Jihočeská univerzita V Českých Budějovicích

Fakulta pedagogická

Katedra fyziky

MECHANICKÁ PRÁCE A TEPLO

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:
RNDr. František Špulák

Autor:
František Košíček

České Budějovice
2005

Knihovna JU - PF



Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá ekvivalencí mechanické práce a tepla a jejich vzájemnou transformací. Výklad je doplněn souborem vhodných úkolů, otázek a problémů z praxe. V praktické části se jedná o návrh a realizaci provedení modelu Stirlingova motoru.

Poděkování:

Děkuji tímto všem, kteří mi jakýmkoliv způsobem pomohli při realizaci této práce. Především chci poděkovat celému týmu pedagogů z Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích za vynikající odbornou přípravu. Zejména však panu RNDr. Františku Špulákovi, který mi, jako vedoucí této bakalářské práce, byl nápomocen svou zkušeností, kritickými připomínkami, ale i přátelskou radou.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím dokumentace a literatury uvedené v seznamu použité literatury.

V Českých Budějovicích
dne 30.10.2005

.....
František Košíček

Obsah

Úvod 8

1. Teoretická část 10

1.1 Mechanická práce a teplo 10

1.1.1 Energie 10

1.1.2 Teplo a mechanická práce 11

1.1.2.1 Zvláštní případy prvního zákona termodynamiky 12

1.1.2.1.1 Adiabatický děj 12

1.1.2.1.2 Izochorický děj 13

1.1.2.1.3 Izotermický děj 14

1.1.2.1.4 Izobarický děj 14

1.1.2.1.5 Kruhový (cyklický) děj 15

1.1.3 Druhý zákon termodynamiky 16

1.1.3.1 Vratné a nevratné děje 16

1.1.4 Carnotův cyklus 17

1.2 Tepelné stroje 22

1.2.1 Chladnička a tepelné čerpadlo 22

1.2.2 Tepelné motory 25

1.2.2.1 Tepelná bilance spalovacího motoru 26

1.2.2.2 Druhy spalovacích motorů 28

1.2.2.3 Tvorba a průběh spalování směsi 30

1.2.2.4 Motory s vnitřním spalováním 31

1.2.2.4.1 Zážehový motor 32

1.2.2.4.1.1 Čtyřdobý zážehový motor 33

1.2.2.4.1.2 Dvoudobý zážehový motor 35
1.2.2.4.2 Vznětový motor 36
1.2.2.4.3 Wankelův motor 39
1.2.2.4.4 Spalovací turbína 42
1.2.2.4.5 Raketový motor 43
1.2.2.5 Motory s vnějším spalováním 43
1.2.2.5.1 Parní stroj 43
1.2.2.5.2 Stirlingův motor 48
2. Praktická část 57
2.1 Úvod 57
2.2 Sestrojení Stirlingova motoru 57
2.3 Měření č.1 59
2.4 Měření č.2 62
2.5 Měření č.3 65
2.6 Měření č.4 69
Závěr 70
Seznam použité literatury 73
Seznam fotografií (s komentářem) 75
Fotogalerie
Seznam příloh (s komentářem) 77
Přílohy

Úvod

„...je na budoucích nadšených a ambiciózních technicích, aby za příznivějších podmínek s úspěchem zopakovali již vykonané...“

Robert Stirling (1876)

S touto myšlenkou se zcela ztotožňuji a v jejím duchu bych chtěl poukázat na geniální a v současnosti ještě nedoceněný vynález Stirlingova horkovzdušného motoru. Abych tento technický unikát řádně představil, budu se v této bakalářské práci nejprve zabývat ekvivalencí mechanické práce a tepla a následně zařízeními převádějícími teplo na mechanickou práci a naopak. Jejich funkcí, vlastnostmi, praktickým využitím nejen v průmyslu, ale i v každodenním životě, jejich výhodami a nevýhodami.

Praktický objev přeměny mechanické práce v teplo je tak prastarý, že můžeme od něho datovat začátek lidských dějin. Ať mu předcházeli jakékoliv vynálezy nástrojů a ochočování zvířat, byl to oheň vznikající třením, kterým lidé poprvé zapřáhli do svých služeb neživou přírodní sílu. A jak se téměř nezměřitelný dosah tohoto gigantického pokroku vtiskl do lidského myšlení, ukazují ještě dnešní lidové pověry. Vynález kamenného nože, prvního nástroje, byl oslavován ještě dlouho po zavedení bronzu a železa, neboť všechny náboženské oběti byly prováděny kamennými noži. To vše je již dávno zapomenuto. Jinak je tomu s ohněm, vznikajícím třením ještě dlouho poté, co lidé poznali jiné způsoby rozdělávání ohně, musel být každý posvátný oheň u většiny národů rozděláván třením. Avšak ještě dnes se udržuje ve většině evropských zemí lidová pověra, že se čarodějný oheň smí zapálit jen třením. Takto ještě v dnešní době žije, polonevědomky, v lidových pověrách a zbytcích pohanských mytologických vzpomínek nejvzdělanějších národů světa, vděčná vzpomínka na první veliké vítězství člověka nad přírodou.

Tento proces byl zatím jednostranný. Mechanická práce se přeměňuje v teplo. Abychom proces zdokonalili, musíme jej převrátit a proměnit teplo v mechanickou práci. Teprve pak bude učiněno zadost dialektice procesu. Na tisíciletí musíme měřit dobu, která uběhla od objevu ohně vznikajícího třením, než Heron Alexandrijský (okolo 120 př. n.l.) vynalezl a sestrojil stroj, který se uváděl do otáčivého pohybu unikající vodní parou. Uběhlo dalších skoro 2000 let než byl sestrojen první parní stroj, první zařízení na přeměnu tepla v mechanickou práci.

Parní stroj byl první opravdu mezinárodní vynález, tato skutečnost je mezníkem nového mohutného dějinného pokroku. Francouz Denis Papin (1647-1712) vynalezl tlakový (Papinův) hrnec, atmosférický parní stroj a to v Německu. Němec Gottfried Wilhelm

Leibnic (1646-1716) rozsívaje kolem sebe geniální myšlenky bez ohledu na to, zda budou přičteny zásluhy jemu nebo jiným, vyslovil hlavní ideu: použití pístu a válce. Angličané Thomas Savery a Thomas Newcomen vynalezli brzy na to podobné stroje a jejich krajan James Watt je dovedl zavedením odděleného kondenzátoru v podstatě na dnešní úroveň. Cyklus objevů byl na tomto poli zakončen, přeměna tepla v mechanickou práci byla provedena. Vše, co přišlo pak, byla již jen detailní zlepšení [1].

Praxe tedy rozřešila svým způsobem otázku vztahu mezi mechanickou prací a teplem. Nejprve přeměna mechanické práce v teplo a poté naopak přeměna tepla v mechanickou práci a s tím spojené množství technických vynálezů.

A jak je to s teorií?

1. Teoretická část

1.1 Mechanická práce a teplo

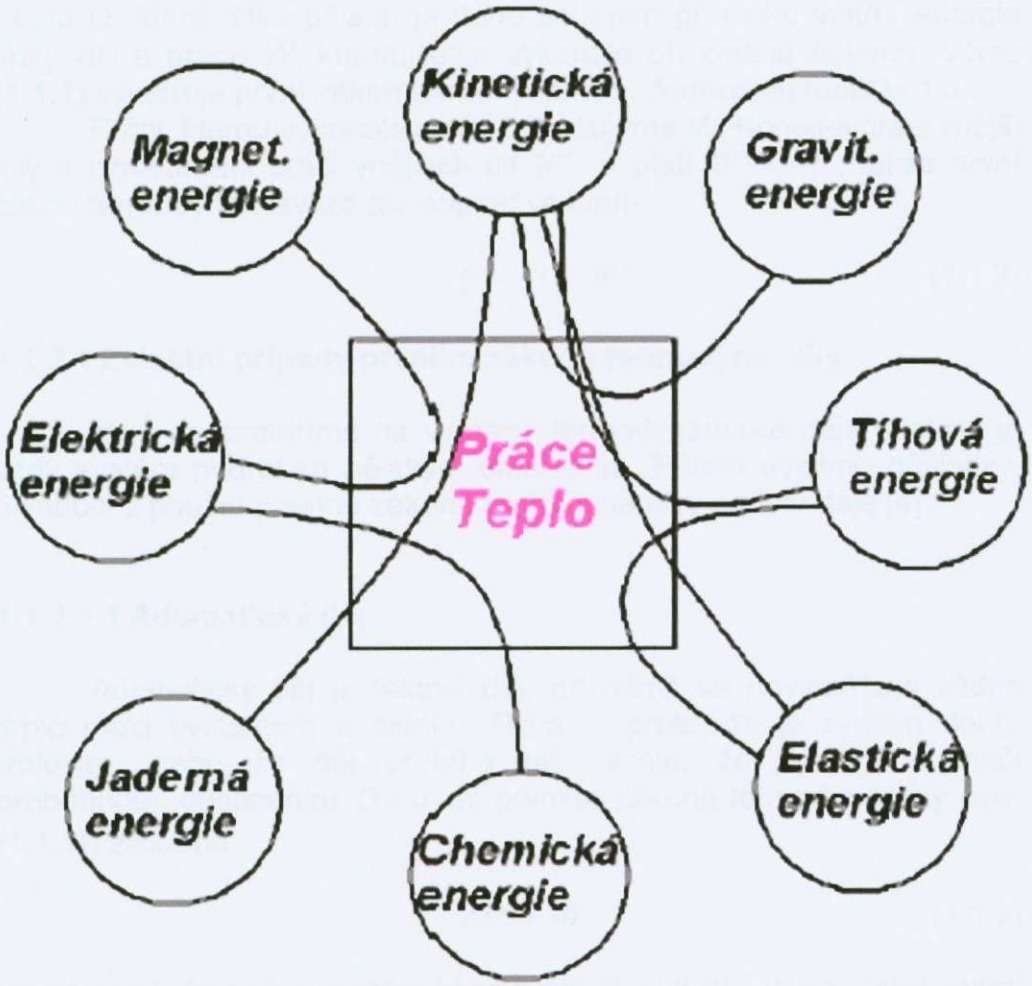
Mechanická práce a teplo jsou fyzikální veličiny, které se měří ve stejných jednotkách jako energie. Touto jednotkou je 1J (1 Joule).

1.1.1 Energie

Energie je schopnost hmoty konat práci (působit silou po dráze), značí se *E* (angl. Energy) [2]. Těleso nebo pole, které nemá energii, nemůže konat práci. Konáním práce se energie mění z jednoho druhu na jiný, celkové množství energie zůstává stejné [3]. Přeměny energií jsou vázány zákonem o zachování energie. Za autory tohoto zákona jsou považováni: německý lékař Robert Julius von Mayer (1814-1878), anglický pivovarník a fyzik James Prescott Joule (1818-1889) a německý lékař a fyzik Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894). Robert Mayer dal základ pro formulaci zákona o zachování energie z filozoficko-empirických úvah a pozorování: v tropech si povšiml, že neexistuje znatelní rozdíl mezi barvou tepenné a žilné krve, z toho usoudil, že lidský organismus zde nemusí vynakládat energii na udržování tělesné teploty a proces okysličování krve je méně intenzivní. James Joule zkoumal přeměny energie mechanické, elektrické a tepelné pomocí kalorimetru. Matematickou podobu dostal zákon o zachování energie v roce 1847 v Helmholtzově díle „O zachování síly". Zákon o zachování energie však není jediným zákonem, kterým se řídí přeměny energie. Chceme li využít tepelnou energii ke konání práce, nemůžeme to nikdy provést beze zbytku. Proto je ve fyzice zaveden pojem účinnost přeměny, účinnost stroje nebo zařízení jako poměr mezi získaným výkonem a energií dodanou za jednotku času (příkonem) a je vyjádřena v procentech. Účinnost stroje musí být vždy menší než 100%.

Zákony, kterými se řídí přeměny energie se zabývá část fyziky zvaná termodynamika. Její počátky sahají do roku 1824, kdy mladý francouzský inženýr Nikolas Léonard Sadi Carnot publikoval práci „Úvahy o pohybové síle ohně". Za zakladatele termodynamiky je však považován německý fyzik Rudolf Clausius, který zavedl pojmy kruhový a vratný děj a entropii a roku 1850 zformuloval první zákon termodynamiky, tedy zákon o zachování energie, a druhý zákon termodynamiky, tedy, že při tepelné výměně těleso o vyšší teplotě nemůže samovolně přijímat teplo o nižší teplotě. Tento zákon též bývá formulován tak, že není možné sestrojit periodicky pracující stroj, který by jen přijímal teplo a vykonával stejně velkou práci. Teoreticky bychom

mohli dosáhnout stoprocentní účinnosti přeměny tepelné energie, pokud bychom udržovali chladič na teplotě tzv. absolutní nuly (-273,15°C). Dalšími význačnými tvůrci termodynamiky byli William Thomson (lord Kelvin), který zavedl pojem absolutní nuly. Nernst, autor třetího zákona termodynamiky , který pravý, že absolutní nuly nelze nikdy dosáhnout. Planck, jako autor jeho konečné verze. Na základě termodynamických úvah jsou konstruovány turbíny, spalovací motory, raketové motory apod.



Obr. 1 Transformace různých druhů energií

1.1.2 Teplo a mechanická práce

Při styku dvou těles s odlišnými hodnotami střední kinetické energie molekul dochází při vzájemných srážkách molekul obou těles na rozhraní k předávání části vnitřní kinetické energie z tělesa s vyšší střední kinetickou energií molekul na těleso s nižší střední kinetickou

energií molekul. Tato přenesená část vnitřní kinetické energie představuj termodynamickou veličinu: teplo *Q*. Teplo *Q* dodané (nebo odebrané) určitému množství látky se může spotřebovat na změnu vnitřní energie ΔU a na práci *W*, vykonanou tlakovou sílou látky při změnách objemu.

Podle zákona zachování energie platí:

$$Q = \Delta U + W \tag{1.1.1}$$

Teplo Q, které látka přijala, je dáno součtem přírůstku vnitřní energie látky ΔU a práce *W*, kterou látka vykonala při změně objemu. Výraz (1.1.1) vyjadřuje první zákon termodynamiky. Jednotkou tepla je 1 J.

Práci, kterou vykonala látka, označujeme *W*. Konají-li práci vnější síly a označíme-li práci vnějších sil W', a platí $W' = -W$, takže první zákon termodynamiky lze též napsat ve tvaru

$$Q = \Delta U - W' \tag{1.1.2}$$

1.1.2.1 Zvláštní případy prvního zákona termodynamiky

Nyní se zaměříme na vybrané termodynamické děje, v nichž je vždy systém podroben nějakým omezením. Přitom uvidíme důsledky, plynoucí z použití prvního zákona termodynamiky na tyto děje [4].

1.1.2.1.1 Adiabatický děj

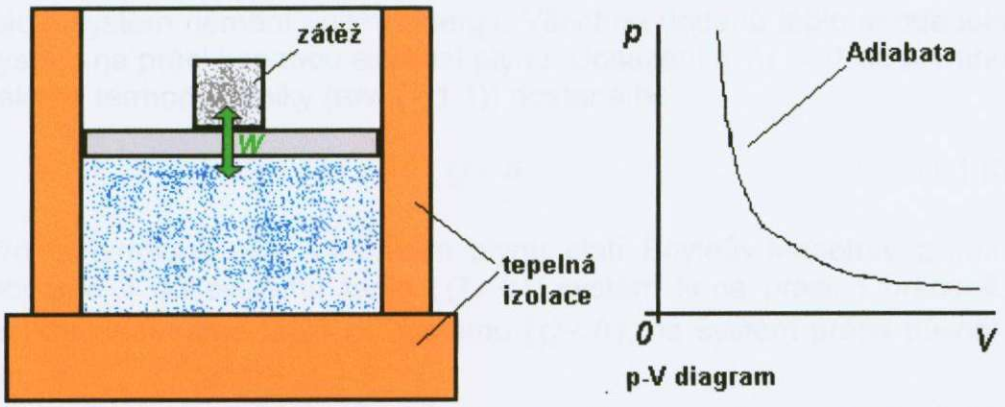
Adiabatický děj je takový děj, při němž se nevyměňuje žádné teplo mezi systémem a okolím. Bývá to proto, že je systém dobře izolován, nebo že děj probíhá tak rychle, že výměna nestačí proběhnout. dosazením $Q = 0$ do prvního zákona termodynamiky (rov. (1.1.1)) získáme

$$\Delta U = -W \tag{1.1.3}$$

to znamená, že pokud systém koná práci (tj. je-li $W > 0$) pak jeho vnitřní energie poklesne o množství vykonané práce.

Obr. 2 ukazuje idealizovaný adiabatický děj. Teplo nemůže ani ze systému, ani do něj díky tepelné izolaci. Jediný způsob přenosu energie mezi systémem a okolím je tedy pomocí práce. Zmenšíme-li zátěž pístu a necháme-li plyn roztáhnout, je práce konaná systémem (plynem) kladná a vnitřní energie plynu klesá. Jestliže naopak přidáme zátěže a stlačíme tím plyn, je práce vykonaná systémem záporná a

vnitřní energie plynu vzroste. Dále ukazuje grafické znázornění adiabatického děje v tzv. *p-V* diagramu.



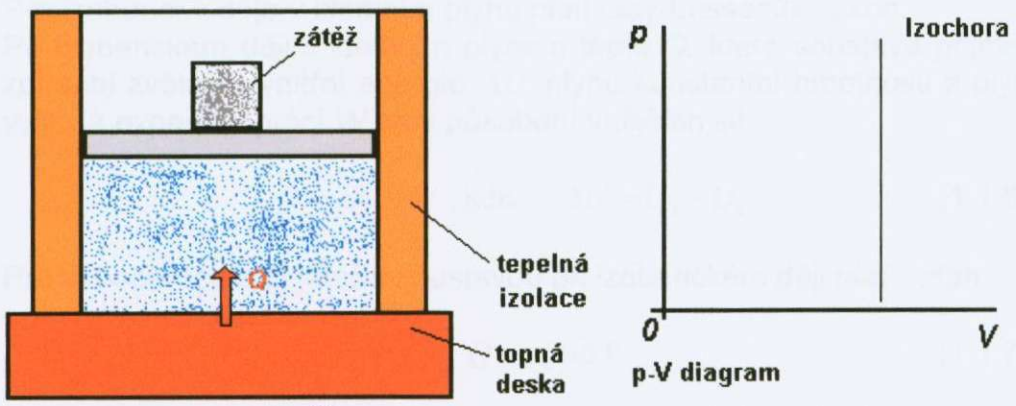
Obr. 2 Adiabatické rozepnutí provedeme pozvolným odebráním zátěže z pístu. Naopak přidáním zátěže můžeme proces kdykoli obrátit.

1.1.2.1.2 Izochorický děj

Při tomto ději se nemění objem systému (plynu), $V = konst$, takže systém nekoná práci. Dosazením $W = 0$ do prvního zákona termodynamiky (rov. (1.1.1)) dostaneme

$$\Delta U = Q \tag{1.1.4}$$

Pro izochorické děje v ideálním plynu platí Charlesův zákon.
Dodáme li do systému teplo ($Q > 0$), roste jeho vnitřní energie. Obráceně, jestliže odebíráme teplo ze systému ($Q < 0$), vnitřní energie systému klesá, obr. 3.



