

Jihočeská univerzita V Českých Budějovicích

Fakulta pedagogická

Katedra fyziky

# **FYZIKÁLNÍ EXPERIMENTY S PODPOROU IKT**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:  
**RNDr. František Špulák**

Autor:  
**Petr Janoušek**

České Budějovice 2008

## **Anotace**

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá popisem zákonů termodynamiky, přiblížením vlastností Stirlingova motoru, jeho funkce a základních principů. V praktické části se pak zabývá návrhem snímačů s možností připojení k PC, jejich realizací a měřením základních charakteristik Stirlingova motoru.

## **Synopsis**

Theoretical part of the bachelors work describes thermodynamic laws, enlightens features of Stirling's engine, its functions and basic principles. Practical part handles sensor design with possible computer connection and solution of measuring systems.

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi pomohli k dokončení mé bakalářské práce. Děkuji pedagogickým pracovníkům katedry fyziky Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích, kteří mě výborně připravovali zejména v oblasti fyziky a elektroniky. Především bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce RNDr. Františku Špulákovi, který mi vždy ochotně pomohl a poradil.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách

V Českých Budějovicích dne 23.4.2008

.....  
Petr Janoušek

## Obsah

Úvod.....	6
1. Teoretická část.....	7
1.1. Energie .....	7
1.2 Termodynamika.....	9
1.2.1 První termodynamický zákon .....	10
1.2.1.1 Termodynamické děje .....	10
1.2.1.1.1 Izotermický děj.....	11
1.2.1.1.2 Izobarický děj.....	12
1.2.1.1.3 Izochorický děj.....	13
1.2.1.1.4 Adiabatický děj.....	13
1.2.1.1.5 Kruhový děj.....	14
1.2.2 Druhý termodynamický zákon.....	16
1.2.2.1 Carnotův cyklus .....	17
1.3 Tepelné stroje .....	22
1.3.1 Tepelné motory.....	23
1.3.1.1 Stirlingův motor .....	24
1.3.1.1.1 Historie.....	24
1.3.1.1.2 Konstrukce .....	27
1.3.1.1.3 Princip .....	30
1.3.1.1.4 Srovnání se spalovacími motory .....	32
1.3.1.1.5 Současné využití .....	33
2. Praktická část .....	35
2.1 Realizace měřicího zařízení .....	35
2.2 ISES .....	36
2.3 Teplotní snímač (horká komora) .....	37
2.4 Teplotní snímač (chladná komora).....	41
2.5 Snímač otáček .....	44
2.6 Návrhy úloh.....	53
Závěr .....	56
Použitá literatura .....	58
Přílohy.....	59

## Úvod

Při výběru tématu své bakalářské práce jsem dával přednost tématům, která v sobě zahrnovala praktickou část. Dále jsem přihlížel k tomu, abych mohl ve své práci využít to, co jsem se během svého studia naučil. Vyhledával jsem témata, kde bylo třeba řešit problém pomocí elektronických obvodů. Na katedře fyziky jsem dostal možnost navázat na bakalářskou práci kolegy z předchozích ročníků, který pracoval na výrobě a studiu Stirlingova motoru. V dnešní době, kdy prakticky všechno řídí počítače, jsem se rozhodl, že i tento úkol bych mohl řešit s pomocí výpočetní techniky. Mým úkolem tak bylo sestavit snímače pro měření na tomto motoru, které by bylo možné připojit k PC. To by umožnilo naměřená data přímo v počítači ukládat a dále s nimi pracovat. Tato problematika je mi poměrně blízká, takže jsem byl na plnění zadaných úkolů připraven.

## 1. Teoretická část

### 1.1. Energie

Energie je definována jako schopnost hmoty, či pole konat práci. Působit silou  $F$  po dráze  $s$ . Energie se značí písmenem  $E$  (z anglického slova Energy) a jeho jednotkou v soustavě SI je joule [J]. Jako další jednotky jsou používány kalorie [cal] nebo elektronvolt [eV], používaný především pro energii elementárních částic. Pokud těleso nebo pole nemá žádnou energii, nemůže vykonávat práci. Při konání práce je energie měněna z jednoho druhu na druh jiný, přičemž celkové množství energie zůstává, podle zákona zachování energie, stejné. Autoři tohoto zákona jsou: německý fyzik a lékař Julius Robert von Mayer (25.11.1814 – 10.3.1878), který jako první popsal proces oxidace, jako primární zdroj energie všech organismů. Mayerovy úspěchy byly po dlouhou dobu přehlíženy a



obr. 1.1.1 Julius Robert von Mayer



obr.1.1.2 James Prescott Joule

objev mechanického ekvivalentu tepla byl přisouzen Joulovi.

Dalším autorem tohoto zákona je anglický fyzik James Prescott Joule (24.12.1818 – 11.10.1889).

Zabýval se vzájemnou přeměnou mechanické a elektrické energie. Později se jeho zájem přesunul k přeměnám elektrické energie v teplo. Dokázal také, že energie dokáže vyrobit stejné množství tepla a je lhostejné, jestli se jedná o energii elektrickou, chemickou nebo mechanickou. Poslední, komu je přisuzováno autorství zákona, je německý fyziolog, lékař, matematik, fyzik a filozof Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (31.8.1821 – 8.9.-2894).



obr. 1.1.3 Hermann Ludwig Ferdinand  
von Helmholtz

Zákon o zachování energie však není jediný, podle kterého se řídí energetické přeměny. Pokud chceme využívat tepelnou energii ke konání práce, je tento proces vždy doprovázen určitými ztrátami. Z tohoto důvodu byl zaveden pojem účinnost přeměny nebo účinnost stroje. Jedná se o poměr mezi výkonem, který získáme po přeměně a příkonem, který do přeměny vstupuje. Účinnost je vyjádřena v procentech a je vždy menší než 100%. [10,11]



## 1.2 Termodynamika

Způsoby přeměny tepelné energie v energii mechanickou a jejich podmínkami se zabývá část fyziky, která se nazývá termodynamika. Předání energie je podle termodynamiky možné dvěma způsoby. Tepelnou výměnou nebo vykonáním práce. Termodynamika a její zákony se začaly utvářet na přelomu 18. – 19. století, a to v souvislosti s vývojem parních strojů. Při snaze o dosažení lepší účinnosti, vyšších výkonů a menší spotřeby vody a uhlí, se učenici a konstruktéři začali zajímat o podstatu dějů, které probíhají uvnitř parních strojů.

Základy termodynamice položil roku 1824 francouzský inženýr Nikolas Léonard Sadi Carnot, který v tomto roce publikoval svou práci „Úvahy o pohybové síle ohně“. Za samotného zakladatele je však považován německý fyzik Rudolf Clausius. Ten formuloval roku 1850 první termodynamický zákon, týkající se zachování energie, a druhý termodynamický zákon, který se zabývá tepelnou výměnou mezi tělesy o různých teplotách. Mimo jiné bývá i formulován tak, že není možné sestavit perpetuum mobile druhého druhu. Tzn., že nelze vytvořit periodicky pracující stroj, kterému by bylo dodáváno teplo a který by toto teplo přeměnil na práci se 100% účinností. Tomuto stavu se však můžeme přiblížit, pokud bychom byli schopni udržet teplotu chladiče na Kelvinově absolutní nule. William Thomson as. Lord Kelvin byl dalším významným fyzikem v oblasti termodynamiky. Stanovil pojem absolutní nula. Kelvinova nula odpovídá  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Dalším významným vědcem je německý chemik Walther Hermann Nernst. Tento významný vědec pracoval v oblasti termochemie a zasloužil se o vznik třetího zákona termodynamiky. Avšak autorem jeho konečného znění je německý fyzik Max Planck. [15]

### 1.2.1 První termodynamický zákon

Tento zákon, nebo také první termodynamická věta, představuje formulaci zákona zachování energie. První termodynamický zákon říká, že celková energie v izolované soustavě se s časem nemění. Nemůže tedy samovolně vznikat ani zanikat. Může se však změnit v energii jiného druhu, jako je energie mechanická nebo teplo. Pokud by jsme na těleso pohlíželi z hlediska mikroskopického, mohli by jsme říci, že tepelné děje, které probíhají uvnitř tělesa jsou jen mechanickým pohybem jednotlivých částic. Tuto skutečnost popisuje kinetická teorie, podle které lze v tomto případě mluvit o zachování mechanické energie. Z pohledu makroskopického, je ale pevné těleso neměnné a o celkové energii pohybujících se částic mluvíme jako o energii vnitřní. Změny této energie  $\Delta U$  můžeme docílit přidáním nebo odebráním tepla  $Q$  nebo mechanické energie. Vykonáním práce  $W$ . [10, 11]

Pak platí rovnice:

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (1.2.1)$$

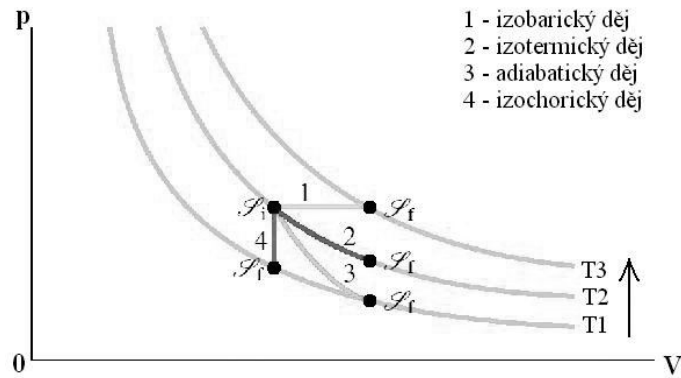
$$\delta Q = c_v \cdot dT - p \cdot dV \quad (1.2.2)$$

#### 1.2.1.1 Termodynamické děje

Termodynamický děj je děj, při kterém se mění některá ze stavových veličin tělesa. V tepelných systémech (v plynech) může docházet k několika termodynamickým dějům. Sledovanými stavovými veličinami jsou objem  $V$ , tlak  $p$  a teplota  $T$ . V těchto dějích je vždy jedna veličina konstantní a sledujeme vzájemnou závislost ostatních veličin.

Platí, že:

$$\frac{p \cdot V}{T} = konst. \quad (1.2.3)$$



obr. 1.2.1  $p$ - $V$  diagram termodynamických dějů

### 1.2.1.1.1 Izotermický děj

Je to termodynamický děj, ve kterém je teplota  $T$  soustavy konstantní.

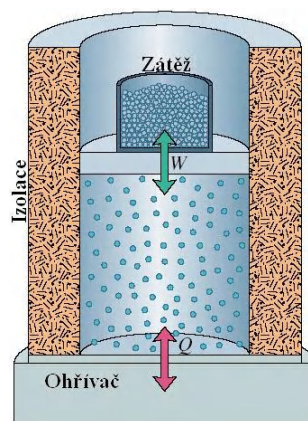
Pro izotermický děj platí Boyleův-Marittonův zákon:

$$p \cdot V = konst. \quad (1.2.4)$$

Vnitřní energie soustavy tedy zůstává stejná a veškeré teplo, které je soustavě dodáno, je spotřebováno k práci vykonané expandujícím plynem. Jelikož je změna vnitřní energie  $\Delta U$  nulová, pak platí:

$$Q = W \quad (1.2.5)$$

Pro ideální plyny platí, že dodáváme-li soustavě teplo, soustava koná práci. Pokud teplo ze soustavy odebíráme, soustava práci spotřebovává.



obr. 1.2.2 Izotermický děj

### 1.2.1.1.2 Izobarický děj

Je to termodynamický děj, ve kterém je tlak  $p$  soustavy konstantní.

Pro izobarický děj platí Guy-Lussacův zákon:

$$\frac{V}{T} = konst. \quad (1.2.6)$$

Při tomto ději se s teplotou mění objem plynu a plyn tak koná práci.

Teplu, které soustavě dodáváme, je spotřebováno ke zvýšení vnitřní energie i k vykonání práce.

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (1.2.7)$$

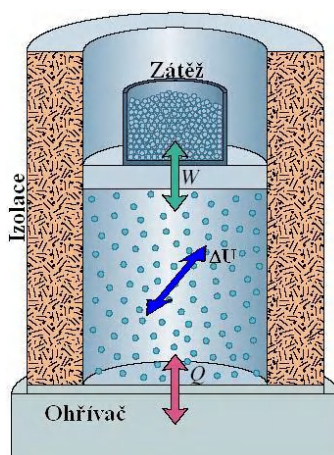
pak  $\Delta U$  je rozdíl mezi vnitřní energií po dodání tepla a vnitřní energií před jeho dodáním.

