Hlavní příčinou nezvykle nízkých hodnot účinnosti cyklů spočívá ve způsobu ohřívání Stirlingova motoru (obr. 5.19). Ohřev „horké“ části válce přemístovacího pístu probíhal prostřednictvím topného tělíska zasunutého do ocelového segmentu, jehož objem se topným tělískem během měření nahříval a byl schopen udržovat přijaté teplo na úrovni potřebné k měření. Plášť ocelového segmentu nebylo možné vůči okolnímu prostředí nijak izolovat, z tohoto důvodu docházelo k poměrně značným tepelným ztrátám únikem velkého množství přiváděného tepla do okolního prostředí. Proto příkon, který Stirlingův motor při svém běhu využil, byl znatelně menší, než příkon topného tělíska.

Z důvodů uvedených v kapitole 5.2 nebyl při výpočtu použit příkon topného tělesa. Zobrazené účinnosti nebyly tedy vztaženy na tento příkon, ale byly vztaženy na hodnoty tepla vypočteného jako teplo dodaného do ideálního Stirlingova cyklu podle vzorců 3.15 a 3.26.



Obr. 5.20 Účinnost jednotlivých cyklů, pasivní chlazení

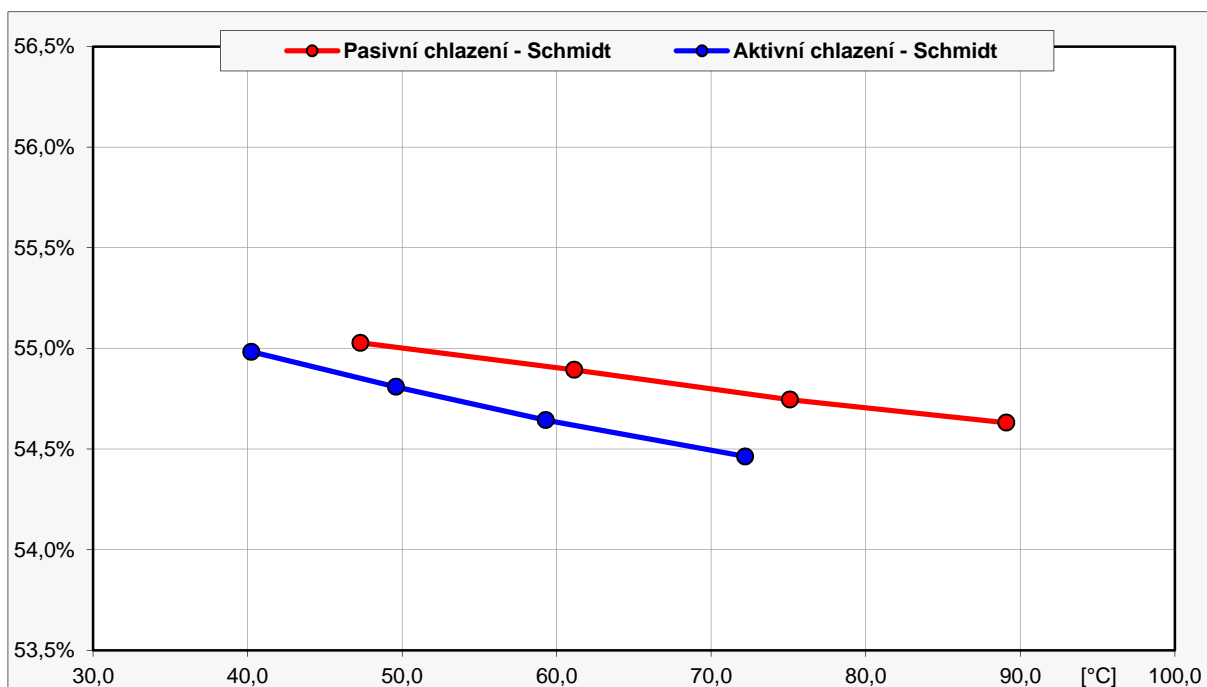


Obr. 5.21 Účinnost jednotlivých cyklů, aktivní chlazení

Výsledné hodnoty účinnosti cyklu měřených při pasivním chlazení cyklu a při aktivním chlazení nabývají téměř srovnatelných hodnot. Porovnáváné účinnosti ideálního a Schmidtova cyklu při daných dvou měřeních jsou rovněž téměř shodné. Z toho vyplývá, že aktivní chlazení průběh účinnosti cyklů v daných měřeních ovlivnilo minimálně.