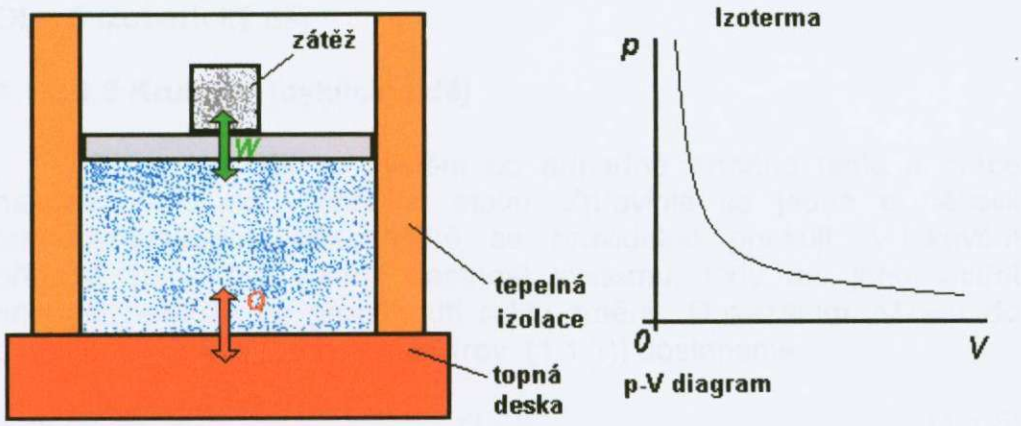
Obr. 3 Izochorický děj

1.1.2.1.3 Izotermický děj

Při tomto ději se nemění teplota systému (plynu), $T = konst$, takže systém nemění vnitřní energii. Všechno dodané teplo spotřebuje systém na práci konanou expanzí plynu. Dosazením $\Delta U = 0$ do prvního zákona termodynamiky (rov. (1.1.1)) dostaneme

$$Q = W \tag{1.1.5}$$

Pro izotermické děje v ideálním plynu platí Boyleův-Mariottův zákon. Dodáme li do systému teplo ($Q > 0$), systém koná práci. Obráceně, jestliže odebíráme teplo ze systému ($Q < 0$), na systém práce působí, obr. 4.



Obr. 4 Izotermický děj

1.1.2.1.4 Izobarický děj

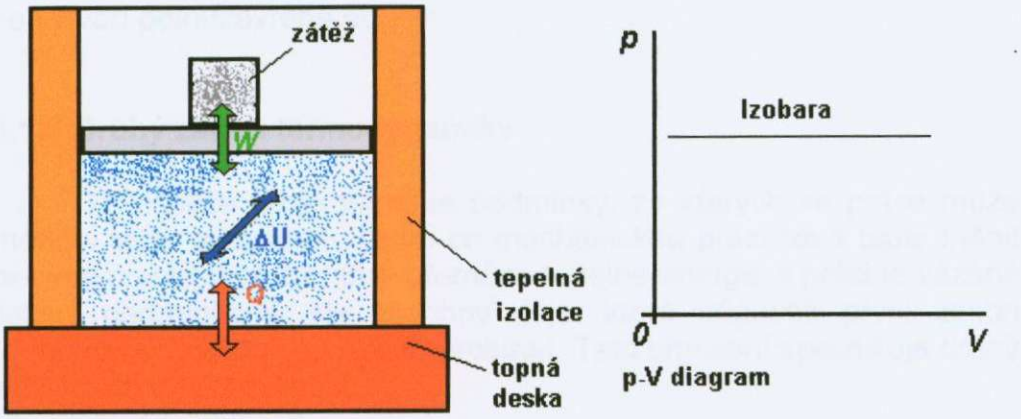
Při izobarickém ději se nemění tlak v systému (plynu),. $p = konst$.
Pro izobarické děje v ideálním plynu platí Gay-Lussacův zákon.
Při izobarickém ději s ideálním plynem teplo Q, které soustava přijme, způsobí zvětšení vnitřní energie ΔU plynu konstantní hmotnosti a plyn vykoná expanzní práci *W* proti působení vnějších sil

$$Q = \Delta U + W \text{ , kde } \quad \Delta U = U_2 - U_1 \tag{1.1.6}$$

Pro výpočet tepla přijatého soustavou při izobarickém ději platí vztah

$$Q = c_p m \Delta T \tag{1.1.7}$$

c_p je měrná tepelná kapacita plynu při konstantním tlaku, m je hmotnost plynu a ΔT je přírůstek termodynamické teploty soustavy, obr 5.



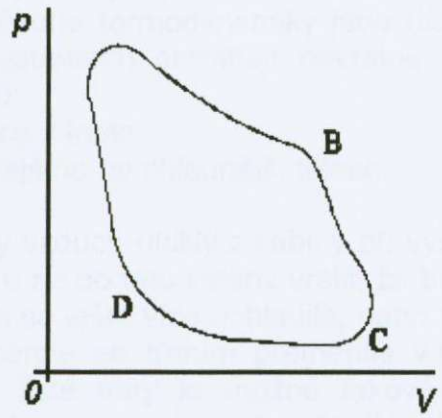
Obr. 5 Izobarický děj

1.1.2.1.5 Kruhový (cyklický) děj

Při tomto ději se systém po případné výměně tepla a práce nakonec vrátí do výchozího stavu. Zpravidla se jedná o několik termodynamických dějů, které se pravidelně opakují. V takovém případě se žádná vnitřní vlastnost systému, tedy ani jeho vnitřní energie, nemůže po proběhnutí cyklu změnit. Dosazením $\Delta U = 0$ do prvního zákona termodynamiky (rov. (1.1.1)) dostaneme

$$Q = W \tag{1.1.8}$$

celková práce vykonaná během děje je tedy přesně rovna celkovému dodanému teplu; vnitřní energie systému zůstává nezměněna. Kruhový děj se na *p-V* diagramu zobrazí uzavřenou smyčkou, viz. obr. 6. Kruhové děje jsou základem tepelných motorů.



Obr. 6 Kruhový děj - *p-V* diagram

Oběh, v něm se pracovní látka nasává z atmosféry, do níž se po uskutečnění potřebné řady termodynamických dějů odvádí zase zpět s nevyužitým teplem, se nazývá otevřený oběh, např. u spalovací turbíny. Naproti tomu uzavřený oběh je charakterizován tím, že v něm v podstatě (až na

regulační zásahy) nenastává výměna pracovní látky s okolím. Tím je určen i způsob přívodu tepla pracovní látce a jeho odvod přes přestupní plochu ohřívače, respektive chladiče. Kombinací obou uvedených typů se vytvoří polouzavřené oběhy.

1.1.3 Druhý zákon termodynamiky

Nyní blíže prozkoumáme podmínky, za kterých se práce může měnit v teplo a naopak. Zatím co mechanickou práci lze v teplo měnit bez omezení (např. třením), přeměna tepelné energie v práci je vázána jistými podmínkami. Ne všechny děje, které připouští první zákon termodynamiky, mohou reálně probíhat. Tato omezení specifikuje druhý zákon termodynamiky [5].

1.1.3.1 Vratné a nevratné děje

Dosavadní děje, kterými jsme se zabývali, byly tzv. kvazistacionární. Jsou to takové děje, které probíhají dostatečně zvolna tak, že plyn při nich prochází stavy velmi blízkými stavu termodynamické rovnováhy. Vnitřní parametry systému jsou jednoznačně určeny teplotou, látkovým množstvím a vnějšími parametry a v souladu s nimi se mění. Jestliže se teplota a vnější parametry mění v opačném směru, jakoby v čase nazpět, projde systém týmiž stavy v obráceném pořadí. Takový děj, který může probíhat stejně v obou směrech nazýváme dějem vratným. Ten, který může probíhat pouze jedním směrem, nazýváme dějem nevratným. Zatím co první zákon termodynamiky platí jak pro děje vratné, tak i pro nevratné, pro formulaci druhého zákona termodynamiky jsou důležité právě děje, které v izolovaných systémech probíhají nevratně. Nyní uveďme některé příklady těchto dějů:

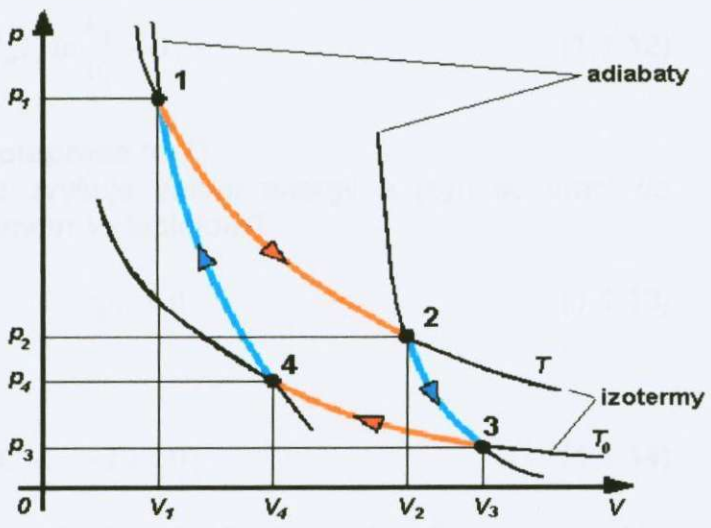
a) přeměna mechanické práce v teplo,
b) předání tepla z tělesa teplejšího na chladnější těleso,
c) expanze plynu do vakua.

Skutečně nebylo pozorováno, že by vzduch uniklý z kabiny při výstupu kosmonautů do kosmického prostoru se do této kabiny vrátil, že by nás zahřála kostka ledu na dlani a sama se ještě více ochladila, nebo že by se pohyb kola, jehož kinetická energie se třením přeměnila v teplo, obnovil ochlazováním ložiska. Do jisté míry je možné takové děje přeměnit ve vratné, odizolujeme-li danou soustavu, tj. připojíme-li k ní další tělesa. Doplníme-li například zmíněné kolo válcem naplněným ideálním plynem, je možné teplo, které plyn získá z ohřátého ložiska, přeměnit při izotermické expanzi v práci, která kolo opět roztočí. Uvedený postup není ovšem možné libovolně dlouho aplikovat, neboť

objem plynu ve válci nemůže růst neomezeně. Izotermické expanze by bylo možné využít k získání práce přeměnou tepla obsaženého v obrovských pozemských zásobnících – zemské kůře nebo mořské vodě. Získali bychom tak téměř neomezené zdroje energie a vytvořili bychom tak perpetum mobile druhého druhu, tj. zařízení, které by cyklickým procesem trvale vykonávalo práci pouze ochlazováním jednoho systému všude stejné teploty. Jak již bylo řečeno, expanze pracovního plynu nemůže probíhat do nekonečna. K trvalé přeměně tepla v práci je možné prakticky použít pouze děje kruhové, které se mohou mnohokrát opakovat. Toto je princip každého tepelného stroje. Zkušenost ukazuje, že při kruhovém ději se vždy část tepla přijatého od jednoho tělesa všude stejné teploty odevzdá během cyklu jinému chladnějšímu tělesu a jenom zbývající část se využije na práci. Část tepla vzniklého hořením směsi paliva a vzduchu ve válci spalovacího motoru se využije na pohyb pístu, pohon automobilu, zbytek odvádějí výfukové plyny a předávají jej okolnímu chladnějšímu vzduchu.

1.1.4 Carnotův cyklus

Zařízení, která umožňují přeměnu tepla na mechanickou práci se nazývají tepelné stroje. Nejúčinnější model takového stroje je založen na Carnotově cyklu. Cyklus (kruhový děj) je děj, jehož konečný stav je dán týmiž hodnotami stavových veličin jako stav počáteční. Na principu cyklů pracují parní a spalovací motory. Carnotův cyklus pracuje mezi dvěma lázněmi; teplotu teplejší lázně, tzv. ohříváku, označujeme T a teplotu chladnější lázně, chladiče, označujeme T_0. Carnotův cyklus je vratný cyklus a je složen ze čtyř vratných dějů. Uskutečňuje-li se v dokonalém plynu (obr. 7), lze popsat termodynamicky jeho činnost a odvodit jeho účinnost.



Obr. 7 Čtyři pracovní děje Carnotova cyklu

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
PEDAGOGICKÁ FAKULTA
ÚSTŘEDNÍ KNIHOVNA -8-
Husova 458, 370 05 České Budějovice

Čtyři pracovní děje přímého (ve směru hodinových ručiček) Carnotava cyklu jsou:

I. Izotermická expanze (1-2),
při níž plyn zvětšuje svůj objem z V_1 na V_2 ve spojení s ohřívákem, do něhož přijímá teplo. Jelikož se nemění teplot ($T = konst$), nemění se ani vnitřní energie a dodané teplo se spotřebuje na vykonanou práci:

$$Q_{12} = W_{12} = nR_m T \ln \frac{V_2}{V_1} > 0. \qquad (1.1.9)$$

II. Adiabatická expanze (2-3),
při níž se zvětší objem na hodnotu V_3, práce se koná výhradně na úkor vnitřní energie

$$Q_{23} = 0, \qquad (1.1.10)$$

a teplota klesne na teplotu chladiče T0. Pro vykonanou práci platí:

$$W_{23} = nC_V (T - T_0) > 0. \qquad (1.1.11)$$

III. Izotermická komprese (3-4),
kdy se zmenšuje objem na hodnotu V_4 dodáním práce W_{34} zvnějšku při teplotě T_0. Tato práce se rovná teplu Q_{34} odevzdanému chladiči

$$W_{34} = Q_{34} = nR_m T_0 \ln \frac{V_4}{V_3} < 0. \qquad (1.1.12)$$

IV. Adiabatická komprese (4-1),
Při níž dodávaná práce zvyšuje vnitřní energii a plyn se vrací do počátečního stavu s objemem V_1 teplotou T:

$$Q_{41} = 0 \qquad (1.1.13)$$

z toho plyne, že práce:

$$W_{41} = nC_v (T_0 - T) < 0. \qquad (1.1.14)$$

Plocha 1234 je periodicky získávaná užitečná práce Carnotova cyklu.

Matematicky je celková práce, vykonaná při Carnotově cyklu, rovna algebraickému součtu prací vykonaných při jednotlivých částech cyklu,

$$W = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} =$$
$$= nR_m T \ln\frac{V_2}{V_1} + nC_V(T - T_0) - nR_m T_0 \ln\frac{V_4}{V_3} - nC_v(T_0 - T)$$

Přitom práce páce $W_{34} =< 0$, $W_{41} =< 0$, což znamená, že v těchto úsecích byla práce plynu dodávána. Vidíme, že práce při adiabatických dějích jsou opačné a ruší se. Po úpravě dostaneme

$$W = nR_m(T - T_0)\ln\frac{V_2}{V_1}. \qquad (1.1.15)$$

Teplo dodané ohřívákem označíme $Q = Q_{12}$ a podle (rov. 1.1.9) je

$$Q = nR_m T \ln\frac{V_2}{V_1}. \qquad (1.1.16)$$

Vliv ztrát při energetických přeměnách v technických zařízeních vystihuje účinnost η. Definujeme ji jako poměr práce vykonané W_1 a práce dodané W_2. Je také rovna podílu výkonu ze stroje odebraného P_1 a výkonu dodaného zdroji zvnějšku (příkonu) P_2

$$\eta = \frac{W_1}{W_2} = \frac{P_1}{P_2}. \qquad (1.1.17)$$

Účinnost je bezrozměrná veličina. Jelikož je vždy $W_1 < W_2$ a $P_1 < P_2$, platí vždy $\eta < 1$.

Účinností cyklu nazýváme poměr vykonané mechanické práce k teplu dodanému ohřívákem, což je po dosazení (rov. 1.1.15) a (rov. 1.1.16) a po úpravě

$$\eta = \frac{W}{Q} = \frac{T - T_0}{T} = 1 - \frac{T_0}{T}. \qquad (1.1.18)$$

Označíme-li velikost tepla odebraného chladičem

$$Q_0 = |Q_{34}| = -Q_{34}$$

je zřejmé, že

$$W = Q - Q_0$$

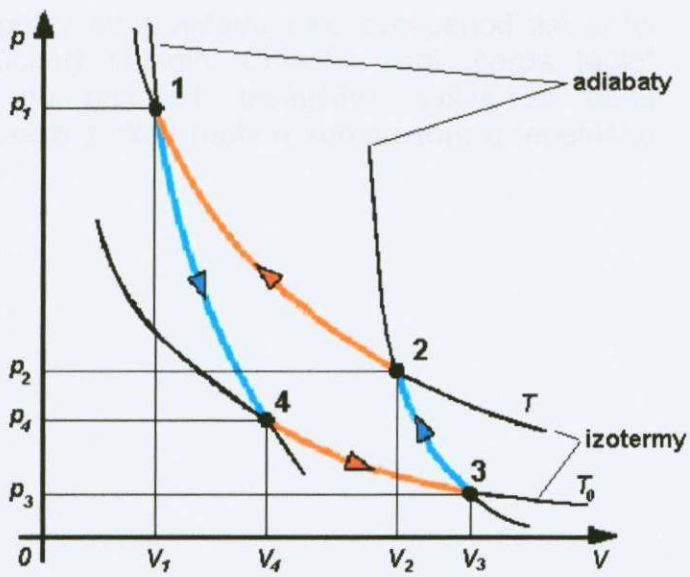
a můžeme také psát

$$\eta = \frac{T - T_0}{T} = \frac{Q - Q_0}{Q}. \qquad (1.1.19)$$

Účinnost η závisí jen na teplotě ohříváku T a chladiče T_0. Účinnost je tím lepší, čím vyšší je teplota ohříváku a čím nižší je teplota chladiče. Tento závěr je platný i pro skutečné nevratné motory, kde se snažíme dosahovat co největšího teplotního rozdílu mezi chladičem a ohřívákem.

