

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



**Měření okamžitých tlaků v pracovních prostorech prototypu malého Stirlingova motoru.**

**Instantaneous pressure measuring in workspaces of small Stirling engine prototype.**

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: bez oboru

Vedoucí práce: Ing. Libor Červenka Ph.D.

**Tomáš Bažant**

---

**Praha 2017**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bažant** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **438305**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Měření okamžitých tlaků v pracovních prostorech prototypu malého Stirlingova motoru.**

Název bakalářské práce anglicky:

**Instantaneous pressure measuring in workspaces of small Stirling engine prototype.**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte studii existujících provedení Stirlingových motorů. Zhotovte funkční vzorek Stirlingova motoru. Provedte konstrukční úpravy pro připojení příslušných snímačů nutných k měření okamžitých tlaků v pracovních válcích motoru. Naměřená data vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

SAE papers

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


**Ing. Libor Červenka Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12.07.2017**

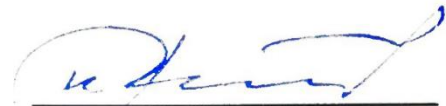
Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

2.5.2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Měření okamžitých tlaků v pracovních prostorech prototypu malého Stirlingova motoru vypracoval samostatně, dle pokynů vedoucího práce. Všechny použité zdroje jsem uvedl v závěru práce.

V Praze dne 7.7.2017

Tomáš Bažant

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat mému tátovi za cenné rady a zkušenosti, které mi dal. Také vedoucímu práce Ing. Liboru Červenkovi Ph.D. za vstřícnost a odborné vedení mé práce. Děkuji také mé mámě, sourozencům a kamarádům za podporu po celou dobu studia.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá měřením okamžitých tlaků v zhotoveném funkčním prototypu Stirlingova motoru a následným vyhodnocením získaných dat. V úvodu je popsána historie vývoje Stirlingova motoru a také studie současných modifikací tohoto motoru. Další část je věnovaná stavbě prototypu malého Stirlingova motoru a jeho následným konstrukčním úpravám nutných pro měření. Dále obsahuje samotné měření a vyhodnocení naměřených dat. V poslední části je celkové zhodnocení a návrh na konstrukční úpravy, které by mohly zlepšit parametry motoru.

## **Klíčová slova**

Stirlingův motor, přeháněč, výkon, prototyp, modifikace

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with measurement of the instantaneous pressures in the functional Stirling engine prototype and evaluation of the obtained data. In the introduction, the history of the Stirling engine development and a study of the current engine modifications are described. The second part is dedicated to the construction of the small Stirling engine prototype and its structural modifications needed for the measurements. The thesis also contains the measurement and evaluation of the measured data itself. In the last part, there is an overall evaluation and suggestion for structural modifications that could improve the engine parameters.

## **Key words**

Stirling engine, displacer, power, prototype, modifications

## Obsah

1	Úvod .....	1
2	Historie .....	2
3	Princip a základní modifikace Stirlingova motoru.....	5
3.1	Princip .....	5
3.2	Modifikace .....	6
3.2.1	Modifikace alfa .....	7
3.2.2	Modifikace beta.....	8
3.2.3	Modifikace gama .....	9
3.2.4	Stirlingův motor s rotačním přeháněčem .....	9
3.2.5	Ringbomův motor.....	10
3.2.6	Dvojčinný Stirlingův motor .....	10
3.2.7	Stirlingův motor s volnými písty .....	10
4	Stavba motoru.....	12
4.1	Volba materiálu.....	12
4.2	Součásti motoru .....	12
4.2.1	komora.....	12
4.2.2	Přeháněč.....	13
4.2.3	Základní deska .....	14
4.2.4	Pracovní válec.....	15
4.2.5	Pracovní píst .....	15
4.2.6	Ojnice .....	15
4.2.7	Ložiskové domečky a jejich uchycení. ....	15
4.2.8	Kliková hřídel .....	16
4.3	Úpravy motoru nutné pro připojení snímačů .....	16
5	Měření a vyhodnocení .....	18
5.1	Průběh měření .....	18
5.2	Snímače.....	19
5.2.1	Tlakové snímače .....	19
5.2.2	Snímač natočení .....	20
5.2.3	Snímače teploty .....	20
5.3	Měřicí ústředna.....	21
5.4	Vyhodnocení .....	23

6 Závěr.....	29
Seznam použitých zdrojů.....	31
Seznam značek.....	35
Seznam obrázků.....	37
Seznam tabulek .....	39
Seznam příloh .....	40

## **1 Úvod**

Stirlingův motor mě hodně zaujal tím, že k jeho provozu stačí jakýkoliv zdroj tepla, nebo chladu. Dokáže pracovat i s malým teplotním rozdílem, je také velmi tichý, relativně bezpečný a nevyžaduje téměř žádnou údržbu. I přes tyto zajímavé vlastnosti se tento motor nikdy masově nepoužíval. Byl totiž zastíněn spalovacími motory, které byly při stejném výkonu mnohem menší. Příchod elektromotoru také nepomohl k jeho většímu rozšíření. Teprve v dnešní době s rozvojem nových materiálů a technologií se o vývoj tohoto motoru zajímá více společností. Také se více hledí na ekologii a to je hlavním důvodem, proč se Stirlingův motor začíná opět více využívat. Aktuálně existuje mnoho provedení tohoto motoru a jeho efektivita postupně stoupá. Já osobně v něm vidím slušný potenciál a doufám, že k jeho reálnému nasazení bude docházet častěji. Cílem této práce je nastínění historického vývoje, zpracování studie existujících Stirlingových motorů, popis principu fungování. Představení stavby a konstrukčních úprav prototypu Stirlingova motoru. Zpracování naměřených dat získaných z použitých snímačů a jejich vyhodnocení.



## 2 Historie

Skotský pastor Robert Stirling (1790-1878) je nejčastěji spojován s teplovzdušnými motory, ačkoli první tepelný motor s otevřeným cyklem nestrojil. Ten údajně sestrojil Sir George Cayley v roce 1807 [1]. Patent Roberta Stirlinga z roku 1816 přinesl tak převratné vylepšení, že se později tyto tepelné motory začaly nazývat Stirlingovy motory. V patentu byl popsán regenerátor, který je dnes obsažen u většiny aktuálně vyráběných Stirlingových motorů. Regenerátor totiž umožňuje uchovat část tepelné energie a tuto uchovanou energii opět motor využívá. To má za následek citelné zvýšení výkonu motoru. Stavbu motoru realizoval dva roky po podání patentu [2]. Chtěl nahradit v té době hojně používané parní stroje, které byly hodně nebezpečné. Docházelo totiž k explozím kotlů, což způsobovalo častá zranění i úmrtí. Stirlingův motor byl tedy ideální náhradou, protože k provozu nepotřeboval kotel, neobsahoval ventily, a navíc byl mnohem tiší. [1]



*Obr. 2-1 Robert Stirling [3]*

Švédský vynálezce John Ericsson (1803-1889) byl také průkopníkem ve výrobě teplovzdušných motorů. Je známý tím, že představil první Stirlingův motor poháněný pouze sluneční energií. Také sestrojil Ericssonův motor, který na rozdíl od Stirlingova motoru obsahoval ventily. Tento motor později porovnal se Stirlingovým a zjistil, že Stirlingův motor je lepší ve spolehlivosti a v jednoduchosti konstrukce. Z toho důvodu pak už svůj motor dále nevyvíjel. [4]

K vytlačování došlo až s nástupem spalovacích motorů. Byly totiž technologicky méně náročné a při stejném výkonu byly menší a lehčí. Později se Stirlingův motor používal hlavně tam, kde nebyly kladeny vysoké nároky na výkon a účinnost. [5]

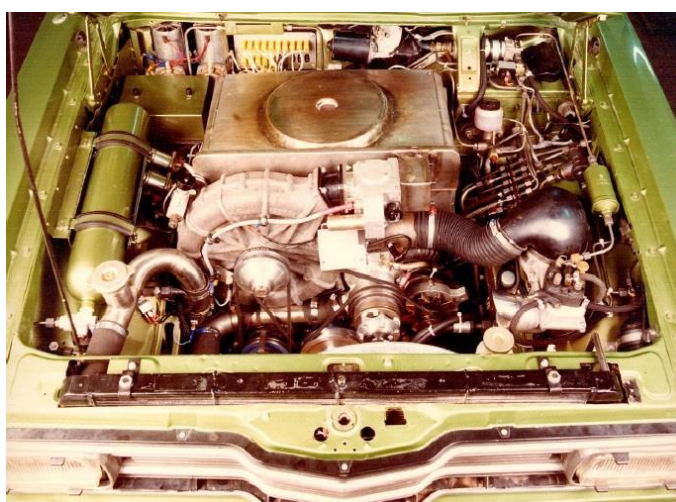
Firmu Philips zaujaly jeho minimální nároky na údržbu, vysoká spolehlivost a možnost použití různých zdrojů tepla. Proto v letech 1940-1950 vyvíjela mobilní elektrický generátor poháněný

tímto motorem. Vytvořila generátor, jehož výkon byl přibližně 200 W. Pracovním médiem byl vzduch o středním tlaku 1,35 MPa. Těchto generátorů se prodalo několik stovek. [5]



**Obr. 2-2 Elektrocentrála firmy Philips využívající Stirlingův motor. [5]**

V 70. letech 20. století byla ropa velmi drahá, to vedlo k tomu, že se začalo uvažovat o použití Stirlingova motoru v osobních automobilech, protože ke svému pohonu nepotřebuje ropná paliva. Firma Ford byla první, které se tato myšlenka podařila zrealizovat. Dostatečně silný motor jim vyrobila firma United Stirling. Při provozních testech prototypu automobilu bohužel zjistili, že použití tohoto motoru není ideální. Hlavní problémy byly v regulaci výkonu, změně rychlosti a akceleraci, což jsou pro pohon osobních automobilů důležité vlastnosti. Proto se pro pohon automobilů tyto motory neuchytily. [5]



**Obr. 2-3 Stirlingův motor instalovaný v automobilu Ford Taunus. [5]**

V 80. letech 20. století již zmíněná firma United Stirling začala s vývojem motoru pro stacionární použití. Díky zkušenostem s motorem pro osobní automobily se jim podařilo sestrojít motor

United Stirling V 161. Motor měl výkon 10 kW a umožňoval plynulou regulaci výkonu pomocí změny tlaku pracovního média i teploty. I v dnešní době je tento motor považován za jeden z technologicky nejvyspělejších. [6]

V současnosti se Stirlingův motor používá hlavně v kogeneračních jednotkách, kde využívá například nevyužitě odpadní teplo z elektráren a toto teplo pomocí generátoru převádí na elektřinu. Tím pomáhá zvýšit celkovou elektrickou účinnost elektrárny. [7]

Stirlingův motor také velmi efektivně vyrábí elektrickou energii ze slunečního záření. V jihoafrické poušti Kalahari švédská společnost Ripasso Energy testuje údajně nejúčinnější solární systém na světě. Dokáže totiž přeměnit 34 % sluneční energie, která dopadá na zrcadla na elektřinu dodávanou do elektrizační soustavy. To je téměř dvojnásobná účinnost ve srovnání s běžnými solárními panely. Dosáhli toho díky použití Stirlingova motoru s účinností více než 40 % [8]. Sluneční záření se pomocí parabolického zrcadla koncentruje v ohnisku, ve kterém je umístěn ohřívák motoru. Ohřívák dosahuje 800 až 900 °C. Motor se musí chladit, a to je realizováno pomocí vodního chladiče s ventilátorem, nebo se používá speciální chladicí okruh. [5]

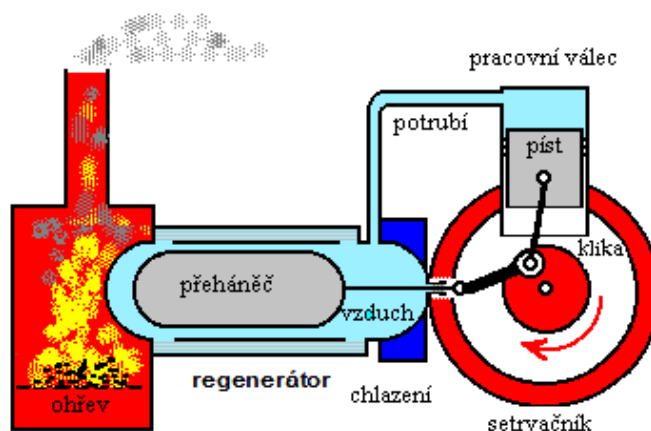
Většina těchto projektů je zatím ve vývoji. Řeší se problém s polohou motoru, kdy motor není ve vodorovné poloze a nastává problém s mazáním a těsněním pístních tyčí. Firmy se také snaží snížit výrobní cenu, aby mohlo dojít k masovému rozšíření. [5]



**Obr. 2-4 Solární systém společnosti Ripasso Energy. [8]**

## 3 Princip a základní modifikace Stirlingova motoru

### 3.1 Princip



Obr. 3-1 Schéma Stirlingova motoru

Stirlingův motor obsahuje válec, ve kterém je umístěn přeháněč. Přeháněč je podobný pístu, ale je mnohem lehčí, izoluje a nedotýká se stěn válce. Slouží k přesouvání pracovního plynu z jedné strany válce na druhou. Vůle mezi přeháněčem a válcem je nejčastěji v jednotkách milimetru. Součástí Stirlingova motoru je setrvačnick, regenerátor, klikový mechanismus a pracovní válec s pístem.