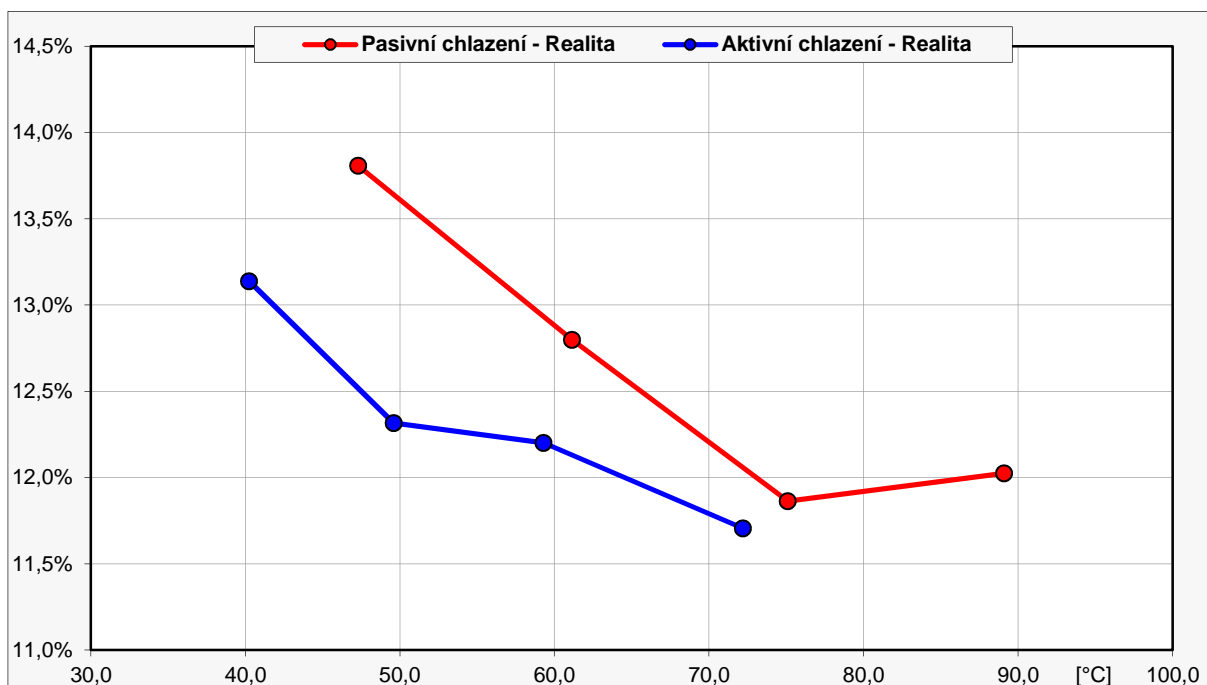


5.7.1 ÚČINNOST SCHMIDTOVA CYKLU VZTAŽENÁ NA IDEÁLNÍ CYKLUS



Obr. 5.22 Účinnost motoru dle Schmidovy teorie vztažená k ideálnímu Stirlingova cyklu

5.7.2 ÚČINNOST REÁLNÉHO MĚŘENÉHO CYKLU VZTAŽENÁ NA IDEÁLNÍ CYKLUS



Obr. 5.23 Účinnost motoru reálného měřeného cyklu vztažená k ideálnímu Stirlingova cyklu



6 DIFERENCE IDEÁLNÍHO A MĚŘENÉHO CYKLU

Pro porovnání průběhu ideálního a reálného měřeného cyklu Stirlingova motoru je nutné zaměřit se na dané faktory způsobující možné odchylky těchto cyklů.

6.1 PRACOVNÍ MÉDIUM

Konstrukce měřeného Stirlingova motoru neumožňuje dosažení konstantního objemu plynného pracovního média během chodu motoru. Tato skutečnost vylučuje jakýkoliv izochorický děj. Nedostatky způsobují netěsnosti použitých těsnících prostředků, u měřeného motoru mohou negativně působit netěsnosti mezi stěnami pracovního pístu a válce motoru a také netěsnosti v ojnicím mechanismu přemíst'ovacího pístu v místě průchodu do přemíst'ovacího válce motoru. Důsledkem těchto negativních vlivů je snížení užitečné práce cyklu.

Mimo daný motor lze brát v úvahu i skutečnost, že při vysokých provozních teplotách a tlacích mají některé pracovní látky, například vodík, schopnost difundovat přes použité konstrukční kovové materiály.

6.2 KLIKOVÝ MECHANISMUS

Pohyb pístů

Oproti ideálnímu cyklu motoru, kde se očekává, že pohyb pístu není plynulý a kontinuální, ale že se například jeden píst pohybuje a druhý je nehybný, se reálné motory konstruují tak, aby trajektorie pohybu pístu měla tvar blížící se sinusovému průběhu z důvodu příliš velkých setrvačných sil působících na píst při přechodu z nenulové rychlosti na rychlost nulovou, které by klikový mechanismus nebyl schopen snést.