Samotnou vnitřní energii lze určit pomocí měrné tepelné kapacity za stálého objemu:

$$dU = n \cdot c_v \cdot dT \quad (1.2.8)$$

A práci konanou plynem určíme jako:

$$\delta W = p \cdot dV \quad (1.2.9)$$



obr. 1.2.3 Izobarický děj

### 1.2.1.1.3 Izochorický děj

Je to termodynamický děj, ve kterém je objem  $V$  soustavy konstantní.

U izochorického děje platí Charlesův zákon:

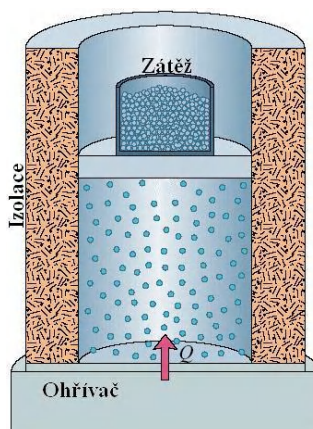
$$\frac{p}{T} = konst. \quad (1.2.10)$$

Při tomto termodynamickém ději se s teplotou mění tlak. Soustava nekoná žádnou práci a ani žádnou práci nespotřebává. Veškeré teplo, které je soustavě dodáno, je tedy využito ke zvýšení vnitřní energie soustavy.

$$dU = \delta Q \quad (1.2.11)$$

Teplo spotřebované pro zvýšení vnitřní energie soustavy lze vyjádřit:

$$\delta Q = n \cdot C_v \cdot dT \quad (1.2.12)$$



obr. 1.2.4 Izochorický děj

### 1.2.1.1.4 Adiabatický děj

Je to termodynamický děj, při kterém, z důvodu dokonalé tepelné izolace, nedochází k tepelné výměně mezi okolím a soustavou. Za adiabatický lze považovat i děj, který proběhne v tak krátkém čase, že se tepelná výměna nestačí uskutečnit.

Pro adiabatický děj platí Poissonův zákon:

$$p \cdot V^\kappa = konst. \quad (1.2.13)$$

kde  $\kappa$  je Poissonova konstanta.

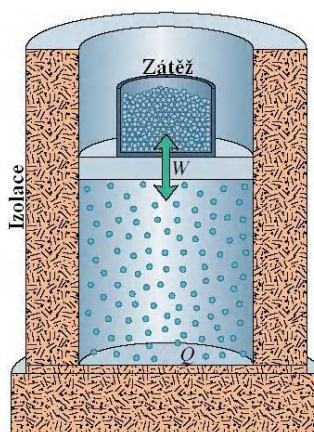
Do soustavy nedodáváme teplo, ani z ní teplo neodebíráme.  $Q$  se tedy rovná nule a platí vztah:

$$dU = \delta W \quad (1.2.14)$$

Při adiabatickém ději je práce konána pouze přeměnou vnitřní energie. [7]

Pro tuto práci platí:

$$\delta W = n \cdot C_v \cdot dT \quad (1.2.15)$$



obr. 1.2.5 Adiabatický děj

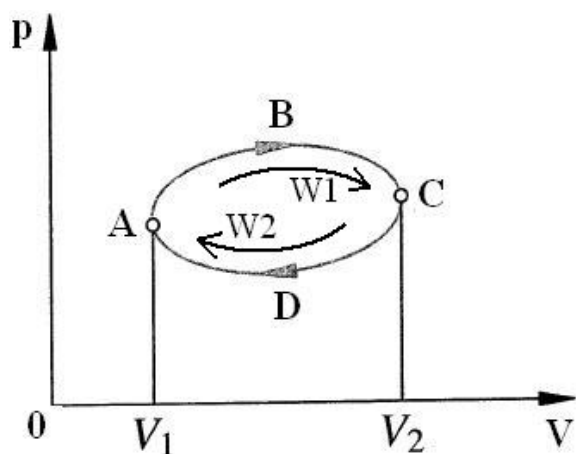
### 1.2.1.1.5 Kruhový děj

Kruhovým dějem se nazývá děj, kdy se termodynamická soustava, po průchodu řady změn, vrátí do počátečního stavu. Většinou se tyto změny periodicky opakují. Na obrázku je znázorněn kruhový děj v p-V diagramu.

Při zvyšování objemu ze stavu A do C koná látka práci ( $W_1$ ), která je rovna obsahu plochy vymezené křivkou A-B-C. Pokud se má látka dostat zpět do původního stavu, musí opět svůj objem snížit. V této fázi je práce látkou

spotřebovávána a dodávána okolními tělesy. Pokud by se látka vracela do původního stavu po stejné křivce C-B-A, výsledná vykonaná práce by byla nulová. Látka se ovšem vrací do počátečního stavu po křivce C-D-A (viz. Obr. 1.2.6). Práce ( $W_2$ ), která je pak látkou spotřebovávána, je rovna obsahu plochy vymezené křivkou C-D-A. Tato práce je menší a výsledná práce, kterou látka vykoná během jednoho cyklu, je rovna rozdílu obsahů ploch pod křivkami A-B-C a C-D-A.

$$W = W_1 - W_2 \quad (1.2.16)$$



obr. 1.2.6 Kruhový děj v p-V diagramu

Děj, při kterém plyn koná práci, se nazývá izotermická expanze. Aby bylo dosaženo stálé teploty, musí se plyn při expanzi ohřívat ohříváčem a při zpětné kompresi naopak chladit chladičem.

Kruhový děj může být otevřený nebo uzavřený. Otevřený kruhový děj je charakteristický tím, že je pracovní látka nasávána z okolí, do něhož se po dokončení cyklu opět vrací. Naopak uzavřený kruhový děj se vyznačuje tím, že u něj nedochází k výměně pracovní látky s okolím. Teplo je tak dodáváno ohříváčem, případně odebíráno chladičem.

Kruhový děj je základním popisem funkce tepelných motorů. [8,15]

### 1.2.2 Druhý termodynamický zákon

Druhý termodynamický zákon popisuje, jaký je přirozený směr, kterým probíhají přírodní procesy. Na rozdíl od prvního termodynamického zákona, který se zabývá vratnými i nevratnými ději, zabývá se druhý termodynamický zákon ději nevratnými. Tzn. těmi, které nemohou proběhnout v obou směrech. Například mechanickou práci lze přeměnit v teplo neomezeně. Přeměna tepla na mechanickou práci je však omezena jistými podmínkami. Slovní formulace druhého termodynamického zákona konstatuje existenci jednoho typu nevratných dějů, přičemž nevratnost ostatních lze z této formulace odvodit. Existuje tak několik formulací, která jsou ovšem obsahově rovnocenné.

#### Clausiusova formulace:

Teplo nemůže při styku dvou těles různých teplot samovolně přecházet z tělesa chladnějšího na těleso teplejší.

#### Thomsonova a Planckova formulace:

Nelze sestavit periodicky pracující tepelný stroj, který by trvale konal práci pouze tím, že by ochlazoval jedno těleso a k žádné další změně v okolí by nedocházelo.

#### Thomsonova a Ostwaldova formulace:

Nelze sestavit perpetuum mobile druhého druhu.

#### Carnotova formulace:

Žádný tepelný stroj pracující mezi dvěma teplotami nemůže mít vyšší účinnost než Carnotův stroj pracující mezi stejnými teplotami.

[8, 10, 11]



### 1.2.2.1 Carnotův cyklus

Zařízení umožňující přeměnu tepla na mechanickou práci, se nazývají tepelné stroje. Z hlediska účinnosti, je tato přeměna nejefektivněji uskutečněna stroji, které jsou založeny na Carnotově cyklu. Carnotovým cyklem nazýváme vratný kruhový děj ideálního tepelného stroje. Jako první ho popsal v roce 1824 francouzský fyzik Nicolas Léonard Sadi Carnot (1.6.1796 – 24.8.1832), který je považován za zakladatele termodynamiky. Ve svém díle popisuje cyklus stroje, ve kterém probíhá ohřívání, expanze, ochlazení a stlačení ideálního plynu. Cyklus probíhá mezi dvěma lázněmi o různých teplotách. Teplotu teplejší lázně, ohříváku, označujeme  $T$  a teplotu chladnější lázně, chladiče, označujeme  $T_0$ . Carnotův cyklus se skládá ze dvou izotermických a ze dvou adiabatických dějů:

#### 1-2 Izotermická expanze

Při tomto ději je dno válce ohříváno ohříváčem o teplotě  $T_1$ . Plyn ve válci se rozpíná z původního objemu  $V_1$  na objem  $V_2$ . Při izotermické expanzi je veškeré teplo  $Q_{12}$ , dodávané ohříváčem, přeměněno na práci  $W_{12}$ . Vnitřní energie plynu se nemění.

Platí tedy:

$$Q_{12} = W_{12} \quad (1.2.17)$$

A vykonaná práce se spočítá jako:

$$W_{12} = n \cdot R_m \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (1.2.18)$$

#### 2-3 Adiabatická expanze

Při tomto ději se dno válce přestane ohřívát. Plyn ve válci se adiabaticky rozpíná z objemu  $V_2$  na objem  $V_3$  a to na úkor vnitřní energie. Plyn se ochlazuje z teploty  $T_1$  ohříváče na teplotu  $T_0$  chladiče. Práce, kterou tak plyn vykoná je

rovna rozdílu vnitřních energií plynu na začátku a na konci adiabatické expanze.

$$W_{23} = U_2 - U_3 \quad (1.2.19)$$

a lze vypočítat jako:

$$W_{23} = n \cdot C_v \cdot (T_1 - T_0) \quad (1.2.20)$$

### 3-4 Izotermická komprese

Při tomto ději se plyn ve válci ochlazuje chladičem o teplotě  $T_0$  a působením vnější síly se plyn izotermicky stlačuje z objemu  $V_3$  na objem  $V_4$ . Při izotermické kompresi je na plynu vykonána práce  $W_{34}$ , která je odevzdána chladiči ve formě tepla  $Q_{34}$ . Spotřebovaná práce je pak rovna odevzdanému teplu:

$$W_{34} = Q_{34} \quad (1.2.21)$$

a vypočítáme ji jako:

$$W_{34} = n \cdot R_m \cdot T_0 \cdot \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (1.2.22)$$

### 4-1 Adiabatická komprese

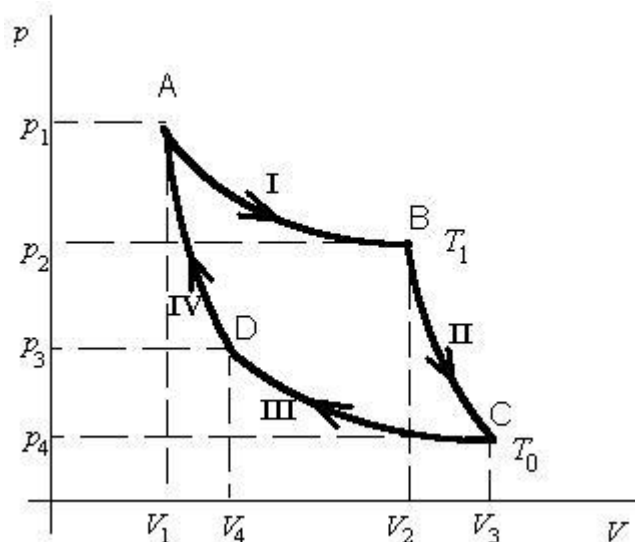
Při tomto posledním ději Carnotova cyklu se plyn ve válci přestane ochlazovat a je vnějšími silami stlačován z objemu  $V_4$  na objem  $V_1$ . Teplota plynu vzroste z  $T_0$  na  $T_1$ . Při adiabatické kompresi je práce, spotřebovaná plynem, rovna nárůstu vnitřní energie.

$$W_{41} = U_4 - U_1 \quad (1.2.23)$$

a vypočítáme ji jako:

$$W_{41} = n \cdot C_v \cdot (T_0 - T_1) \quad (1.2.24)$$

Průběh Carnotova cyklu v  $p$ - $V$  diagramu je znázorněn na obr. 1.2.7



obr. 1.2.7  $p$ - $V$  diagram Carnotova cyklu

Celková práce, která byla vykonána během Carnotova cyklu, se vypočítá jako součet prací v jednotlivých fázích:

$$W = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} \quad (1.2.25)$$

Protože práce vykonané během adiabatické expanze a adiabatické komprese mají stejnou velikost, ale opačný smysl, platí, že:

$$W_{23} + W_{41} = 0 \quad (1.2.26)$$

z toho lze pak odvodit, že celková práce je pak:

$$W = W_{12} + W_{34} \quad (1.2.27)$$

Jinak můžeme říci že, práce vykonaná soustavou při Carnotově cyklu je rovna rozdílu tepla přijatého a tepla odevzdaného. Toto lze popsat jako:

$$W = Q_{12} - Q_{34} \quad (1.2.28)$$

Dokonalého tepelného stroje, který pracuje s ideálním plynem, a který by přeměnil veškeré teplo na mechanickou práci však nelze dosáhnout, a proto je i zde zaveden pojem účinnost. Je to poměr mezi prací, kterou soustava vykoná  $W_1$  a prací soustavě dodanou  $W_2$ .