Jedna strana válce je ohřívána a druhá je chlazená. Když je přeháněč v pravé části válce, tak ohřívána strana válce ohřívá většinu pracovního plynu v motoru. Dochází k rozpínání plynu. Jelikož se v počáteční fázi objem nemění, tak dochází ke zvýšení tlaku, který tlačí na pracovní píst. Pracovní píst se vlivem tlaku přesune a pomocí klikového mechanismu pootočí setrvačnickem (koná práci). Velmi důležitý je vzájemný pohyb pístu a přeháněče, který záleží na dané modifikaci motoru. U klikového mechanismu bývá zpoždění 90° až 105°. Klikový mechanismus je propojený s přeháněčem, to znamená, že při přesouvání pracovního pístu do spodní polohy dojde k přesunu přeháněče do levé části válce a při tomto pohybu se ohřátý plyn přesune do pravé části válce. Zde se plyn ochladí a tím klesne i jeho tlak. Dojde k přesunutí pracovního pístu do horní části pracovní komory. Tento proces se neustále opakuje. [9]

Stirlingův motor také často obsahuje regenerátor, který zvyšuje jeho účinnost. V regenerátoru se totiž regeneruje teplo. Při pohybu přeháněče do levé části válce bude část ohřátého pracovního plynu proházet přes regenerátor. Regenerátor obsahuje matici, což bývají nejčastěji jemné drátky z oceli a této matici pracovní plyn předá tepelnou energii. To způsobí ohřátí matrice a zchlazení plynu. Když se pak přeháněč přesune do pravé strany, část zchlazeného plynu proudí



přes regenerátor, který jej ohřeje, ale jeho teplota tím klesne. Těmito procesy dochází k většímu využití tepelné energie v oběhu. [11]

Pracovní plyn by měl mít co nejmenší odpor při proudění a velkou tepelnou kapacitu, aby mohl přenášet co nejvíce tepla. Pro základní motory může být použit vzduch. U profesionálních motorů se častěji používá helium, nebo vodík, protože mají větší tepelnou kapacitu. Vodík má větší tepelnou kapacitu než helium, ale jeho zápalná teplota je 530 °C, proto je jeho použití dost omezené. Ve většině případech se používá helium, které je mnohem bezpečnější. Ke zvýšení účinnosti motoru se používá plyn o vysokém tlaku. Tlak se nejčastěji pohybuje v rozmezí 10–22 MPa. [10]

### 3.2 Modifikace

Existují tři hlavní typy Stirlingova motoru, které se liší podle toho, jak jsou od sebe odděleny teplá a studená strana motoru.

1. **Alfa** konfigurace má dva písty, jeden v horkém válci a druhý ve studeném. Válce jsou propojeny a plyn mezi nimi může proudit. Motor bývá konstruován do tvaru písmene V a ojnice pístů jsou na klikové hřídeli spojeny na stejném místě. [12]
2. **Beta** konfigurace má pracovní píst i přehaněč v jednom válci. Motor se vyznačuje vysokou spolehlivostí a kompaktními rozměry. [12]
3. **Gama** konfigurace je podobná betě. Má ale dva válce místo jednoho. V jednom válci je přehaněč a v druhém pracovní píst. Princip fungování je podobný s betou. Vnitřní objem je dán polohou pracovního pístu. [12]



Obr. 3-4 Modifikace alfa [13]



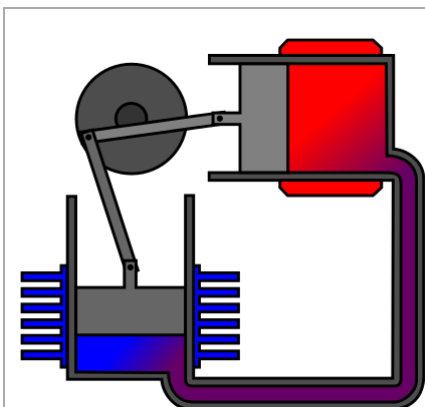
Obr. 3-3 Modifikace beta [14]



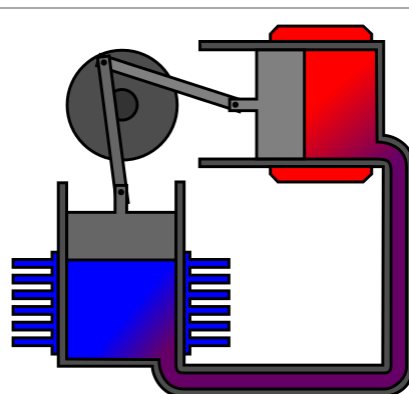
Obr. 3-2 Modifikace gama [15]

### 3.2.1 Modifikace alfa

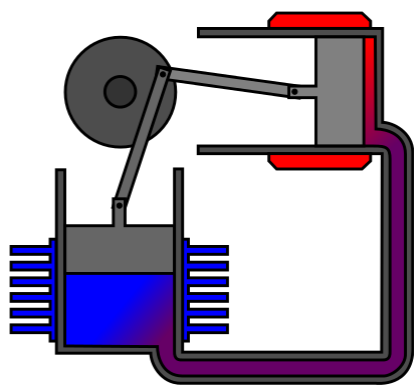
Stirlingův motor typu alfa se skládá ze dvou pracovních pístů v oddělených válcích. Jeden je ohříváný a druhý chlazený. Ohříváný válec je vlastně výměník tepla. Tento typ motoru má dobrý poměr výkonnosti k objemu, ale má problémy s životností těsnění u pístu v ohříváném válci. Vlivem vysoké teploty dochází k jeho degradaci, což může vést k netěsnosti. Úhel kliky má velký vliv na účinnost a často se ideální úhel nastavuje experimentálně, ale úhel  $90^\circ$  se volí nejčastěji. U alfa modifikace se také může používat vyrovnávací nádrž, která slouží ke snížení tlakového poměru. V následujících obrázcích je znázorněn princip fungování. [12]



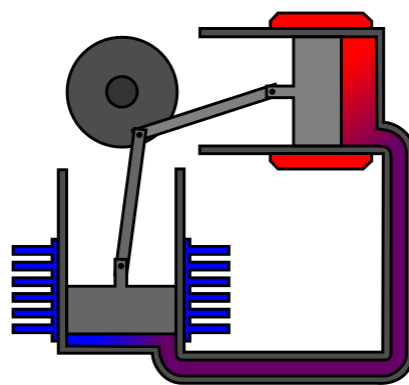
*Obr. 3-5 Většina pracovního plynu je v horkém válci a dochází k jeho ohřívání. Tlak se zvětšuje a plyn expanduje. To vede ke zvětšení vnitřního objemu, posunem pístu ve studeném válci. [12]*



*Obr. 3-6 Systém dosáhl maximálního objemu a plyn se dostává do kontaktu se studeným válcem. Nastává ochlazování a tím i klesání tlaku. Klika je v horní úvratí a vlivem setrvačnosti se začne zasouvat píst na ohřívané straně. [12]*



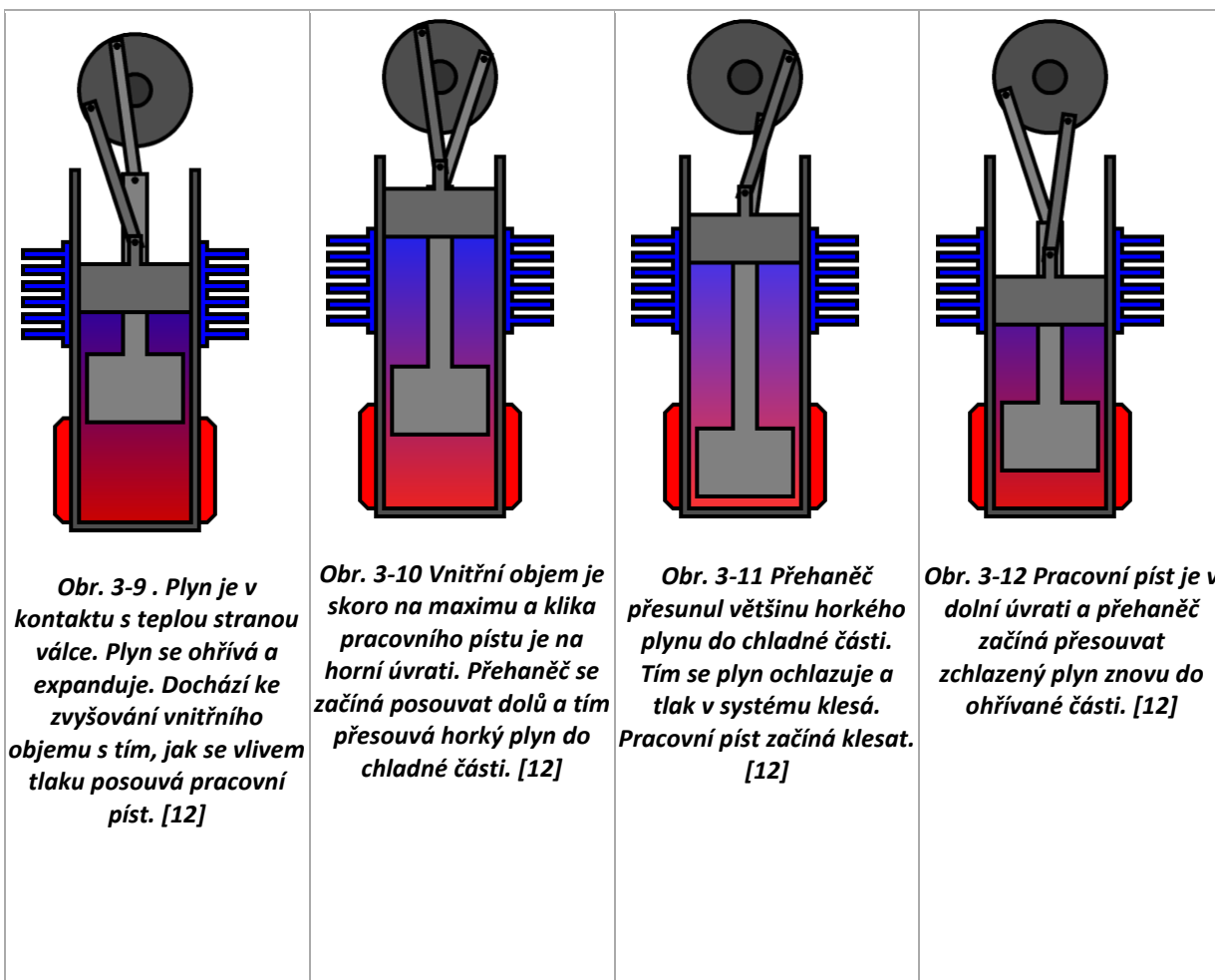
*Obr. 3-7 Téměř všechnen plyn je v kontaktu se studeným válcem. Vzniká podtlak a válec začne klesat a tím i vnitřní objem. [12]*



*Obr. 3-8 Systém dosáhl minimálního objemu a plyn se znovu začíná dostávat do ohřívané části motoru. Začíná růst tlak i objem. [12]*

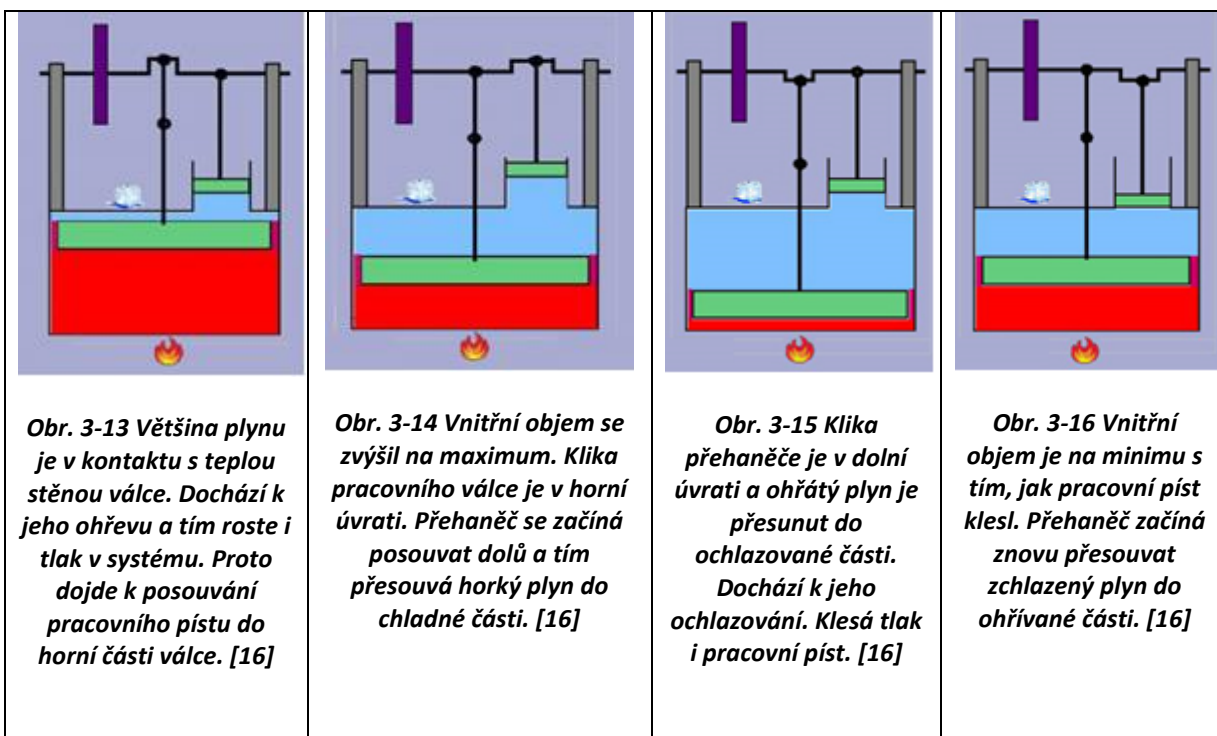
### 3.2.2 Modifikace beta

Tento typ ve svém patentu popsal právě Robert Stirling. Modifikace beta má pracovní píst ve stejném válci jako přehaněč, proto jsou tyto motory daleko kompaktnější než ostatní základní modifikace. Přehaněč zde slouží k přehánění plynu mezi ohřivanou a chlazenou částí válce a nekoná téměř žádnou práci. Úhel kliky je podobný jako u alfa modifikace a to nejčastěji 90°. Tato modifikace už nemá takový problém s životností těsnění pracovního válce jako u předchozí modifikace, protože se pracovní píst nachází na chladné části a těsnění tak rychle nedegraduje. Životnost tohoto motoru je tedy vyšší. Přehaněč těsnění neobsahuje a překonává zejména síly vzniklé aerodynamickým třením plynu. Nastává ale problém s utěsněním pístní tyče přehaněče, která prochází skrz pracovní píst. Teplotní rozdíl mezi ohřivanou a chlazenou částí válce nebude tak velký jako u modifikace alfa, protože ohřev a chlazení probíhá na stejném válci a tím se vzájemně ovlivňují. Na následujících obrázcích je znázorněn a popsán princip fungování. [12]