Ojnice přemíst'ovacího pístu

Ojnice přemíst'ovacího pístu měřeného motoru pro jednoduchost konstrukce tvoří silonové vlákno. Nahradilo tak běžně používanou rozměrově stabilní ojnicí z hliníkových slitin. I přes výhodu v její nízké hmotnosti a ulehčení klikovému mechanismu při působení setrvačných sil spočívá její hlavní nedostatek v neschopnosti přenášet tlakové síly na klikový mechanismus. Přenáší pouze tahové síly. Klikový mechanismus proto neovlivní pohyb přemíst'ovacího pístu a proudění pracovního plynu z „horkého“ do „studeného“ pracovního prostoru. Neprojeví se hydraulické ztráty. Efektivitu přenosu tepelné energie tak ovlivňuje pouze gravitační zrychlení, působící na přemíst'ovací píst. Použití silonové ojnice snižuje výkon motoru a vzdaluje od možnosti přiblížit se naměřenými hodnotami ideálnímu cyklu motoru a jeho p-V diagramu.

6.3 VLIV MRTVÝCH OBJEMŮ

Mrtvé objemy ovlivňují nepříznivě množství užitečné práce vykonané motorem. Oproti ideálnímu stavu, kdy se předpokládalo, že se při expanzi, respektive kompresi nachází všechen plyn v „horké“, respektive „chladné“ části válce přemíst'ovacího pístu se u měřeného modelu při expanzi, respektive kompresi, nachází část pracovního plynu ve „studené“, respektive „horké“ části motoru. V závislosti na této skutečnosti je celkový tlak nižší, respektive vyšší.



6.4 VLIV NEDOKONALÉ VÝMĚNY TEPLA VE „STUDENÉ“ A „HORKÉ“ ČÁSTI VÁLCE PŘEMISŤOVACÍHO PÍSTU

Konstrukce motoru neumožňuje ideální izotermickou kompresi a expanzi dle předpokladů ideálního Stirlingova cyklu. V modelu motoru probíhá ochlazování „studené“ části válce přemísťovacího pístu vlivem působení teploty okolního prostředí. Rovněž použití konstrukčních materiálů s nedostatečně velkým součinitelem tepelné vodivosti neumožňuje zajištění konstantní teploty pracovního plynu ve válci. Dané faktory ovlivňují tlak v systému a snižují množství vykonané užitečné práce.

6.5 VLIV REGENERÁTORU

Hlavním úkolem regenerátoru je dosažení co možná nejvyšší účinnosti cyklu. Oproti předpokladům pro ideální cyklus uvažující dokonalou regeneraci tvoří v motoru daný regenerátor pouze vzduchová mezera mezi vnitřní stěnou válce přemísťovacího pístu a přemísťovacím pístem. Efektivita regenerace tohoto zařízení je prakticky zanedbatelná.

6.6 VLIV ZDROJE TEPELNÉ ENERGIE

U ideálního cyklu se předpokládá 100% využití přivedeného tepla. V případě měřeného motoru dochází k tepelným ztrátám únikem tepla do okolí vlivem nedostatečné izolace topného segmentu. Toto teplo ovlivňuje účinnost motoru v případě, že nerozlišujeme množství tepelné energie dodané do topného tělíska a množství tepelné energie využitě pro chod motoru.

Stanovení množství přivedeného tepla využitě pro chod motoru je velmi obtížné. V motoru dochází v průběhu měření k regeneraci energie, jejíž míru nebylo možné stanovit, a tudíž množství tepla dodaného do systému topným tělískem nelze přesně určit.



7 KROUTICÍ MOMENTY

7.1 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA HŘÍDEL MOTORU

Zdroje sil, které působí na klikový hřídel motoru, můžeme pro účely této diplomové práce rozdělit do čtyř skupin:

- Pracovní píst
- Přemíst'ovací píst
- Excentrický setrvačník
- Pasivní odpory

Pracovní píst

Tlak plynové náplně působící na pracovní píst je hybnou silou celého motoru. Kroučící moment, kterým pracovní píst působí na klikový hřídel, vypočítáme podle vzorce:

$$M_E = r_E \cdot F = F \cdot r_E \cdot \sin(\alpha_E) = p \cdot S_E \cdot r_E \cdot \sin(\alpha_E) \quad (7.1)$$

Přemíst'ovací píst

Přemíst'ovací píst nemění svým pohybem vnitřní objem motoru (neuvažujeme objem pístní tyče). Na klikový hřídel však působí svou hmotností. Kroučící moment vyvolaný tíhou přemíst'ovacího pístu vyjadřuje následující vzorec:

$$M_P = G \cdot r_P \cdot \sin(\alpha_E + \beta_P) = m_P \cdot g \cdot r_P \cdot \sin(\alpha_E + \beta_P) \quad (7.2)$$