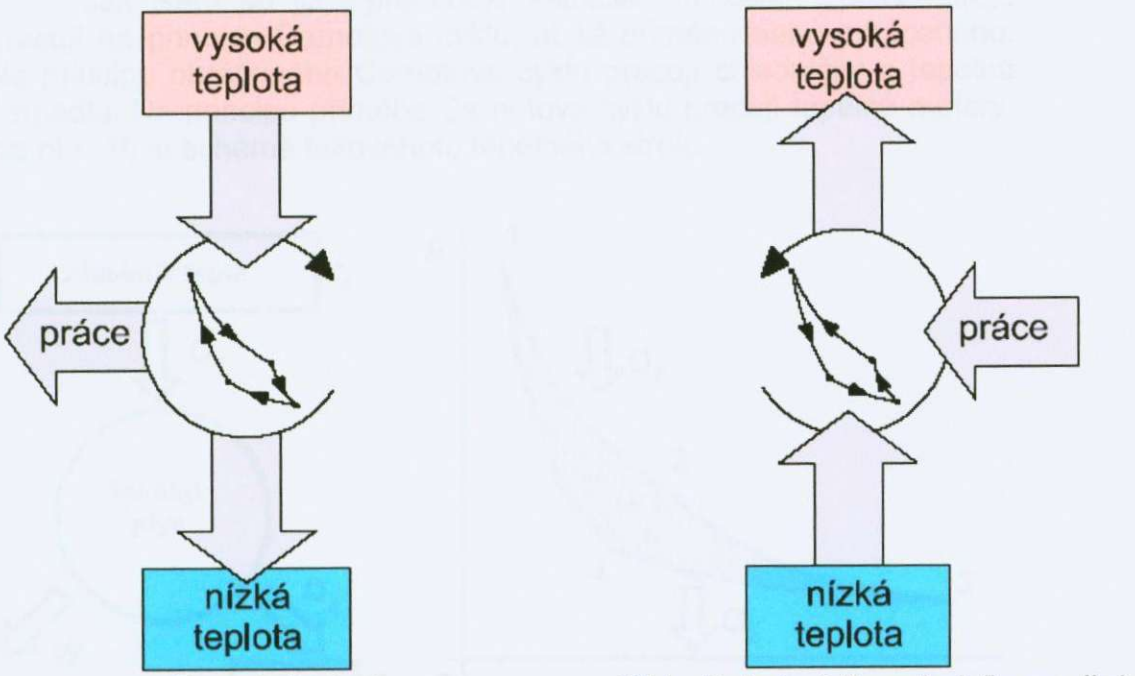
Chladící (obrácený) Carnotův stroj pracuje v opačném směru (proti směru hodinových ručiček), než stroj tepelný, tj. podle obr. 8 probíhá obrácený Carnotův cyklus 4-3-2-1-4. U obráceného Carnotova cyklu nemluvíme o účinnosti, ale o tzv. chladícím faktoru stroje, který je dán poměrem tepla odebraného chladné lázni Q_0 ku dodané práci W.Je větší než 1. Pro tepelná čerpadla je uváděn tzv. topný faktor, který je dán poměrem odvedeného tepla do vytápěného prostředí ku dodané práci. Je také větší než 1.

43 – vratná izotermická expanze (přívod tepla z chlazeného prostředí)
32 – vratná adiabatická komprese
21 – vratná izotermická komprese (odvod tepla do okolí)
14 – vratná adiabatická expanze



Obr. 8 Obrácený Carnotův cyklus

Schémata toků tepla a práce v pracovních cyklech:

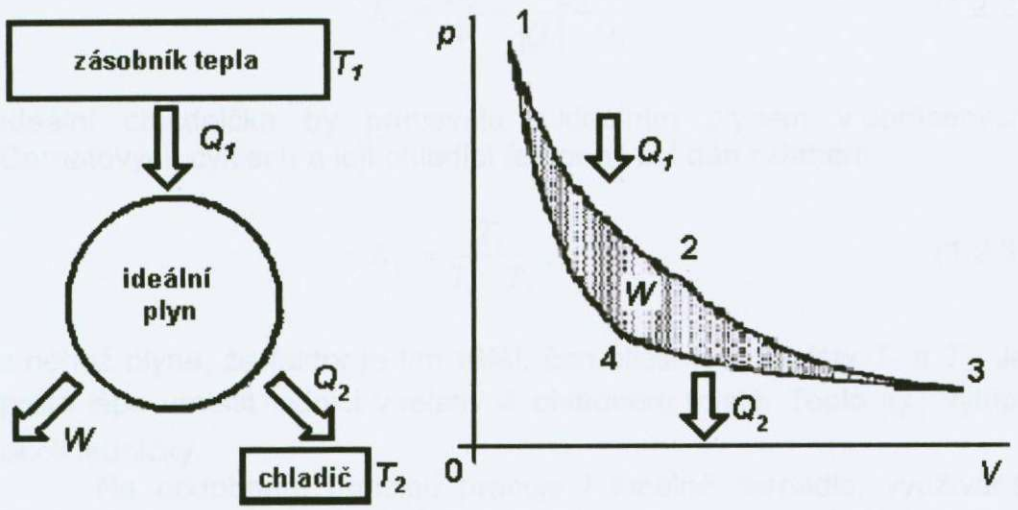


Obr. 9 Schéma toků tepla a práce v tepelných strojích

Z obr. 9 je patrno, že tepelný stroj vyžaduje ke své periodické práci nejen palivo, ale také účinný chladič. Chladící stroj „čerpá teplo" z chladnějšího prostředí do prostředí teplejšího, avšak za cenu spotřebované dodávané práce z okolí (pohon kompresoru u tepelného čerpadla).

1.2 Tepelné stroje

Jak jsem se již v předchozí kapitole zmiňoval, tepelné stroje pracují na principu Carnotova cyklu, ať již přímého nebo obráceného. Na principu obráceného Carnotova cyklu pracují chladničky a tepelná čerpadla. Na principu přímého Carnotova cyklu pracují tepelné motory. Na obr. 10 je schéma takovéhoto tepelného stroje.



Obr. 10 Schéma tepelného stroje

Výjimku tvoří Stirlingův motor, který pracuje na principu Stirlingova cyklu.

1.2.1 Chladnička a tepelné čerpadlo

Chladnička a tepelné čerpadlo využívají ke své funkci obrácený sled Carnotova cyklu (pořadí stavů 4-3-2-1-4). Výsledkem jednotlivých cyklů nebude výsledná kladná práce stroje, ale převod tepla z chladnějšího zásobníku do teplejšího. Aby proces neodporoval druhému zákonu termodynamiky, bude při něm spotřebována kladná práce vykonaná vnějšími silami působícími na systém. Označme Q_2 teplo odebrané během cyklu chladnější lázni a předané systému ($Q_2 > 0$). Teplo odevzdané systémem teplejší lázni bude Q_1 ($Q_1 < 0$). Dále označíme W práci vykonanou během cyklu vnějšími silami ($W < 0$). Podle prvního zákona termodynamiky bude platit, s využitím odpovídající znaménkové konvence, pro cyklický děj

$$Q_1 + Q_2 = -W \text{ a } -Q_1 = |Q_1| = Q_2 + W . \qquad (1.2.1)$$

Teplo odevzdané teplejší lázni $|Q_1|$ bude součtem tepla Q_1 odebraného chlazenému prostoru a práce vykonané vnějšími silami (motorem nebo výparníkem).

Konstrukce chladničky bude tím výhodnější, čím méně práce bude nutno dodat a čím více se odčerpá tepla. Výhodnost kvantifikuje tzv. chladící faktor K_c vyjádřený poměrem

$$K_c = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} \,. \tag{1.2.2}$$

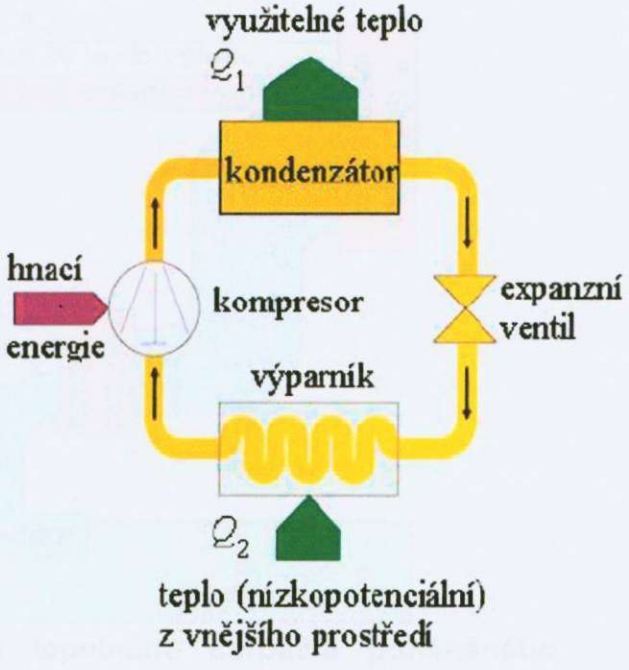
Ideální chladnička by pracovala s ideálním plynem v obrácených Carnotových cyklech a její chladící faktor by byl dán vztahem

$$K_{ci} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \tag{1.2.3}$$

z něhož plyne, že faktor je tím větší, čím bližší jsou teploty T_1 a T_2. Je proto lépe umístit lednici v relativně chladném místě. Teplo $|Q_1|$ vytápí okolí ledničky.

Na podobném principu pracuje i tepelné čerpadlo, využívané k vytápění budov. Je to kotel nebo stroj? Kde může brát tepelnou energii zdarma? Na jakém principu vůbec pracuje? Jak moc je tento systém složitý?

Takové a podobné otázky si zcela jistě klade každý, kdo poprvé uslyšel tento pojem. Tepelné čerpadlo však není kotlem! Trvale zůstává chladícím zařízením, pouze se změnil smysl jeho využití. Původně odpadové teplo z chladničky nyní využíváme k vytápění našeho obydlí, a vychlazovaný prostor se nám stal zdrojem tepelné energie, obr. 11.



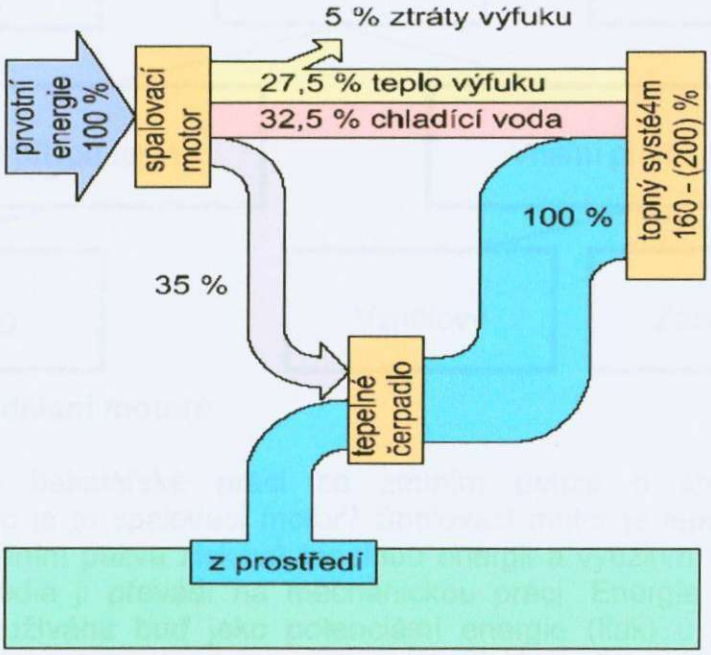
Obr. 11 Schéma tepelného čerpadla

Pro posouzení jeho účinnosti se zavádí tzv. topný faktor K_t, který udává poměr získaného tepla $|Q_1|$ a spotřebované práce W

$$K_t = \frac{|Q_1|}{W} = \frac{|Q_1|}{|Q_1| - Q_2} \; ; \tag{1.2.4}$$

$$K_{ti} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \; . \tag{1.2.5}$$

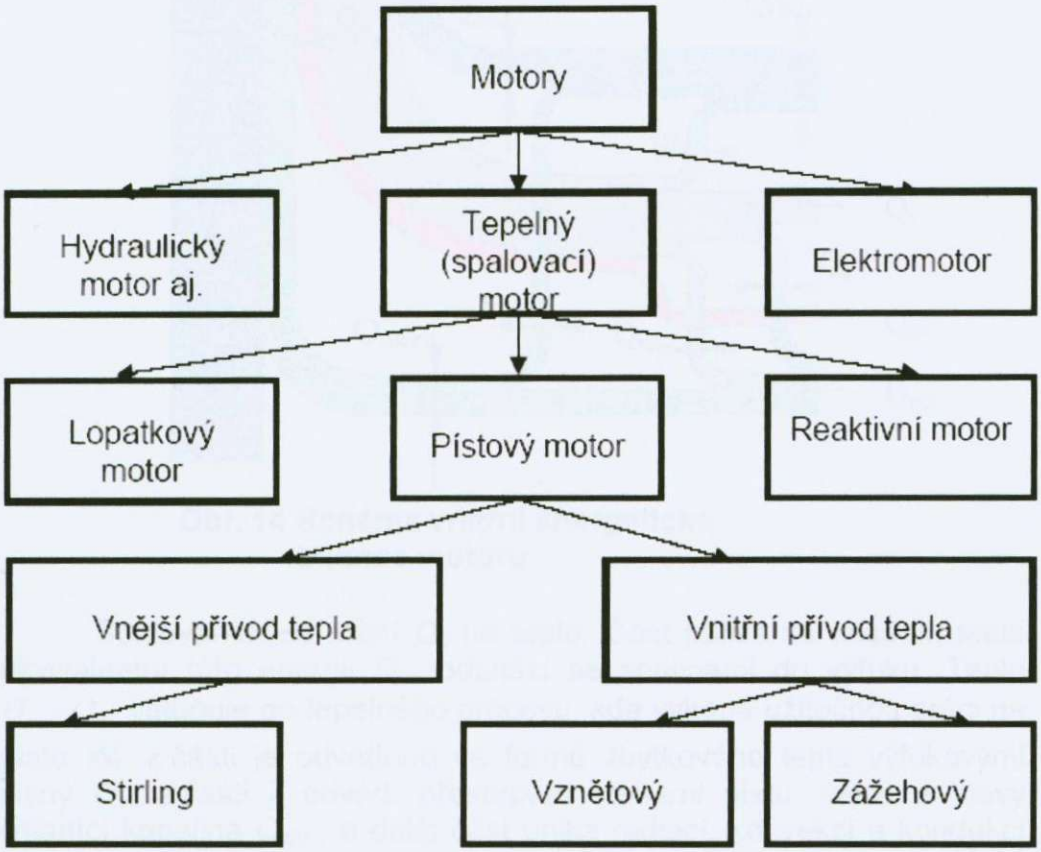
Pro velikost topného faktoru platí stejný závěr jako pro chladící faktor. Topný faktor se u reálných tepelných čerpadel pohybuje v rozmezí 3 až 4. Tento poměr je také ovlivněn teplotou prostředí, ze kterého tepelnou energii získáváme. Například při větším poklesu venkovní teploty vzduchu na –10°C, klesá topný faktor pod hodnotu 2 a provoz agregátu se tak stává ztrátovým. Běžně se v informačních letáčcích firem uvádí topný faktor 3, to znamená, že z každé zaplacené 1kWh se získají 2kWh tepelné energie navíc [6]. Lepší topný faktor dosahují tepelná čerpadla poháněná spalovacím motorem či spalovací turbinou, u kterých se k vytápění může využít i odpadní teplo z chlazení motoru a části tepla z výfukových plynů, obr. 12, [7].



Obr. 12 Energetická bilance tepelného čerpadla poháněného spalovacím motorem

1.2.2 Tepelné motory

Co je to vlastně motor? Strohá definice by mohla znít takto: hnací stroj umožňující přeměnu určitého druhu přiváděné energie na energii mechanickou. Podle základních konstrukčních znaků se motory dělí na pístové (spalovací), vznětové, zážehové a parní motory, rotační (parní a vodní turbína, většina elektromotorů) a reaktivní (proudové, raketové motory). Podle druhu přiváděné energie se motory dělí na tepelné (parní a plynová turbína, spalovací motory), hydraulické (vodní turbíny, hydromotory), elektrické (elektromotory), pneumatické, obr. 13.

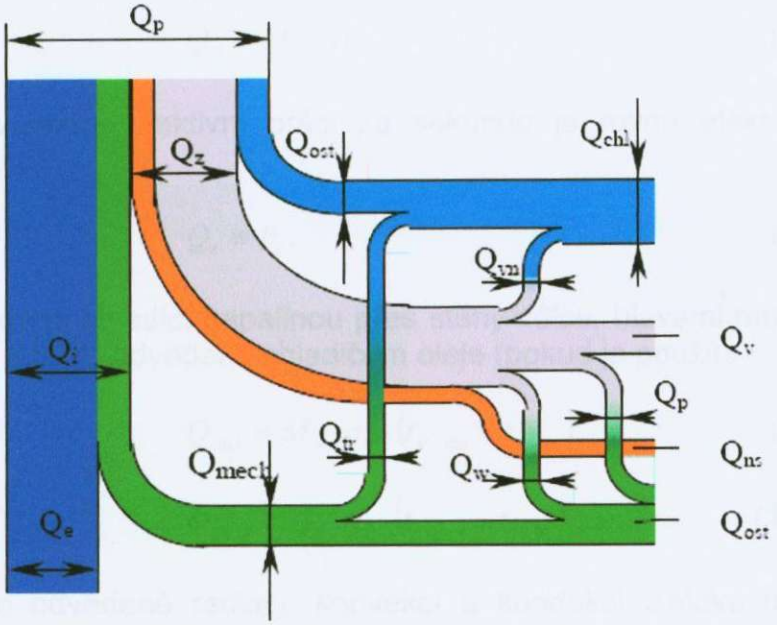


Obr. 13 Rozdělení motorů

V této bakalářské práci se zmíním pouze o spalovacích motorech. Co je to spalovací motor? Spalovací motor je tepelný stroj, který spalováním paliva získává tepelnou energii a využitím vhodného plynného média ji převádí na mechanickou práci. Energie plynného média je využívána buď jako potenciální energie (tlak) u pístových spalovacích motorů, nebo energie kinetická (rychlost proudu) u spalovacích turbin.

1.2.2.1 Tepelná bilance spalovacího motoru

Spalovací motor transformuje chemickou energii paliva Q_p na mechanickou práci W_e. Tato přeměna je ztrátová. Při vývoji motoru je snaha maximalizovat celkovou účinnost přeměny energie, což lze realizovat jen při znalosti toku energií motorem a jednotlivých druhů ztrát, obr. 14.