### 3.2.3 Modifikace gama

Modifikace gama je podobná betě, ale je mechanicky ještě jednodušší. Z tohoto důvodu jsem tuto modifikaci použil pro konstrukci prototypu, na kterém bude probíhat měření. Od bety se liší tím, že gama nemá jeden společný válec pro přehaněč a pracovní píst v jednom válci, ale má válce dva. V jednom je přehaněč a v druhém je pracovní píst. Tyto válce jsou vzájemně propojeny, aby pracovní plyn mohl mezi nimi volně procházet. Klika je opět posunuta o cca 90°. Tento typ má nižší kompresní poměr. Využívá se i ve více válcových konfiguracích. Na obrázcích je znázorněn princip fungování. [16]



Mezi další typy patří například:

### 3.2.4 Stirlingův motor s rotačním přehaněčem

V roce 2013 si Dr. Philip Foster z University of North Texas patentoval nový model Stirlingova motoru. V modelu nahradil tradiční přehaněč za rotační. Jeho účel je stejný jen se plyn nepřehání jeho lineárním posuvem, ale rotací. Pracovní komora je po délce rozdělena na polovinu. Jedna polovina je chlazená a druhá je ohřívána. Obě poloviny mají mezi sebou izolační vrstvu, aby byly teplotní rozdíly co největší. Díky rotačnímu přehaněči je chod motoru daleko plynulejší a nedochází k rázům, protože se přehaněč lineárně nepohybuje. Veškeré zatížení přehaněče zachytává ložisko. Nejčastěji kuličkové, nebo válečkové. V motoru dochází ke snížení třecích ztrát, protože nejsou potřeba ojnice k připojení klikového mechanismu, ale přehaněč je na klikový mechanismus připojen přímo. Tato konfigurace vede ke zvýšení životnosti motoru a zvýšení jeho účinnosti. Mezi rotační motory patří ještě například Quasiturbínový. Ten může být



dvoupólový či čtyřpólový, tyto motory jsou, ale konstrukčně složitější než motor Dr. Fostera. [17] [18]

### **3.2.5 Ringbomův motor**

V roce 1907 byl navržen finským vynálezcem, který se jmenoval Ossiana Ringbom. Motor se někdy označuje jako hybridní, neboť nemá plně mechanické řízení pístů ani nemá oba písty volné. Zvláštností tohoto motoru oproti tradičním konstrukcím je to, že přehaněč není mechanicky propojen s klikovým mechanismem. Tato konfigurace může značně zmenšit velikost motoru, protože umožňuje vytvořit "plochou" variantu motoru, kdy je osa setrvačnicku rovnoběžná s osou přehaněče. [19]

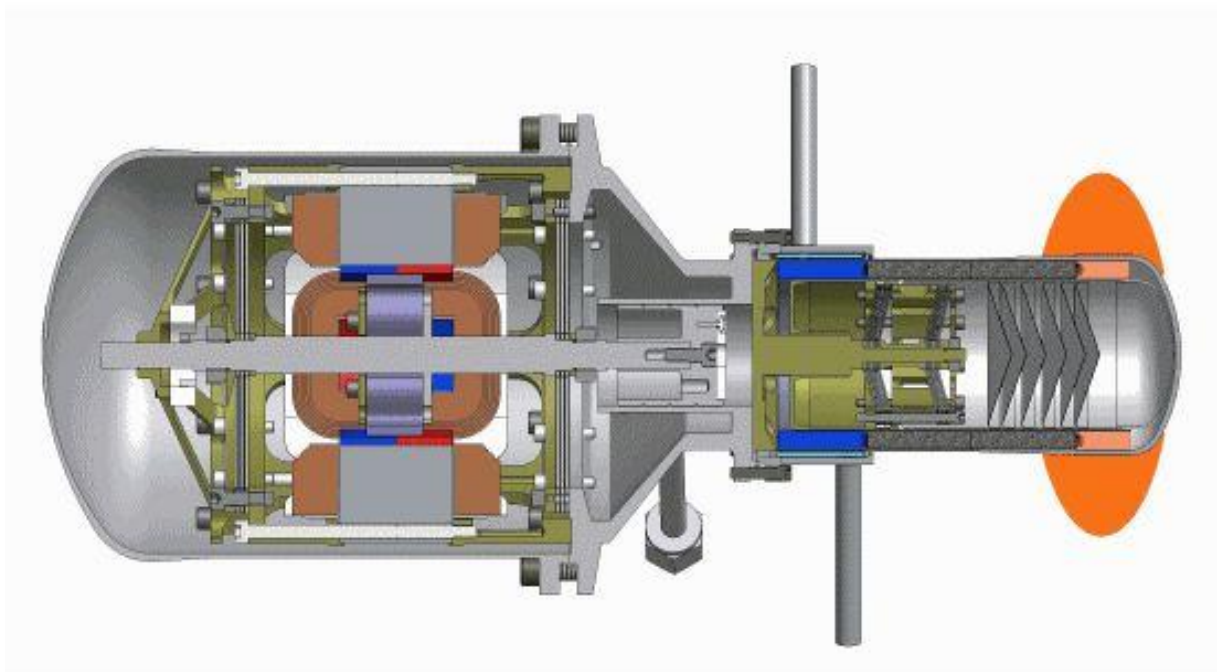
### **3.2.6 Dvojčinný Stirlingův motor**

Motor si v roce 1853 nechal patentovat francouzský inženýr Charles-Louis-Félix Franchot. Jednalo se o koncept víceválcového motoru, kdy se použijí dvojčinné písty motoru typu Alfa. Podrobnější provedení dvojčinného víceválcového motoru popsal v roce 1863 Angličan William Siemens. Realizace ale nebyla provedena. Teprve za dalších osmdesát let se firmě Philips v Nizozemsku podařilo postavit funkční model tohoto motoru. Od té doby se čtyřválcové dvojčinné motory s využitím modifikace alfa používají pro aplikace, kde je žádán vysoký výkon. Tyto motory totiž dosahují výkonu v řádech několika kilowat. Modifikace alfa se v těchto motorech používá hlavně z důvodu jednodušší konstrukce v porovnání s modifikacemi využívající přehaněč a válce jsou hospodárněji využívány. Existují dva typy těchto motorů lišící se uspořádáním. Franchotovo uspořádání se vyznačuje písty, které mají výhradně expanzní, nebo kompresní prostory na obou stranách pístu. Pokud je expanzní prostor oddělen od kompresního prostoru pístem, označujeme toto uspořádání jako Siemensovo. Oproti předchozím modifikacím se prostor pod pístem využívá jako studená strana sousedního válce. Válce jsou totiž vzájemně propojeny. Dochází tedy k lepšímu využití tepelné energie. Z principu motoru je jasné, že jsou nutné minimálně tři válce dvojčinného Stirlingova motoru. V praxi se nejčastěji používají čtyř až šestiválcová uspořádání. [5][19]

### **3.2.7 Stirlingův motor s volnými písty**

V roce 1964 profesor strojního inženýrství na univerzitě v Ohio William Beale vynalezl Stirlingův motor s volnými písty. Nechal si ho patentovat v roce 1971. V roce 1974 založil firmu Sunpower Inc. s cílem komercializace Stirlingova motoru s volnými písty. Firma je aktuálně největším lídrem ve vývoji těchto motorů. Většina motorů je v konfiguraci beta a neobsahují žádné mechanické spojovací systémy. Systém obsahuje lineární generátor umístěný uvnitř motoru. To umožňuje celou konstrukci hermeticky uzavřít. Nehrozí tedy kontaminace z okolí a zároveň pracovní plyn neuniká. Jelikož motor neobsahuje setrvačnick ani klikový mechanismus,

tak se potřebné dynamické účinky nahrazují pracovním pístem o větší hmotnosti a pružným elementem, což může být například pružina, nebo plyn. Motor se tedy skládá ze tří základních částí. Z pracovního pístu, přehaněče a z na obou koncích uzavřeného válce. Obsahuje tedy jen dva pohyblivé elementy a tak nedochází k velkým třecím ztrátám. Mezi jeho největší výhody patří kompaktnost konstrukce a vysoká tepelná účinnost. Motor se navíc dokáže rozeběhnout sám, což je také často ku prospěchu věci. U motoru se nepoužívá klikový mechanismus, to vede ke snížení třecích ztrát a zároveň se tím prodlužuje životnost motoru. Motor většinou obsahuje permanentní magnety, které se využívají pro generování elektrické energie s vysokou účinností. Na vývoji tohoto motoru se značně podílí NASA, která ho chce využít v kosmických sondách. [19][20]



**Obr. 3-17 Motor s volnými písty. [21]**

## **4 Stavba motoru**

Pro stavbu motoru mně přišla modifikace gama nevhodnější. Na výrobu je relativně jednoduchá a při drobných konstrukčních úpravách umožňuje snadné připojení snímačů. Při konstruování jsem vycházel z přibližného výkresu sestavení, který je dostupný na internetových stránkách soutěže Vyrob si svůj Stirlingův motor [22]. Soutěž vede pan Ing Jiří Toman a jelikož jsem se soutěže zúčastnil, tak jsem díky tomu získal dost zkušeností pro stavbou Stirlingova motoru.

### **4.1 Volba materiálu**

Při stavbě Stirlingova motoru je volba materiálu jednotlivých součástí velmi důležitá, protože zásadně ovlivňuje jeho funkčnost a životnost. Některé části motoru by měly dobře vést teplo, jiné by naopak měly izolovat. Materiály musí vydržet teploty a tlaky, kterým jsou vystavovány. Také je nutné brát v potaz hmotnost jednotlivých materiálů, tuhost, korozní odolnost, součinitel tření, obrobitelnost, svařitelnost a další vlastnosti. Veškeré tyto aspekty jsem se snažil při výrobě motoru zohledňovat.

### **4.2 Součásti motoru**

#### **4.2.1 komora**

Komora se skládá z dělené trubky, ventilu, ohříváku a dna. Trubka je vyrobena z hliníkové slitiny EN AW 6060 [23]. Jelikož hliník dobře vede teplo, docházelo by k většímu ohřevu chlazené části od teplé, čemuž jsem chtěl co nejvíce zabránit. Trubku jsem tedy rozřezal na čtyři menší kroužky a mezi ně jsem vložil tři kruhové podložky o tloušťce 3 mm a o průměrech stejných jako u kroužků. Podložky jsou vyrobeny z překližky. Slouží jako izolace a tím snižují prostup tepla válcem. Pro přilepení podložek k duralovým kroužkům jsem použil silikonový tmel, protože snese vysoké teploty a zaručí mi těsnost. Abych zajistil správnou polohu komory vůči základní desce, vyvrtal jsem v horním kroužku dvě dírky, do kterých jsem umístil kolíčky. Při spojení komory se základní deskou kolíčky zapadnou do dírek v základní desce a tím bude komora ve správné poloze. V horním kroužku se ještě nachází čtyři díry s vnitřním závitem, abych mohl základní desku ke komoře přišroubovat. Při výrobě motoru jsem počítal s tím, že jako pracovní plyn budu používat helium. Musel jsem tedy do spodního kroužku komory umístit ventil, který slouží k vypuštění vzduchu, při plnění heliem. Bylo tedy nutné do spodního kroužku vyvrtat otvor se závitem, abych tam mohl ventil zašroubovat

Abych dostal co nejvíce tepla z vnějšího ohřevu do komory, použil jsem ohřívák. Ohřívák je vyroben z kruhového nízkoprofilového hliníkového chladiče, který se používá na chlazení procesoru [24]. Vybral jsem ho, protože má měděné jádro, jež zajistí dobrý přenos tepla a tenká žebra vycházející ze středu, má velkou plochu a nízký aerodynamický odpor. Do jádra jsem ještě vyvrtal několik děr, aby se ohřívák rychleji ohřál.

Komoru jsem uzavřel dnem vyrobeným z hliníkového plechu EN AW-5754 H22 tloušťce 2 mm [25]. Z plechu jsem vyřízl kolo o průměru 108 mm. Abych mohl ohřívák propojit se dnem, musel jsem do vzniklého dna vyvrtat díru o průměru odpovídající průměru jádra. Z chladiče jsem vyndal měděné jádro, které do něj bylo nalisované. Jádro jsem potřel silikonem, aby těsnilo a nalisoval jsem na něj dno a poté i chladič. Takto mně vzniklo dno s ohřívákem. Dno jsem nakonec přišrouboval k dělené trubce pomocí osmi šroubků a spoj utěsnil silikonem, jelikož silikon snese vysoké teploty.



**Obr. 4-1 Podoba komory.**

#### **4.2.2 Přehaněč**

Při konstrukci motoru jsem vytvořil několik přehaněčů, ve snaze zvýšit výkon motoru. Původně jsem ho vyrobil z tenkého hliníkového plechu, ale v provozu se mně moc neosvědčil. Byl velmi těžký a kladl větší aerodynamický odpor. Další přehaněč jsem zkoušel vytvořit z tvrzeného polystyrénu v domnění, že snese vyšší teploty. Ten jsem však ani nedokončil, protože při teplotních pokusech jsem zjistil, že by nevydržel teplotu, která bude v komoře. Nakonec jsem vyrobil přehaněč z balsy. Balsa odolá větším teplotám než polystyrén, dobře izoluje, je velice lehká a relativně snadno se s ní pracuje.

Čím lehčí přehaněč je, tím menší třecí odpor mají ložiska, jelikož nejsou tak zatěžovaná setrvačnými silami. Balsový přehaněč jsem tedy vyrobil dutý, abych snížil jeho váhu. Výroba byla náročnější než u hliníkového přehaněče, protože pro výrobu stěny přehaněče, bylo nutné balsové dřevo stočit do kruhu což byl největší výrobní problém. Ve středu přehaněče se nachází grafitová trubička, ve které je přilepen tenký a tvrdý ocelový drátek. Tenký drátek slouží jako písní tyč. Má nízkou váhu a ve vodítku klade malý třecí odpor, protože je jeho třecí plocha malá. Grafitová trubička je v přehaněči proto, abych zafixoval samotný drátek. Vlivem kmitů by totiž mohl prořezávat horní část přehaněče. V provozu se mi balsový přehaněč velice osvědčil, jelikož

měl motor při stejném zdroji tepla téměř dvojnásobné otáčky oproti hliníkovému. Po několika testech jsem provedl ještě pár úprav.