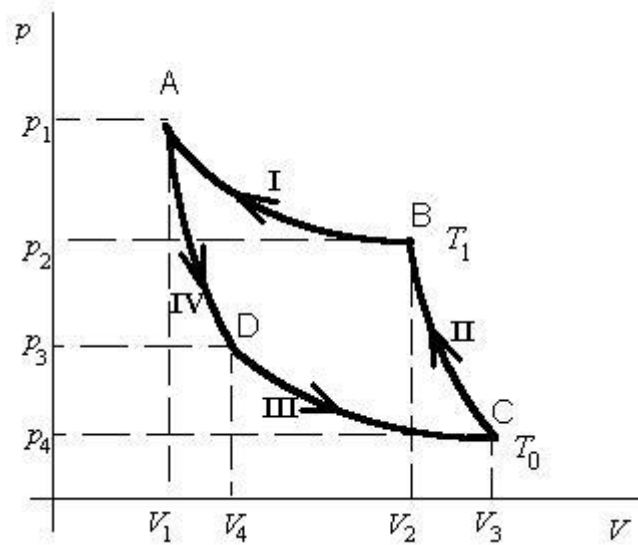
$$\eta = \frac{W_1}{W_2} \quad (1.2.29)$$

Účinnost Carnotova cyklu je dána poměrem mezi vykonanou mechanickou prací a dodaným teplem.

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{T - T_0}{T} \quad \Rightarrow \quad \eta = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (1.2.30)$$

Ze vztahu je vidět, že účinnost závisí na rozdílu teplot ohříváče a chladiče. Čím je teplota ohříváče vyšší a teplota chladiče nižší, tím je účinnost tepelného stroje vyšší.

Vedle přímého Carnotova cyklu existuje i obrácený cyklus, na jehož principu pracuje například tepelné čerpadlo nebo chladnička. Pracovní cyklus probíhá v opačném směru než u přímého Carnotova cyklu, a to proti směru hodinových ručiček. Výsledkem jednotlivých cyklů není vykonaná mechanická práce, ale přenos tepla z chladnější lázně do teplejší. Stroje, pracující na tomto principu, spotřebovávají práci vykonanou působením vnějších sil na systém.



obr. 1.2.8  $p$ - $V$  diagram obráceného Carnotova cyklu

Pokud označíme teplo odebrané během cyklu chladnější lázni a předané soustavě  $Q_2$  a teplo předané soustavou teplejší lázni  $Q_1$ , platí:

$$Q_1 + Q_2 = W \quad (1.2.31)$$

kde  $W$  je práce vykonaná vnějšími silami.

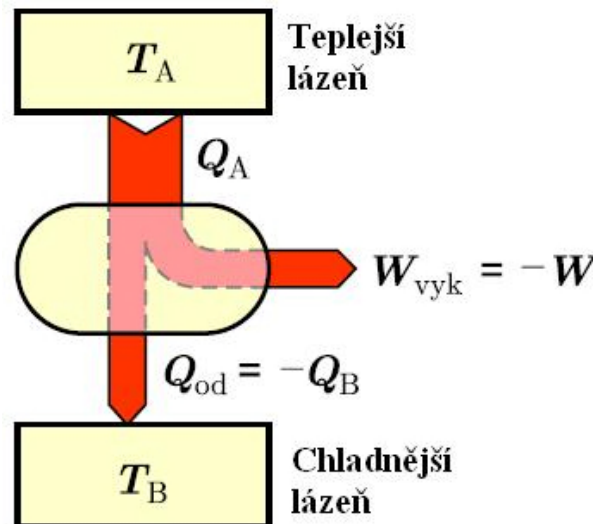
U obráceného Carnotova cyklu se nepoužívá pojem účinnost, ale chladicí faktor. Ten je dán poměrem mezi teplem odebraným chladné lázni  $Q_2$  a spotřebovanou prací  $W$ .

$$K_c = \frac{Q_2}{W} \quad (1.2.32)$$

[10,11,15]

### 1.3 Tepelné stroje

Tepelný stroj je cyklicky pracující zařízení, které odebírá teplo z teplejší lázně, část převede nejčastěji na mechanickou práci a zbytek tepla vrátí do chladnější lázně.



obr. 1.3.1 Princip tepelného stroje

z popisu obrázku pak platí:

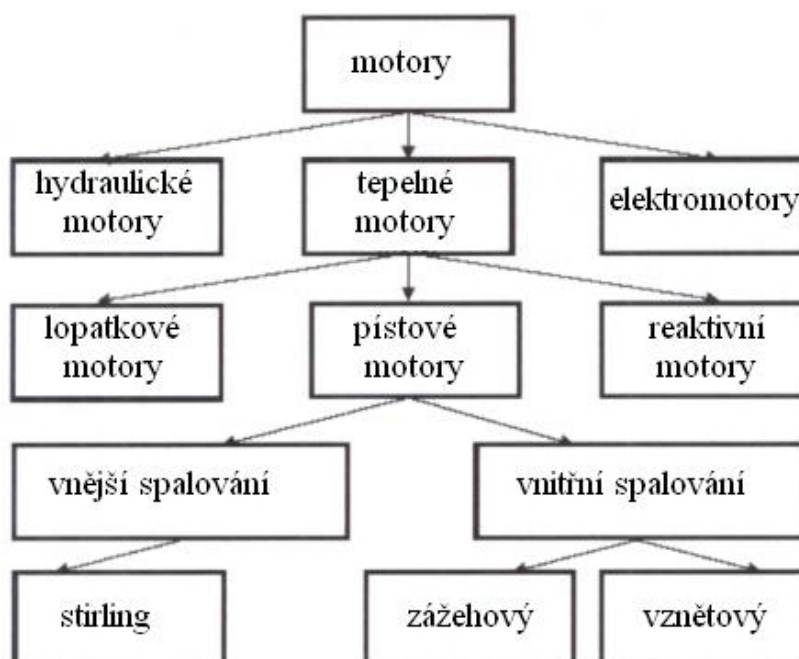
$$\Delta U = W + Q_A + Q_B \quad (1.3.1)$$

Již dříve bylo zmíněno, že tepelné stroje pracují na principu Carnotova cyklu. Na principu přímého Carnotova cyklu pracují tepelné motory a na principu obráceného Carnotova cyklu chladicí stroje jako je lednička nebo tepelné čerpadlo.

### 1.3.1 Tepelné motory

Motor je definován jako hnací stroj, který přeměňuje určitý druh energie v energii mechanickou. Podle konstrukčních prvků můžeme rozdělit motory na: pístové (spalovací motory, parní motory), rotační (parní a vodní turbíny, elektromotory) a reaktivní (proudové a raketové motory).

Podle druhu přeměňované energie se motory dělí na tepelné (spalovací motory a parní či plynová turbína), hydraulické (vodní turbíny a hydromotory), pneumatické a elektrické.



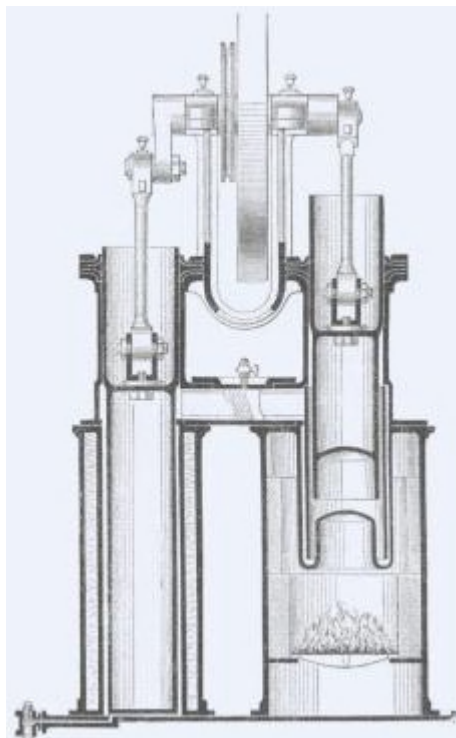
obr. 1.3.2 Rozdělení motorů

Jak název napovídá motory tepelné, a to všechny druhy, využívají tepelnou energii k přeměně na mechanickou. Popis principů všech tepelných motorů však není cílem této práce, a proto se jimi dále zabývat nebudeme. Existuje jeden tepelný motor, který nepracuje na principu Carnotova cyklu. Jedná se o Stirlingův horkovzdušný motor a pracuje na principu Stirlingova cyklu. [10,11]

### 1.3.1.1 Stirlingův motor

#### 1.3.1.1.1 Historie

Vynález Stirlingova motoru je datován k 27.9.1816, kdy si ho nechal



patentovat Skotský pastor Robert Stirling. Motor byl vynalezen ještě v době, kdy ještě neexistovala teorie tepelných motorů. Tento patent však dokazuje, že vynálezce již věděl o podmínkách, které byly potřebné k přeměně tepla na mechanickou energii. Roku 1818 sestrojil motor o výkonu 2 koňských sil, který byl používán k čerpání vody z kamenolomu Ayrshire ve skotsku. Za další práci na zdokonalení svého motoru obdržel Robert Stirling ještě další dva patenty v letech 1827 a 1840.

obr. 1.3.3 Původní rytina

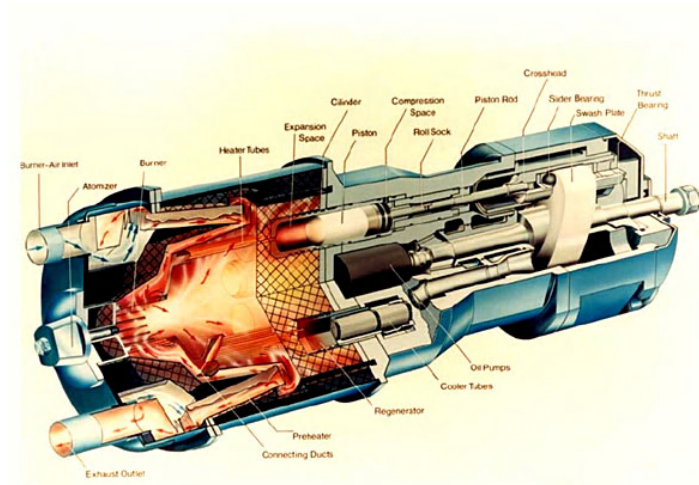
Už od 19. století se Stirlingovy motory používaly v různých průmyslových odvětvích. V zemědělství pumpovaly vodu pro dobytek na vyprahlých farmách, dodávaly vodu do dolů a železnic a zásobovaly jí i velké množství sídel a statků. Zmenšené typy motorů dodávaly energii zubařským vrtačkám, v domácnostech byly použity do šicích strojů a do ventilátorů. Velké typy Stirlingových motorů byla užívána především k pohonu navijáků. K pohonu těchto motorů byla používána kapalná, pevná i plynná paliva. Mnoho typů těchto motorů bylo vynalezeno ve Švédsku Johnem Ericssonem,



který postavil mnoho motorů založených na Stirlingově principu. Tyto motory se užívaly zemědělství, průmyslu a obchodu. Protože si uvědomoval výhody těchto motorů, začal je postupně zlepšovat. Sestavil tak například motor, který pracuje jen díky solární energii. Kvůli vysoké hmotnosti motoru a limitovanému hutnictví byl spalovacími motory a elektromotory vytlačen z trhu. Tento jedinečný přístroj byl až do 20. let minulého století téměř zapomenut.

To se změnilo až v roce 1938, kdy se N.V. Philips začal zabývat vývojem malého Stirlingova motoru, který měl výkon kolem 200W. Motor tak využíval jako tichý zdroj energie, který nezpůsobuje interferenci radiových vln jako neodrušené svíčky u spalovacích motorů. Při svém vývoji zjistil, že pro funkci Stirlingova motoru jsou výhodné i jiné plyny než jen vzduch. Například helium či vodík, které mají menší molekulovou hmotnost. Pomocí těchto plynů dosáhl lepšího měrného výkonu a účinnosti motoru.