Obr. 14 Schéma vnitřní energetické bilance motoru

Spalováním se mění Q_p na teplo. Část paliva se nespálí, teplo ekvivalentní této energii Q_{ns} odchází se spalinami do výfuku. Teplo $Q_p - Q_{ns}$ vstupuje do tepelného procesu, kde vykoná užitečnou práci na pístu W_i, z části je odvedeno ve formě zbytkového tepla výfukovými plyny Q_v, z části ji odvádí přestupem stěnami pístu, válce a hlavy chladící kapalina Q_{chl1}, a další část uniká radiací, konvekcí a kondukcí z bloku motoru a dalších částí v Q_{chl3} a chladičem oleje Q_{chl2}. Část užitečné práce W_i se zmaří třením na pístní skupině (Q_{tr}), v ložiskách a rozvodovém ústrojí a odchází z motoru opět ve formě tepla zahrnutém v Q_{chl1}, Q_{chl2} a Q_{chl3}. Část práce W_i je využita na pohon pomocných zařízení (Q_{mech}: čerpadla, kompresory, alternátor a pod.). celkově je situace komplikovanější, jednotlivé energie se přelévají do různých forem, avšak pro základní pochopení toto rozdělení postačí. Rovnice energetické rovnováhy je

$$Q_p = Q_{ns} + Q_e + Q_{chl} + Q_{ost} + Q_v , \qquad (1.2.6)$$

kde Q_{chl} je celkové teplo odvedené chlazením a Q_{ost} jsou všechna tepla neobsažená v předchozích. Tepla Q a práce W jsou vztaženy na časovou jednotku (rozměr [J.s^{-1}], jsou číselně rovny svým svým výkonům). Pokud se zjišťují jednotlivá tepla experimentálně na reálném motoru, lze vyjít z následujících vzorců. Energie dodávaná v palivu je určena časovou spotřebou paliva M_p a jeho výhřevností H_u:

$$Q_p = M_p \cdot H_u \tag{1.2.7}$$

Teplo ekvivalentní efektivní práci za sekundu je rovno efektivnímu výkonu motoru:

$$Q_e \equiv P_e . \tag{1.2.8}$$

Teplo odvedené chladící kapalinou přes stěny válce, hlavami motoru a dnem pístu a teplo odvedené chladičem oleje (pokud je použit):

$$Q_{chl1} = M_w \cdot c_w \cdot \left(t_{w_out} - t_{w_in}\right), \tag{1.2.9}$$

$$Q_{chl2} = M_o \cdot c_o \cdot \left(t_{o_out} - t_{o_in}\right). \tag{1.2.10}$$

Teplo odvedené radiací, konvekcí a kondukcí z bloku motoru Q_{chl3}, lze vůči ostatním teplům zanedbat nebo určit z teplot na povrchu bloku motoru a okolního vzduchu, rychlosti proudění, atd. Teplo vynesené z pracovního prostoru výfukovými plyny se určí přibližně z hmotnostního průtoku výfukových plynů (ev. čerstvé náplně m_l), jejich měrných tepel c_{p_v}, c_{p_vzd} a teplot:

$$Q_v = \dot{m}_l \cdot (c_{p_v} t_v - c_{p_vzd} t_a); \tag{1.2.11}$$

kde:

$$\dot{m}_l = \rho_l \cdot \dot{V}_l . \tag{1.2.12}$$

Množství nespáleného paliva je dáno především koeficientem přebytku vzduchu λ, rozložením směsy při spalování a fyzikálními podmínkami spalování (pro exaktní posouzení je nutno znát relativní množství jednotlivých složek ve výfukových plynech). Pokud uvažujeme, že nespálené palivo je dáno pouze nedostatkem vzduchu, pak množství tepla v něm obsažené je:

$$Q_{ns} = (\Delta H_u)_{ch} \cdot M_p \tag{1.2.13}$$

kde:

$$(\Delta H_u)_{ch} = (\Delta H_u)_{CO} + (\Delta H_u)_{H_2} \tag{1.2.14}$$

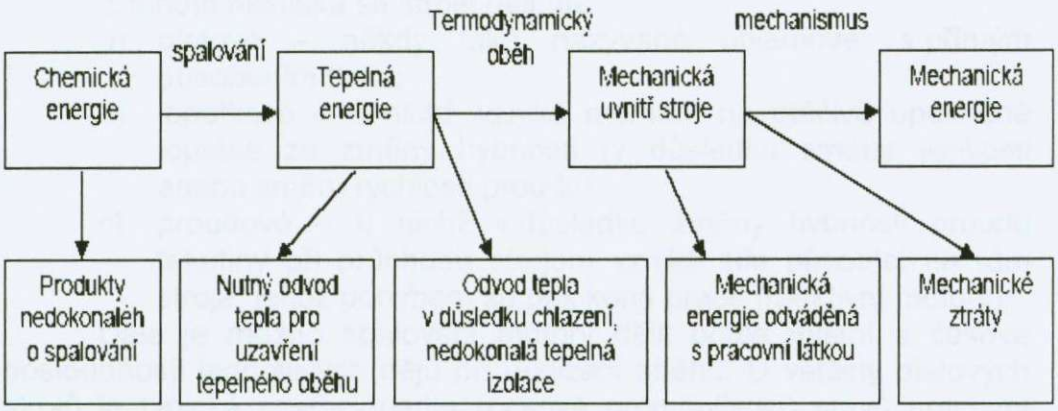
a pokud známe koeficient přebytku vzduchu λ (zjistíme pomocí volumetru (měří spotřebu vzduchu) nebo analyzátoru výfukových plynů s λ sondou), můžeme psát:

$$Q_{ns} = H_u(1-\lambda)M_p \tag{1.2.15}$$

Všechny ostatní tepelné ztráty (kinetická energie výfukových plynů Q_w) jsou zahrnuty do Q_{ost}:

$$Q_{ost} = Q_p - Q_{ns} - Q_e - Q_{chl} - Q_v \tag{1.2.16}$$

Hlavním úkolem konstrukce a řízení motoru je nalezení takového uspořádání a pravidel řízení, aby účinnost převodu chemické energie na užitečnou mechanickou práci byla co největší, což, jak je patrno z obr. 15, není neni zrovna jednoduchá věc.



Obr. 15 Schéma transformace energie ve spalovacích motorech

1.2.2.2 Druhy spalovacích motorů

Spalovací motory je možné klasifikovat podle velkého množství kritérií. Protože se tato bakalářská práce bude dále zabývat jen velmi úzkou třídou pístových motorů, bude uveden jen stručný přehled druhů

motorů. Podrobný přehled a rozbor motorů je uveden v literatuře [8] nebo [9].

Podle způsobu odvodu tepla do okolí rozdělujeme motory, na motory s oběhem otevřeným a motory s oběhem uzavřeným.

Uzavřený (resp.polouzavřený) oběh vyžaduje realizovat odvod i přívod tepla pomocí výměníků, zařízení náročných prostorově, hmotnostně i ekonomicky. Je typický pro oběhy pracující s látkou odlišnou od atmosférického vzduchu (např. vodní pára, helium a tp.). I když existují motory, pracující s takovými látkami a otevřeným oběhem (výfukové parní stroje např. lokomotivní, parní turbiny s odběrem topné páry v teplárnách), musí být přívod tepla u těchto strojů realizován vždy pomocí výměníku zvenčí. V případě spalovacích motorů jsou to motory se spalováním vnějším, zatímco druhá možnost, motory se spalováním vnitřním, si vynucuje oběh otevřený.

U vnitřního spalování se přívod tepla odehrává uvnitř pracovního prostoru, přičemž se mění chemické složení pracovní látky a spaliny přímo působí na pohyblivé části stroje, což přináší vyšší nároky na konstrukci dílů. Na druhé straně odpadají výměníky na straně přívodu i odvodu tepla, což stroj podstatně zjednoduší.

Pracovní látka působí svým tlakem na pohyblivou část stroje (píst). Ve skutečnosti je však možno tuto tlakovou energii přeměnit úplně nebo z části na energii kinetickou a síly na pohyblivé části stroje vyvodit pak ze změny hybnosti proudu. Většinou je pohyblivou částí stroje výhodně tvarovaná zakřivená lopatka.

Z tohoto hlediska se stroje dělí na:

a) pístové – někdy také nazývané objemové, s přímým působením tlaku;
b) lopatkové – u nichž vzniká moment na otáčivě upevněné lopatce ze změny hybnosti (v důsledku změny velikosti anebo směru rychlosti proudu);
c) proudové – u nichž v důsledku změny hybnosti proudu tekutiny při průchodu strojem vzniká síla působící na rám stroje, jehož pohybem se pak koná práce (reaktivní motory).

Dále je možno spalovací motory dělit podle místní a časové posloupnosti jednotlivých dějů při realizaci oběhu. U většiny pístových strojů je typická nestacionarita (časová proměnlivost) stavů pracovní látky, zachycené v jednom místě stroje. Stále stejné části pracovního prostoru (např. píst, válec, hlava válce s ventily) obklopují pracovní látku během všech změn, tvořících pracovní oběh. V tomto prostou se oběh periodicky opakuje. Z hlediska podmínek pro optimální průběh změn nejsou tyto stroje s nestacionárními ději ideální, neboť tvar dílů pracovního prostoru musí být kompromisně přizpůsoben mnoha protichůdným požadavkům. Proto vzniká snaha alespoň část těchto

dějů stacionarizovat mimo vlastní pracovní prostor stroje (např. tvoření směsy u benzinových motorů).

Na druhé straně je nestacionarita působení vysokých teplot (nikoli vysokých tlaků) velmi vítána, neboť střední teploty dílů pracovního prostoru lze (obvykle s přiměřeným chlazením) udržet na přijatelné úrovni. Přes teploty plamene 2400K – 2800K se běžně dosahují maximální teploty pístu z hliníkových slitin pod 300°C, teploty kluzné plochy válce 200°C atd. Tím je splněna podmínka dosažitelnosti vysokých teplot pro dobrou tepelnou účinnost oběhu současně s přijatelnou cenou materiálu dílů motoru.

Stroje se stacionárními ději využívají změn, probíhajících v čase při průtoku pracovní látky jednotlivými částmi stroje. Děje v jednom místě stroje (např. komprese v lopatkovém kompresoru) probíhají víceméně ustáleně. Každá část stroje má stejnou oddělenou funkci, pro níž je optimalizována. Nároky na materiál dílů horké části stroje, trvale zatížené vysokou teplotou plynů, jsou ovšem značné a dosažitelné maximální teploty, jsou podstatně nižší než u strojů s nestacionárními ději (1500K – 1700K).

Jako u každé klasifikace, musíme se i zde smířit se skutečností, že v praktickém provedení strojů se setkáme s kombinacemi uvedených principů. Některé z nich jsou velice životaschopné, např. kombinace pístového motoru se spalovací turbinou v podobě turbodmychadla, případně i plynové turbíny činného výkonu.

Základní rozdělení podle druhu spalování paliva [3]:

a) Motory s vnitřním spalováním:
   - Přímočarý vratný pohyb pístu
     - Čtyřdobý motor
     - Dvoudobý motor
   - Rotační pohyb pístu
     - Wankelův motor
   - Reakční motory
     - Spalovací turbína
     - Raketový motor

b) Motory s vnějším spalováním.
   - Parní stroj
   - Stirlingův motor

1.2.2.3 Tvorba a průběh spalování směsi

Děje při spalování jsou spojeny s přenosem látek (např. difůzí), sdílením tepla za vysokých gradientů teploty, přičemž přenosové jevy mohou být o několik řádů urychleny trubicí, která překryje molekulární přenos řídící se kinetickou teorií plynů. Vlastní spalování pak

představuje složité návazné chemické reakce. V pístovém motoru hoří často směsi složitých chemických látek za nestacionárních podmínek. Z předchozího vyplývá, že úplný model hoření je velice složitý a ovlivněný takovým množstvím parametrů, že nelze najít jeho přesný model. Časovou posloupnost dějů vedoucích ke spálení paliva a vzniku tepla lze rozdělit do několika etap, které se však mohou překrývat nebo probíhat paralelně v různých částech spalovacího prostoru. Před vlastním hořením paliva musí dojít k jeho fyzikální a chemické přípravě. Palivo je třeba nejdříve ohřát a vytvořit dostatečnou kontaktní plochu mezi jeho částicemi a okysličovadlem (většinou vzduchem). Toho se docílí rozprášením paliva do vzduchu nebo vytvořením palivového filmu na stěně válce. Poté dojde k odpaření paliva a smísení par s kyslíkem a ohřátí směsi na teplotu nutnou k proběhnutí předplamenných reakcí. Po chemické přípravě, kdy dojde k proběhnutí endotermických předplamenných reakcí, nastává vlastní etapa hoření, při které proběhnou exotermické chemické reakce spalování a při kterých se tvoří také nežádoucí oxidy dusíku [10]. V poslední etapě dochází k dohořívání směsi. Proběhnou pomalejší reakce a dojde k dosažení rovnovážného stavu při poklesu teploty během expanze. V této etapě dochází k tvorbě většiny nežádoucích škodlivin způsobených nedokonalím spalováním za nižších teplot.

Podle způsobu tvorby směsi a způsobu dodání tepla pro předplamenné reakce lze pístové motory dále dělit do několika kategorií:

1. Vznětové motory
2. Zážehové motory
   a) s vnějším tvořením směsi
   b) s vnitřním tvořením směsi (s přímím vstřikováním)

1.2.2.4 Motory s vnitřním spalováním

Pístové spalovací motory s vnitřním spalováním jsou v současné době nejvýznamnější zdroje mechanické energie (současně však jsou i významným zdrojem znečišťování ovzduší). Pístové spalovací motory mají za sebou asi 140-ti letou historii technického vývoje a výroby a nepochybně ještě několik desetiletí bude jejich vývoj a zdokonalování pokračovat.

Vývoj pístových spalovacích motorů je historicky svázán s objevy a vývojem v oblasti pístových tepelných motorů, především parních strojů. Počátky pístových tepelných motorů spadají do přelomu 17. a 18. století. Skutečný provozuschopný pístový spalovací motor (svítiplyn – zapálení směsi ve válci plamenem v polovině sacího zdvihu) postavil v roce 1860 Lenoir, celková účinnost tohoto motoru však byla pod 5%. Lenoirovy motory se stavěly řadu let, představují významný technický

pokrok ve vývoji tepelných motorů a přispěly k urychlení rozvoje průmyslu. Na světové výstavě v Paříži v roce 1878 představil Otto ležatý čtyřdobý plynový motor s klikovým (křižákovým) mechanizmem (výkon 3kW při n=170 1/min); řešení tohoto motoru nastartovalo velmi intenzivní a rychlí rozvoj plynových pístových spalovacích motorů. Další rozvoj pístových spalovacích motorů je spojen s úsilím po využití kapalných paliv. V roce 1884 předvedl Daimler rychloběžný (n=800 1/min) čtyřdobý benzinový motor. V období 1893 – 1897 vypracoval Diesel řešení čtyřdobého spalovacího motoru na těžko odpařitelná paliva, jehož pracovní cyklus zajistil výrazné zvýšení celkové účinnosti motoru (přes 26%). Současná výroba pístových spalovacích motorů obsahuje širokou škálu výkonů motorových jednotek, od cca 0,1kW (modelářské) až po výkony řádově v desítkách MW (průmyslové, lodní motory). Provozní otáčky pístových spalovacích motorů se dnes pohybují od cca 100 1/min (rozměrově a výkonově největší kategorie) až po desítky tisíc 1/min (modelářské a jiné speciální motory). Celkové účinnosti dnešních pístových spalovacích motorů se pohybují v rozsahu od cca 20% až do 55% (vysoce přeplňované vznětové motory). V pístových spalovacích motorech dochází k uvolňování tepla přímo ve vlastním pracovním prostoru. Pracovní látkou jsou samotné zplodiny spalování. Spaliny působí bezprostředně na píst motoru a uvádějí ho do přímočarého nebo rotačního pohybu (pístové spalovací motory), nebo na lopatky oběžného kola (spalovací turbiny), popřípadě vykonávají mechanickou práci tím, že proudí velkou rychlostí ze spalovací komory vhodnou tryskou do atmosféry (reaktivní motory).

1.2.2.4.1 Zážehové motory

Dělíme podle způsobu tvorby směsi na:

a) s vnějším tvořením směsi využívající přípravy homogenní směsy před vstupem do válce. Při kompresy ve válci dochází k odpaření paliva a ohřátí směsi. Zvýšení teploty a dodání energie pro počáteční endotermické chemické reakce se nejčastěji lokálně dociluje elektrickou jiskrou. Dále dochází k zapalování směsi od již hořícího plamene.
b) s vnitřním tvořením směsi, nebo také s přímím vstřikováním se od předchozí kategorie odlišují přípravou směsi přímo ve válci, avšak zvýšení teploty při kompresi a druh paliva u těchto motorů neumožňuje samovznícení směsi. Směs je opět ve většině případů zapalována elektrickou jiskrou. K hoření dochází v připravované lokálně homogenní směsi a tvořící se směsi, v případě pokračování vstřikování i po zážehu.

Podle uspořádání pracovního oběhu na:
a) čtyřdobé
b) dvoudobé

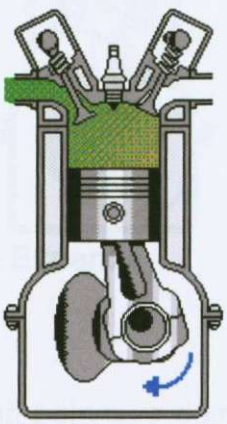
1.2.2.4.1.1 Čtyřdobý zážehový motor

Většina současných i minulých automobilů používá klasický čtyřdobý zážehový motor, vyvinutý v devatenáctém století. Palivem bývá většinou benzín, ale tyto motory mohou po úpravě spalovat také alkohol nebo plyn (LPG, CNG).

Jeden pracovní oběh se uskuteční během čtyř zdvihů pístu, tj. dvou otáček klikového hřídele. Výměnu náplně válce obstarává převážně píst pomocí rozvodových orgánů, nejčastěji talířových ventilů, ovládaných rozvodovým ústrojím. Ventily se otevírají nuceně, zpravidla vačkami na rozvodovém hřídeli, poháněném poloviční otáčkami motoru. Zavírání ventilů obstarávají pružiny, [11].

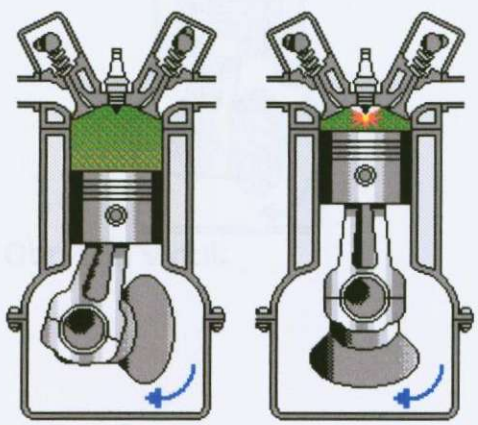
Pracovní fáze čtyřdobého zážehového motoru:

1. fáze – **sání** – Při sacím zdvihu pístu z horní úvratě do dolní úvratě vzniká ve válci podtlak, tak že se sacím ventilem otevíraným s vhodným předstihem ještě před horní úvratí, nasaje do válce čerstvá náplň. Je to směs vzduchu a paliva, tvořená při sacím zdvihu ještě před vstupem do válce ve směšovacím ústrojí. U motorů se vstřikováním benzínu nebo vefukováním plynu do pracovního válce se nasává jen vzduch a směs se tvoří ve válci. Nasávaná náplň se ve válci ohřívá horkými stěnami a mísí se se spalinami, zbylými z minulého výfukového zdvihu v kompresním prostoru, obr. 16a.



Obr. 16a Sání

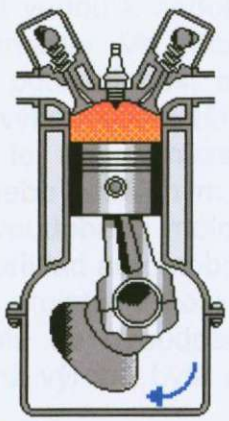
2. fáze – **komprese a zapálení** – Na začátku zpětného pohybu pístu, tj. na začátku druhého, kompresního zdvihu, se zavře sací ventil. Náplň válce se pak stlačuje a tím roste i její teplota. Konečný kompresní tlak a teplota závisí hlavně na kompresním poměru (stupni komprese). Velikost kompresního poměru je



Obr. 16b Komprese a zapálení

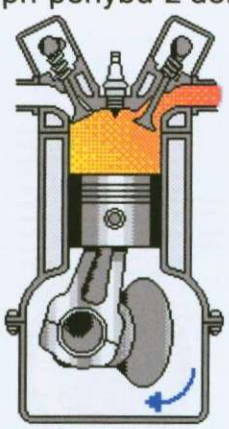
omezena požadavkem, aby před zažehnutím směsi elektrickou jiskrou nepřestoupila kompresní teplota ani u značně ohřátého motoru teplotu samovznícení stlačované směsi a aby spalování proběhlo bez detonací a bez příliš rychlého vzestupu tlaku, vyvolávajícího tvrdý chod motoru. Směs se zapaluje elektrickou jiskrou, vytvořenou mezi elektrodami zapalovací svíčky s vhodným předstihem před koncem kompresního zdvihu, voleným zpravidla tak, aby motor dával maximální výkon. Zažehnutá směs pak shoří za současného stoupání tlaků a teplot v okolí horní úvrati. Spalování se značně blíží izochorickému a jen malá část paliva shoří při zvětšování objemu, obr. 16b.