Excentrický setrvačník

Přesně vyvážený setrvačník by žádnou silou nepůsobil. Ale při kontrole rozměrů bylo zjištěno, že jedno ze závaží je umístěno na nepatrně delším rameni než závaží protilehlé. Samotný hřídel se setrvačníkem (bez klikového mechanismu) se však ustálila v poloze až o 20° odchýlené od vertikály. To je důkazem, že na hřídel v klidové poloze působí síla větší než asymetricky umístěné závaží. Jediným vysvětlením je vychýlený hřídel. Navíc při chodu motoru byl zjevný excentrický pohyb konce hřídele. Přesné zjišťování těchto odchylek i výpočet jejich výsledných sil, které ovlivňují chod motoru, je však nad rámec diplomové práce, protože by vyžadoval dekompozici celého přístroje a detailní proměření rozměrů všech použitých součástí, kontrolu jejich hmotností atd.

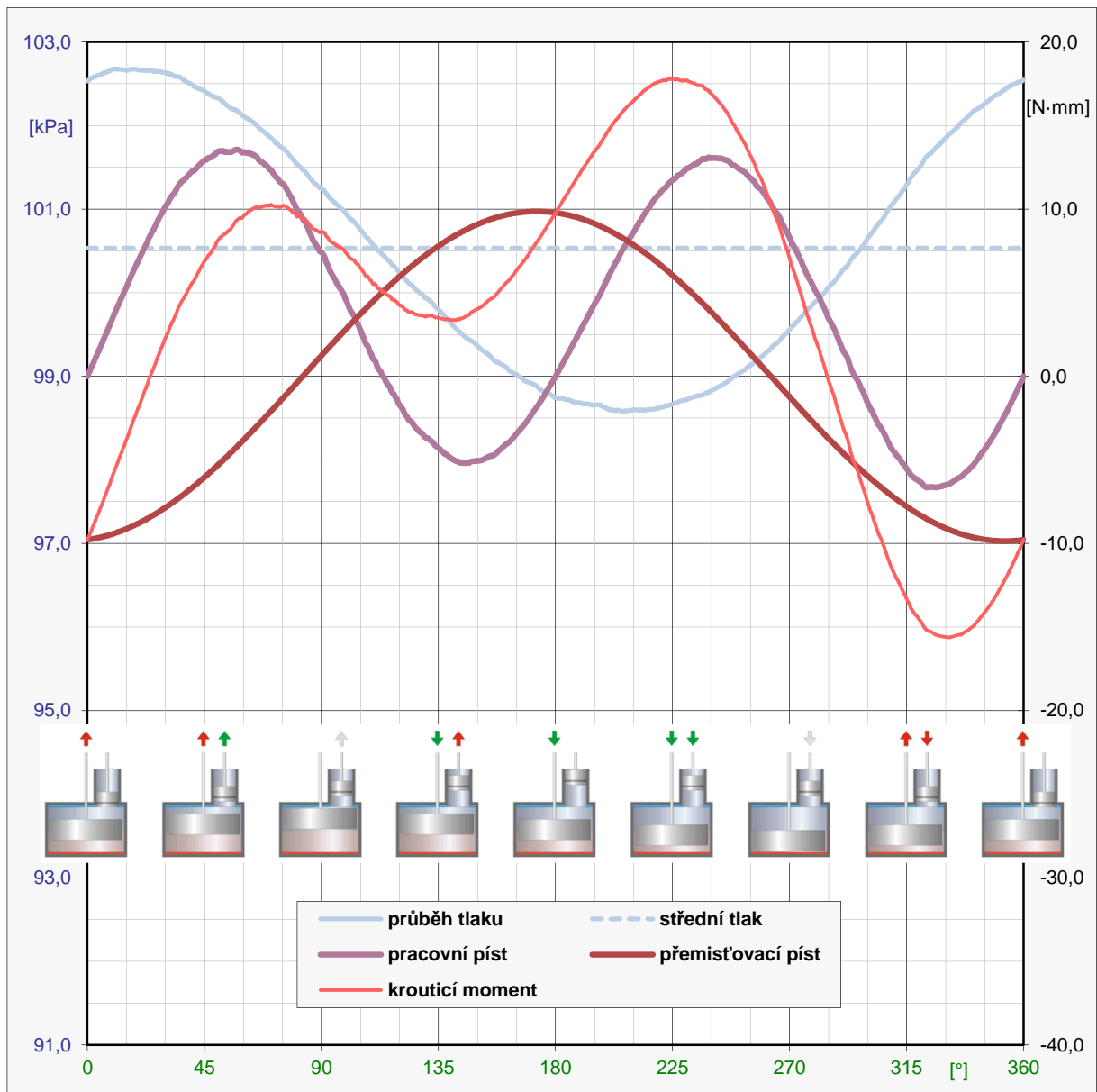
Pasivní odpory

Pohybu motoru samozřejmě klade odpor řada veličin. Kromě tření v ložiscích, ve vedení pístní tyče přemíst'ovacího pístu a ve válci pracovního pístu, je to např. aerodynamický odpor vzduchu při pohybu přemíst'ovacího pístu. Také řešení těchto sil by bylo mimo rámec této práce, a proto nebudou dále uvažovány.