V padesátých letech 20. století došlo k rychlému rozvoji materiálů a tím se otevřely i nové možnosti Stirlingova motoru. V sedmdesátých letech 20. století přišla ropná krize a ceny paliv začaly intenzivně růst. Tato krize vyvolala obrovský zájem o Stirlingovy motory, a to zejména pro schopnost motoru využívat pro svou funkci prakticky jakéhokoliv zdroje tepla. V době, kdy se objevily náznaky, že by Stirlingův motor mohl pohánět i dopravní prostředky, se k vývoji firmy Philips přidali i další zájemci. Přední světové automobilky pak poskytovaly milionové částky na vývoj Stirlingova motoru. Tyto kroky později přivedly motor na velmi vysokou úroveň. Švédská firma FVV Group společně s dalšími společnostmi vytvořily joint venture jménem United Stirling a za použití licence N.V. Philips začaly vyvíjet motor o výkonu 200 koňských sil, který měl pohánět terénní automobily, autobusy, nákladní automobily a také ponorky. V průběhu let 1969 – 1970 byl vyvinut motor Philips V4-65, určený pro městský autobus.



obr. 1.3.4 Řez motorem Philips V4-65

Čtyřválcový Stirlingův motor měl celkový objem válců 940 ccm a při 3000 ot/min dosahoval výkonu 200 koňských sil při středním tlaku 22 000 Pa. Díky těmto vysokým tlakům ovšem nedosáhl předpokládané životnosti. Proto společnost United Stirling začala vyvíjet vlastní motor pod označením 4-65, který dosahoval srovnatelného výkonu již při 1500 ot/min a středním tlaku 15 000 Pa. Další vývoj tohoto motoru měl za úkol snížit výrobní a provozní náklady na minimum. Ale ekonomické výpočty ukázaly, že i přesto by byla sériová výroba motorů několikanásobně dražší než výroba dieselových motorů podobného výkonu. Později se United Stirling začala zabývat i vývojem motoru, který měl být tentokrát určen pro osobní vozidla. Konstrukce tohoto motoru vycházela z původního modelu Philips V4-65, na kterém bylo provedeno několik konstrukčních úprav. Po dlouhém vývoji vznikl motor s označením V4X2. Ten byl namontován do prvního osobního automobilu především díky automobilce Ford. Tento automobil se však do sériové výroby nikdy nedostal. Konečným vývojovým stupněm byl motor s označením V4X35, který byl v roce 1974 namontován do Fordu Taunus. I přes dobré výsledky testů jízdních vlastností se vůz opět do sériové výroby nedostal. A to zejména kvůli jeho vysoké ceně. [2, 6]



obr. 1.3.5 V4X35 ve Fordu Taunus 1974

#### **1.3.1.1.2 Konstrukce**

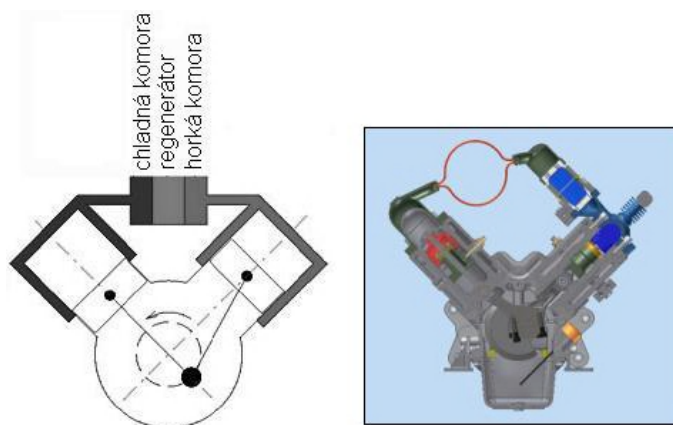
Stirlingův motor se skládá ze dvou pracovních prostorů, mezi nimiž volně proudí vzduch nebo použitý plyn. Jeden pracovní prostor je ohříván a druhý chlazen. Mezi těmito prostory bývá umístěn regenerátor, který pracuje jako akumulátor tepla, který je schopen teplo přebrat a poté s co nejmenšími ztrátami odevzdat.

Podle umístění těchto jednotlivých částí se Stirlingův motor dělí na tři základní konstrukční provedení.

## $\alpha$ – modifikace

U tohoto typu je pracovní prostor rozdělen do dvou válců. V jednom z nich se nachází horká komora a ve druhém studená. Chlazení, regenerátor a ohřívač jsou umístěny mezi oběma válci.

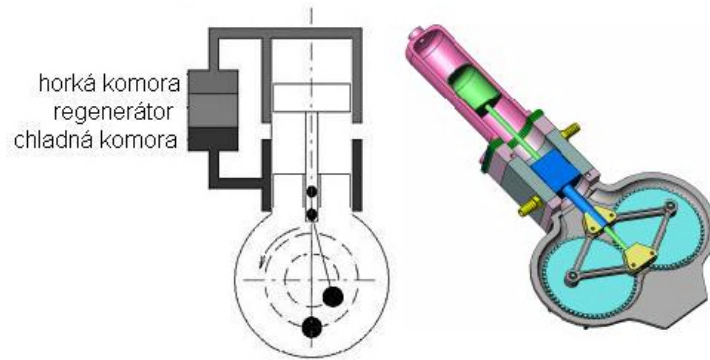
Již zmíněné motory Philips V4-65 nebo V4X35 jsou právě konstrukční modifikací  $\alpha$ .



obr. 1.3.6 Motor v modifikaci  $\alpha$

## $\beta$ - modifikace

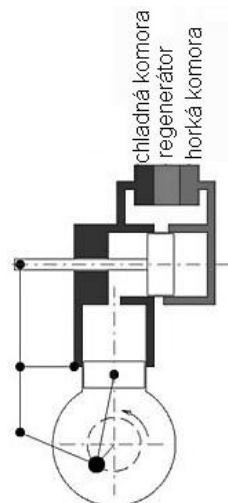
Tato konstrukce motoru je charakteristická tím, že má pouze jeden pracovní válec, v němž se pohybují oba písty. První válec je označován jako pracovní, protože právě on koná práci. Nachází se v chladné části a je řádně utěsněn. Druhý se nazývá přemísťovací. Není úplně utěsněn a slouží k přemísťování pracovního plynu z horké části do chladné a naopak. U této konstrukce je nutné dvojitě utěsnění, neboť pístní tyč přemísťovacího pístu prochází dutou pístní tyčí pracovního pístu. Příkladem motoru této konstrukce je například GM Alisson PD-46, který používá NASA pro výrobu elektrické energie ve vesmíru.



obr. 1.3.7 Motor v modifikaci  $\beta$

### $\gamma$ - modifikace

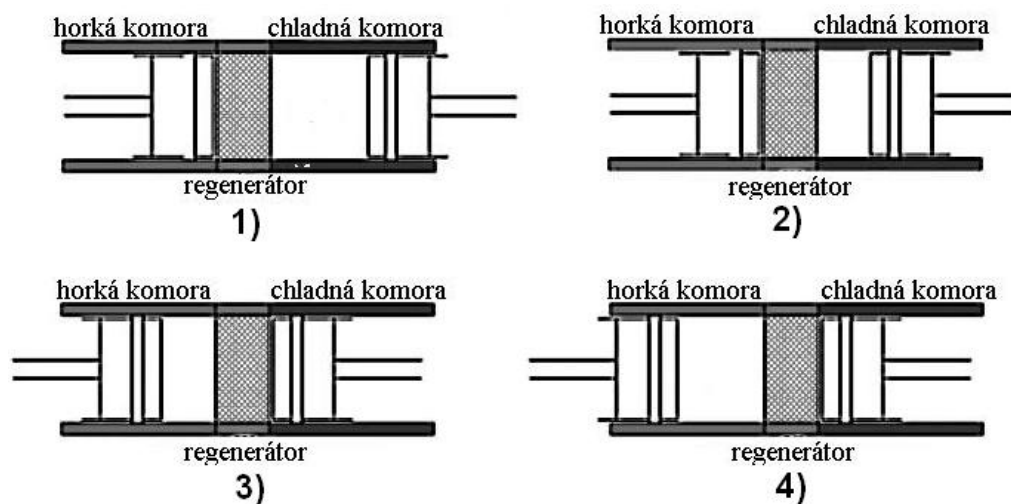
Motory této konstrukce mají opět 2 písty. Přemísťovací a pracovní. Každý z nich však pracuje ve vlastním válci. Jeden válec funguje celý jako chladný prostor druhý z části jako chladný a z části jako horký prostor. Teoreticky se tedy nemůže stát, že by objem chladného prostoru byl nulový. Tato modifikace se zaměřuje na velmi malé motory o výkonu nejvýše několik stovek wattů. [2,3,11]



obr. 1.3.8 Motor v modifikaci  $\gamma$

### 1.3.1.1.3 Princip

Motor pracuje na základě Stirlingova oběhu. Ideální Stirlingův oběh se skládá ze dvou dějů izobarických a ze dvou izotermických. Jelikož je oběh idealizovaný, jsou zanedbány ztráty způsobené třením mechanických částí motoru a ztráty způsobené nevyužitými objemy regenerátoru a chladiče.



obr. 1.3.9 Stirlingův oběh

Na obrázku 1.3.9 je vidět válec se dvěma písty a mezi písty je umístěn regenerátor. Levá strana válce je stále ohřívána a pracovní plyn uvnitř má vysokou teplotu. Pravá strana válce je naopak stále ochlazována, aby bylo dosaženo co nejnižší teploty pracovní plynu.

Průběhy mezi jednotlivými fázemi:

#### 1-2 izotermická komprese

Levý píst zůstává stát. Pravý píst vlivem chlazení zmenšuje objem plynu na minimální hodnotu  $V_{\min}$ . Tlak vzrůstá.

### 2-3 izochorický ohřev

Oba písty se pohybují tak, že se objem  $V_{\min}$  nemění. Plyn prochází regenerátorem, kde se mu vrací dříve odevzdané teplo a ohřívá jej na teplotu  $T_{\max}$ . Tlak plynu tak dosahuje maximální hodnoty  $p_{\max}$ .

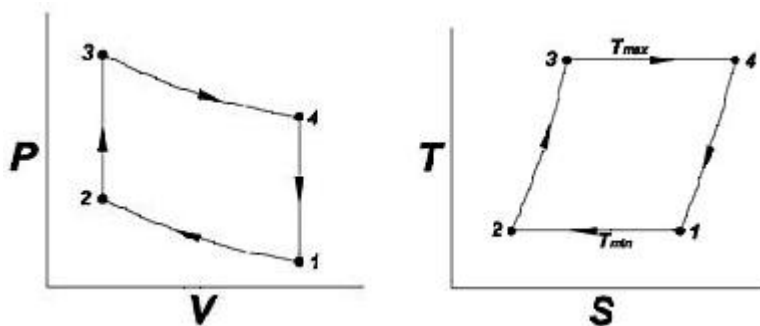
### 3-4 izotermická expanze

Pravý píst zůstává stát. Plyn se v horké komoře vlivem ohřívání rozpíná a zvětšuje svůj objem na hodnotu maximální hodnotu  $V_{\max}$ . Tlak klesá.

### 4-1 izochorické chlazení

Oba písty se pohybují tak, že se velikost objemu  $V_{\max}$  nemění. Plyn prochází regenerátorem, jemuž odevzdá své teplo a je ochlazován na minimální teplotu  $T_{\min}$ . Tlak klesá na hodnotu  $p_{\min}$ .

Tyto jednotlivé přechody jsou vidět i na  $p$ - $V$  a  $T$ - $s$  diagramu.

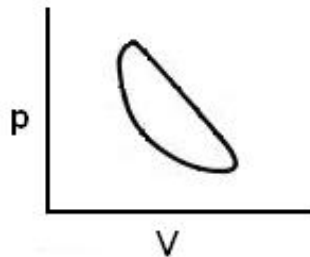


obr. 1.3.10  $p$ - $V$  a  $T$ - $s$  diagram

V případě, že by regenerátor neměl žádné tepelné ztráty a jeho účinnost byla 100%, měl by Stirlingův oběh stejnou termickou účinnost jako Carnotův oběh. V tomto ideálním případě by pak byla účinnost motoru dána vztahem:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \quad (1.3.2)$$

Z toho vyplývá, že pro co nejvyšší účinnost by teplota  $T_{\min}$  měla být co nejnižší a teplota  $T_{\max}$  co nejvyšší. Teploty jsou ovšem omezeny možnostmi a vlastnostmi použitých materiálů. [2, 10]



obr. 1.3.11  $p$ - $V$  diagram reálného motoru

#### 1.3.1.1.4 Srovnání se spalovacími motory

V historii Stirlingova motoru jsou zmínky o snaze konstruktérů a vývojářů použít motor v dopravních prostředcích. Proto sem začlením i srovnání se spalovacími motory.