3. fáze – **expanze** – Při třetím, expanzním zdvihu, směs paliva se vzduchem ve válci dohořívá. Při tom asi 5° – 10° otáčení klikového hřídele za horní úvratí dosahuje tlak, a o něco později i teplota náplně válce maximum. Spaliny působí na píst pohybující se k dolní úvrati. Píst vykonává užitečnou práci. Během expanze tlak a teplota spalin klesá. Před koncem zdvihu se otevře výfukový ventil a spaliny unikají se značným tlakovým spádem z válce do okolí, obr. 16c.



Obr. 16c Expanze

4. fáze – **výfuk** – Během čtvrtého zdvihu píst při pohybu z dolní úvratě do horní úvratě vytlačuje zbytek spalin otevřeným výfukovým ventilem z válce. Zpravidla před koncem výfukového zdvihu se otevírá sací ventil, kdežto výfukový ventil se zavírá později, až za horní úvratí. V období současného otevírání sacího i výfukového ventilu nastává při vhodných podmínkách v sacím a výfukovém potrubí propláchnutí spalovacího prostoru a vypláchnutí části zbytku spalin z válce motoru, obr. 16d.



Obr. 16d Výfuk

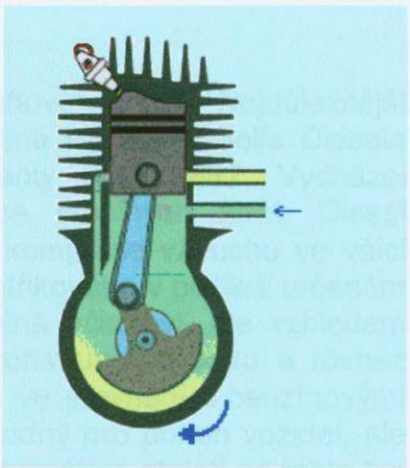
Tím je pracovní oběh čtyřdobého motoru ukončen a začne sací zdvih dalšího oběhu.

1.2.2.4.1.2 Dvoudobý zážehový motor

Dvoudobý (dvoutaktní) zážehový motor je malý a lehký, je používán v menších strojích jako jsou motorové pily, motocykly, sekačky na trávu atd. Je jednoduché konstrukce, oproti čtyřtaktnímu motoru neobsahuje 3/4 pohyblivých součástí (ventily, vačkové hřídele atd.) a proto je jeho výroba poměrně levná. Je nenáročný na údržbu. Dvoudobý motor kombinuje vždy dvě doby dohromady, proto by měl mít teoreticky dvojnásobnou účinnost proti motoru čtyřdobému, v praxi tomu tak ale není. Problémy při souběhu fází vedou k nedokonalému nasátí směsi a jen částečnému využití její energie. Ve válci zůstává část výfukových plynů a naopak do výfuku odchází část nespálené směsi. Dvoudobý motor má sice o něco vyšší výkon, ale vyšší spotřebu a vyšší exhalace škodlivých látek. Navíc je třeba mazat klikový mechanismus buď mícháním oleje do paliva nebo odděleným mazacím systémem, který odstraňuje hlavní výhodu dvoudobého motoru - jeho jednoduchost. Dvoudobé motory používaly například automobily DKW a Saab (do poloviny šedesátých let dvacátého století), z českých vozů značky Aero, Jawa a Z (Zbrojovka). Nejdéle se dvoudobé motory udržely ve vozech Trabant a Wartburg, jejichž výroba byla ukončena kolem roku 1990, [12].

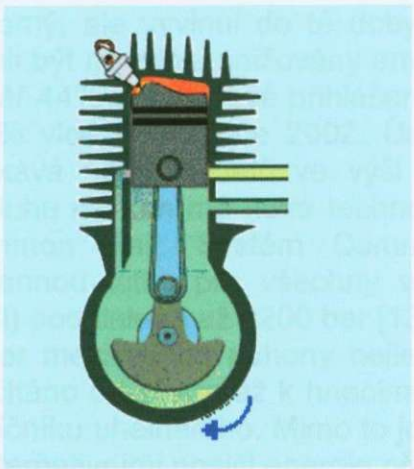
Na jeden pracovní oběh dvoudobého motoru připadají dva pracovní zdvihy pístu, kompresní a expanzní, tj. jedna otáčka klikového hřídele.

1. fáze – **sání a komprese** – píst se pohybuje od dolní úvratě směrem k horní úvrati. V klikové skříni vzniká podtlak a tím se nasaje do klikové skříně zápalná směs. Během pohybu pístu nahoru se uzavírá výfukový a přepouštěcí kanál, obr. 17a. Směs v prostoru nad pístem (byla připravena dříve během druhé fáze) se stlačuje, nastává komprese a pod pístem probíhá důsledkem podtlaku sání.

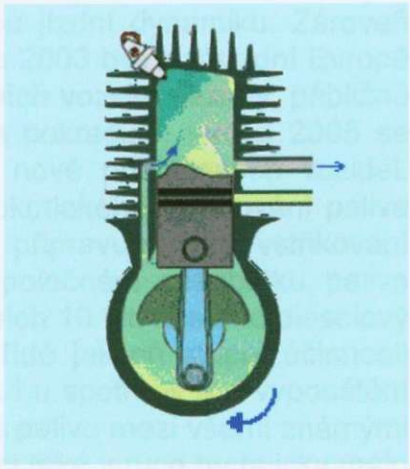


Obr. 17a Sání a komprese

2. fáze – **expanze a výfuk** – těsně před horní úvratí přeskočí jiskra,obr. 17b, nastává zážeh a expanze. Expanzí je píst tlačen z horní úvratě do dolní úvratě. Spodní hrana pístu uzavírá sací kanál. Směs v klikové skříni se pohybem pístu stlačuje. Při dalším pohybu pístu otevírá pravá horní hrana pístu výfukový kanál a vzápětí na to otevírá horní hrana pístu i přepouštěcí kanál a stlačená směs začne vytlačovat zbytky zplodin a dostává se do prostoru nad píst, obr 17c.



Obr. 17b Zapálení



Obr. 17c Expanze a výfuk

Píst svým pohybem nahoru a dolu otáčí tzv. klikovou hřídelí. K ní je připevněn těžký setrvačník, který se otáčí i poté co píst dosáhl své nejnižší polohy. Setrvačník tak převádí energii z dolu se pohybujícího pístu na plynulý, nepřetržitý pohyb a nutí píst k pohybu vzhůru v druhé části každého cyklu.

1.2.2.4.2 Vznětový motor

Nazývaný též dieselový nebo naftový motor. Nejdůležitější zdokonalení vznětového motoru jsou spojena s prací Rudolfa Diesela v Německu, který podal své první patenty roku 1892. Vycházel z termodynamických principů minimalizace tepelných ztrát, Diesel zkonstruoval motor, v němž velmi vysoká komprese vzduchu ve válci zajistila samovznícení paliva, pokud bylo vstřikováno v pečlivě určeném množství. Tím byla zajištěna vysoká tepelná účinnost, ale vzhledem k vysokým tlakům byla nutná i robustní konstrukce motoru a rovněž chod motoru při nízkých rychlostech nebyl ve srovnání s benzínovými motory tak hladký. Nebyl tedy okamžitě vhodný pro pohon vozidel, ale Diesel svůj motor stále zdokonaloval a ve dvacátém století se tento typ motoru stal důležitým pohonem vozidel. Ve dvacátých letech uvedla

firma MAN na trh první užitková vozidla s dieselovým motorem. Velký zájem vykazovala také lodní doprava a letectví. Na palubě vzducholodi „Hrabě Zeppelin" se o pohyb starali dieselové motory. S Mercedesem 260D byl v roce 1936 prezentován první dieselový osobní automobil. U automobilů ovšem zůstával diesel nejprve za exota. Sice byl úsporný a s dlouhou životností, ale platil ještě dokonce v sedmdesátých letech za hlučný, hrubý a těžkopádný. Se zavedením prvního dieselového vstřikovacího motoru pro osobní automobily u společnosti Audi začalo skutečné vítězné tažení dieselových motorů. Diesel nebyl už jen úsporný, ale vyvinul do té doby netušenou jízdní dynamiku. Zároveň mohli být neustále snižovány emise. V roce 2003 byli v západní Evropě téměř 44% všech nově přihlášených osobních vozidel diesely, přibližně o 3% více než v roce 2002. Úspěch dále pokračuje, v roce 2005 se očekává podíl dieselů ve výši cca 50% nově přihlášených vozidel. Zásluhu na tom má nová technologie vysokotlakého vstřikování paliva Common Rail. Systém Common Rail připravuje pro vstřikování pohonnou látku pro všechny válce ve společném zásobníku paliva (Rail) pod tlakem až 2200 bar [13]. Pro dalších 10 let, zůstane dieselový motor mezi všemi pohony nejlepším ve třídě jak při stupni účinnosti (počítáno od vývrtu až k hnacímu kolu) tak i u spotřeby a u vypouštění kysličníku uhelnatého. Mimo to je dieselové palivo mezi všemi známými a alternativními nosiči energie při manipulaci také v ruce technicky málo zběhlého řidiče s odstupem nejbezpečnější [14].

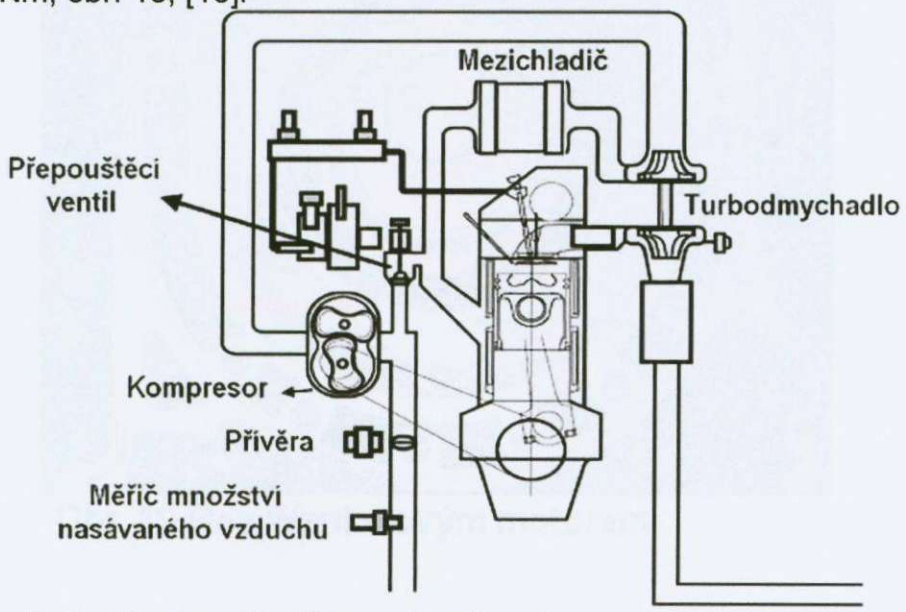
Konstrukce čtyřdobého vznětového motoru je podobná konstrukci motoru zážehového. Na rozdíl od zážehového je však robustnější, nepotřebuje zapalovací soustavu.

Pracovní fáze vznětového motoru jsou"

1. fáze - **sání** – píst se pohybuje směrem dolů, přes sací ventil je nasáván vzduch.
2. fáze – **komprese** – píst se pohybuje směrem vzhůru. Oba ventily jsou uzavřené. Nasátý vzduch zmenšuje svůj objem, v pracovním prostoru se zvětšuje tlak a teplota. Těsně před horní úvratí je do válce vstříknuto palivo.
3. fáze – **expanze** – oba ventily jsou uzavřené. Směs paliva a vzduchu zapálená samovzněcením hoří. V pracovním prostoru válce se prudce zvýší teplota i tlak vzniklých plynů. Ty expandují a během pohybu pístu směrem dolů konají práci.
4. fáze – **výfuk** – píst se pohybuje směrem vzhůru. Výfukový ventil je otevřený. Spaliny z pracovního prostoru válce jsou vytlačovány do výfukového potrubí.

Zážehové motory se též vyrábějí ve dvoutaktním provedení. Jedná se většinou o velké lodní motory a o motory používané v lokomotivách. Výjimkou však nejsou ani motory menších konstrukcí, používané v malých traktorech. Tyto motory bývají maloobjemového

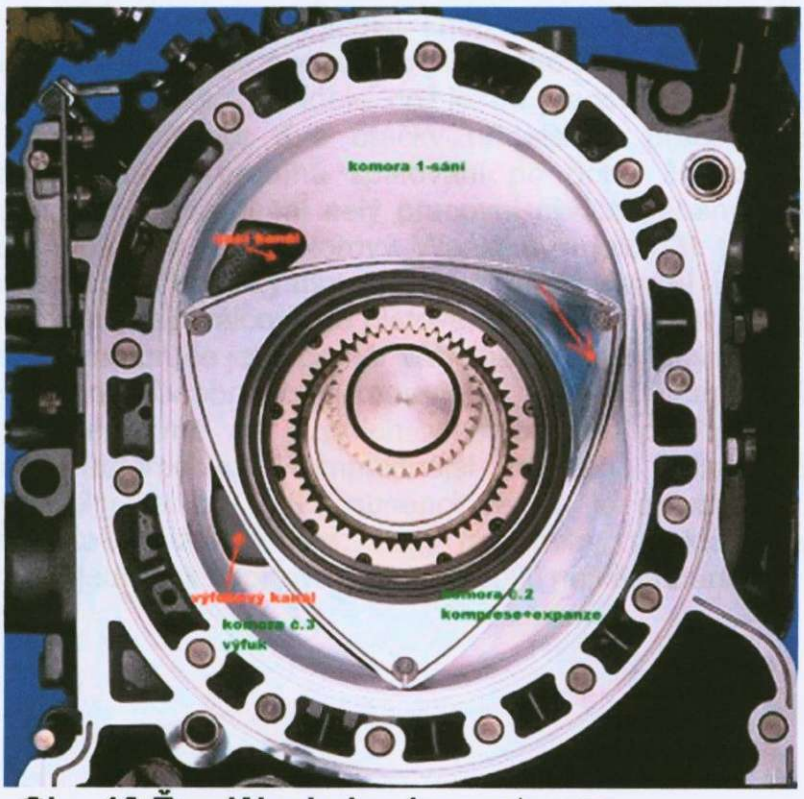
provedení a mívají většinou dva válce. Příkladem moderního řešení může být Japonská automobilka Daihatsu, která představila na letošním frankfurtském autosalónu studii dvoudobého turbodieselu [15]. Ta se zabývá především malými automobily, kde by se brzy mohly prosadit výhody léta používaného dvoutaktu. Jednoduchý princip práce tohoto uspořádání v posledních dvaceti letech nedokázal plnit přísné emisní požadavky, ale Daihatsu již léta pracuje na jeho renesanci. Tentokrát automobilka spojila dnes již neobvyklý dvoutaktní motor se spalováním nafty a dvoustupňovým přeplňováním. U prototypů se podařilo dosáhnout dobrého výsledku v oblasti produkce emisí, dosahovaných výkonů i spotřeby paliva. Významná je proti srovnatelným čtyřtaktním motorům redukce NOx a potenciál pro plnění normy Euro V. Nový motor s označením 2CDDI-II je vybaven vstřikováním nafty common-rail poslední generace. V sání je zařazen mechanický kompresor, poháněný řemenem od klikové hřídele, druhým stupněm je dmychadlo poháněné výfukovými plyny. Důležitou kvalitu spalování ovlivňuje elektronicky řízená recirkulace výfukových plynů (značná část spalin se vrací do sání), elektronicky ovládaný přepouštěcí ventil, vstřikování paliva a optimalizovaný tlak v sacím potrubí za všech otáček resp. optimalizovaný tvar přepouštěcího kanálu, který umožňuje kontrolovanou výměnu staré a nové náplně válce. Motor má dva ventily (v každém válci jeden), které obsluhují výfukovou stranu procesu. Motor má konvenční systém mazání (tedy netřeba míchat palivo s olejem), spotřebu oleje snižují tradiční pístní kroužky. Vyšší kulturu projevu dvouválci propůjčuje vyvažovací hřídel. Dvouválcový motor má zdvihový objem 1200 cm^3, nejvyšší výkon 65kW a točivý moment 230Nm, obr. 18, [16].



Obr. 18 Studie dvoudobého turbodieselu

1.2.2.4.3 Wankelův motor

Wankelův motor byl vynalezen v lednu roku 1957 Felixem Wankelem a znamenal revoluční změnu v konstrukci spalovacího motoru, která se přesto udála až půl století po tom, co vyjel první spalovacím motorem poháněný automobil. Vznikl ve snaze zvýšit účinnost spalovacích motorů. Přímočarý vratný pohyb pístu v klasickém spalovacím motoru sebou nese mnoho nevýhod a cestou ze začarovaného kruhu se měla stát konstrukce, která eliminuje klikový mechanismus, zásadně snižuje počet pohybujících se částí a je přitom kompaktnější než srovnatelné konvenční spalovací motory. Na svět přišel rotační pístový motor, [17]. V roce 1964 se objevil první sériový vůz vybavený Wankelovým motorem s nadějemi, že právě tento motor spotřebu paliva značně sníží. Ukázalo se však, že motor má své vlastní problémy. Před zánikem zachránila tento motor automobilka Mazda, která i přes veškeré problémy pokračovala s vývojem motoru a začala sériově vyrábět automobil osazený Wankelovým motorem.

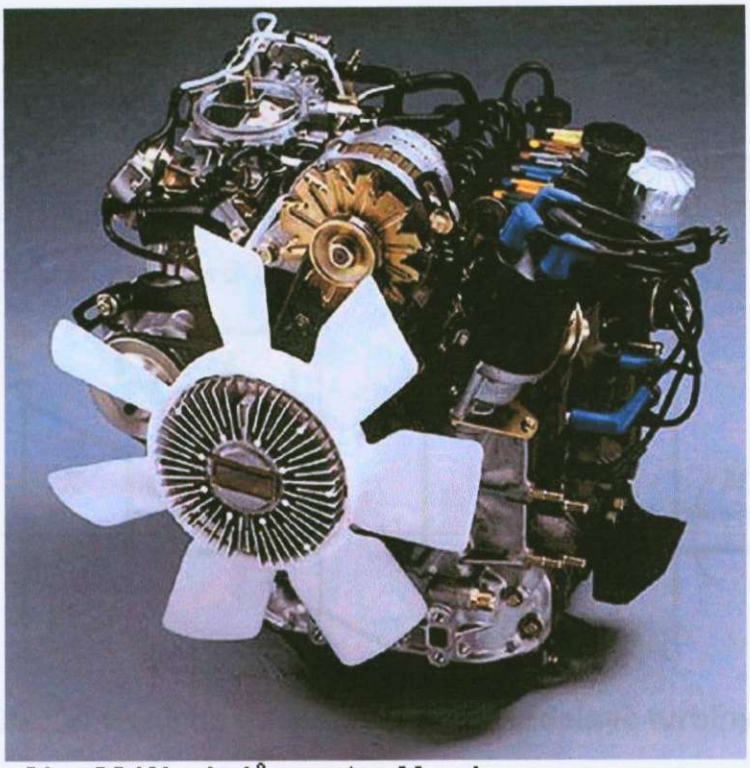


Obr. 19 Řez Wankelovým motorem

Vzhledem k tomu, že rotační motory neobsahují žádné vačky a ventily, je jejich konstrukce mechanicky jednodušší a tudíž i potencionálně spolehlivější, a zároveň se toto i pozitivně projevuje na charakteristice motoru. Všechny hlavní pohyblivé součásti motoru se narozdíl od klasických pístových motorů pohybují stále stejným směrem a všechny masy jsou dokonale vyvážené, tudíž jsou eliminovány veškeré vibrace.