Rozhodující pro chod motoru jsou tedy kroučící momenty vyvolané oběma písty. Na obrázku (obr. 7.1) je znázorněn průběh kroučících momentů vyvolaných pracovním a přemíst'ovacím pístem během pracovního cyklu motoru. V dolní části jsou schematicky naznačeny polohy obou pístů během otáčení klikového hřídele. Šipky znázorňují okamžitý směr



pohybu daného pístu a barva udává smysl kroučícího momentu (zelená – kladný moment, červená – záporný moment).

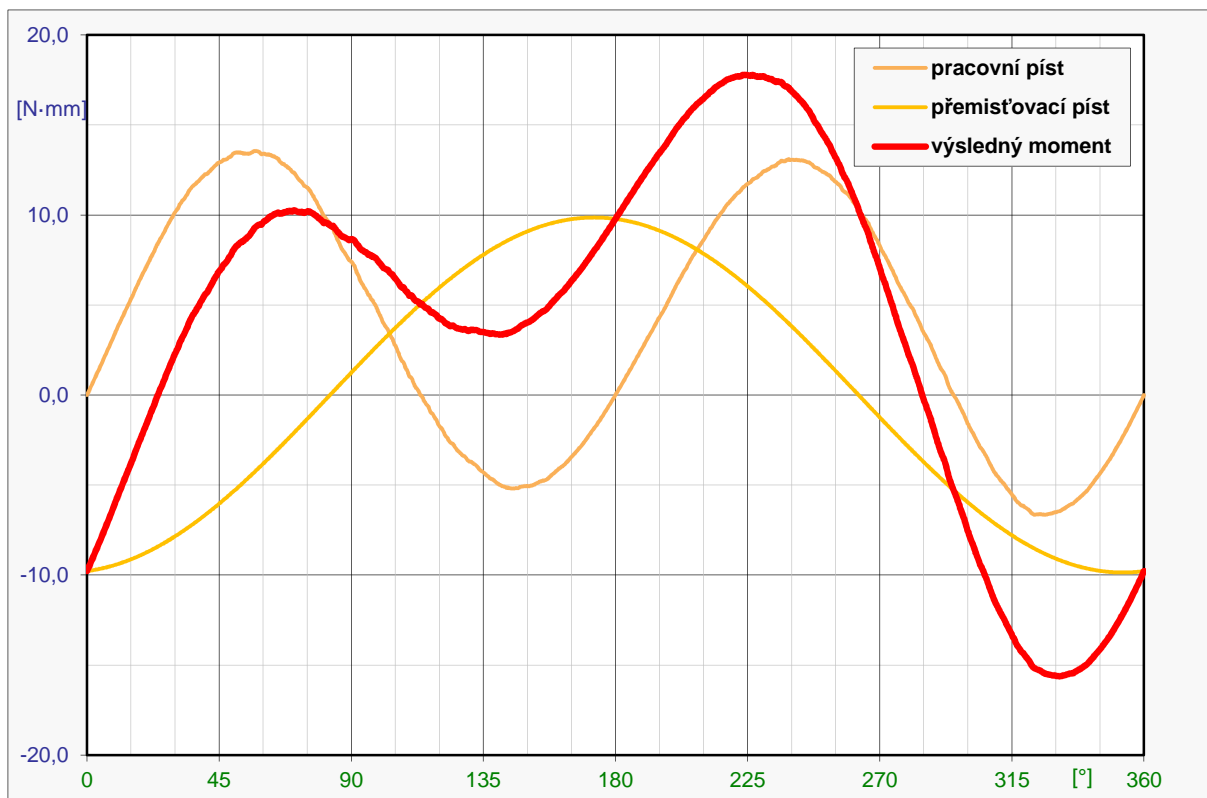


Obr. 7.1 Průběh tlaku a kroučících momentů během pracovního cyklu

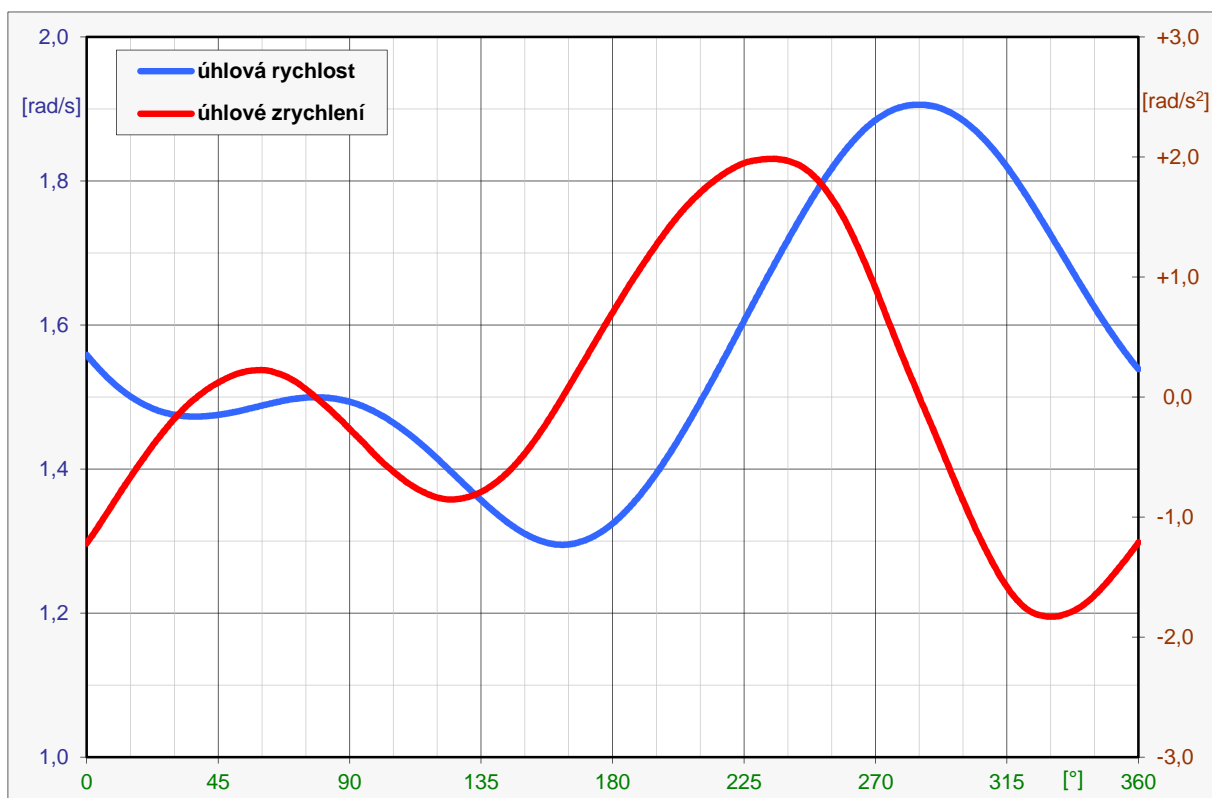
Vzhledem ke skutečnosti, že tlak plynu během pracovního cyklu kolísá kolem tlaku okolní atmosféry, vytvořil se již během expanze uvnitř motoru podtlak, který působil proti pohybu motoru. Poté, co pracovní píst přešel přes horní úvrat', začal podtlak působit ve směru otáčení hřídele motoru a úhlová rychlost začala narůstat. Během komprese postupně vzrostl tlak nad úroveň okolního prostředí a motor začal opět zpomalovat.

7.2 ÚHLOVÁ RYCHLOST A ÚHLOVÉ ZRYCHLENÍ

Z obrázků 7.2 a 7.3 je zřejmá korelace mezi výsledným kroučícím momentem a úhlovým zrychlením klikového hřídele v průběhu pracovního cyklu.



Obr. 7.2 Průběh krouticích momentů v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele



Obr. 7.3 Průběh úhlové rychlosti a zrychlení v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele



ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá měřením průběhu vykonaného cyklu konkrétního Stirlingova motoru. S využitím měřících zařízení a softwaru byly snímány hodnoty tlaku plynu v pracovním prostoru motoru v závislosti na pootočení klikového hřídele.

Jedním z hlavních úkolů měření bylo ze získaných dat vytvořit p-V diagramy reálného měření, ideálního Stirlingova cyklu a Schmidovy teorie a vzájemně je porovnat. Následně jsem provedl zhodnocení i dalších zajímavých faktorů, jako například porovnání teplot v průběhu jednotlivých cyklů, porovnání provozních otáček a účinností cyklů.

Po zkušenostech nabytých měření tohoto motoru se domnívám, že by bylo vhodné provádět nejen jeho měření, ale i měření jiných modelů Stirlingových motorů v laboratořích pravidelně jako součást laboratorních cvičení ve výuce na naší vysoké škole.