#### Výhody

Jak už bylo výše popsáno, obrovskou výhodou Stirlingova motoru je fakt, že dokáže pracovat s prakticky jakýmkoliv zdrojem tepla. Tímto zdrojem může být spalování fosilních paliv, směsí plynů, biomasy nebo lze použít ekologických zdrojů jako je geotermální a solární energie. Jelikož nedochází uvnitř pracovního válce k výbuchům, jako je tomu u spalovacích motorů,



pracuje Stirlingův motor velice tiše, a to i v nízkých otáčkách. To je důležité zejména u automobilového motoru. Mazací olej navíc nepřichází do styku s hořící směsí, není tak znehodnocován, není nutná jeho častá výměna. Hořící směs přímo nepůsobí ani na žádné vnitřní části motoru a nedochází ani k zanášení částí motoru karbonem. Mimo jiného i s tím jsou spojeny i nižší servisní náklady.

## **Nevýhody**

Velice diskutovanou nevýhodou je vyšší pořizovací cena, která je zapříčiněna především výrobou jednotlivých kusů nebo jen malých sérií.

Pomalá regulace výkonu je nevýhodou především u automobilových motorů. U generátorů elektřiny však toto problémem není. Motory mají i mírně nižší účinnost a vyšší měrnou hmotnost na jednotku výkonu. Tato skutečnost je opět problémem hlavně u automobilových motorů. [10]

### **1.3.1.1.5 Současné využití**

V současné době se využití Stirlingova motoru přesunulo zejména do oblasti výroby elektrické a tepelné energie. Zvláště pak výrobou elektrické energie z odpadního tepla v technických provozech.

Špičkou v nasazení Stirlingova motoru, který je poháněn solárním systémem, je použití pro kosmické stanice NASA. Zde jsou zdrojem tepla radioizotopy. V roce 2002 uvedla firma Stirling Technology Company, že jeden z jejich nejstarších vyrobených motorů je v provozu již 70 000 provozních hodin a to bez přestávky a bez údržby. Podle dosavadních opotřeбенí je jeho životnost odhadována až na 100 000 provozních hodin.

Dnes jsou firmou komerčně nabízené jednotky, které mají elektrický výkon od 25kW do 70kW.



obr. 1.3.12 Solární jednotka SES 25 kW  
([www.engine.stirling.cz](http://www.engine.stirling.cz))

Pravděpodobně největší připravovaný projekt, zahrnující použití Stirlingových motorů, je elektrárna v USA o výkonu 500 MW. V dohledné době by měl výkon vzrůst až na 850 MW. Elektrárna by měla být umístěna v poušti v jižní Kalifornii a bude prozatím osazena 20 000 jednotkami o výkonu 25 kW. Plánované je rozšíření na 34 000 jednotek.

Z evropských firem je významná firma SOLO Stirling z Německa. Ta se zabývá vývojem kogenerační jednotky, která je založena na modelu V-160 společnosti United Stirling. Tato jednotka má válce do V v úhlu 90°. Pracovní prostor je plněn héliem a při středním tlaku 13 MPa dosahuje výkonu 7,5 kW.

V České republice se v současné době vývojem zabývá VUT v Brně a báňská technická univerzita v Ostravě. Dále pak několik menších firem v čele s firmou TEDOM, která je ve vývoji nejdále a pracuje na kogenerační jednotce se Stirlingovým motorem v modifikaci  $\alpha$ . [1, 2]

## 2. Praktická část

### 2.1 Realizace měřícího zařízení

Před začátkem realizace měřícího zařízení bylo potřeba určit, jaké fyzikální veličiny bude potřeba měřit. Z principu funkce Stirlingova motoru vyplynulo, že budeme potřebovat měřit hlavně teplotu chladné komory motoru, teplotu horké komory motoru a otáčky, které jsou úměrné rozdílu těchto dvou teplot. Dalším doplňujícím měřením by mohlo být měření elektrického výkonu elektromotoru, který by byl poháněn Stirlingovým motorem. Stirlingův motor by se pak zahříval topnou spirálou, na které se dá změřit odebíraný výkon. Z toho by se určila účinnost Stirlingova motoru. Původně byl Stirlingův motor zahříván lihovým kahanem, ale ten by měl být nahrazen zmiňovanou topnou spirálou, protože teplotní čidlo, které jsem použil v teploměru měří pouze do 300°C a přímý plamen by jej mohl poškodit. Druhý teploměr měří teplotu na chladné části motoru, takže zde nebylo žádné další omezení. Každý teploměr má svou vlastní elektronickou část kvůli různým rozsahům. Otáčky motoru jsou snímány z osy setrvačníku, kde je připevněno průhledné slídové kolečko, na kterém jsou černě natištěné dílky. Toto kolečko prochází optickou závorou, kde je paprsek natištěnými dílky přerušován a dává tak signály pro čítač. Původně bylo na slídovém kolečku natištěno 120 dílků. To jsem ale změnil na 12 dílků. Při zkoušení se ukázalo, že některé použité součástky takovouto frekvenci nezpracují. Při 1000 ot/min je pak frekvence z optické závory 200 Hz. A 12 dílků jsem zvolil kvůli lepšímu přepočtu Hz na ot/min. Všechny signály ze zmíněných snímačů bylo třeba zesílit a přivést do počítače k dalšímu zpracování. K tomuto účelu nám výborně poslouží měřící software, který má univerzita k dispozici. Jedná se o software doplněný ISA kartou s A/D a D/A převodníky s názvem iSES.

## 2.2 ISES

Pod zkratkou iSES se skrývá internet School Experimental Systém. Jedná se o školní experimentální systém, který je určen k měření a řízení experimentů v oblasti fyziky, chemie, biologie atd. Součástí iSESu je software, hardwarová karta s převodníky a různé snímače veličin. Mezi dostupnými snímači se však nenašly žádné vhodné pro měření na Stirlingově motoru, tak jsem musel přistoupit k výrobě vlastních. Důvodem byla zvláště velikost dostupných snímačů a absence snímače otáček. Pro stavbu vlastních snímačů bylo potřeba znát měřené rozsahy, se kterými je iSES schopen pracovat. V tomto případě nás zajímaly pouze vstupní kanály. ISES je schopen zpracovávat vstupní napěťový signál v rozsahu 0-5V. Signál je pak přiveden na kartu s A/D a D/A převodníky a dále už zpracováván jako digitální signál,



obr. 2.2.1 Sestava iSESu se snímači

Z těchto informací bylo zřejmé, že snímače by měly být aktivní. Tzn., že budou napájeny vlastním zdrojem energie a výstup bude upraven a zesílen tak, aby jeho hodnoty odpovídaly rozsahu vstupních kanálů iSESu. V programu pak lze měřicí stupnici snadno kalibrovat a nastavit citlivost tak, aby zobrazeným výstupem byla již skutečná hodnota měřené veličiny včetně jednotek. Program je schopen měřit všechny vstupní kanály najednou. Výsledkem měření jsou grafy závislostí měřených veličin na čase. Z takto naměřených grafů pak lze sestavit graf závislosti jedné měřené veličiny na veličině další.

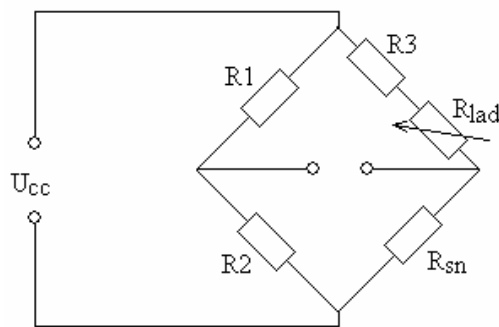
### 2.3 Teplotní snímač (horká komora)

Při návrhu teplotního snímače k horké komoře Stirlingova motoru, jsem musel dbát na jistá kritéria. Hlavním kritériem byl teplotní rozsah snímače. Pro funkci Stirlingova motoru je důležitý co největší teplotní rozdíl. Teplota horké komory dosahuje řádově stovek °C. Dalším kritériem byla velikost snímače. Snímač by měl být co nejmenší, aby se snadno připevnil na skleněný pracovní válec motoru. V katalogu jsem našel pouze jeden použitelný teplotní snímač. Jedná se o tepelně závislý odpor s označením KTY 84-130, který má teplotní rozsah -40°C až 300°C. K vyhodnocení změny odporu snímače jsem použil Wienův můstek.

#### Wienův můstek

Wienův můstek je obvod vyhodnocující rozdíl poměru odporů v jeho větvích. Wienův můstek je vyvážený, pokud platí, že:

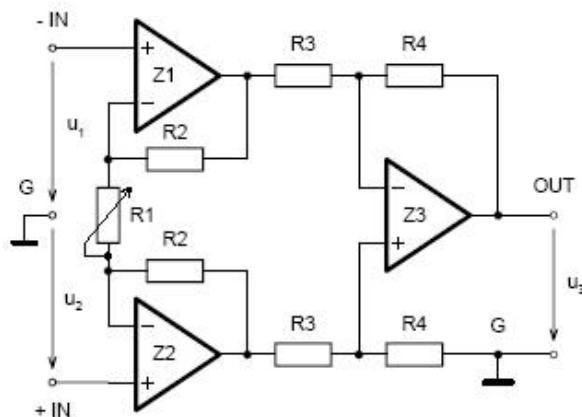
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3 + R_{lad}}{R_{sn}} \quad (2.3.1)$$



obr. 2.3.1 Wienův můstek

Tedy je na výstupních svorkách nulové napětí. Pro vyvážení můstku je v obvodu použit potenciometr  $R_{lad}$ . Můstek by měl být vyvážený při nejnižší teplotě, která nám v měření může nastat. S rostoucí teplotou se pak mění odpor snímače a můstek se stává nevyváženým. Přímě úměrně odporu snímače se pak mění napětí na výstupních svorkách. Experimentem jsem zjistil, že výstupní napětí při ohřátí snímače na maximum se pohybuje kolem 1,6V. Protože by nebyl využit plný rozsah vstupního kanálu iSESu, bylo potřeba napětí ještě zesílit. Abych dosáhl 5V na výstupu, bylo potřeba napětí zesílit zhruba 2-3 krát. Zvolil jsem tedy neinvertující zesilovač s OZ. Po sestavení jednoduchého obvodu jsem však zjistil, že na výstupu zesilovače je stále plné napájecí napětí tzn. že zesilovač byl stále v saturaci. Vyzkoušel jsem několik typů OZ ale vždy se stejným výsledkem. Až po poradě s vyučujícím jsem zjistil, že výstupní napětí Wienova měřícího můstku je rozdílové napětí. Znamená to, že napětí, které jsem měřil na výstupních svorkách, není napětí vztažené k zemi, ale pouze jedné svorky k druhé. Změřil jsem si tedy napětí mezi jednou svorkou a zemí a zjistil jsem, že proti zemi je na svorkách napětí kolem 2,4V. Pokud je toto napětí zesilovačem zesíleno ještě 2 krát, je zesilovač stále v saturaci. Musel jsem tedy zvolit jiné zapojení zesilovače. V úvahu přicházel jednoduchý rozdílový zesilovač nebo přístrojový zesilovač. Kvůli lepším vlastnostem jsem si zvolil přístrojový zesilovač.