Píst Wankelova motoru má průřez rovnostranného trojúhelníku se zakřivenými stranami a rotuje v pracovním prostoru oválného tvaru. Ve středu pístu je kruhový otvor, jehož vnitřní obvod je ozuben. Tento otáčivý píst rotuje hřídelí, která je uložena ve skříni. V komoře oválného tvaru se pohybuje trojúhelníkový zaoblený píst a koná dvojí pohyb, jednak se pohybuje po excentrické dráze a také se otáčí kolem vlastní osy, takže postupně vytváří prostor sací, kompresní, spalovací a výfukový. V klasickém pístovém motoru dojde k zapálení směsi a tudíž výrobě síly v každém válci jednou za dvě otáčky klikové hřídele. Zatímco u rotačního Wankelova motoru dojde k explozi směsi v každé komoře vždy při každé otáčce excentrické hřídele. Motor tak během jedné otáčky pístu vykoná cyklus čtyřdobého motoru, obr. 19.

Další výhoda je plynulejší chod. Je to dáno délkou průběhu spalovacího cyklu. U konvenčního pístového motoru probíhá spalování po dobu poloviny otáčky hřídele, což je 1/4 pracovního cyklu (pístový 4-taktní motor potřebuje dvě otáčky hřídele na pracovní cyklus), u Wankelova motoru probíhá spalování po dobu 3/4 otáčky hřídele (wankelův motor uskuteční celý pracovní cyklus během jedné otáčky hřídele). Proto má jednorotorový Wankelův motor 3x plynulejší chod než jednoválcový klasický motor. Dvourotorový wankel se tudíž kulturou chodu vyrovná šestiválcovému pístovému motoru! Další hlavní výhodou Wankelova motoru je jeho poměr váhy na produkovaný výkon. Klasický pístový motor obdobného výkonu je o 50 - 100 kg těžší, což se projevuje negativně na jízdních vlastnostech, popřípadě rozložení hmotnosti automobilu. Kompaktnější rozměry, příznivější průběh charakteristiky motoru (díky absenci ventilu je charakteristika velmi plochá) a také nižší vibrace. Tedy parametry, na které se klade u pohonných jednotek sportovních automobilů největší důraz.



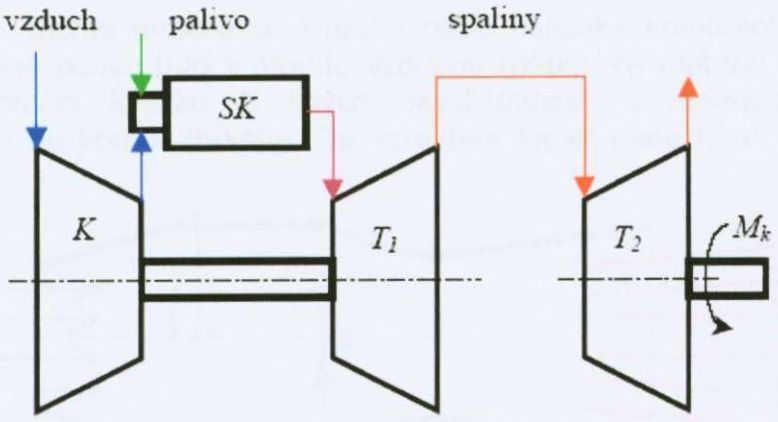
Obr. 20 Wankelův motor Mazda

Dříve tyto motory trpěly vysokou spotřebou benzínu i oleje a nízkou životností. Poslední generace rotačních motorů od Mazdy (zejména motory Renesis použité v RX-8, obr. 20) jsou však v těchto hodnotách již zcela srovnatelné se svou pístovou konkurencí. Jediný skutečný problém s rotorovými motory je, že většina mechaniků nemá tušení jak je opravovat, i když je několik vysoce kvalifikovaných "rotačních" techniků roztroušených po Spojených státech a ve světě. Kdyby ale byla spolehlivost takový problém, pak by Mazda neměla tolik úspěchů na různých závodních okruzích po celém světě [18].

Obzvláště diskutovaná u Wankelových motorů je otázka životnosti. Dříve měly tyto motory s životností opravdu problémy, ale hlavně díky intenzivnímu vývoji a výzkumu těchto motorů automobilkou Mazda, již dnes nejsou s životností žádné problémy. Důkazem toho je, že už před deseti lety dokázala Mazda vyhrát se závodním automobilem poháněným právě Wankelovým motorem na spolehlivost a výkon velice náročný závod 24 hodin v LeMans a celkově patří Mazda se svými rotačními motory k nejúspěšnějším týmům soutěže.

1.2.2.4.4 Spalovací turbína

Ve vozidlové spalovací turbíně se energie přivedená v palivu mění přes kinetickou energii proudu spalin na mechanickou práci. Pro pohon vozidel nejlépe vyhovuje dvou hřídelové uspořádání s volnou hnací turbínou, viz. obr. 21. Princip práce: po dosažení startovacích



Obr. 21 Schéma uspořádání dvouhřídelové turbíny

otáček, v okamžiku kdy již kompresor *K* dodává dostatečné množství vzduchu je soustavou trysek rozprášeno do spalovací komory *SK* palivo a současně jsou zapnuty zapalovací svíčky, které směs paliva se vzduchem zažehnou. Hoření směsi paliva se vzduchem probíhá ve spalovací komoře prakticky za konstantního tlaku. Spaliny jsou vedeny do rozváděcího ústrojí turbíny T_1, kde v důsledku expanze dochází k nárůstu rychlosti proudu plynů a současně je proud spalin vhodně usměrňován na lopatky rotoru turbíny T_1. Tato turbína je spojena hřídelí s kompresorem, který dodává do spalovací komory vzduch o tlaku, který zabezpečí průtok vzduchu a spalin spalovací komorou a turbínou.

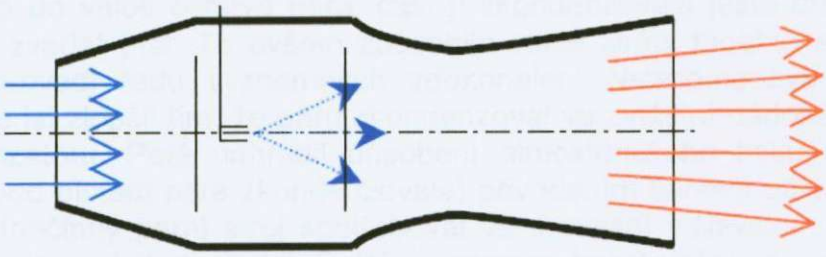
Je zřejmé, že při odběru výkonu pro pohon vozidla z hřídele turbíny T_1 bude docházet s nárůstem zatížení k poklesu otáček rotoru a tedy i otáček kompresoru, což povede ke snížení tlaku a množství vzduchu dodávaného do spalovací komory. Točivý moment vyvíjený turbínou poklesne.

Proto se používá dvou hřídelové uspořádání, výkon potřebný pro pohon vozidla je odbírán z hřídele samotné turbíny T_2. Turbína T_1 je dimenzována pouze pro pohon kompresoru a spaliny z jejího výstupu jsou vedeny na vstup turbíny T_2. Při nárůstu zatížení turbíny T_2 dochází taktéž k poklesu jejích otáček. Avšak otáčky turbíny T_1 se nemění a kompresor poháněný jen touto turbínou dodává do spalovací komory stále stejné množství vzduchu. Při stejném množství paliva dodávaného do spalovací komory je i energie přiváděná na lopatky turbíny T_2 stejná.

V důsledku snížení otáček rotoru turbíny T_2 se síla od proudu plynů působící na lopatky rotoru turbíny zvyšuje a tím roste i kroutící moment vyvíjený turbínou. Čím větší je pokles otáček, tím větší je i nárůst kroutícího momentu.

1.2.2.4.5 Raketový a proudový motor

U těchto motorů se v jedné nebo několika komorách spaluje kontinuálně palivo buď v proudu vzduchu (náporové motory), obr. 22, nebo pomocí kyslíku či jiných okysličovadel, přiváděných spolu s palivem do komor (rakety). Se vzrůstem teplot roste i tlak a měrný



Obr. 22 Schéma náporového motoru

objem spalin, které pak proudí ze spalovacích komor otevřenými tryskami velkou rychlostí z motoru ven. Reakce proudu spalin se využívá bezprostředně jako hnací síla k mechanické práci.

1.2.2.5 Motory s vnějším spalováním

U motorů s vnějším spalováním paliva nedochází ke spalování uvnitř pracovního prostoru válce, ale vně. Výhodou tohoto spalování je výrazná redukce škodlivin vzniklých při spalování a možnost použití obnovitelných zdrojů energie (biomasa). Nevýhodou je pomalejší reakce na požadavek změny otáček. Proto se tyto motory většinou používají jako stabilní motory např. pro pohon generátorů (dříve se používali hlavně pro pohon zemědělských strojů, jako centrální pohony v továrnách atd.). Nejstarším a vlastně prvním tepelným strojem, patřícím do této kategorie je parní stroj.

1.2.2.5.1 Parní stroj

Parní stroj je pístový tepelný stroj, přeměňující tepelnou energii vodní páry na energii mechanickou, nejčastěji rotační pohyb.

Proti současným tepelným strojům má velmi nízkou účinnost přeměny energie (maximálně 30 %). Spolu s kotlem, který má tepelnou účinnost okolo 50% je výsledná účinnost (podle typu stroje a kotle) mezi 5% - 15%. To je proti spalovacím motorům s běžně dosahovanou účinností okolo 35% nedostačující.

Vynález parního stroje je připisován Jamesi Wattovi v roce 1765. Ve skutečnosti Watt "pouze" významně zdokonalil stroje Thomasse Severyho a Thomase Newcomena, když byl v roce 1757 pověřen opravou Newcomenova „ohňového stroje" (tehdy mu bylo 21 let). Prostudoval si toto zařízení a pochopil, že příčinou jeho neefektivnosti je chladná voda vstřikovaná do válce, ta sice způsobila kondenzaci páry, ale zároveň ochladila i samotný válec. Když se pak v dalším cyklu přivedla do válce čerstvá pára, část jí zkondenzovala ještě dříve než začala zvedat píst. To ovšem způsobilo velké ztráty tepelné energie. Watt provedl řadu významných zdokonalení Newcomenova stroje. Nejprve jej zlepšil tím, že páru zkondenzoval ve zvláštní nádobě, v tzv. kondenzátoru. Poté nahradil působení atmosférického tlaku na píst (když pod pístem pára zkondenzovala) přivedením čerstvé páry. Tento tzv. jednočinný parní stroj spotřeboval ve srovnání s Newcomenovým strojem, jen asi čtvrtinu uhlí. Další významnou konstrukční úpravou bylo převedení přímočarého pohybu pístu na pohyb rotační. Použil k tomu planetové soukolí a aby v krajních polohách překonal „mrtvé body", opatřil svůj stroj setrvačníkem. V roce 1769 získal Watt pro tento svůj parní stroj patent. V průběhu druhé poloviny 18. století si pak Watt nechal patentovat řadu dalších vynálezů, které byly dále využity po celou éru parních strojů. Jmenujme například dvojčinný parní stroj, převod posuvného pohybu pístu na otáčivý, nebo Wattův odstředivý regulátor, [19].

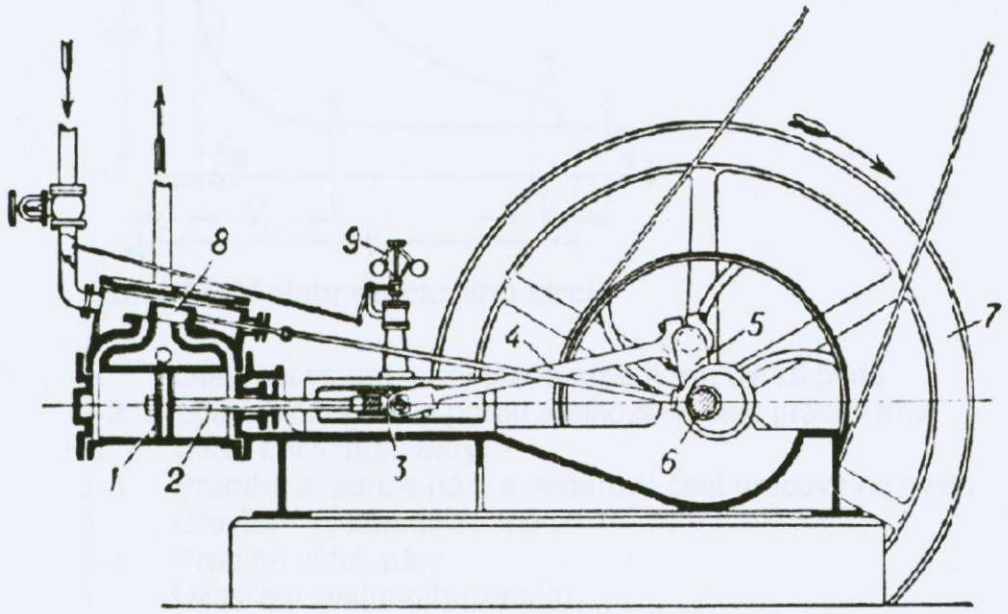
Watt též zavedl jednotku výkonu – horse-power (HP). Dnes používanou jednotku výkonu označujeme jeho jménem: watt (W). Anglická jednotka „horse-power" = 550 angl. librostop/s = 746 W. Kromě toho se používala jednotka výkonu „kůň" („koňská síla") = 75 kgm/s = 736 W, [20].

V 19. století se parní stroj stal nejvýznamnějším zdrojem energie jak v průmyslu, tak dopravě. Proto se tomuto století také říká století páry. Dopravě kralovaly vlaky tažené parními lokomotivami, vody brázdily parníky, průmyslové podniky měly stroje poháněné transmisemi od centrálního parního stroje, na polích se objevily parní oračky a parní mlátičky.

Ve 20. století význam parního stroje postupně upadá. Z dopravy byl vytlačen spalovacím motorem a z průmyslu elektrickými stroji a parní turbínou. Nejdéle sloužily těžní parní stroje, které v některých dolech vydržely až do devadesátých let 20. století. V současnosti je

možné se s provozem parních strojů setkat především u nostalgických jízd parních lokomotiv.

Na obr. 23 je řez jednoduchým stabilním parním strojem. Stabilní parní stroj je parní stroj umístěný na jednom místě, obvykle v budově či místnosti, zvané strojovna, s níž je pevně spojen. Pokud nemá jednu určitou funkci (například pohon generátoru), je jeho mechanická práce obvykle rozváděna do okolí transmisemi. Zachovalé funkční parní stroje tohoto typu je možno vidět v muzeích, vzniklých z původních provozů. V Čechách je to například v ekotechnickém muzeu v Praze - Bubenči (bývalá čistička odpadních vod), nebo v hornickém muzeu v Příbrami.



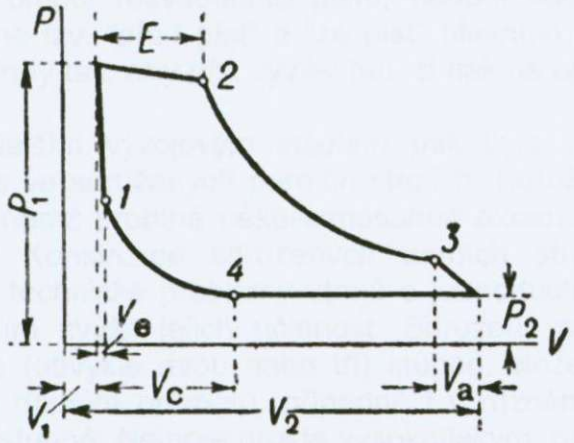
Obr. 23 Stabilní parní stroj

1. Píst
2. Pístní tyč
3. Křižák
4. Ojnice
5. Klika
6. Výstředník
7. Setrvačník
8. Šoupátko
9. Wattův odstředivý regulátor

Šipkami vlevo je ukázán směr toku páry, vpravo je vidět řemen poháněj ící transmisní hřídel. Na obrázku je také vidět, že u stroje s plochým šoupátkem je pára přiváděna nad šoupátko a do válce vedena vně výfukového kanálu. Je to nutné, aby bylo šoupátko přitlačováno ke dnu šoupátkové komory. Tato koncepce byla změněna až s nástupem pístových šoupátek.

Pára z kotle je přes regulátor vedena do šoupátkové komory a odtud je rozdělována do válce. Tam svým tlakem způsobuje pohyb pístu. Použitá pára je přes šoupátkovou komoru vypouštěna ven. Posuvný pohyb pístu je přes pístní tyč, křižák a ojnici přenášen na kliku, která posuvný pohyb převádí na rotační.

P-V diagram popisuje práci tepelného stroje v Carnotově cyklu.



Obr. 24 P-V diabram parního stroje

1. Otevření vstupu páry těsně před horní úvratí pístu
1-2. Probíhá plnění válce párou a plnotlaká část práce stroje
2. Uzavření vstupu páry
2-3 Probíhá expanze páry a expanzní část pracovního cyklu
3. Otevření výstupního kanálu
3-4 Probíhá výfuk páry
4. Uzavření výstupního kanálu
4-1 Probíhá částečná komprese zbytku páry ve válci

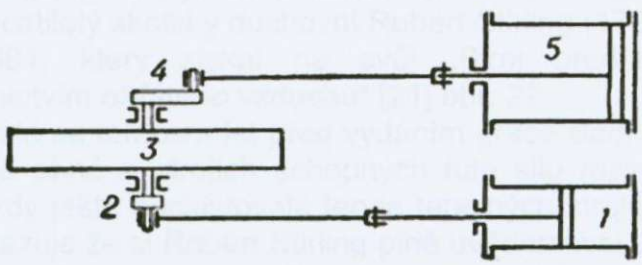
P - Osa tlaku ve válci
V - Osa objemu válce nad pístem
P1 - Tlak vstupující páry
P2 - Tlak vystupující páry
V1 - Objem válce s pístem v horní úvrati
V2 - Objem válce s pístem v dolní úvrati
Ve - Předstih (jako objem zbývající do horní úvrati)
E - Plnění (jako objem) plnící procenta jsou E/V2*100
Va - Předstih otevření výstupního kanálu
Vc - Přesdstih uzavření výstupního kanálu

Pokud je pára přiváděna do válce po celou dobu pohybu pístu, mluvíme o plnotlakém parním stroji. Takové byly především první parní stroje. Pokud je pára vpouštěna jen po část pohybu pístu, mluvíme o

expanzních strojích. Poměr mezi celkovým objemem válce a objemem v okamžiku uzavření přívodu páry se nazývá plněním. Obvyklá plnění se pohybují mezi 100% (plnotlaké stroje) a zhruba 10-20%. Využití expanze páry umožnilo několikanásobně zvýšit účinnost parního stroje.