Protože bylo dno přehaněče tepelně velmi namáhané, začalo docházet k jeho lehkému opalování. Musel jsem tedy dno překrýt několika vrstvami alobalu, aby se teplo lépe odvádělo. Mezi vrstvy jsem nenesl tenkou vrstvu silikonu. Ta slouží jako tepelně odolné pojivo. Stěny přehaněče jsem ještě nastříkal tepelně odolným lakem pro snížení aerodynamického tření.



*Obr. 4-2 Výsledná podoba přehaněče.*

#### **4.2.3 Základní deska**

Základní deska je chlazena ledem, proto nepotřebuje žádné žebrování. Je tedy vyrobena pouze z čtvercového profilu 150x150 mm o tloušťce 5 mm. Deska je z hliníkové slitiny EN AW 6060 pro snadnou obrobitelnost a dobré vedení tepla [26]. Do desky bylo potřeba umístit vodítko pro drát přehaněče. Proto je uprostřed desky otvor. Vodítko je vyrobeno z provrtaného mosazného šroubu a injekční jehly, která je přilepena ve šroubu. Jehla má dostatečně velký vnitřní průměr na to, aby jí mohl procházet tvrdý ocelový drát přehaněče. Vodítko je umístěné v otvoru uprostřed desky a zajištěno nerezovou maticí, aby nedocházelo ke korozi, když bude v kontaktu s ledem. Na základní desce se dále nachází otvor o průměru 32 mm pro válec pracovního pístu. Otvor pro kohoutek, kterým se bude napouštět helium. Tři otvory pro tyče, které drží ložiskové domečky. Dva malé otvory ve kterých jsou středící kolíčky pro správné uložení komory a čtyři díry pro šrouby, které drží komoru.

#### **4.2.4 Pracovní válec**

Pracovní válec jsem volil skleněný z důvodu nízkých třecích ztrát skla. Původně jsem měl skleněný válec o menším průměru, ale chtěl jsem zvýšit otáčky motoru, proto jsem zvolil válec o průměru 32 mm. K základní desce je přilepen silikonem, který zajistí dostatečnou pevnost a těsnost.

#### **4.2.5 Pracovní píst**

Ve snaze o co největší snížení hmotnosti pístu jsou stěny pístu vyrobeny z hliníkové trubky o tloušťce pouze 1 mm a dno pístu je vyrobeno z balsy. Ve dnu je vyvrtána díra se závitem, aby se do ní dalo zašroubovat oko pístu s pístním čepem, jenž bude držet ojnici. Aby oko pístu v balse drželo, bylo nutné závit zpevnit pomocí vteřinového lepidla. Dno je zasazeno do hliníkového válce a přilepeno epoxidovým lepidlem. Stěny pístu jsou zaleštěny, aby tření mezi pístem a válcem bylo minimální.

#### **4.2.6 Ojnice**

Ojnice pracovního pístu je vyrobena z balsy a je potažena stříbrnou folií. Na koncích ojnice jsou přilepena kuličková mikroložiska [29], která mají nižší tření než kluzná.

Ojnice přehaněče je vyrobena ze stejného drátu, jako je použito u přehaněče. Drát je na koncích stočen do kroužku. Kuličkové ložisko je vloženo do spodního kroužku, ve vrchním kroužku ložisko není, protože dostat kuličkové ložisko na klikovou hřídel by bylo velmi náročné. Drát je tedy pouze obtočen kolem klikového čepu. Kuličkovým ložiskem prochází drát, jehož konce jsou ohnuty k sobě. Na tyto spojené konce je navléknutá těsná bužírka. Do bužírky se pak zasune drát přehaněče a jelikož je bužírka těsná, zaručuje dostatečně stabilní uložení. Tento způsob uložení také umožňuje snadnou demontáž přehaněče skrz vodítko. Na konci drátu totiž není nic pevně připevněno, co by překáželo při vyjmutí.

#### **4.2.7 Ložiskové domečky a jejich uchycení.**

Ložiskové domečky jsou vyrobeny z hliníkového válce. První domeček je mezi vodítkem a pracovním válcem. Je uchycen na dvou tyčích. Kdyby byla použita jen jedna rovná tyč, tak by zasahovala do pracovního válce. Druhý domeček už s místem problém neměl, tak v použití jedné tyče nic nebránilo. Tyče mají na konci závit, aby se tyče do domečků mohly zašroubovat. Tyče u pracovního válce jsou zasunuty do nachystaných děr v základní desce a následně přilepeny epoxidovým lepidlem. Tyč druhého domečku je do základní desky zašroubována. Do prvního domečku je zasunuto keramické kuličkové ložisko [27]. Keramické ložisko má nižší třecí odpor,

ale je velmi drahé. Použil jsem tedy pouze jedno keramické ložisko. Do druhého domečku je zasunuto klasické ocelové kuličkové ložisko [28]. V ložiskách je umístěna kliková hřídel.

#### **4.2.8 Kliková hřídel**

Kliková hřídel je vyrobena z dlouhého ocelového šroubu. Hlava šroubu je odříznuta a na konci šroubu je vytvořen závit. Ke šroubu jsem přiložil klikový čep tak, aby polovina jeho délky byla přesně v ose drátu přehaněče. Konce čepu jsem pak přivařil ke šroubu. Šroub pod čepem jsem poté odříznul a tím mě vznikla klika přehaněče. Čep měl takový průměr, abych měl zdvih 10 mm, protože tento zdvih mně z experimentálních testů vyšel jako nejideálnější.

Klika pracovního pístu je vyrobena z hliníkového kolečka. Do kolečka je uprostřed vyvrtaná díra se závitem, abych kolečko mohl zašroubovat na klikovou hřídel. V kolečku je ještě vyvrtán malý otvor ve vzdálenosti 5 mm od středu. Z experimentálních testů se zdvih 10 mm jevil jako nejideálnější. Do otvoru je zasunut a zalepen klikový čep, na kterém je nasazeno ložisko ojnice.

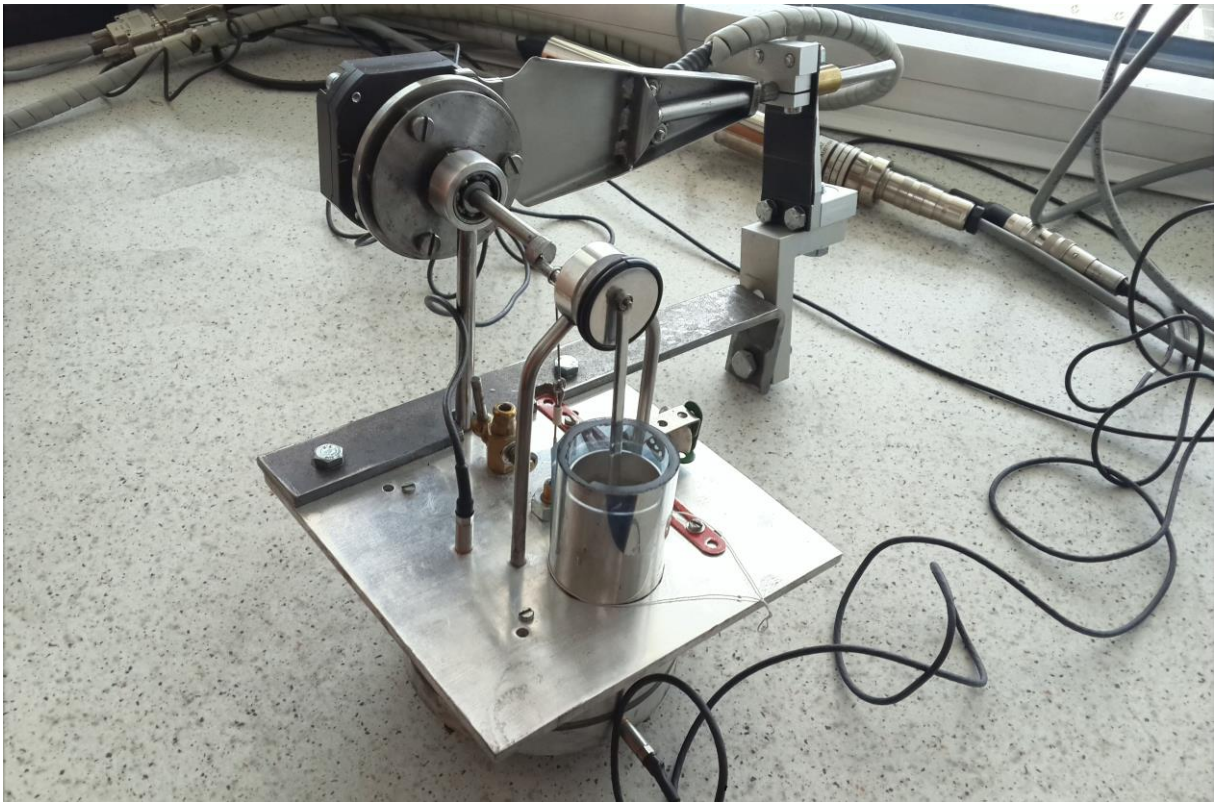
### **4.3 Úpravy motoru nutné pro připojení snímačů**

Pro měření bylo nutné použít dva tlakové snímače a snímač polohy. Pro připojení snímačů bylo nutné provést konstrukční úpravy na motoru.

Pro tlakové snímače bylo potřeba vyvrtat dva otvory se závitem M5x0,5. Jeden do spodního kroužku komory pro měření tlaku v horké části motoru a druhý do základní desky pro měření chladné části motoru. Kvůli těsnosti má závit velmi jemné stoupání.

Pro připojení snímače polohy se musela na klikovou hřídel připravit příruba. Příruba je vyrobena z plechového kruhu, v jehož středu je navařena matice. Matice s přírubou je pak zašroubována na konec klikové hřídele. V kruhu jsou pak vyvrtány 3 otvory pro šrouby. Pomocí tří šroubů a matic je snímač polohy připevněn k přírubě. Tělo snímače polohy se ještě muselo připevnit k základní desce motoru. Pro jeho připevnění bylo potřeba vyrobit držák. Ten je vyroben z pásoviny, která je na konci ohnutá do pravého úhlu. Držák je k základní desce přišroubovaný pomocí dvou šroubů. Jedním šroubem je pak přišroubován snímač k držáku.





***Obr. 4-3 Vzhled prototypu s připojenými snímači.***

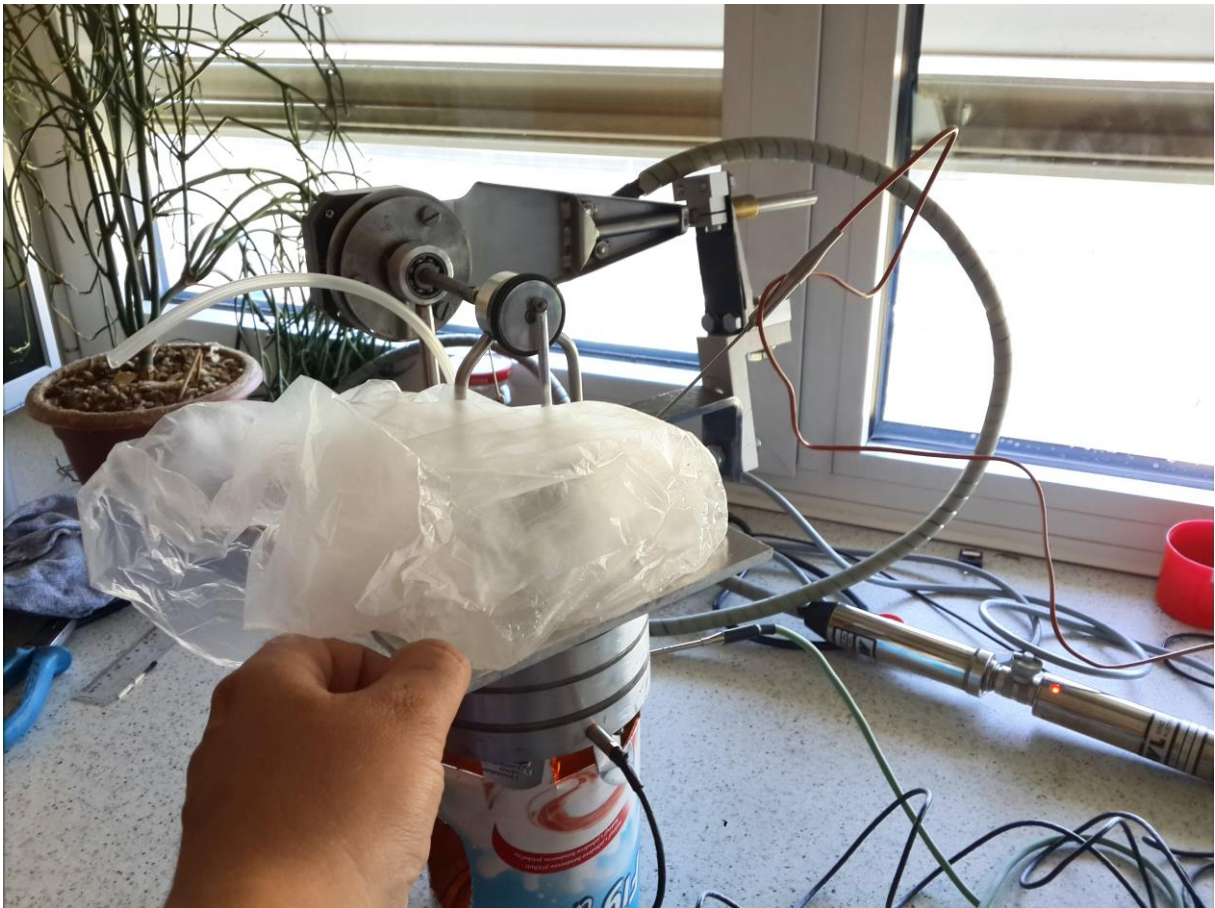


## 5 Měření a vyhodnocení

Abychom mohli zjistit parametry motoru, museli jsme provést měření, ze kterého jsme získali hodnoty okamžitých tlaků v horkém a studeném válci, v závislosti na pootočení klikové hřídele. Tyto tlaky pak byly použity pro výpočet indikovaného výkonu motoru. Pro zjištění účinnosti Carnotova cyklu bylo potřeba znát teplotu ohřivané a chlazené části stroje.