## Přístrojový zesilovač



obr. 2.3.2 Přístrojový zesilovač

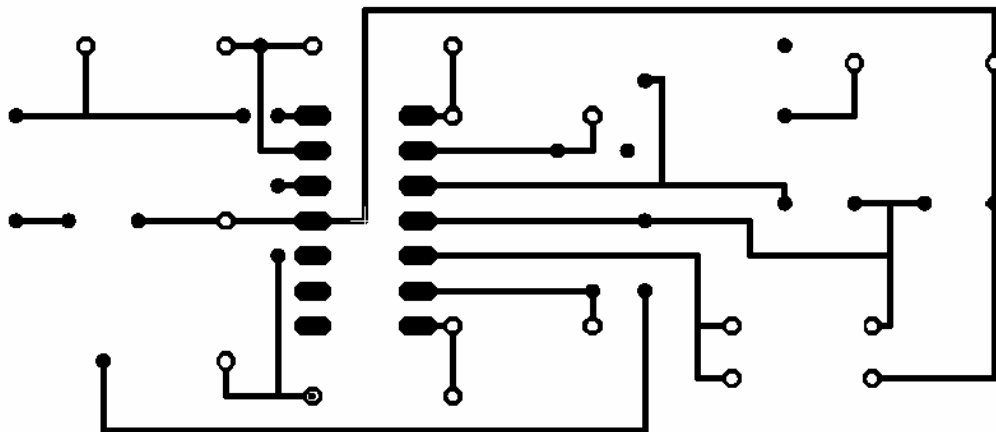
Přenos přístrojového zesilovače je:

$$u_3 = (u_1 - u_2) \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (2.3.2)$$

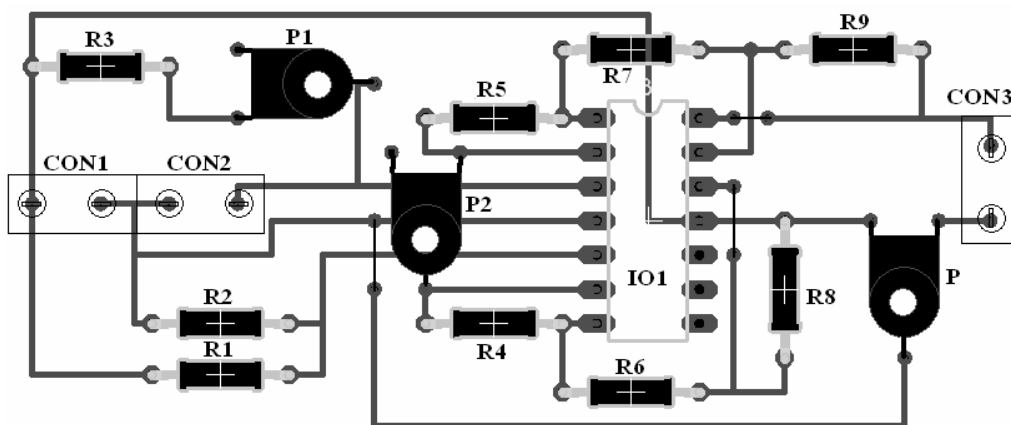
Na základě těchto vztahů jsem spočítal hodnoty příslušných rezistorů . Jak je vidět ze schématu, jsou zde použity celkem 3 OZ (operační zesilovač). Použil jsem integrovaný obvod LM324N, který má v sobě čtveřici bipolárních OZ. Stačil mi tedy pouze jeden IO (integrovaný obvod).

Toto zapojení už fungovalo bez větších problémů. Jediným nedostatkem bylo, že výstupní napětí zesilovače bylo zatěžkáno chybou nuly. To jsem ovšem vyřešil pouze jedním potenciometrem, kterým jsem tuto chybu eliminoval.

Po vyzkoušení funkčnosti jednotlivých částí přišlo na řadu jejich spojení. Pro jednoduchost a funkčnost zařízení jsem umístil vše na jednu desku plošných spojů, která je zabudovaná v pouzdře z konektory.



obr. 2.3.3 Deska plošných spojů teploměru

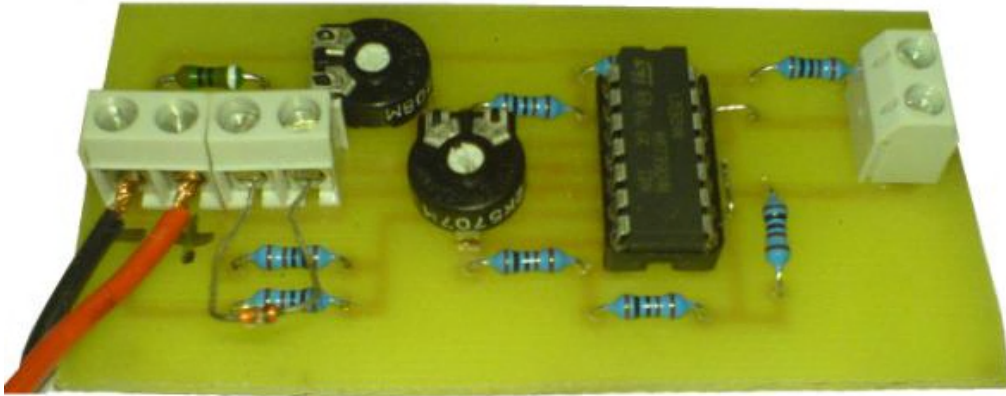


obr. 2.3.4 Osazení desky teploměru

Seznam součástek:

R1	1K0	P1	250Ω
R2	1K0	P2	2K5
R3	910Ω	P3	2K5
R4	1K0	IO	LM324N
R5	1K0	Sn	KTY 84-130
R6	1K0	Con1	ARK500/2SV
R7	1K0	Con2	ARK500/2SV
R8	1K0	Con3	ARK500/2SV
R9	1K0		



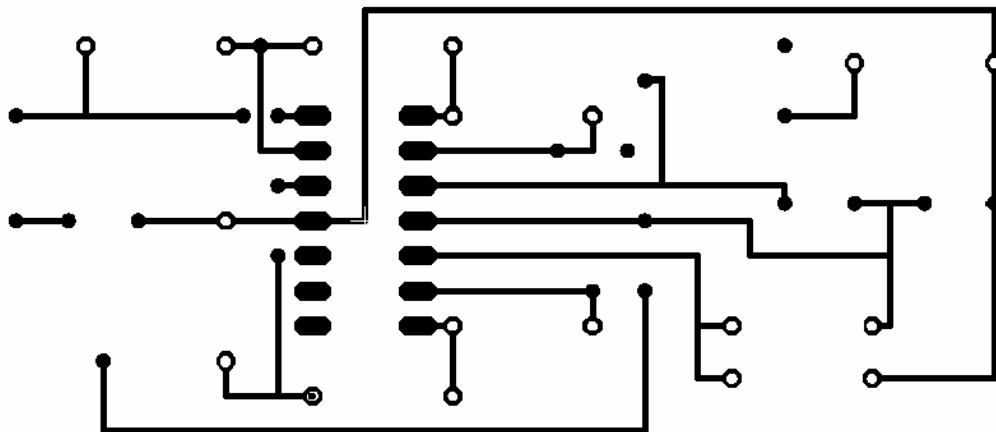


obr. 2.3.5 Elektronická část teploměru

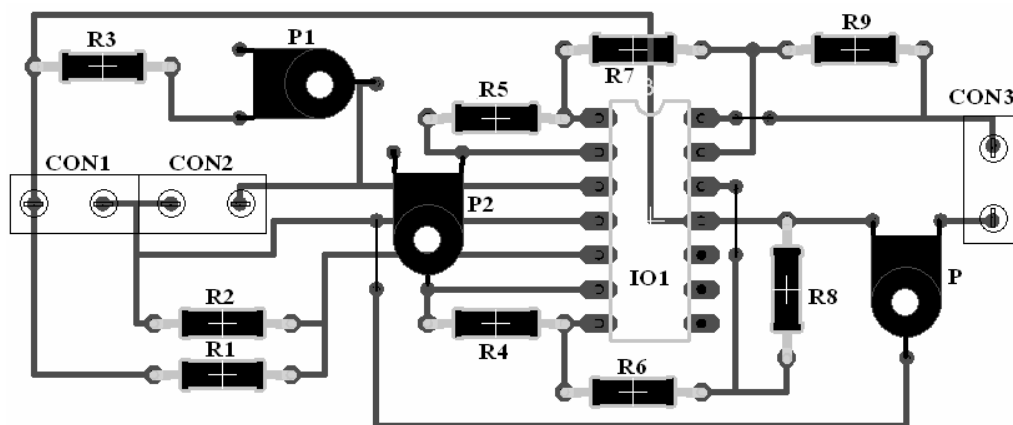
Teplotní čidlo je zde pro názornost umístěno na desce. Po zapouzdření desky bude umístěno na měřené místo.

#### 2.4 Teplotní snímač (chladná komora)

Celkové zapojení s teplotním snímačem chladné komory je téměř shodný se zapojením pro horkou komoru. Liší se pouze v použitém teplotním snímači a v hodnotách některých součástek. Teplota v chladné komoře se pohybuje řádově v desítkách °C. Snímačů s takovýmto teplotním rozsahem je na výběr mnoho, takže jsem vybíral spíše podle pouzdra. Zvolil jsem snímač s označením KTY 81-220. Teplotní rozsah tohoto snímače je -55°C až 150°C, což je pro měření chladné části motoru naprosto dostačující. Opět zde byl použit Wienův můstek a napětí z něj bylo opět zesíleno přístrojovým zesilovačem. Zapojení již bylo vyzkoušeno z předchozího teploměru, takže žádné problémy nenastaly.



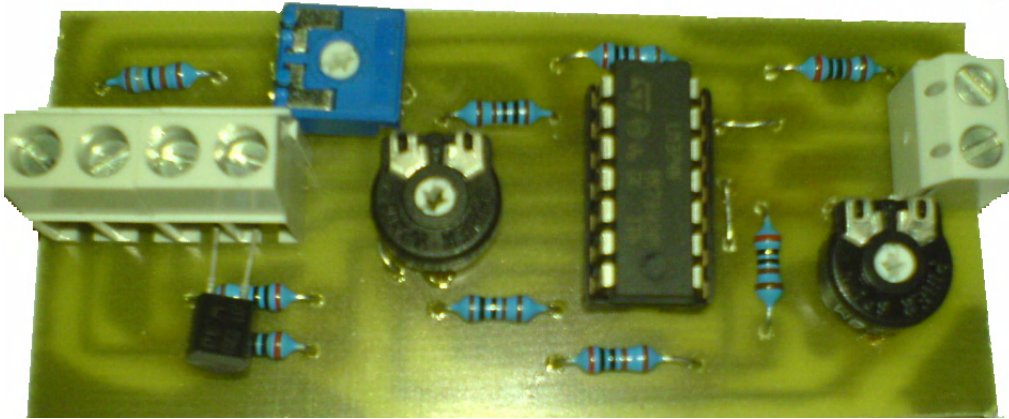
obr. 2.4.1 Deska plošných spojů teploměru



obr. 2.4.2 Osazení desky teploměru

Seznam součástek:

R1	2K0	P1	500Ω
R2	2K0	P2	2K5
R3	1K8	P3	2K5
R4	2K0	IO	LM324N
R5	2K0	Sn	KTY 81-220
R6	2K0	Con1	ARK500/2SV
R7	2K0	Con2	ARK500/2SV
R8	2K0	Con3	ARK500/2SV
R9	2K0		



obr. 2.4.3 elektronická část teploměru

### Kalibrace

Když jsem teploměry dokončil a vyzkoušel jak fungují, musel jsem je zkalibrovat, aby jejich výstupy byly kompatibilní se vstupy iSESu.



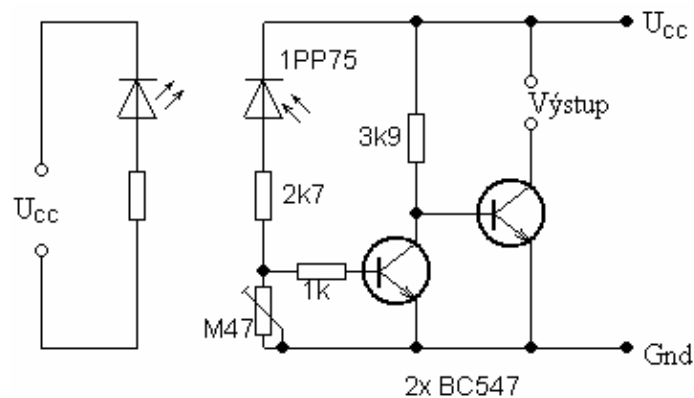
obr. 2.4.4 Kalibrace teploměru

Postup kalibrace obou teploměrů je prakticky totožný a proto je zahrnu do jedné podkapitoly.

Nejprve jsem kalibroval teploměr pro měření teploty chladné komory. Tento teploměr vystačí s teplotním rozsahem  $0^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$ .  $0^{\circ}\text{C}$  pak odpovídá 0V a  $100^{\circ}\text{C}$  odpovídá 5V. Do skleničky jsem vhodil několik kostek ledu a počkal až začnou tát. Do této vody jsem umístil čidlo teploměru. Teplotu této roztáté vody jsem považoval za  $0^{\circ}\text{C}$  a při této teplotě jsem trimrem vyvážil měřící můstek tak, že na výstupu bylo napětí 0V. Poté jsem nechal v hrnci vařit vodu, do vody ponořil čidlo teploměru a při této teplotě jsem trimrem, kterým se nastavuje zesílení přístrojového zesilovače, nastavil na výstupu 5V. Postup jsem opakoval i u teploměru pro měření teploty horké komory motoru. Ten má ovšem rozsah  $0^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ , takže citlivost bude jiná. Teplotu  $300^{\circ}\text{C}$  jsem ovšem nedokázal nijak nasimulovat, takže jsem výpočtem určil, jaké napětí by mělo odpovídat  $100^{\circ}\text{C}$ . Při varu vody jsem nastavil na výstup napětí 1,66V, což je třetina 5V. Za předpokladu, že napětí bude vzrůstat i nadále lineárně v závislosti na teplotě, pak by 5V odpovídalo  $300^{\circ}\text{C}$ . V katalogu je udáváno, že závislost odporu čidla na teplotě je lineární. Proto by i napětí mělo skutečně vzrůstat i dále lineárně.