Na základě naměřených výsledků a získaných poznatků jsem dospěl k závěru, že pro sestavení vhodné metodiky měření bude nutné laboratorní model Stirlingova motoru vybavit senzory pro měření tepelného toku. Senzory budou umístěny jak na „horké“ tak i na „studené“ straně válce přemístovacího pístu. Toto uspořádání nám umožní změřit nejen teplo dodané do motoru z topného tělíska, ale i množství tepla, získané regenerací tepelné energie uvnitř motoru. Průběh tepelného toku v průřezu tepelného výměníku nebude konstantní. Proto definitivní počet senzorů a jejich rozmístění v prostoru je předmětem dalšího zkoumání. Z těchto důvodů by bylo předčasné vypracovat podrobnou metodiku měření Stirlingova motoru.

V průběhu měření bylo pro mne zajímavé zjištění, že detailní analýza chodu motoru během pracovního cyklu může odhalit případné výrobní nepřesnosti, montážní odchylky, nebo nerovnoměrnost chodu způsobenou zvýšeným opotřebením pohyblivých částí, či únavou materiálu. Proto bych doporučoval, aby byla v budoucnu věnována větší pozornost také analýze chodu motoru, což bylo v minulosti opomíjeno.



LITERATURA

- [1] FINKELSTEIN, Theodor. *Air engines: The History, Science, and Reality of the Perfect Engine*. E-Book [online]. 2001 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.media.rmutt.ac.th/media/e-Book/Engineer/Automotive/Air%20Engines%20-%20The%20History,%20Science,%20and%20Reality%20of%20the%20Perfect%20Engine.pdf>
- [2] GRAS, Pierre. *History: Robert Stirling*. Stirlingengine [online]. 2008 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.robertstirlingengine.com/history.php>
- [3] *History of the Stirling Engine: Reverend Dr. Robert Stirling*. I-stirlingengine.co [online]. 2011 [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: http://www.i-stirlingengine.co/History_of_the_Stirling_Engine/Reverend_Dr_Robert_Stirling.htm
- [4] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. První vydání, Praha: Grada, 2012, 158 s. ISBN 978-80-247-4455-1
- [5] *Integrated pressure sensor: MPX4250D*. Freescale semiconductor [online]. 2006 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/29745.pdf>
- [6] KAPLAN, Zdeněk. *Stirlingovy motory: a zařízení jim podobná*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002. Habilitační práce.
- [7] KOVÁŘ, M. *Indikace tlaku ve válcích modelu Stirlingova motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
- [8] LUNDHOLM, Gunnar. *The experimental V4X Stirling Engine: The pioneering development*. Energychallenge [online]. 2004 [cit. 2013-01-14]. Dostupné z: http://www.energychallenge.com/ST_TA2_1.pdf
- [9] *NI USB-6009: 14-bit, 48 kS / s* Low-Cost multifunkční DAQ. National instruments [online]. 2012 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/201987>
- [10] ORGAN, Allan J. *The regenerator and the stirling engine*. London: Mechanical Engineering Publication, 1997. ISBN 978-186-0580-109
- [11] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3. přeprac., Brno, 284 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2409-5.
- [12] *Significant Scots: Robert Stirling*. ElectricScotland [online]. 1999 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.electricscotland.com/history/men/stirling_robert.htm
- [13] *Stirlingův motor*. Transformační technologie [online]. 2006 [cit. 2013-02-29]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html>