### 5.1 Průběh měření

Nejprve jsme k motoru připevnili snímače tlaku a snímač natočení a připojili je k měřicí ústředně. Měřicí ústředna byla propojená s počítačem, ve kterém byl nainstalován obslužný program. Dále jsme na motor umístili teplotní snímače. Jeden teplotní snímač byl umístěn v chlazené a druhý v ohřivané části motoru. Snímače byly připojeny k multimetrům. Poté jsme zapálili kahan a umístili jej do plechovky, která sloužila jako stojan motoru. Motor jsme postavili na plechovku se zapáleným kahanem a čekali jsme několik minut, než se motor dostatečně zahřeje. Také jsme položili sáček s ledem na základní desku, aby se začala chladit. Po pár minutách šlo motor uvést do chodu. Pro měření jsme jako pracovní plyn použili místo vzduchu helium ve spreji [30]. Helium mělo tendenci unikat, jelikož motor nebyl dokonale utěsněn. Motor jsme tedy plnili až těsně před měřením, abychom helia v motoru měli co největší množství. Před plněním bylo ještě potřeba otevřít oba ventily a připojit hadičku spreje do horního ventilu. Poté jsme byli připraveni na plnění. Pomocí spreje jsme pozvolna plnili helium do motoru a díky otevřenému spodnímu ventilu zároveň docházelo k vypouštění vzduchu z motoru, protože byl těžší než helium. Po pár vteřinách plnění jsme uzavřeli spodní ventil a přestali jsme plnit. Pak jsme uzavřeli vrchní ventil a mohli jsme vytáhnout hadičku spreje. Po naplnění motoru heliem jsme motor rozeběhli a začali jsme měřit. Průběhy teplot jsme sledovali na displejích přístrojů měřících teplotu a následně jsme je zapisovali. Průběh tlaků a natočení klikové hřídele zaznamenával počítač. Takto jsme provedli čtyři měření, a v každém bylo zaznamenáno dvacet cyklů. Zpočátku byly otáčky poměrně vysoké ale tím, jak helium ze stroje postupně vyprchávalo, se otáčky motoru pozvolna snižovaly. Po skončení měření bylo nutné naměřená data z programu počítače vyexportovat, aby se dala dále zpracovávat.



*Obr. 5-1 Průběh měření.*

## 5.2 Snímače

Pro měření byly použity tyto snímače:

### 5.2.1 Tlakové snímače

Pro měření tlaků ve spodní a horní části komory jsme použili tlakové snímače ETL-189-190M-10BAR firmy Kulite. Snímače umožňují měřit okamžitý průběh tlaků což jsme pro zjištění parametrů motoru potřebovali. Tyto snímače se často používají pro měření tlaků u spalovacích motorů, ale dají se použít i pro Stirlingovy motory. [31][32]

Jedná se o piezoresistivní snímače. Tyto snímače pracují na principu, kdy je silovým působením (mechanické namáhání v určité krystalografické ose monokrystalu nebo difuzní vrstvě polovodiče) na polovodičový PN přechod dosaženo změny jeho vlastností. Dochází ke změně vodivosti přechodu a při konstantním napětí se mění proud procházející přechodem. Tato změna je závislá na typu polovodiče a koncentraci příměsi. Tento jev se označuje jako piezoresistivní. [31]

K hlavním výhodám piezoresistivní snímačů tlaku patří jejich malé rozměry, nízká hmotnost (miniaturizace), snadné vyhodnocování a široké frekvenční pásmo. Umožňují měřit okamžitý průběh tlaku od 0 do 10 barů. [31][32]

### 5.2.2 Snímač natočení

Pro měření přesné polohy klikové hřídele jsme použili úhlový enkodér 365C firmy AVL. Je to velice přesné čidlo pro měření úhlu natočení klikové hřídele. Obsahuje disk, na kterém jsou štěrbinové, přes které prochází světlo. Disk je spojen s otočnou spojovací hřídelí enkodéru, která je pak připevněna ke klikové hřídeli motoru. Hřídel se tedy otáčí současně s diskem. Světlo vysílané LED diodou, která je umístěn před diskem, může procházet diskem pouze průhlednými okénky, zatímco zbývající část disku je neprůhledná, a pohlcuje světlo. Světelné impulsy vytvářené otáčením disku aktivují optický snímač, který je převádí na elektrické impulsy. Pro minimalizaci elektrického rušení se světelné impulsy z enkodéru přenáší pomocí optického kabelu do elektrického snímače. Aby bylo u snímače zajištěno generování obdélníkových impulsů bez rušení, musí být elektrický signál zesílen a elektronicky zpracován. [33]

Jeho vlastnosti jsou:

- vysoká přesnost
- vysoké rozlišení (0,1-0,5°)
- vysoká mechanická odolnost (až stovky g)
- vysoká maximální rychlost až 20 000 ot/min
- rotační a torzní analýza
- teplotní rozsah -40 °C až + 70 °C

[33]

Běžně se používá pro měření polohy klikových hřídelí spalovacích motorů. Největší nevýhodou tohoto systému měření je vysoká cena. Při prvním testu jsme zjistili, že má snímač větší odpor, než jsme předpokládali. Pro rozběh motoru byl tedy potřeba větší teplotní rozdíl mezi ohřívanou a chlazenou částí motoru, než který potřeboval bez připojeného snímače. [33]

### 5.2.3 Snímače teploty

Pro měření teplot byly použity dva termočlávkové snímače Omega KTSS-18E-3 [36]. Termočlánek převádí teplotu na elektrické napětí s využitím termoelektrického jevu. Skládá se ze dvou různých vodičů, které jsou na jednom konci vodivě spojeny. Spojené konce slouží jako měřicí spoj a volné konce slouží jako srovnávací spoj. Jedná se o aktivní snímač, jelikož je zdrojem elektrické energie. Existuje mnoho typů termočláneků, které se liší použitými materiály vodičů. V tabulce Tab. 5-1 jsou uvedeny rozsahy jednotlivých termočláneků. Nami použitý termočlánek byl typu K, ve kterém je spojen niklchrom s niklhlíníkem. Z tabulky je jasné, že

rozsah termočlánku typu K je od -200 °C do +1000 °C a to bylo pro naše měření zcela dostačující. [34]

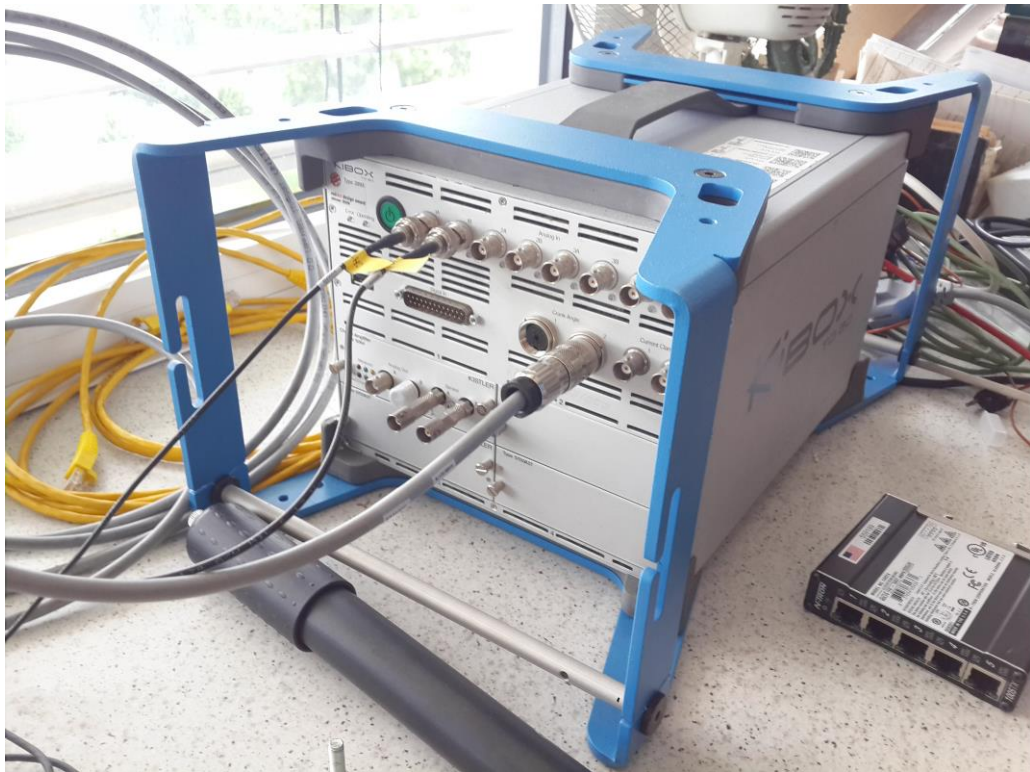
Typ termočlánku	Měřicí rozsah [°C]
T (Cu - CuNi)	- 200 až 400
J (Fe - CuNi)	-200 až 760
E (NiCr - CuNi)	- 100 až 700 (900)
K (NiCr - NiAl)	- 200 až 1000 (1300)
S (PtRh10 - Pt)	0 až 1300 (1600)
R (PtRh13 - Pt)	0 až 1300 (1600)
B (PtRh36 - PtRh6)	300 až 1600 (1800)
A (WRe5 - WRe20)	0 až 2500
N (nicrosil - nisil)	- 270 až 1370

**Tab. 5-1 Měřicí rozsahy termočlánků. [34]**

Termočlánky byly připojeny k digitálním multimetrům Omega HHM32. Tyto Multimetry umožňují zobrazovat teplotu z termočlánku typu K. Dokáží změřit teploty v rozsahu od -20 do 1300 °C s rozlišením měřené teploty 1°C. [43]

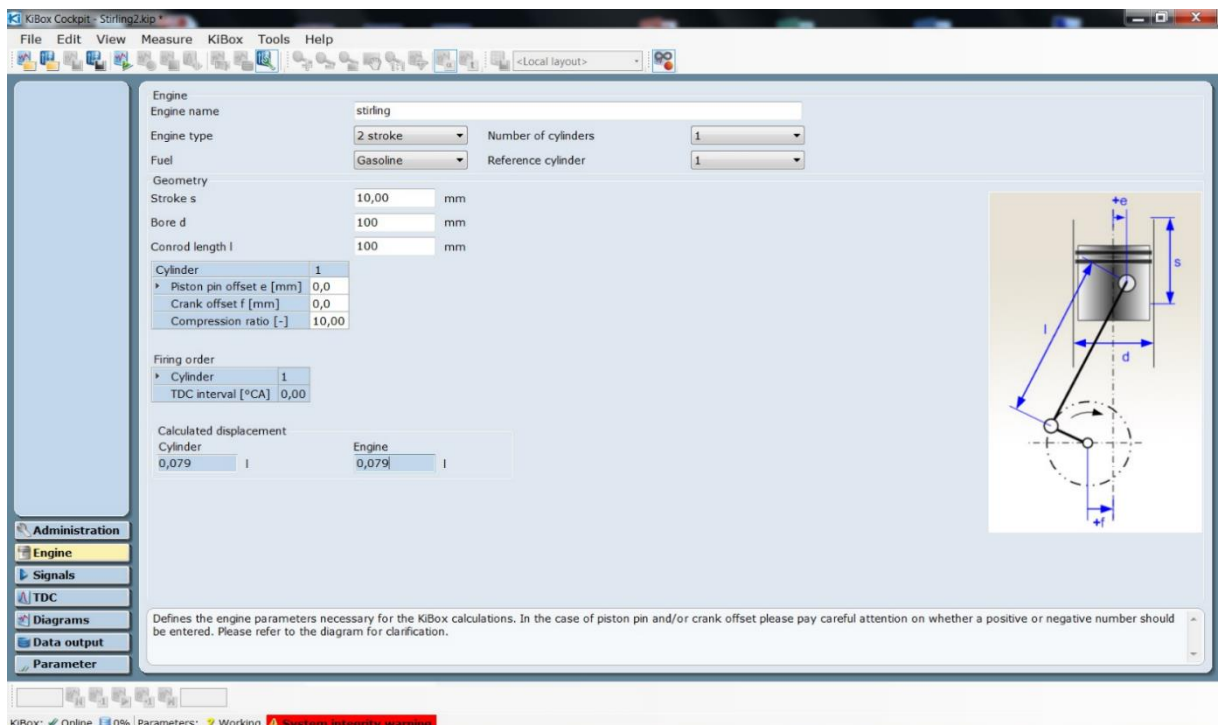
### **5.3 Měřicí ústředna**

K úpravě výstupních signálů snímačů tlaků a snímače natočení jsme použili měřicí ústřednu Kistler 2893A Kibox. Ta zvládne tyto signály převést na takové, které dokáže počítač vyhodnotit. Umožňuje najednou zpracovávat osm analogových napěťových signálů s vzorkovací frekvencí 1,25 MHz. Signál inkrementálního snímače otáček je vzorkován frekvencí 40 MHz. Měřicí ústředna je propojena s počítačem UTP kabelem a pro správnou komunikaci počítače s měřicí ústřednou je nutné mít v počítači nainstalovaný program Kistler Kibox Cockpit. [37]



**Obr. 5-2 Měřicí ústředna Kistler 2893A Kibox s připojenými snímači.**

Program dokáže pomocí dat ze snímačů vyhodnotit parametry spalovacích motorů, ale parametry Stirlingových motorů vyhodnotit nedokáže. V našem případě jsme z programu pouze opsali otáčky motoru pro jednotlivá měření a další data pouze vyexportovali. Vyhodnocení jsme provedli sami. [38]