Dalšího zvýšení účinnosti bylo dosaženo konstrukcí tzv. dvojčinného parního stroje, u něhož pára koná práci na obou stranách pístu. Pomocí rozváděcího pístu, nebo-li šoupátka, je tlaková pára přiváděna tzv. "před píst" a "za píst" hlavního pracovního válce podle jeho polohy tak, aby píst vyvíjel tah, či tlak na ojnici při pohybu dopředu i zpět.

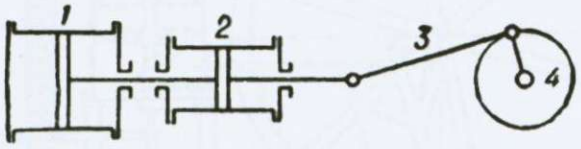
Dalším vývojovým stádiem pak bylo využití několikanásobné expanze ve sdružených parních strojích. Sdružený parní stroj je parní stroj, v němž probíhá několikanásobná expanze páry v samostatných válcích. Konstrukce sdružených parních strojů umožnila odstranit některé technické problémy strojů s jednoduchou expanzí páry, a tak především zvýšit jejich účinnost. Sdružený parní stroj se skládá z několika (obvykle dvou nebo tří) stupňů, složených ze samostatných válců o různém průměru, případně i v různém počtu. Těmi prochází pára postupně. Nejprve projde vysokotlakým, poté středotlakým (pokud jsou stupně tři) a nakonec nízkotlakým válcem. V každém válci odevzdá pára jen část své energie. Protože dochází jen k částečné expanzi, není ve válcích tak velký rozdíl mezi teplotou stěn válce a páry, a tím dochází k nižším tepelným ztrátám. Rozdíly tlaků páry na obou stranách pístů jsou také menší, a tím dochází k menším ztrátám průchodem kolem pístních kroužků. Mezi jednotlivými stupni může být pára znovu ohřáta v regenerátoru páry, a tak zvětšen její objem pro stupně s nižším tlakem. Tím se opět zvýší účinnost soustavy kotel-stroj. Největší část tepelné energie je totiž třeba k prvotnímu vyvaření vody, dodatečné zvýšení teploty páry vyžaduje už jen řádově nižší energii.



Obr. 25 Schéma sdruženého parního stroje

1. Vysokotlaký válec
2. Klika vysokotlakého válce
3. Setrvačník
4. Klika nízkotlakého válce
5. Nízkotlaký válec

Dalším typem je sdružený parní stroj v tandemovém uspořádání.Tento typ parního stroje se využíval především u stabilních parních strojů, kde bylo možno montovat velký setrvačník, který vyrovnal nepravidelnosti jeho chodu. Proti sdruženému parnímu stroji uvedenému výše byl tento stroj konstrukčně jednodušší a proto i levnější.



Obr.26 Sdružený parní stroj - tandemové uspořádání

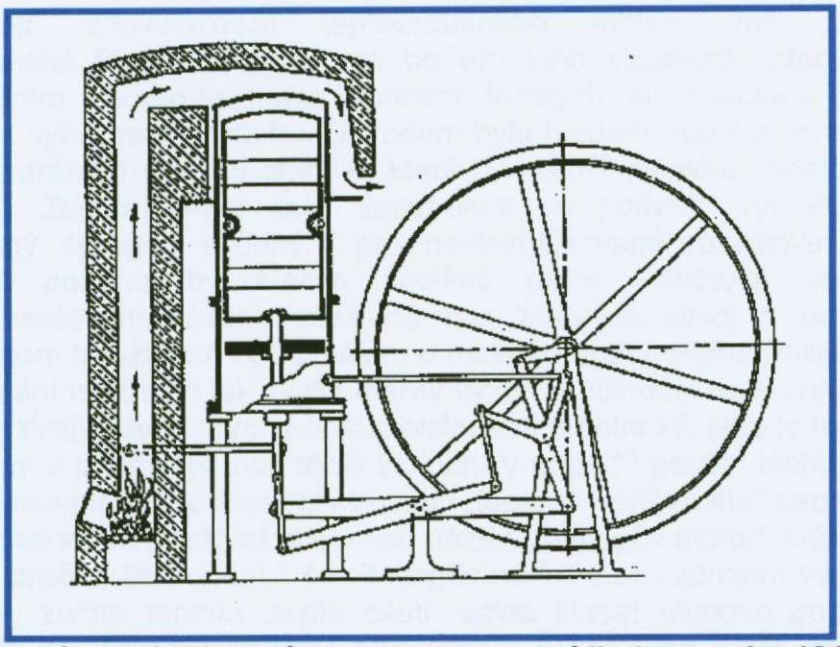
1. Nízkotlaký válec
2. Vysokotlaký válec
3. Ojnice
4. Setrvačník

Sdružené parní stroje se využívaly od konce 19. století do druhé poloviny 20. století ve všech oblastech dopravy i průmyslu. Jen namátkou: Byly jimi vybaveny parníky (například Titanic), průmyslové podniky (pražská čistička odpadních vod) a malá část lokomotiv (mimo jiné i matettova konstrukce, dodnes je ji možno spatřit u lokomotivy U47.001 na Jindřichohradecké úzkokolejce).

1.2.2.5.2 Stirlingův motor

Princip činnosti teplovzdušného motoru, jak byl původně Stirlingův motor nazýván, je znám od roku 1816. Popsal jej tehdy šestadvacetiletý skotský duchovní Robert Stirling (1790-1878) v patentu číslo 4081, který získal na svůj „Stroj produkující hnací sílu prostřednictvím ohřátého vzduchu" [21] obr. 27.

Stalo se tak osm let před vydáním práce Sadi Carnota „Úvahy o hnací síle ohně a strojích schopných tuto sílu rozvíjet". Bylo to tedy v době, kdy ještě neexistovala teorie tepelných strojů. Stirlingův patent však dokazuje,že si Robert Stirling plně uvědomoval všechny podmínky nezbytné k efektivní přeměně tepla v mechanickou práci, které později formuloval Sadi Carnot, a našel způsob jak je prakticky využít.



Obr. 27. Původní Stirlingův motor z patentní listiny z roku 1816

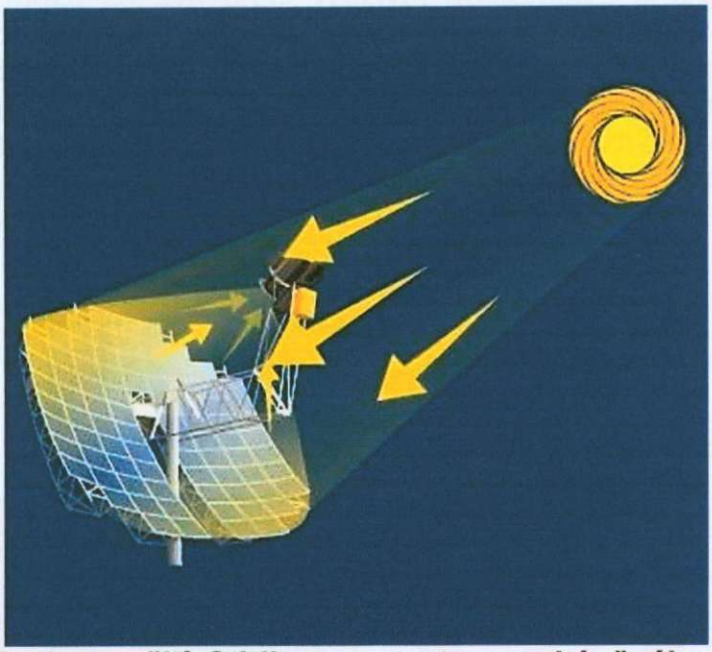
V letech 1827 a 1840 obdržel Robert Stirling ještě dva patenty (č. 5456 a 8652) na zdokonalené varianty svého stroje. V následujících letech pracovaly teplovzdušné motory vcelku spolehlivě v různých oblastech lidské činnosti. Ve srovnání s parními stroji vynikaly svojí bezpečností v provozu. Nepotřebovali, na rozdíl od parních strojů, žádnou tlakovou nádobu, která by hrozila výbuchem a podléhala revizím. Dále měli oproti parnímu stroji ještě několik výhod. Nemuseli se zdlouhavě roztápět jako parní stroj. Nevyžadovali obsluhu se státní zkouškou. Pracovali tiše a s výrazně menší spotřebou oleje než parní stroj. Neměli choulostivé rozvody a obtížně vyrobitelné součásti. Měli velmi malé opotřebení a pracovní válec nekorodoval. Všechny tyto vlastnosti je předurčily jako hnací motory všude tam, kde byl parní stroj příliš drahý, choulostivý, náročný na údržbu, provoz a obsluhu [22]. Další jejich vývoj byl však znemožněn a tak byly na počátku 20.století v důsledku rozvoje nejprve zážehových a později vznětových motorů zatlačeny do ústraní a posléze zcela zapomenuty. Svojí nízkou účinností a malým měrným výkonem jim nemohly konkurovat.

Příčiny neúspěchu původních teplovzdušných motorů jsou dnes dobře známy: chybějící žárupevné materiály, malá propracovanost konstrukce a nedostatečné představy veřejnosti o potenciálních možnostech motoru. Sám Robert Stirling v roce 1876 napsal: „...nedostatky v konstrukci motoru budou časem odstraněny díky Bessemerovu vynálezu. Kdyby byla známa Bessemerova litina a ocel před třiceti, čtyřiceti lety, sotva by dnes přetrvávali pochybnosti o tom, že teplovzdušný motor bude velmi úspěšný...".

Na znovuzrození teplovzdušného motoru má zásluhu nizozemská firma Philips, která ho pro jeho vlastnosti odpovídající obchodním záměrům firmy, koncem třicátých let minulého století, doslova vyhrabala z prachu. Důvodem bylo hledání malého generátoru pro bezdrátové vysílací stanice, který by nerušil vysílání zapalováním motoru. Zdokonalením celé konstrukce se podařilo vytvořit malý přenosný agregát, vhodný i pro neelektrifikované rozvojové země, k jehož pohonu by stačilo jakékoli palivo. Světová válka a vybombardování závodu však na čas zastavilo vývoj a po válce s rozvojem tranzistorů opadl zájem o malé agregáty. Firma Philips však při hledání možností jak zvýšit měrný výkon a účinnost teplovzdušného motoru zjistila, že plyny s menší molekulární hmotností, jako je helium a vodík, jsou příznivější než těžší vzduch. V případě použití těchto plynů jako pracovního média se stává název „teplovzdušný motor" nepřesným a proto se začal používat obecnější název „Stirlingův motor". Dále firma Philips zjistila, že pohání-li se Stirlingův motor cizím zdrojem ve směru otáčení, začne teplota „teplé části" válce klesat hluboko pod nulu. Dosáhlo se dokonce teploty 12K tedy –231°C, což stačí nejen ke zkapalnění vzduchu, ale i vodíku (bod varu vodíku je 20,4K bod tání je 14,2K [23]). Začalo se proto vyrábět chladící zařízení na tomto principu [24].

Rychlý rozvoj technologie výroby materiálů, který nastal v padesátých letech 20.století, otevřel nové perspektivy i pro Stirlingův motor. Avšak největší zájem o něj vyvolala až energetická krize v sedmdesátých letech 20.století. Když začaly ceny paliva intenzivně růst, stala se jeho schopnost, hospodárně využívat kapalné uhlovodíkové palivo, zvláště přitažlivá. Jakmile vývoj naznačil, že by Stirlingův motor mohl být vhodný i pro pohon motorových vozidel, připojily se k firmě Philips další zájemci. Renomované automobilky vložily mnohamiliónové prostředky do výzkumných a vývojových prací, které přivedli Stirlingův motor k vysokém stupni dokonalosti.

Stirlingův motor však nesplnil očekávání výrobců automobilů. Je těžší, rozměrnější a dražší v sériové výrobě ve srovnání s motory používanými pro pohon současných motorových vozidel. Na druhé straně však nad jiné motory vyniká svými mimořádnými přednostmi a potenciálními možnostmi, které lze v budoucnu ještě dále rozvíjet. Moderní Stirlingův motor se vyznačuje vysokou efektivitou využití přiváděného tepla, vysokou hospodárností a provozní spolehlivostí, nižší úrovní hluku a vibrací a nižšími emisemi škodlivin ve výfukových plynech (pokud se přiváděné teplo získává spalováním), které jsou hluboko pod normou požadovaným limitem. Ale hlavně a především, vzhledem k vnějšímu přívodu tepla, může pracovat prakticky s libovolným zdrojem tepla. Může ke své práci využívat obnovitelné zdroje energie jako je sluneční energie obr. 28 [25].



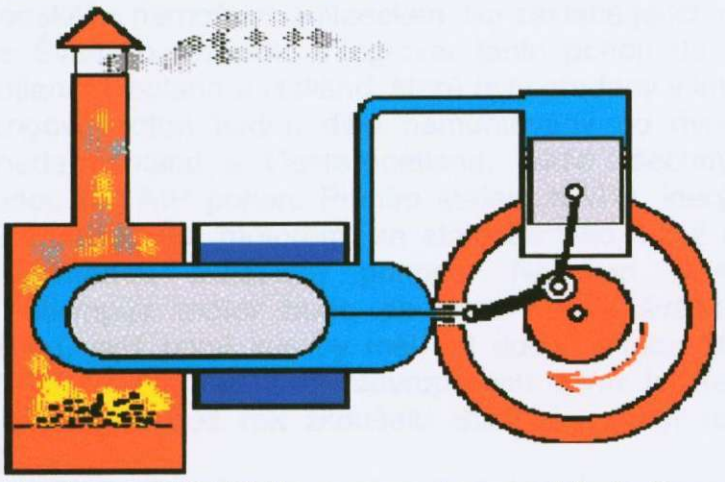
Obr. 28. Princip využití Stirlingova motoru poháněného sluneční energií

Některé země na světě již tento způsob získávání sluneční energie prakticky využívají. Příkladem mohou být Sandia National laboratoře v Albuquuerqu v Novém Mexiku v USA obr. 29 [26], [32].



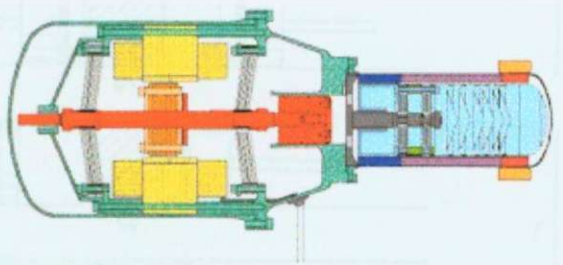
Obr. 29 Solární parabolická zrcadla v jejichž ohnisku je umístěn Stirlingův motor o výkonu 25 kW

Dále může ke své práci využívat geotermální energii, energii získanou spalováním biomasy. V neposlední řadě dokáže efektivně využívat i odpadní teplo, které jiné motory využít nejsou schopny. Proto je mimořádně vhodný pro hospodárné stacionární kogenerační jednotky na výrobu tepla a elektřiny nebo na další využití zbytkové energie unikající do komínů při spalování obr. 30. Elektrická účinnost těchto motorů se pohybuje v rozpětí 25 až 33%, což je účinnost u motorů o výkonu 1 až 25 kW velmi dobrá, [27].



Obr. 30. Princip využití Stirlingova motoru poháněného zbytkovým teplem

Ojedinělé vlastnosti a schopnosti Stirlingova motoru ho předurčují i ke zcela mimořádnému využití. Ve vyspělých státech světa podobné výzkumy probíhají a jsou podporovány. V rámci těchto iniciativ byl zkonstruován i Stirlingův motor, který několik let spolehlivě a zcela bez údržby pracoval v kosmickém prostoru, viz.obr. 31.

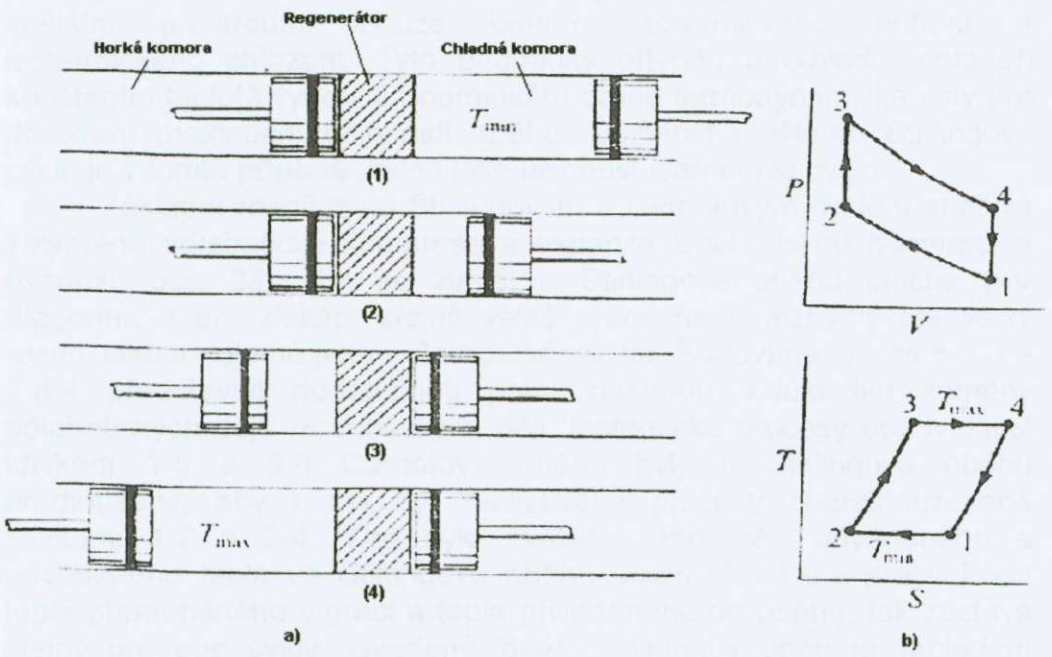


Obr. 31. Princip Stirlingova motoru používaného NASA

Zajímavý až neuvěřitelný je záměr použít Stirlingův motor pro pohon umělého srdce. Přitažlivé je využití Stirlingova motoru s tepelným akumulátorem, kdy motor nepotřebuje ke své činnosti vzduch a neprodukuje žádné výfukové plyny. Taková energetická jednotka je asi čtyřikrát lehčí než srovnatelný systém elektromotoru s elektrickými

akumulátory. Příkladem takovéhoto využití Stirlingova motoru jsou tak zvané „na vzduchu nezávislé (AIP, Air Independent Propulsion)" pohony ponorek. Švédské loděnice Kockums AB pracovali na ponorkovém AIP pohonu už od 60.let. pracovním médiem Stirlingova motoru je inertní plyn (např. hélium), který je teplem ohříván, takže se rozpíná a koná práci, kterou lze generátorem měnit v elektřinu. První takto poháněnou ponorkou bylo francouzské vědecké plavidlo Saga z poloviny 80.let a v roce 1988 byl Stirlingův motor instalován do ponorky švédského námořnictva Naecken. Na základě jejích úspěšných zkoušek se Švédsko rozhodlo integrovat tento pohon do tří nových ponorek Gotland, Uppland a Halland, které byly předány v letech 1996-1997. Stirlingovi motori budou dále namontovány do dvou starších plavidel Soedermanland a Oestergoetland, takže všechny švédské ponorky budou mít AIP pohon. Prvním státem NATO, který si pořídil ponorku se Stirlingovým motorem, se stalo Dánsko, když roku 2001 zakoupilo zmíněnou švédskou ponorku Naecken (nové jméno Kronborg). Stirlingův motor bude použit i v nové švédsko-dánské ponorce Viking, jejíž první kus by měl být dodán v roce 2009 (více v ATM 7/2003 na str. 3). Z mimoevropských zemí je třeba zmínit japonsko, které více než rok zkoušelo Stirlingův motor na ponorce Asašio [28].