## **2.5 Snímač otáček**

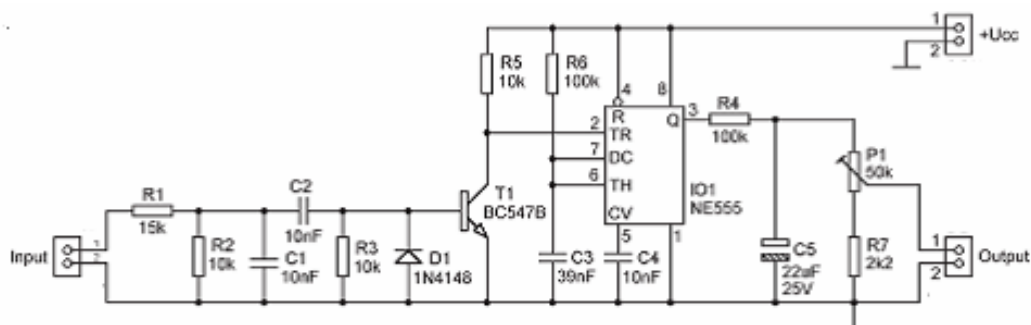
V úvodu jsem už zmínil, že otáčky jsou u Stirlingova motoru měřeny z osy setrvačnicku. Zde jsou pomocí přerušování laserového paprsku převedeny na frekvenci a pomocí převodníku  $f/U$  pak z frekvence na napětí. Toto napětí je pak přivedeno pomocí iSESu do PC. Jako optická závora mi zde posloužil jednoduchý obvod s laserovou diodou a fototranzistorem. Přerušováním paprsku je spínán tranzistor, který na výstup přivádí napájecí napětí s frekvencí, která odpovídá rychlosti přerušování.



obr. 2.5.1 Schéma optické závory

V tomto obvodu byla původně použita IR LED, ale mohlo by docházet k ovlivňování slunečními paprsky. Spektrum světla obsahuje IR záření, na které je IR tranzistor citlivý. Proto musel být tento obvod dobře odstíněn od parazitního osvětlení.

Výstup z obvodu optické závory je přiveden do převodníku  $f/U$ .

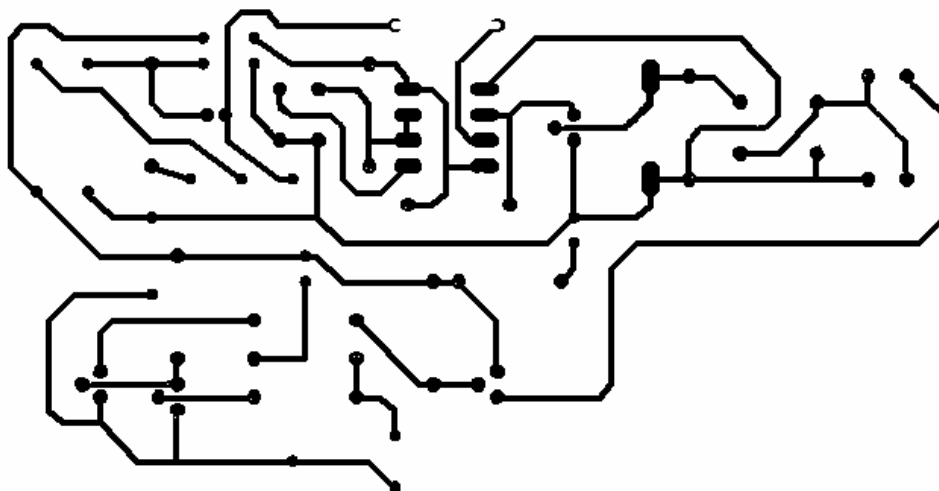


obr. 2.5.2 Převodník  $f/U$  s NE555N

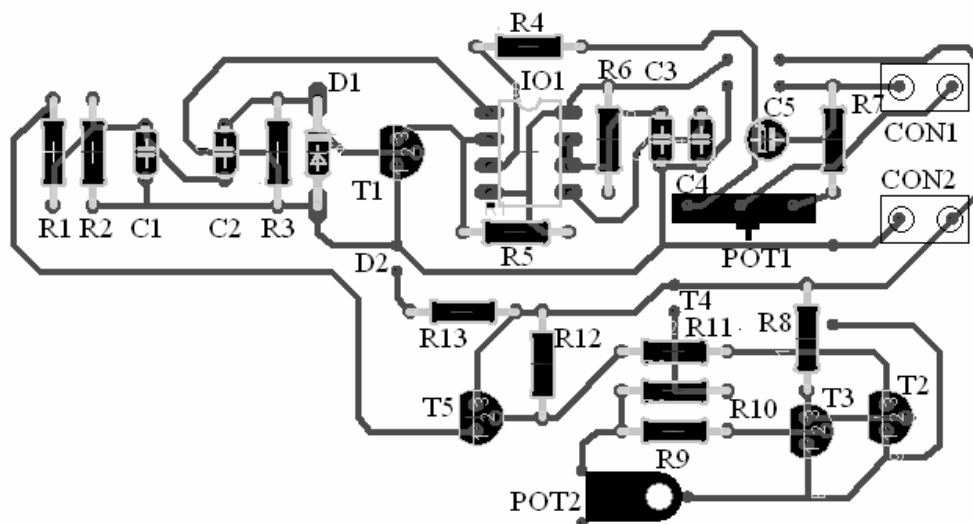
Jako převodník  $f/U$ , který dále signál zpracovává, jsem zvolil jednoduchý integrátor s obvodem NE555N. Schéma zapojení jsem našel v časopise Amáro. Zde byl prezentován jako digitální otáčkoměr do

automobilu se čtyřmístným displejem. Displej jsem zde vynechal a výstupní napětí jsem měřil na integračním RC článku. Také zde jsem umístil oba obvody na jednu desku plošných spojů a vzájemně propojil.

Na řadu ještě přišla malá úprava na výstupu z optické závory. Závora, tak jak je zobrazena na schématu, ve skutečnosti nespíná napájecí napětí, ale zem. Napájecí napětí je na vstup převodníku  $f/U$  přivedeno trvale. To se mi však nehodilo. Proto jsem na výstup umístil ještě jeden tranzistor PNP, který je ovládán spínanou zemí a připojuje na výstup kladné napájecí napětí.



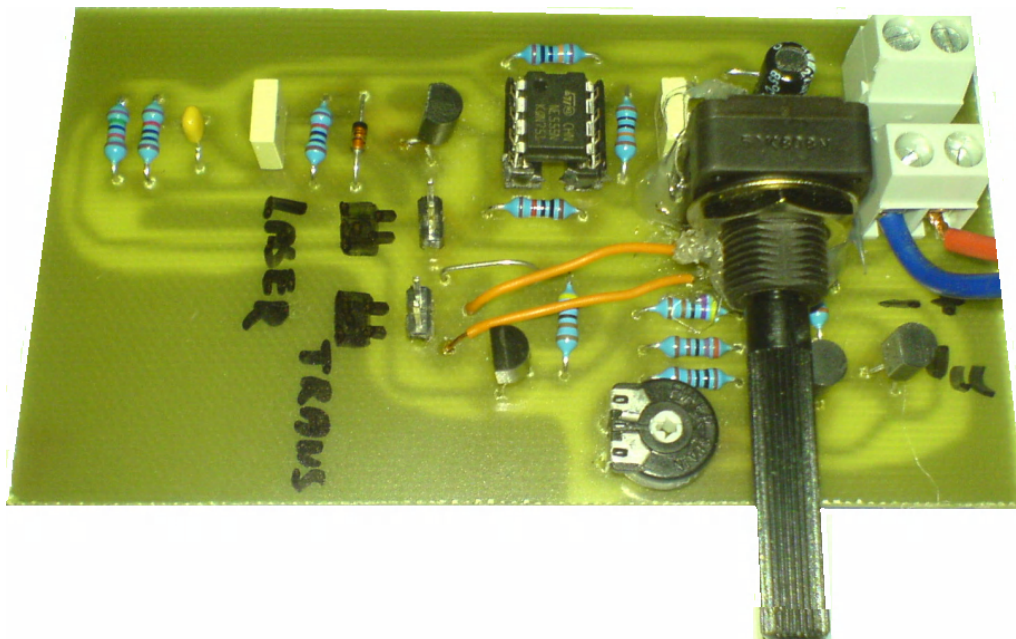
obr. 2.5.3 Deska plošných spojů otáčkoměru



obr. 2.5.4 Osazení desky otáčkoměru

Seznam součástek:

R1	15K	C3	33nF fol.
R2	10K	C4	10nF ker.
R3	10K	C5	22 $\mu$ F
R4	100K	D1	1N4148
R5	10K	D2	laser
R6	100K	POT1	50K
R7	2K2	POT2	500K
R8	3K9	IO1	NE555
R9	1K0	CON1	ARK500/2SV
R10	2K7	CON2	ARK500/2SV
R11	4K7	T1	BC547C
R12	4K7	T2	BC547C
R13	270 $\Omega$	T3	BC547C
C1	10nF ker.	T4	BPX81
C2	10nF fol.	T5	BC557C



obr. 2.5.5 Elektronický otáčkoměr

Potenciometrem POT2 lze nastavovat citlivost fototranzistoru na světlo. Po vyzkoušení IR LED diody jsem zjistil, že by bylo výhodnější použít místo ní laserovou diodu. Citlivost fototranzistoru jsem nastavil na minimum, aby nereagoval na denní světlo a místo LED jsem použil laser, který jsem získal s laserového ukazovátka. Světlo paprsku bylo dostatečně intenzivní, aby ho fototranzistor zaznamenal.

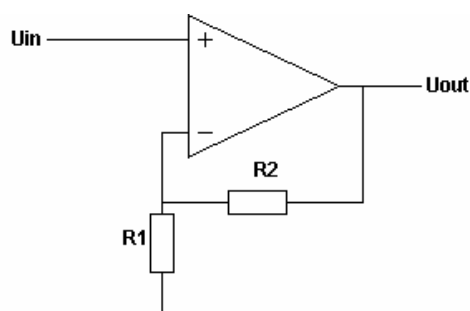
Fototranzistor a laserová dioda jsou zobrazeny na obrázku.



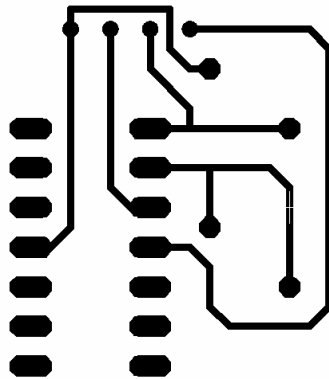


obr. 2.5.6 Složení snímače pro otáčkoměr

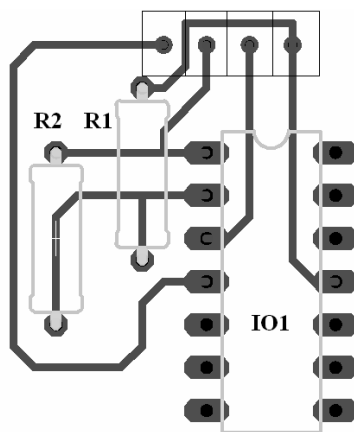
Po zkušebním oživení jsem zjistil, že výstupní napětí nedosahuje hodnoty 5V ani při vysokých frekvencích. Toto napětí jsem opět zesílil. Tentokrát k zesílení stačil neinvertující zesilovač s OZ. Na desce plošných spojů převodníku se závorou zbylo ještě místo, tak jsem tento zesilovač umístil na tutéž desku. Leptání zde už nepřipadalo v úvahu, proto jsem desku vyškrábal .



obr. 2.5.7 Neinvertující zesilovač



obr. 2.5.8 Deska plošných spojů zesilovače



obr. 2.5.9 Osazení desky zesilovače

Seznam součástek:

R1	1K0
R2	5K1
IO1	LM324N

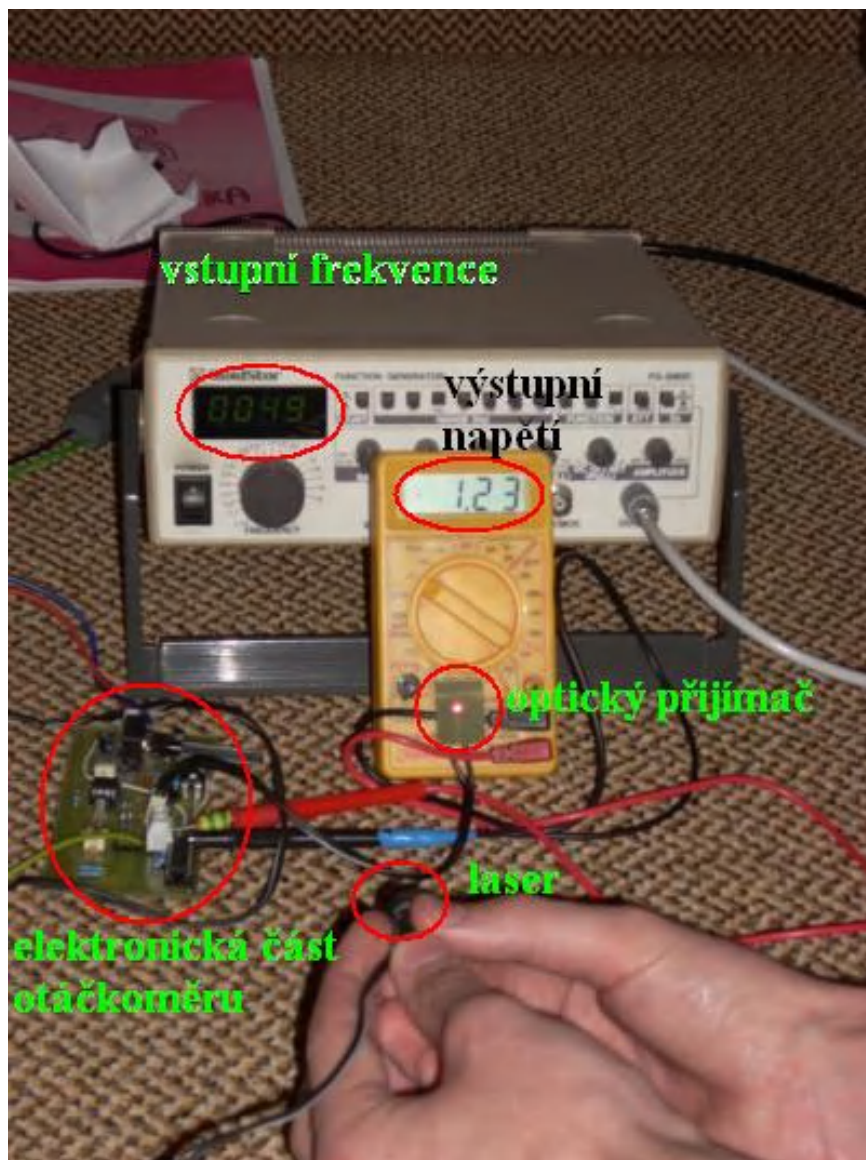


obr. 2.5.10 Konečná podoba elektronické části otáčkoměru se zesilovačem

Samotný otáčkoměr je napájen 5V, ale zesilovač je napájen 9V, protože 5V nestačilo aby maximální výstupní napětí dosahovalo plných 5V, které jsem potřeboval pro iSES.

### **Kalibrace**

Po osazení, oživení a vyzkoušení jsem potřeboval otáčkoměr zkalibrovat. Z tohoto kroku jsem použil generátor obdélníkového impulsu GolgStar FG2002C, který jsem si vypůjčil ve škole. Na výstup generátoru jsem připojil laserovou diodu, namířil na optický přijímač otáčkoměru a měřil výstupní napětí v závislosti na frekvenci blikání laseru. Počítal jsem s tím, že Stirlingův motor bude mít maximálně 1000 ot/min. Pokud má slídové kolečko, které bude přerušovat paprsek, 12 černých políček, pak 1000 ot/min odpovídá 200 Hz. Nastavil jsem tedy na generátoru frekvenci 200 Hz a ladícím potenciometrem jsem na otáčkoměru nastavil hodnotu výstupního napětí 5V.



obr. 2.5.11 Sestava při kalibraci

Pro vyzkoušení linearity převodu jsem otestoval otáčkoměr pro více frekvencí. Pro 50 Hz, 100Hz , 150 Hz, 200 Hz. Na fotce je zobrazena zkouška pro 50 Hz. Generátor nedržel příliš přesně jednu frekvenci, takže musím počítat s chybou, která tímto mohla vzniknout. Převod frekvence na napětí se zdál být lineární.

## 2.6 Návrhy úloh

Pro představu, jak měření na Stirlingově motor vypadá jsem zde uvedl dvě úlohy.

### Úloha 1

#### Zadání:

Studium činnosti Stirlingova motoru jako chladícího stroje.

#### Pomůcky:

Model Stirlingova motoru

Stejnoseměrný elektromotor

Elektronický otáčkoměr

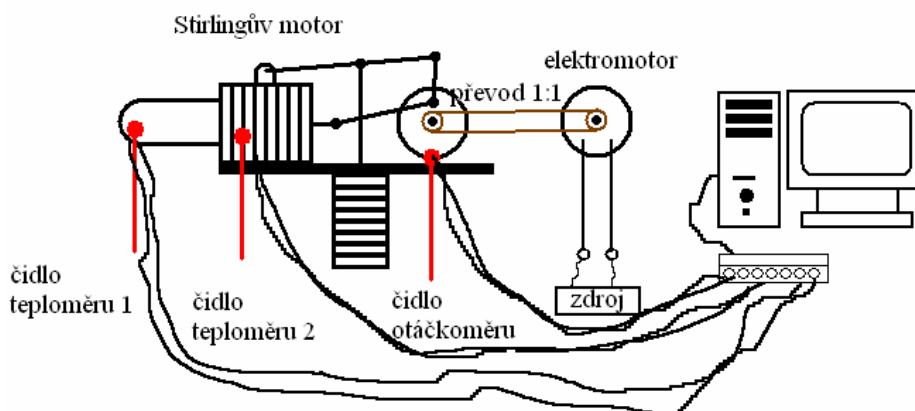
Elektronický teploměr 2x

PC s nainstalovaným iSESem + příslušenství

#### Postup měření:

Nejprve je potřeba propojit Stirlingův motor a elektromotor řemenovým převodem 1:1 . Teplotní čidlo pro měření teploty chladné komory motoru umístíme na žebrování chladiče motoru a teplotní čidlo pro měření teploty horké komory motoru umístíme na skleněný pracovní válec Stirlingova motoru. Otáčkoměr umístíme k ose setrvačnicku. Po rozmístění snímačů je připojíme k panelu s konektory iSESu. Nastavíme potřebné údaje v softwaru iSESWIN a přivedeme napětí na elektromotor. Regulací napětí na elektromotoru měníme jeho otáčky a sledujeme, jak se mění teploty v závislosti na otáčkách.

## Schéma:



obr. 2.6.1 Schéma zapojení úlohy 1

## Úloha 2

### Zadání:

Studium činnosti Stirlingova motoru – měření otáček bez zatížení

### Pomůcky:

Model Stirlingova motoru

Elektronický otáčkoměr

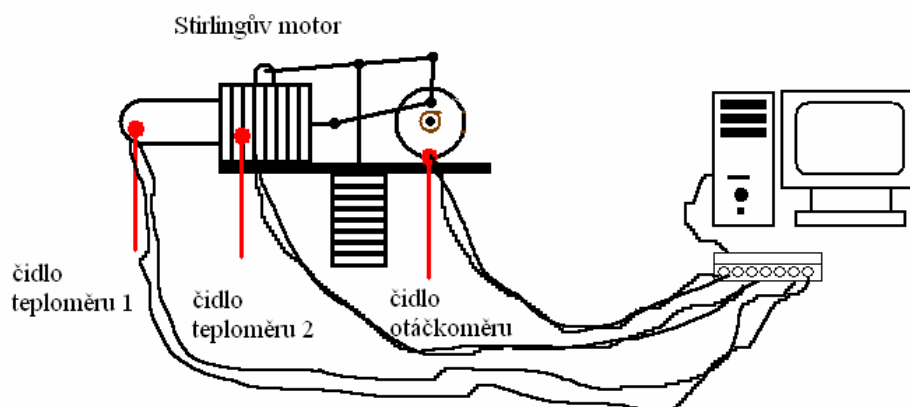
Elektronický teploměr 2x

PC s nainstalovaným iSESem + příslušenství

### Postup měření:

Umístíme teplotní čidlo pro měření teploty chladné komory na žebrovaní chladiče a čidlo pro měření teploty horké komory na přemísťovací válec. Čidlo otáčkoměru umístíme k ose setrvačníku. Čidla připojíme k panelu s konektory iSESu. V softwaru nastavíme potřebné parametry a spustíme měření. Stirlingův motor začneme zahřívát lihovým kahanem nebo topnou spirálou a sledujeme jak se mění otáčky motoru v závislosti na teplotě. Z naměřených teplot určíme tepelnou účinnost.

### Schéma:



obr. 2.6.2 Schéma zapojení úlohy 2

## Závěr

Hlavním úkolem mé práce bylo vyrobit snímače, pomocí kterých by se dala studovat funkce Stirlingova motoru a provádět na něm měření. Tato práce je z větší části zaměřena na praktickou část. Ale pro pochopení základních principů jsem s použitím uvedené literatury napsal teoretickou část, kde jsem se pokusil přiblížit základní principy funkce motoru.

V teoretické části jsem se nejprve zabýval pojmem energie a jejími přeměnami. Pak jsem se zaměřil na termodynamické zákony, které popisují přeměny tepelné a mechanické energie a jejich podmínky. Dále jsem ve své práci zmínil princip Carnotova cyklu, na kterém je založena funkce téměř všech tepelných motorů. Výjimku tvoří právě Stirlingův motor, kterým se převážně ve své bakalářské práci zabývám. Teorii kolem Stirlingova motoru jsem ve své práci věnoval hodně pozornosti. Zmínil jsem historii motoru a dále jsem zde uvedl vývoj, princip a možná využití motoru.

Při úvaze nad využitím mě napadla myšlenka využití Stirlingova motoru například jako doplňkový zdroj elektřiny v jaderných elektrárnách, které produkují obrovské množství odpadního tepla, které není nijak dále zpracováno. Ovšem předpokládám, že realizace takového zařízení by byla příliš nákladná.

V praktické části jsem se zabýval modernizací původního měřícího zařízení, které mělo být tentokrát připojitelné k počítači. Využil jsem programu iSES, který má fakulta k dispozici, a začal s návrhem snímačů. Snímače byly celkem tři a ani jeden mi hned napoprvé nefungoval bezchybně. Výroba samotných snímačů nebyla příliš časově náročná, ale finální lazení a dodělávky zabraly času mnohem víc. Nakonec se ale vše podařilo oživit a po kalibraci je vše připravené k měření.

Dále jsem do praktické části zahrnul dvě základní měřící úlohy pro



Stirlingův motor. První úloha je měření závislosti otáček nezátíženého motoru na teplotě a v druhé úloze se měří na Stirlingově motoru jako na chladícím stroji. V této úloze je elektromotorem poháněn Stirlingův motor a sleduje se teplota chladné části motoru v závislosti na otáčkách.

Práce na této bakalářské práci byla velmi zajímavá a při výrobě snímačů jsem se něco přiučil o operačních zesilovačích, vyzkoušel jsem si jejich funkci v praxi a vyzkoušel jsem si i funkci fotosoučástek, se kterými jsem doposud nepracoval. Pokud se mi podaří i nadále studovat na Jihočeské univerzitě, rád bych se tomuto tématu věnoval i v dalších pracích.

## Použitá literatura

- [1] [www.techtydenik.cz](http://www.techtydenik.cz)
- [2] [www.engine.stirling.cz](http://www.engine.stirling.cz)
- [3] [www.gorvin.mysteria.cz/stirling](http://www.gorvin.mysteria.cz/stirling)
- [4] [www.mve.energetika.cz](http://www.mve.energetika.cz)
- [5] [www.stirling-technik.de](http://www.stirling-technik.de)
- [6] [www.vok.lth.se](http://www.vok.lth.se)
- [7] [www.physics.fme.vutbr.cz](http://www.physics.fme.vutbr.cz) 10\_termodynamika.ppt
- [8] [www.mfweb.wz.cz](http://www.mfweb.wz.cz)
- [9] [www.jan.gfxs.cz/studium](http://www.jan.gfxs.cz/studium)
- [10] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [11] Košíček, F.: Mechanická práce a teplo, PF JCU, České Budějovice 2005
- [12] Příručka k soustavě iSES
- [13] Kameš, J.: Alternativní pohony automobilů, BEN, Praha 2004
- [14] Míka, J. Tomčala, J. Janeta, P.: Vlastnosti Stirlingova. Teplo, technika  
teplárenství 2001
- [15] Gruber, J.: Základní zákony termodynamiky, elektronický učební  
materiál 1999
- [16] [www.ises.info](http://www.ises.info)

## **Přílohy**