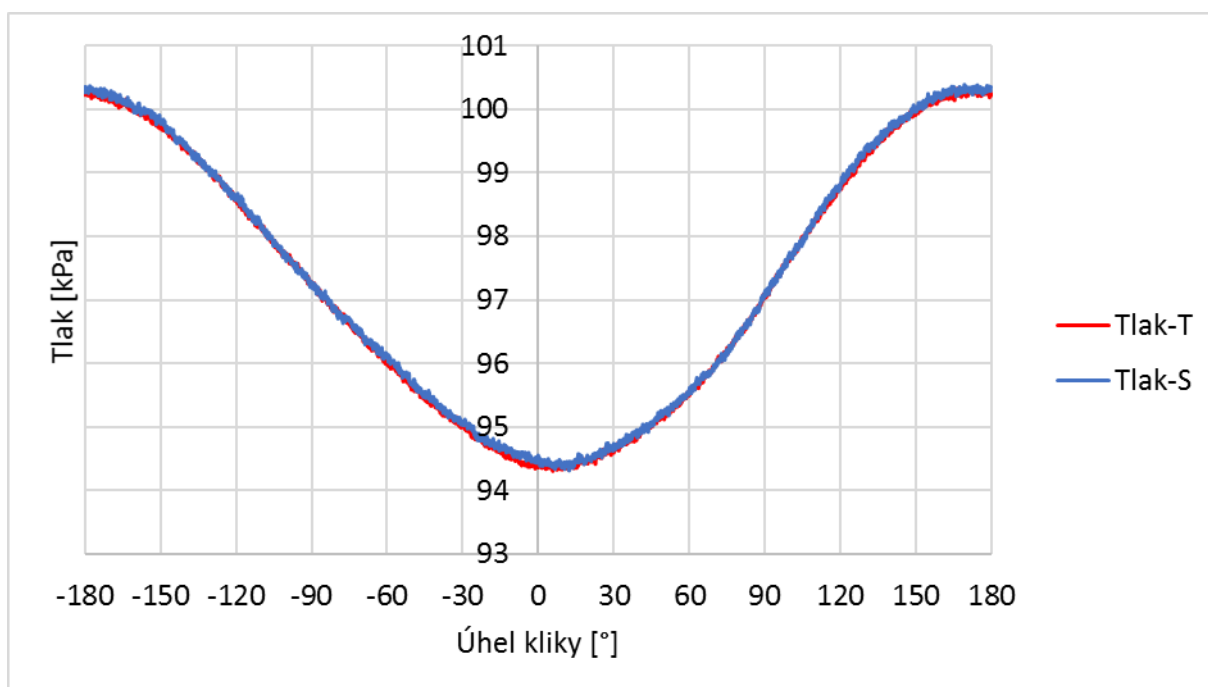


**Obr. 5-3 Prostředí programu Kistler Kibox Cockpit.**

## 5.4 Vyhodnocení

Pro vyhodnocování byl vytvořen výpočtový Excel, který je součástí přílohy. Do Excelu byla importována naměřená data. Tato data byla zaznamenána pro dvacet po sobě jdoucích cyklech motoru. Aby se částečně eliminovaly šumy snímačů tlaků, vypočítali jsme průměr z těchto dvaceti cyklů pro jednotlivé okamžité tlaky. Jelikož tlaky byly měřeny v barech, musely se pro další výpočty převést na kilo Pascaly.

Z takto získaných dat byl vytvořen graf průběhů tlaků v závislosti na natočení klikové hřídele.



Obr. 5-4 Průběh tlaků.

Z grafu je patrné, že se průběh tlaku T v ohřívané části motoru takřka shoduje s průběhem tlaku S v chlazené části motoru. Je to dáno tím, že se tlak šíří lokální rychlostí zvuku.

Dále bylo nutné do excelu vložit průběh vnitřního objemu teplé a chlazené části motoru. Velikost objemu teplé části byla závislá na zdvihu přehaněče a ten byl závislý na pootočení klikové hřídele.

Velikost objemu v chlazené části byla závislá jak na zdvihu pracovního pístu, tak na pohybu přehaněče. Pracovní píst byl připojen ke klikové hřídeli, ale na rozdíl od přehaněče je klika pístu pootočená o úhel 90°.

Pro výpočet okamžitého zdvihu přehaněče a pracovního pístu v závislosti na pootočení klikové hřídele byl použit tento vztah:

$$x_p \doteq r \cdot \left( 1 - \cos \alpha + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin^2 \alpha \right) \quad (5-1)$$



$$\lambda = \frac{r}{l} \quad (5-2)$$

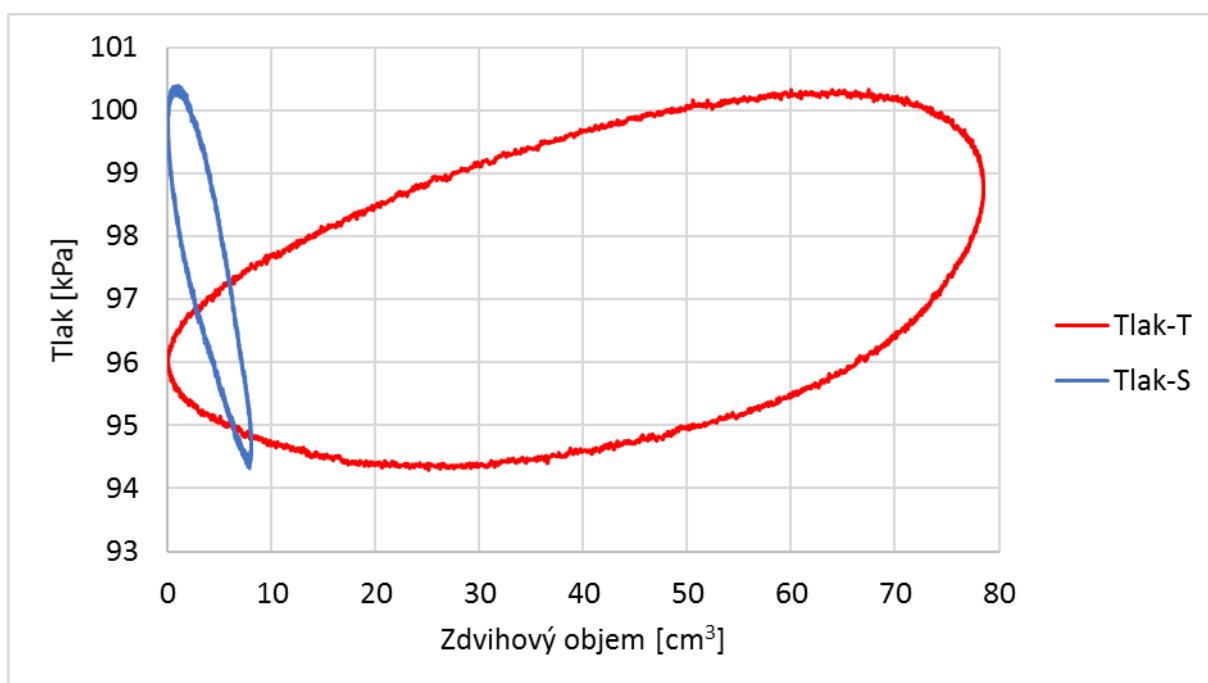
Kde  $\lambda$  je klikový poměr,  $r$  je polovina zdvihu,  $l$  je délka ojnice a  $\alpha$  je úhel natočení klikové hřídele.

Výsledné vztahy pro výpočet okamžitého zdvihového objemu studené a teplé části motoru tedy jsou:

$$V_t \doteq r_t \cdot \left( 1 - \cos \alpha + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin^2 \alpha \right) \cdot \frac{\pi \cdot D_t^2}{4} \quad (5-3)$$

$$V_s \doteq r_s \cdot \left( 1 - \cos(\alpha + 90^\circ) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin^2(\alpha + 90^\circ) \right) \cdot \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \quad (5-4)$$

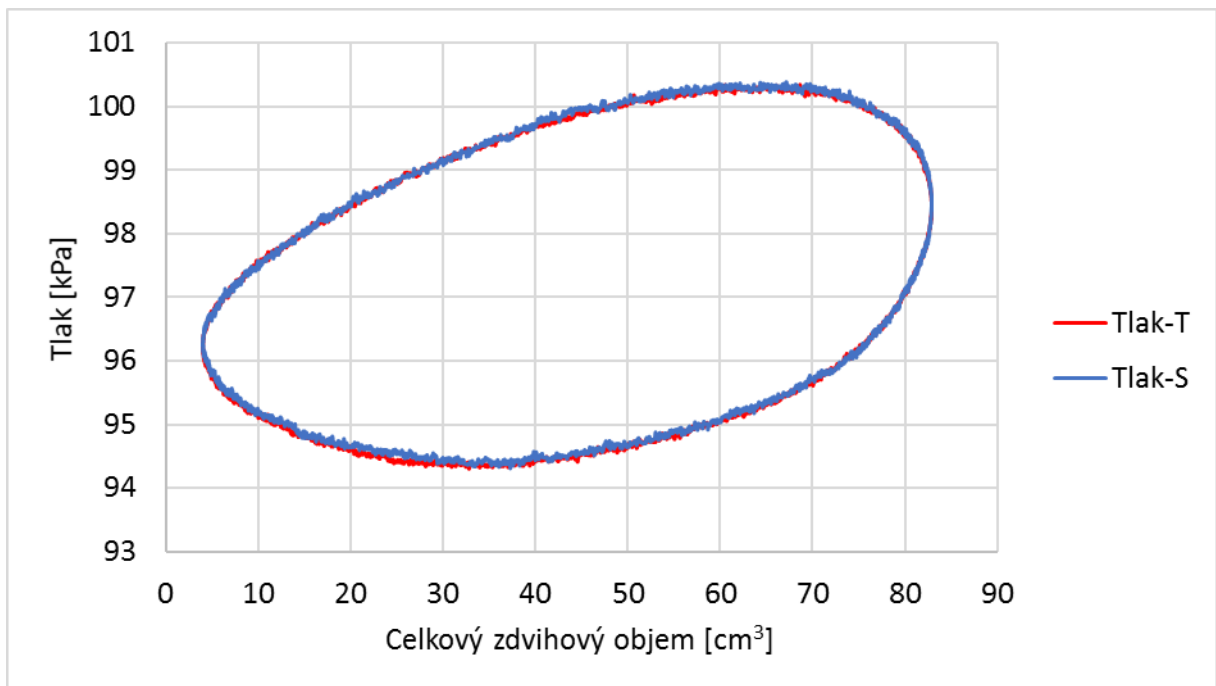
Ze získaných objemů a tlaků byl vytvořen pV diagram, ve kterém jsou znázorněny průběhy tlaků v závislosti na objemech  $V$  teplé a studené části motoru.



**Obr. 5-5 Závislost tlaků na zdvihovém objemu ve studené a horké části motoru.**

Při sečtení okamžitého objemu ohříváné a chlazené části byl získán okamžitý celkový objem.

Z průběhu celkového objemu a průběhu tlaků byl vytvořen pV diagram, ve kterém jsou průběhy ve vzájemném poměru.



**Obr. 5-6** Závislost tlaků ve studené a horké části motoru na celkovém zdvihovém objemu.

Pro správné vyhodnocování bylo potřeba vědět jaký úhel natočení přísluší horní úvrati pístu. Tento úhel nešlo z naměřených dat určit. Jeho hodnota tedy byla přibližně určena z průběhu pV diagramů. Postupným nastavováním ofsetu úhlu se měnily i průběhy pV diagramů. Snažili jsme se úhel nastavit tak, aby průběhy byly co nejvíce podobné průběhům Stirlingova motoru, které má ve své disertační práci pan Ing. Libor Červenka Ph.D. [44]. Z průběhů jsme tedy zjistili, že tento úhel je přibližně 60°.

Pokud plyn koná práci při proměnném tlaku, tak se velikost síly působící na píst mění. Lze tedy předpokládat, že se objem plynu mění o tak malé přírůstky objemu, že tlak plynu při každé z těchto dílčích změn lze považovat za stálý [39]. Indikovanou práci vykonanou plynem při tomto dílčím zvětšení objemu lze tedy určit podle vztahu:

$$W_{ij} = \int_{V_j}^{V_{j+1}} p(V) dV = \frac{p_j + p_{j+1}}{2} \cdot (V_{j+1} - V_j) \quad (5-5)$$

Kde velikost tlaku  $p$  je závislá na objemu.

Indikovaná práce vykonaná plynem je dána součtem dílčích prací.

$$W_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad (5-6)$$

Pomocí těchto vztahů byla určena indikovaná práce plynu v ohřivané a chlazené části motoru. Práce v teplé části motoru vyšla  $W_{it}=0,316$  [J] a v chladné části  $W_{is}=-0,0172$  [J]. Celková indikovaná práce plynu v motoru je dána součtem obou prací.

$$W_{ic} = W_{it} + W_{is} = 0,316 + (-0,0172) = \mathbf{0,299} \text{ [J]} \quad (5-7)$$



Jelikož z měření víme, že otáčky motoru byly 650 [min<sup>-1</sup>] a celková indikovaná práce byla také vypočtena, tak bylo možné určit indikovaný výkon motoru. [40]

$$P_i = \frac{W_{ic}}{t} = \frac{0,299 \cdot 650}{60} = \mathbf{3,24 [W]} \quad (5-8)$$