- [14] ŠKORPÍK, Jiří. *Stirlingův motor, Transformační technologie*, 2009-06, [date of last update 2013-03]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html>.
- [15] TEDOM; *Princip funkce Stirlingova motoru* [online]. [2004] [cit. 12.2.2013]. Dostupný z WWW: <<http://www.stirling.cz/tedom-stirlinguv-motor-princip.html>>
- [16] *Tříkanálový optický inkrementální snímací modul: HEDS-9040 # B00*. Avago technologies [online]. 2005 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: http://www.avagotech.com/pages/en/motion_control_encoder_products/incremental_encoders/transmissive_encoders/heds-9040b00/http://www.avagotech.com/docs/AV02-1132EN
- [17] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. První vydání, Ilustrace Viktorie Vlachová, Praha: BEN - technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [18] WALKER, Graham. *Stirling-cycle machines*. Oxford: Clarendon Press, 1973, 1st edition, 156 p. ISBN 01-985-6112-1.
- [19] WIKIPEDIA; *Gustav Schmidt (Ingenieur)* [online]. [29.10.2008] [cit. 19.3.2013]. Dostupný z WWW: <[http://de.wikipedia.org/wiki/Gustav_Schmidt_\(Ingenieur\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Gustav_Schmidt_(Ingenieur))>
- [20] WIKIPEDIA; *Gustav Schmidt* [online]. [19.6.2010] [cit. 19.3.2013]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Gustav_Schmidt>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Veličina
\bar{p}_1	[kPa]	Střední parciální tlak 1 molu plynu
\bar{p}	[kPa]	Střední tlak plynu
c_p	[mJ g ⁻¹ K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita (p=konst.)
c_v	[mJ g ⁻¹ K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita (V=konst.)
D_E	[mm]	průměr pracovního válce
D_P	[mm]	průměr přemísťovacího pístu
d_T	[mm]	průměr pístní tyče přemísťovacího pístu
D_V	[mm]	průměr válce přemísťovacího pístu
F	[N]	síla působící na pracovní píst
G	[N]	tíhová síla
h_C	[mm]	výška mrtvého prostoru chlazené zóny
h_E	[mm]	výška mrtvého prostoru pracovního válce
h_H	[mm]	výška mrtvého prostoru vytápěné zóny
H_P	[mm]	výška přemísťovacího pístu
h_R	[mm]	výška rekuperátoru
H_V	[mm]	výška válce přemísťovacího pístu (výška výměníku)
k		počet počítaných objemových zón
l_E	[mm]	délka ojnice pracovního pístu
l_P	[mm]	délka ojnice přemísťovacího pístu
m	[kg]	celková hmotnost plynu
M_E	[Nm]	točivý moment pracovního pístu
M_m	[g.mol ⁻¹]	molární hmotnost plynu
M_P	[Nm]	točivý moment přemísťovacího pístu
m_p	[g]	hmotnost přemísťovacího pístu
n	[mol]	množství plynu v motoru
n_C	[mol]	látkové množství plynu v motoru ve „studené“ části válce přemísťovacího pístu
n_E	[mol]	látkové množství plynu v pracovním válci
n_H	[mol]	látkové množství plynu v motoru v „horké“ části válce přemísťovacího pístu
n_R	[mol]	látkové množství plynu v regenerátoru
p_0	[kPa]	standardní tlak
p_1	[Pa]	tlak v bodě 1



Symbol	Jednotka	Veličina
p_2	[Pa]	tlak v bodě 2
p_3	[Pa]	tlak v bodě 3
p_4	[Pa]	tlak v bodě 4
p_L	[kPa]	laboratorní tlak
P_t	[W]	příkon topného tělesa
Q	[J]	teplo
R	[mJ.K ⁻¹ .mol ⁻¹]	univerzální plynová konstanta
r_e	[mm]	poloměr klikového hřídele pracovního pístu
r_p	[mm]	poloměr klikového hřídele přemístovacího pístu
S_C	[cm ²]	plocha průřezu chlazené zóny
S_E	[cm ²]	plocha průřezu pracovního válce
S_H	[cm ²]	plocha průřezu vytápěné zóny
S_R	[cm ²]	plocha průřezu regenerátoru
T_0	[K]	standardní teplota
T_1	[°C]	teplota v bodě 1
T_2	[°C]	teplota v bodě 2
T_3	[°C]	teplota v bodě 3
T_4	[°C]	teplota v bodě 4
T_C	[°C]	teplota chladného plynu
T_E	[°C]	teplota plynu v pracovním válci
T_H	[°C]	teplota horkého plynu
T_L	[°C]	laboratorní teplota
T_R	[°C]	teplota plynu v regenerátoru
V_1	[cm ³]	objem v bodě 1
V_2	[cm ³]	objem v bodě 2
V_3	[cm ³]	objem v bodě 3
V_4	[cm ³]	objem v bodě 4
V_{Cmax}	[cm ³]	maximální objem chlazené zóny
V_{Cmin}	[cm ³]	minimální objem chlazené zóny
V_{Emax}	[cm ³]	maximální objem expanzního prostoru
V_{Emin}	[cm ³]	minimální objem pracovního válce
V_{Hmax}	[cm ³]	maximální objem vytápěné zóny



Symbol	Jednotka	Veličina
V_{Hmin}	[cm ³]	minimální objem vytápěné zóny
V_L	[cm ³]	vnitřní objem v klidové poloze
V_{max}	[cm ³]	maximální vnitřní objem
V_{min}	[cm ³]	minimální vnitřní objem
V_R	[cm ³]	objem regenerátoru
z_E	[mm]	zdvih pracovního pístu
z_P	[mm]	zdvih přemísťovacího pístu
α_0	[°]	klidový úhel natočení klikového hřídele
β_P	[°]	úhel natočení přemísťovacího pístu
β_S	[°]	úhel natočení setrvačnicku