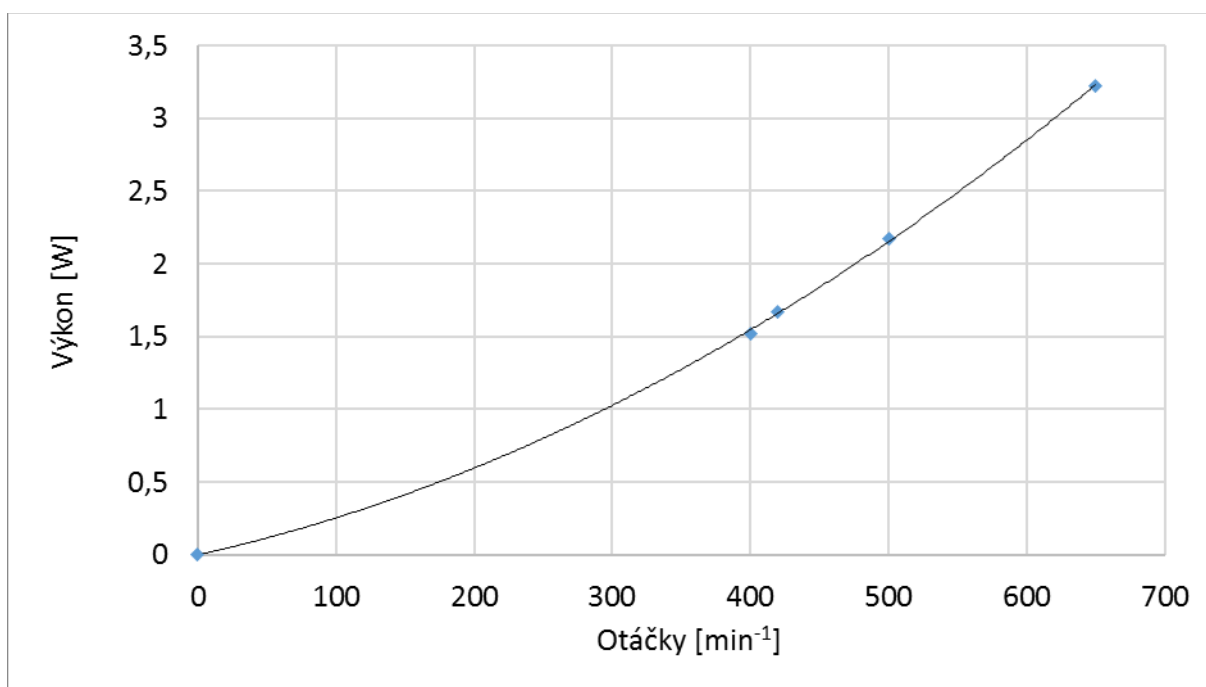
Dále byla vypočtena účinnost Carnotova cyklu, což je poměr vykonané práce k dodané energii. Účinnost je dána tímto vztahem:

$$\eta = \frac{W}{E} = \frac{(Q_{max} - Q_{min})}{Q_{max}} = 1 - \frac{Q_{min}}{Q_{max}} = \frac{(T_{max} - T_{min})}{T_{max}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (5-9)$$

Z měření víme, že teplota stěny ohřívané části byla 305 °C a chlazené části 8 °C. Po převodu ze stupňů Celsia na kelviny a dosazení do rovnice (5-10) byla zjištěna účinnost Carnotova cyklu. [41]

$$\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = \left(1 - \frac{281,15}{578,15}\right) \cdot 100 = \mathbf{51,371 \%} \quad (5-10)$$

Jelikož všechna čtyři měření byla vyhodnocena, bylo možné sestavit graf závislosti výkonu na otáčkách. Body představují hodnoty otáček a indikovaného výkonu pro jednotlivá měření. Pro přehlednost jsou body proloženy polynomem druhého stupně.



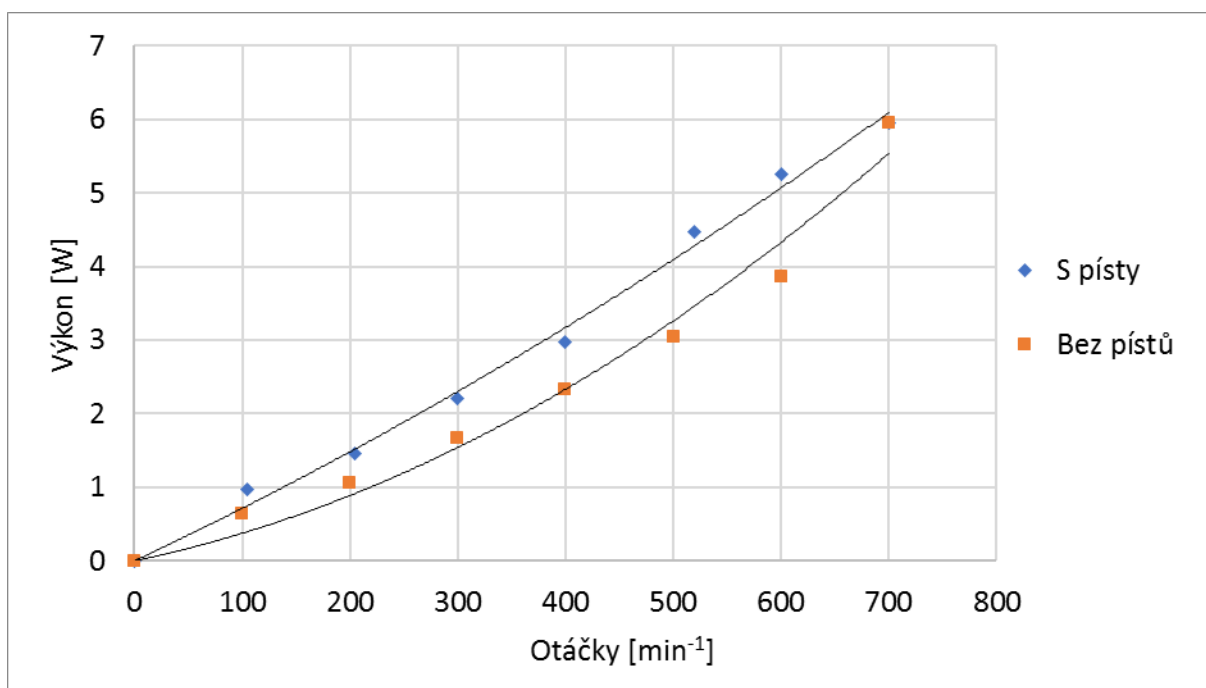
**Obr. 5-7 Průběh výkonů prototypu.**

Z grafu je patrné, že s rostoucími otáčkami stoupá i výkon motoru. S rostoucími otáčkami však porostou i tlakové ztráty pro přesouvání pracovního média. Z tohoto důvodu bude mít výkon své maximum a se zvyšujícími otáčkami začne klesat.

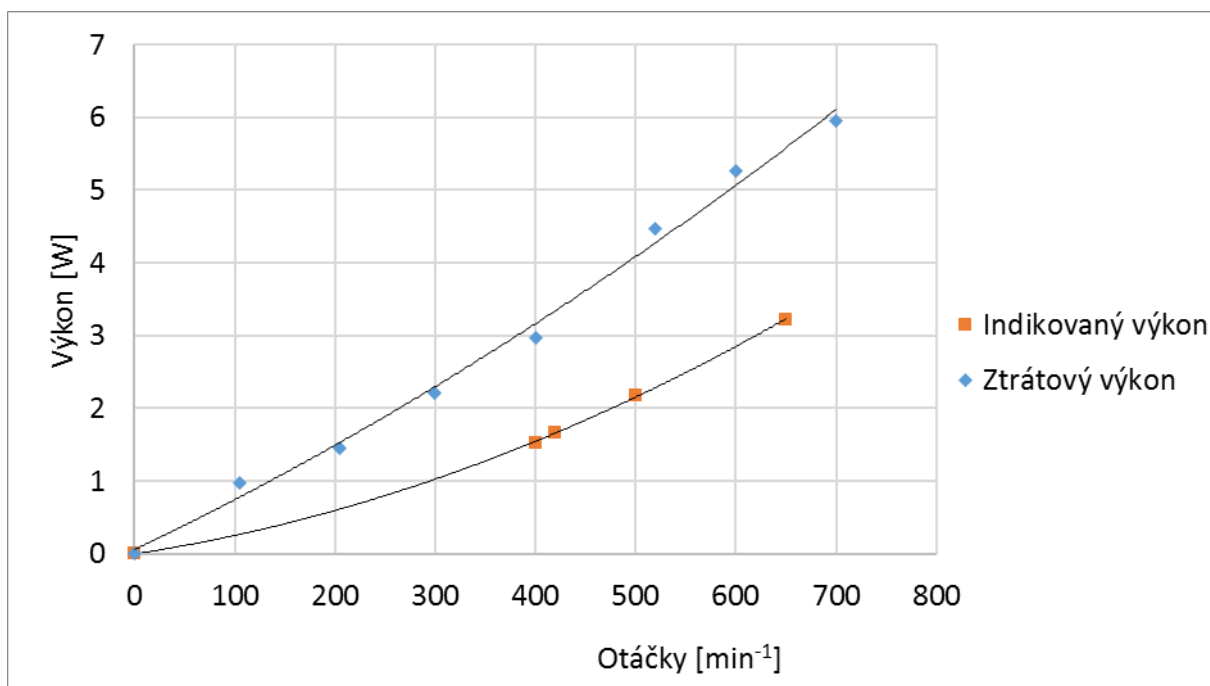
Efektivní výkon motoru byl nulový, jelikož motor běžel naprázdno a nepoháněl tedy žádný generátor. Efektivní výkon je dán vztahem:

$$P_e = P_i - P_z = 0 \Rightarrow P_i = P_z \quad (5-11)$$

Indikovaný výkon se tedy rovná ztrátovému výkonu, který zahrnuje všechny mechanické ztráty. Pro ověření správnosti vypočteného indikovaného výkonu jsme pomocí elektromotoru rozeběhli motor a provedli jsme několik měření, ze kterých jsme určili ztrátový výkon pro jednotlivé otáčky. [42]



**Obr. 5-8 Průběh výkonů nutných pro překonání mechanických ztrát pro variantu bez připojených pístů a s připojenými písty. Mechanické ztráty pístů jsou dány rozdílem výkonů.**



**Obr. 5-9 Průběh indikovaného a ztrátového výkonu.**

Z obrázku Obr. 5-9 je patrné, že se průběhy liší. Může to být dáno tím, že při výpočtu ztrátového výkonu jsme předpokládali konstantní účinnost elektromotoru v celém rozsahu otáček. Při výpočtu jsme použili hodnotu maximální účinnosti 59.58 %, která je uvedena v technických specifikacích elektromotoru [42]. Případné další odchylky mohly být způsobeny nepřesným měřením.

## 6 Závěr

V úvodu této práce je nastíněn historický vývoj Stirlingova motoru. Dále jsou v práci popsány základní modifikace motoru a několik dalších modifikací, které mi přišly zajímavé. Je zde popsána stavba prototypu Stirlingova motoru, kde jsou rozepsány hlavní součásti motoru. Také je zde uvedeno, jaké konstrukční úpravy byly nutné pro připojení snímačů. Pak je tu rozepsán průběh měření a použité snímače, které jsme k měření potřebovali. Je zde také uvedeno k čemu byly snímače připojeny a jak byla získána finální data pro vyhodnocování. Po měření následuje vyhodnocení, kde jsou zpracována naměřená data z měření, ve kterém měl motor největší otáčky. Je tu vyobrazen průběh tlaků v závislosti na natočení klikové hřídele, průběh tlaků v závislosti na jednotlivých objemech, průběh tlaků v závislosti na celkovém objemu. Je zde spočítána indikovaná práce, indikovaný výkon a účinnost Carnotova cyklu. Ze všech čtyř měření byl sestaven graf průběhu indikovaného výkonu motoru.

Z výsledků je patrné, že prototyp malého Stirlingova motoru dosahoval malých výkonů. Pro vyšší výkon by bylo potřeba motor lépe utěsnit, aby se dal zvýšit tlak pracovního plynu. Vlivem netěsností totiž tlak v motoru při natlakování heliem pozvolna klesal až na úroveň atmosférického tlaku. Motor také neobsahoval regenerátor, který bývá součástí profesionálních motorů a jeho použití by bylo velmi vhodné. Optimalizace tvaru přeháněče by snížila třecí odpor při obtékání plynu, a to by se také příznivě projevilo na výkonu. V komoře se nacházel ohříváč, ale chladič už ne. Přidáním chladiče by se mnohonásobně zvětšila teplosměnná plocha a ohřátý plyn by se tak rychleji zchlادil. To by také pravděpodobně pomohlo zvýšit výkon. Výkon motoru je velice ovlivněn teplotním rozdílem mezi ohřívanou a chlazenou částí motoru. Pro vyšší výkon by bylo potřeba mít ještě větší teplotní rozdíl, než jsme měli.

Možnost použití jiného zdroje tepla se nám velice hodila. Původně pro pohon stačilo teplo z horké vody, ve které bylo dno komory namočeno. Jenže po připojení snímače natočení nešlo motor rozeběhnout, jelikož měl snímač moc velký odpor. Použili jsme tedy kahan s petrolejem a ten už pro rozběh motoru stačil.

Při testech jsme měli problém dlouhodobě udržet konstantní otáčky. Pravděpodobně to bylo způsobeno netěsností motoru a tím, že při ohřívání spodní části motoru horké spaliny kromě dna komory ohřívají také spodek základní desky. Bylo by tedy potřeba důkladně odizolovat ohřívanou a chlazenou část motoru. Při vyhodnocování byl ještě problém přesně určit úhel natočení, při kterém je píst v horní úvratí. Pro jeho přesné určení by bylo potřeba použít další snímač, který by snímal jeho polohu.

Pokud by se podařilo odstranit tyto nedostatky mohl, by motor dosahovat mnohem většího výkonu a měl by i stabilnější otáčky. Poté by možná mohlo dojít i k jeho reálnému nasazení, například pro generování elektrické energie ze slunečního záření.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Stirlingův motor – historie, princip a jeho využití při kogeneraci. *Zelené zprávy* [online]. Praha, 2012 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.zelenezpravy.cz/stirlinguv-motor-%E2%80%93-historie-princip-a-jeho-vyuziti-pri-kogeneraci/>
- [2] WALKER, Graham. Dvigateli Stirlinga/Двигатели Стирлинга, 1985. Doplněný Ruský překlad knihy: WALKER, Graham Stirling engine, 1980. Oxford: Oxford University Press.
- [3] A Brief History of the Hot Air Engine. In: *Hot Air Engine Models* [online]. Australia: Edwyn [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://hotairengines.bravepages.com/History.html>
- [4] STOUFFS, Pascal. Does the Ericsson engine deserves more consideration than the Stirling engine?, *Proceedings of the Europäische Stirling forum 2002*, 18.-19. September 2002. Osnabrück.
- [5] ŠKORPÍK, J. Stirlingův motor, Transformační technologie, 2009-06, [aktualizováno 2013-03]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. [cit. 2017-06-29]. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html>.
- [6] LUNDHOLM, Gunnar. The experimental V4X Stirling engine – a pioneering development, Proceedings of the 11th International Stirling engine conference, 19.-21. November 2003. Roma: Department of Mechanical and Aeronautical Engineering University of Rome “La Sapienza”.
- [7] Viessmann uvedl na trh malou kogeneraci pro bytové a větší rodinné domy. *Tzb-info* [online]. Kopačková, 2012 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/8581-viessmann-vedl-na-trh-malou-kogeneraci-pro-bytove-a-vetsi-rodinne-domy>
- [8] Nejúčinnější solární systém na světě? *OEnergetice* [online]. Vobořil, 2015 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/nejucinnejsi-solarni-system-na-svete/>
- [9] Walker, Stirling-cycle machines, Clarendon press, Oxford, 1973.
- [10] Vodík: Vodík 3.0 Tech. - 50/200. *SIAD* [online]. Příbram: SIAD, c2017 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.e-plyn.cz/?p=productsMore&iProduct=64>

- [11] Stirlingův motor a jeho využití při mikrokogeneraci. *MIKROGENERECE* [online]. Mikrokogenerace, 2012 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.mikrokogenerace.cz/stirlinguv-motor-a-jeho-vyuziti-pri-mikrokogeneraci-%E2%80%93-kombinovana-vyroba-tepla-a-elektricke-energie/>
- [12] Stirling engine. *Wikiwand* [online]. Geni, 2009 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: [http://www.wikiwand.com/en/Stirling\\_engine](http://www.wikiwand.com/en/Stirling_engine)
- [13] Mini stirling engine. In: *Pinterest* [online]. Kocaer [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/380272762260914734/>
- [14] Solar powered beta type stirling engine. In: *Gyroscope* [online]. Brightfusion, 2009 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: [https://www.gyroscope.com/d.asp?product=KS18\\_ASS\\_DISH](https://www.gyroscope.com/d.asp?product=KS18_ASS_DISH)
- [15] Thermodynamic and mechanical calculations of gama type stirling engine. In: *Stirling solar generator* [online]. WordPress, 2009 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <https://stirlinggenerator.wordpress.com/2009/03/20/3/>
- [16] HOW A STIRLING GAMMA ENGINE WORKS? *Inside Stirling Engines* [online]. Turu, 2012 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://inside-stirling-engines.weebly.com/how-a-stirling-gamma-engine-works-without-regenerator.html>
- [17] Liquid cooled stirling engine with a segmented rotary displacer. 2010. USA. US8495873 B2. Uděleno 30.července 2013. Zapsáno 16.září 2010.
- [18] Quasiturbine Stirling and Short Steam Circuit: Hot Air Engine. *Quasiturbine* [online]. Francie: Quasiturbine, 2007 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://quasiturbine.promci.qc.ca/ETypeStirling.htm>
- [19] Stirling engine [online]. Španělsko: Toral, 2015 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <https://ifisc.uib-csic.es/users/raul/CURSOS/TERMO/Stirling%20engine.pdf>
- [20] Free-piston Stirling Machine Commercialization Status at Sunpower [online]. USA: Lane, 2014 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://sunpowerinc.com/wp-content/uploads/2014/08/Doc0087-Free-Piston-Stirling-Machine-Commercialization-Status-at-Sunpower.pdf>
- [21] Can Solar Energy Run an Engine? In: *BRIGHT HUB* [online]. USA: Raunekk, 2009 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.brighthub.com/environment/renewable-energy/articles/57216.aspx>
- [22] Přibližný výkres sestavení. In: *Vyrob si svůj stirlingův motor!* [online]. Praha: Toman, 2007 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://betlemska-stirling.blog.cz/0701/vykres-sestaveni>

- [23] OBJEDNÁVKA/POPTÁVKA: Hliníková trubka 110X5. *Alupa: hliníkové profily a plechy* [online]. Pardubice: Alupa [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.alupa.cz/hlinik/hlinikova-trubka-110x5/pro-CAT0000101.html>
- [24] STARFLOW PRO. *Spire* [online]. Nizozemsko: Spire, 2013 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.spire-corp.com/cpu-coolers/starflow-pro-sp559s7-1/>
- [25] 2,00 x 1250 x 2500 mm, AlMg3 H22. *ALUMINIUMSHOP* [online]. Praha: KERAMET, c2012 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.aluminiumshop.cz/?i=846/2-00-x-1250-x-2500-mm-almg3-h22o>
- [26] OBJEDNÁVKA/POPTÁVKA: Hliníková tyč plochá\čtvercová 150X150 6082 Ital. *Alupa: hliníkové profily a plechy* [online]. Pardubice: Alupa [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.alupa.cz/hlinik/hlinikova-tyc-plochactvercova-150x150-6082-ital-/pro-4AV0000101.html>
- [27] 608-2RS Full Ceramic Sealed Skate Bearing 8x22x7 Miniature Bearings. *VXB Ball Bearings* [online]. Kalifornie: VXB, C2017 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.vxb.com/608-2RS-Full-Ceramic-Skate-8x22x7-Miniature-p/kit7652.htm>
- [28] 626 - ložisko kuličkové jednořadé. *ARKOV* [online]. Slatiňany: ARKOV, C2017 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <https://zbozi.arkov.cz/i/8338-626-lozisko-kulickove-jednorade-zkl.html>
- [29] SMR52ZZ Bearing Stainless Steel Shielded 2x5x2.5 Miniature Bearings. *VXB Ball Bearings* [online]. Kalifornie: VXB, C2017 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.vxb.com/SMR52ZZ-Stainless-Steel-2x5x2-5-Miniature-p/kit7622.htm>
- [30] Helium ve spreji do balónku. *Párty prodej* [online]. Ludgeřovice: TARRA PYROTECHNIK, C2014 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: [1url.cz/4tDQE](http://1url.cz/4tDQE)
- [31] Snímače tlaku. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. Děčín: AUTOMA, 2011 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: [http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/42719.pdf](http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42719.pdf)
- [32] *ETL-184(X)-190M SERIES* [online]. Kulite, c2014 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://www.kulite.com/docs/products/ETL-184-190.pdf>
- [33] 365C ANGLE ENCODER SET. *AVL PRODUCT DESCRIPTION*. [online]. 2010 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <https://www.avl.com/documents/10138/885965/angle-encoder-365C-PS-2010-ENG+neu.pdf>



- [34] Termočlánky. *Jan Klepárník - WEB podpora výuky* [online]. Brno: Klepárník, 2003 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: [http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn\\_tcl.htm](http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm)
- [35] Snímače teploty - termočlánky. *ELUC* [online]. Olomouc: Šimáček, 2014 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1582>
- [36] Molded Transition Joint Probes: PFA Insulated Lead Wire Stripped Lead Termination [online]. Karviná: OMEGA, c1995-2017 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: [http://www.omega.com/temperature/pdf/KTSS\\_JTSS\\_CHB.pdf](http://www.omega.com/temperature/pdf/KTSS_JTSS_CHB.pdf)
- [37] KiBox® To Go Measurement and Evaluation System for Combustion Analysis in Vehicles and on Test Benches, Kistler Group, Winterthur, Switzerland
- [38] KiBox® Cockpit Version 1.4 - for In-Vehicle and Test Bench Combustion Analysis, Kistler Group, Winterthur, Switzerland
- [39] Práce vykonaná ideálním plynem. *Encyklopedie fyziky* [online]. Reichl, c2016-2017 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/606-prace-vykonana-idealnim-plynem>
- [40] Vlk, František: Vozidlové spalovací motory. Brno, 2003. 1. vyd. (580 str.), ISBN 80-238-8756-4
- [41] Kruhový děj a Carnotův cyklus. *FYZIKA 007* [online]. Brabec, 2012 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/struktura-a-vlastnosti-latek/kruhovy-dej-a-carnotuav-cyklus>
- [42] Elektromotor 12V. *ES-ELECTRONICS* [online]. Plzeň: ES-ELECTRONICS, C1991-2017 [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <https://www.ges.cz/cz/elektromotor-12v-GES08103095.html>
- [43] Thermo/Multimeter: HHM32 [online]. Karviná: OMEGA, c1995-2017 [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <http://www.omega.com/temperature/pdf/HHM32.pdf>
- [44] ČERVENKA, L. *Nástroje pro termodynamickou optimalizaci objemových tepelných motorů s vnějším přívodem tepla*. Praha, 2015. 100s. Disertační práce na FS ČVUT. Vedoucí disertační práce Jan Macek.

## Seznam značek

symbol	význam	jednotka
$x_p$	zdvih pístu	[mm]
$r$	polovina zdvihu	[mm]
$l$	délka ojnice	[mm]
$V_t$	zdvihový objem v teplé části motoru	[mm <sup>3</sup> ]
$V_s$	zdvihový objem ve studené části motoru	[mm <sup>3</sup> ]
$r_t$	polovina zdvihu přehaněče	[mm]
$r_s$	polovina zdvihu pracovního pístu	[mm]
$D_t$	vnitřní průměr komory	[mm]
$D_s$	vnitřní průměr pracovního válce	[mm]
$p$	tlak	[Pa]
$W$	práce	[J]
$W_i$	indikovaná práce	[J]
$W_{it}$	indikovaná práce v teplé části motoru	[J]
$W_{is}$	indikovaná práce ve studené části motoru	[J]
$W_{ic}$	celková indikovaná práce	[J]
$P_i$	indikovaný výkon	[W]
$t$	čas	[s]
$E$	mechanická energie	[J]
$Q_{max}$	maximální teplo	[J]
$Q_{min}$	minimální teplo	[J]
$T_{max}$	maximální teplota	[J]
$T_{min}$	minimální teplota	[J]
$P_e$	efektivní výkon	[W]
$P_i$	indikovaný výkon	[W]

$P_z$	ztrátový výkon	[W]
$\eta$	účinnost	[-]
$\alpha$	úhel natočení	[°]
$\lambda$	klikový poměr	[-]

## Seznam obrázků

Obr. 2-1 Robert Stirling [3] .....	2
Obr. 2-2 Elektrocentrála firmy Philips využívající Stirlingův motor. [5] .....	3
Obr. 2-3 Stirlingův motor instalovaný v automobilu Ford Taunus. [5] .....	3
Obr. 2-4 Solární systém společnosti Ripasso Energy. [8] .....	4
Obr. 3-1 Schéma Stirlingova motoru .....	5
Obr. 3-2 Modifikace gama [15] .....	6
Obr. 3-3 Modifikace beta [14] .....	6
Obr. 3-4 Modifikace alfa [13] .....	6
Obr. 3-5 Většina pracovního plynu je v horkém válci a dochází k jeho ohřívání. Tlak se zvětšuje a plyn expanduje. To vede ke zvětšení vnitřního objemu, posunem pístu ve studeném válci. [12] .....	7
Obr. 3-6 Systém dosáhl maximálního objemu a plyn se dostává do kontaktu se studeným válcem. Nastává ochlazování a tím i klesání tlaku. Klika je v horní úvrati a vlivem setrvačnosti se začne zasouvat píst na ohřívání straně. [12] .....	7
Obr. 3-7 Téměř všechny plyn je v kontaktu se studeným válcem. Vzniká podtlak a válec začne klesat a tím i vnitřní objem. [12] .....	7
Obr. 3-8 Systém dosáhl minimálního objemu a plyn se znovu začíná dostávat do ohřívání části motoru. Začíná růst tlak i objem. [12] .....	7
Obr. 3-9 . Plyn je v kontaktu s teplou stranou válce. Plyn se ohřívá a expanduje. Dochází ke zvyšování vnitřního objemu s tím, jak se vlivem tlaku posouvá pracovní píst. [12] ...	8
Obr. 3-10 Vnitřní objem je skoro na maximum a klika pracovního pístu je na horní úvrati. Přehaněč se začíná posouvat dolů a tím přesouvá horký plyn do chladné části. [12] ..	8
Obr. 3-11 Přehaněč přesunul většinu horkého plynu do chladné části. Tím se plyn ochlazuje a tlak v systému klesá. Pracovní píst začíná klesat. [12] .....	8
Obr. 3-12 Pracovní píst je v dolní úvrati a přehaněč začíná přesouvat zchlazený plyn znovu do ohřívání části. [12] .....	8
Obr. 3-13 Většina plynu je v kontaktu s teplou stěnou válce. Dochází k jeho ohřevu a tím roste i tlak v systému. Proto dojde k posouvání pracovního pístu do horní části válce. [16] .....	9
Obr. 3-14 Vnitřní objem se zvýšil na maximum. Klika pracovního válce je v horní úvrati. Přehaněč se začíná posouvat dolů a tím přesouvá horký plyn do chladné části. [16] ..	9
Obr. 3-15 Klika přehaněče je v dolní úvrati a ohřátý plyn je přesunut do ochlazované části. Dochází k jeho ochlazování. Klesá tlak i pracovní píst. [16] .....	9

Obr. 3-16 Vnitřní objem je na minimu s tím, jak pracovní píst klesl. Přehaněč začíná znovu přesouvat zchlazený plyn do ohřívané části. [16] .....	9
Obr. 3-17 Motor s volnými písty. [21] .....	11
Obr. 4-1 Podoba komory. ....	13
Obr. 4-2 Výsledná podoba přehaněče.....	14
Obr. 4-3 Vzhled prototypu s připojenými snímači. ....	17
Obr. 5-1 Průběh měření. ....	19
Obr. 5-2 Měřicí ústředna Kitler 2893A Kibox s připojenými snímači.....	22
Obr. 5-3 Prostředí programu Kistler Kibox Cockpit. ....	22
Obr. 5-4 Průběh tlaků. ....	23
Obr. 5-5 Závislost tlaků na zdvihovém objemu ve studené a horké části motoru. ....	24
Obr. 5-6 Závislost tlaků ve studené a horké části motoru na celkovém zdvihovém objemu. ..	25
Obr. 5-7 Průběh výkonů prototypu. ....	26
Obr. 5-8 Průběh výkonů nutných pro překonání mechanických ztrát pro variantu bez připojených pístů a s připojenými písty. Mechanické ztráty pístů jsou dány rozdílem výkonů. ....	27
Obr. 5-9 Průběh indikovaného a ztrátového výkonu. ....	28

## Seznam tabulek

Tab. 5-1 Měřicí rozsahy termočlánků. [34] .....	21
---	----

## **Seznam příloh**

Příloha 1 – Výkres sestavy prototypu malého Stirlingova motoru.

Příloha 2 – CD – Čtyři Excely s naměřenými a vyhodnocenými daty ze čtyř měření a Excel s naměřenými a vyhodnocenými daty z rozběhu Stirlingova motoru pomocí elektromotoru.