Ideální Stirlingův oběh je tvořen čtyřmi termodynamickými ději, dvěma izotermickými a dvěma izochorickými. Situaci ilustruje obr. 32,



Obr. 32. Ideální Stirlingův oběh: a) teoretický pohyb pístů, b) p-V a T-s diagramy

na kterém je zobrazen válec se dvěma písty, mezi kterými je umístěn regenerátor. Regenerátor pracuje jako ideální akumulátor tepla, tj. jako zařízení, které je schopno od pracovního plynu jeho teplo nejprve převzí, a později mu ho beze ztrát vrátit. Válec nalevo od regenerátoru je nepřetržitě ohříván, proto v něm má pracovní plyn vysokou teplot T_{max}. Pravý válec je nepřetržitě ochlazován a pracovní plyn v něm má nízkou teplotu T_{min}. Jednotlivé děje lze sledovat také v p-V a T-s diagramech. Mezi uvedenými body probíhá:

1-2 izotermická komprese, levý píst stojí na místě, pravý při konstantní teplotě T_{min} zmenšuje objem plynu na hodnotu V_{min}, tlak plynu přitom roste;

2-3 izochorický ohřev, oba písty se pohybují tak, že se velikost objemu V_{min} nemění, plyn prochází regenerátorem, který mu vrací dříve uložené teplo, a je ohříván na teplotu T_{max}, tlak plynu dosahuje hodnoty p_{max};

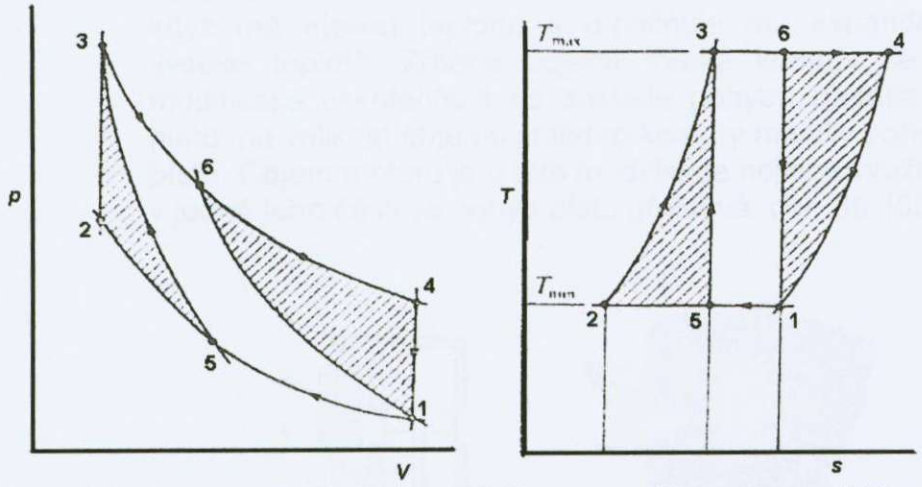
3-4 izotermická expanze, pravý píst stojí na místě, plyn se v horké komoře při stálé teplotě T_{max} rozpíná a zvětšuje svůj objem na hodnotu V_{max}, tlak klesá;

4-1 izochorické chlazení, oba písty se pohybují tak, že se velikost objemu V_{max} nemění, plyn prochází regenerátorem, ve kterém ukládá své teplo a je ochlazován na teplotu T_{min}, tlak klesá na hodnotu p_{min}.

Jestliže se množství tepla uložené v regenerátoru při cestě plynu z horké do chladné komory, v ideálním případě beze zbytku vrací při jeho zpáteční cestě, pak se realizuje výměna tepla mezi motorem a vnějším prostředím pouze během izotermického ohřevu a izotermického chlazení. Tyto podmínky přívodu a odvodu tepla při konstantní teplotě vyhovují podmínkám druhé termodynamické věty pro dosažení maximální účinnosti oběhu. Účinnost ideálního Stirlingova cyklu je v tomto případě stejná jako účinnost Carnotova cyklu.

Základní rozdíl mezi Stirlingovým a Carnotovým cyklem spočívá v záměně adiabatické komprese a expanze izochorickou kompresí a expanzí, obr. 33. Tím se zvětší u Stirlingova oběhu plocha p-V diagramu a pro získání stejně velké práce není nezbytný tak velký rozdíl tlaků a objemů jako v Carnotově oběhu. Šrafované plochy 5-2-3 a 1-6-4 představují dodatečnou práci získanou v důsledku záměny adiabatických dějů izochorickými ději. Izotemické procesy odpovídající křivkám 1-5 a 3-6 Carnotova oběhu byly u Stirlingova oběhu prodlouženy, aby mohli být realizovány procesy charakterizované křivkami 1-2 a 3-4. Tím bylo zvětšeno množství přiváděného a odváděného tepla ve Stirlingově oběhu úměrně získané práci. Podíl tepla přeměněného v práci a tepla přivedeného do oběhu, tak zůstává stejný pro obe cykly. Uvedený ideální Stirlingův oběh je vzhledem k příliš idealizovaným předpokladům, podobně jako jiné ideální cykly

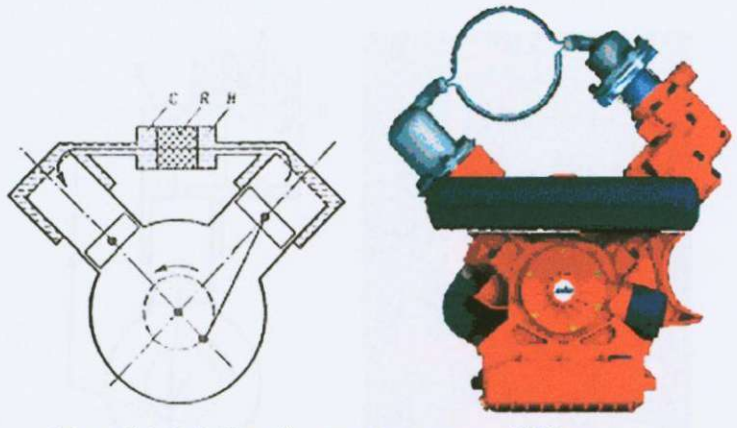
prakticky neuskutečnitelný. Nicméně je možné ho realizovat s poměrně vysokým stupněm přiblížení.



Obr. 33. Porovnání ideálního Stirlingova a Carnotova oběhu

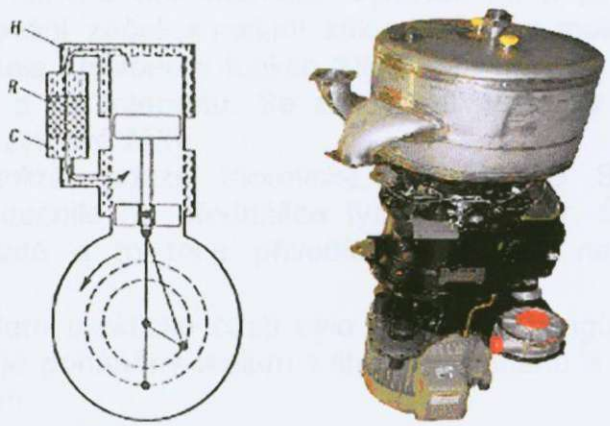
Stirlingův motor se vyznačuje velkým množstvím konstrukčních variant, které bývají členěny podle různých hledisek. V zásadě lze však každé konstrukční uspořádání zařadit do některé ze tří modifikací [29]. Tato klasifikace umožňuje dostatečně přesně definovat zvláštnosti jednotlivých typů motorů bez nutnosti podrobně zkoumat detaily konstrukce:

a) mezi motory α-modifikace patří motory, jejichž pracovní objem je rozdělen do dvou válců. V jednom z nich je horká, v druhém studená komora. Regenerátor se nachází mezi těmito válci obr. 34, [32].



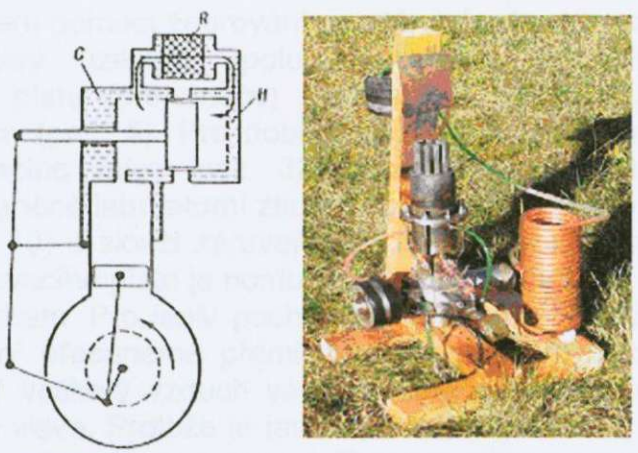
Obr. 34 Stirlingův motor α-modifikace
C – chladič, R- regenerátor, H - ohřívač

b) motory β-modifikace mají jeden válec a dva písty. Přemísťovací píst slouží k nucenému pohybu pracovního plynu mezi horkou a chladnou komorou a tím k jeho střídavému ohřevu a ochlazování. Pracovní píst stlačuje plyn, když má nízkou teplotu, a umožňuje mu expandovat při vysoké teplotě. Změna objemu horké komory se u této modifikace uskutečňuje na základě pohybu přemísťovacího pístu, na velikost objemu chladné komory má vliv pohyb obou pístů. Objem motoru je u této modifikace nejlépe využit, neboť v jedné jeho části se pohyb pístů překrývá, obr. 35, [33].



Obr. 35 Stirlingův motor β-modifikace

c) motory γ-modifikace mají také dva písty, přemísťovací a pracovní, ale každý z nich se pohybuje ve svém vlastním válci. Chladná komora je rozdělena do dvou válců a proto je její minimální objem vždy větší než nula, obr. 36, [34].



Obr. 36 Stirlingův motor γ-modifikace

2. Praktická část

2.1 Úvod

Kdy a jak jsem se setkal se Stirlingovým motorem? Poprvé se tak stalo v roce 2000, když k nám na učiliště ve firmě Robert Bosch v Českých Budějovicích přijeli na návštěvu naši kolegové z partnerského učiliště závodu Robert Bosch v Eisenachu a přivezli nám funkční model Stirlingova motoru. Tento model sestavili ze zakoupených dílů a podle dokumentace firmy Eichleitner GmbH. Stirlingův motor mě moc zaujal a tak jsem požádal naše kolegy, zdali by nám poskytli výkresovou dokumentaci. Vyhověli mi a jsme v rámci praktického vyučování začali s našimi žáky Stirlingův motor vyrábět. Jelikož mne zajímala i historie a funkce Stirlingova motoru, začal jsem pátrat v literatuře a na internetu. Se získanými poznatky jsem také seznamoval naše zvídavé žáky.

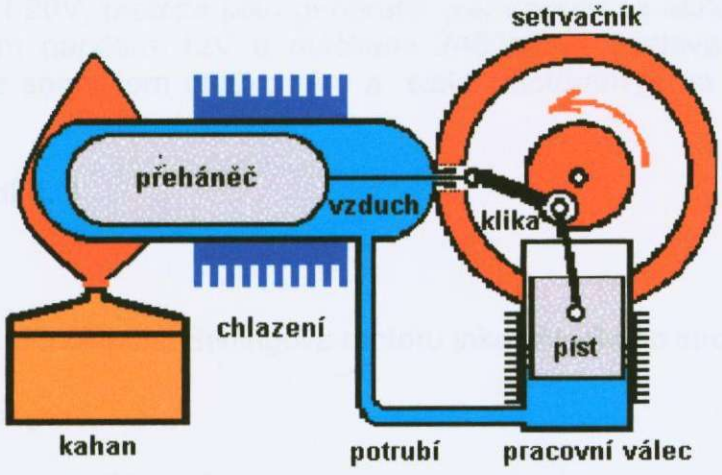
Další, tentokrát pouze teoretické, setkání se Stirlingovým motorem se uskutečnilo na přednášce fyziky p. RNDr. Špuláka na Jihočeské univerzitě a to mne přivedlo k myšlence napsání této bakalářské práce.

Hlavním cílem praktické části bylo sestrojit Stirlingův motor γ-modifikace, který je poháněný teplem z lihového kahanu a provést na něm několik měření.

2.2 Sestrojení Stirlingova motoru

Stirlingův motor jsem vyrobil dle technické dokumentace, která je součástí přílohy (list I – XVI). Vlastní Stirlingův motor před sestavením je na fotografii č. 1 (příloha fotogalerie) a po sestavení je na fotografii č. 2. Jak již bylo uvedeno výše, jedná se o Stirlingův motor γ-modifikace, který je plněn vzduchem o atmosférickém tlaku (při 20°C), chlazený okolním vzduchem pomocí žebrování na stěnách přemisťovacího válce (pozice 6), který uzavírá, spolu s vodítkem (poz. 8), prostor přemisťovacího pístu (přeháněče) (poz. 10 a 33) a dále stěnami pracovního válce (poz. 5). Pro dobrou názornost chodu motoru jsou část přemisťovacího válce (poz. 32) a přemisťovací píst (poz. 33) vyrobeny ze skleněné laboratorní zkumavky. Část přemisťovacího pístu je kovová (poz. 10) a slouží zároveň jako regenerátor energie. Vnitřní prostor přemisťovacího pístu je pomocí duté pístní tyče (poz. 11) spojen s okolním vzduchem. Pro lepší pochopení konstrukce zároveň popíši i jeho funkci. Nyní přesuneme přemisťovací píst uvnitř válce směrem doprava. Téměř veškerý vzduch ve válci obteče přemisťovací píst a nashromáždí se vlevo. Protože je tato část válce vyhřívána, ohřeje se i vzduch. Vzduch má snahu se rozpínat. Tím se zvýší jeho tlak. Vzduch o

tomto vyšším tlaku je díly tvořícími potrubí (poz. 2, 3, 26, 30) veden do pracovního válce, kde tlačí na pracovní píst (poz. 21) a přes klikový mechanismus (poz. 14, 17, 17, 22, 23) roztáčí setrvačník (poz. 15). Tím koná práci. Jenže na stejnou kliku je napojena ojnice pohybující přemisťovacím pístem. Ještě dříve, než píst pracovního válce dokončí zdvih a ocitne se v horní úvrati, přesune se přemisťovací píst v ležatém válci vlevo. Tím odtud vytlačí horký vzduch. Ten obteče přemisťovací píst doprava do studené části válce. Tam se ochladí, jeho tlak výrazně poklesne i pod úroveň okolního atmosférického tlaku. V celém válci nastane podtlak. Podtlak se potrubím přenese i do pracovního válce a „nacucne" píst zpět do válce. Tím se ovšem opět koná práce a roztáčí setrvačník. Jeden pracovní cyklus je dokončen. Setrvačník se však otáčí dál a přesouvá přemisťovací píst opět doprava. Tím se studený vzduch dostává opět vlevo do ohřáté komory, ohřeje se a zvýší svůj tlak. To se stále periodicky opakuje a motor se trvale otáčí, obr. 37.



Obr. 37. Stirlingův motor – principielní schéma

Technické údaje motoru:

Průměr pracovního válce	13	mm
Zdvih pracovního pístu	10	mm
Zdvihový objem pracovního válce	1768	mm^3
Průměr přemisťovacího válce	16,5	mm
Zdvih přemisťovacího pístu	10	mm

Dále jsem vyrobil přídavné zařízení na měření otáček Stirlingova motoru, jež je namontováno přímo na osu setrvačníku. Jako čidlo jsem použil optický snímač SHARP GP1A71R, technický popis snímače je součástí přílohy (list XX – XXVI). Sestavení a uchycení snímače je na

fotografii č. 3. Vyhodnocení a vlastní čítání impulsů je realizováno otáčkoměrem sestavením dle schématu uvedeného v příloze (list XXVII – XXIX). Sestava otáčkoměru je na fotografii č. 4. V zapojení jsem upravil frekvenci časové základny. Důvodem úpravy byl předpoklad, že otáčky Stirlingova motoru se budou pohybovat v rozmezí 0 – 1200min^{-1} a počet zobrazených číslic na modulu je tři. Z tohoto vyplynulo, že otáčkoměr měří s přesností na desítky otáček za minutu. Dalším důvodem pro tuto úpravu bylo čidlo, které má 120 impulsů na otáčku. Zvolil jsem dobu načítání impulsů na 0,05s, střídu 1:1, z toho vyplývá frekvence časové základny 20Hz.

Dalším zařízením připojeným ke Stirlingovu motoru je stejnosměrný elektromotor. Tento elektromotor slouží k pohonu Stirlingova motoru v zapojení jako chladící stroj, nebo slouží jako generátor stejnosměrného napětí. Napětí z tohoto generátoru měřím pomocí digitálního panelového voltmetru sestaveného dle schématu uvedeného v příloze (list XXX – XXXI), fotografie č. 5. Měřící rozsah jsem zvolil 20V, protože jako generátor jsem použil ss elektromotor se jmenovitým napětím 12V a otáčkami 2400min^{-1}. Sestava Stirlingova motoru se snímačem otáčkoměru a elektromotorem je na fotografii č. 6.

2.3 Měření č. 1

Úkol:

Studium činnosti Stirlingova motoru jako chladícího stroje.

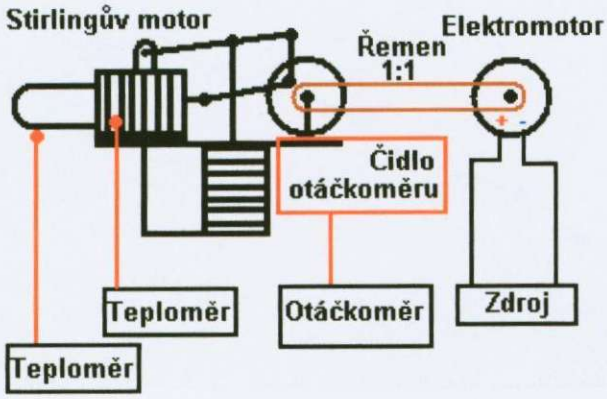
Pomůcky:

Soustrojí Stirlingův motor ve spojení se stejnosměrným elektromotorem
Otáčkoměr
Teploměr Termo timer
Multimetr METEX M3650M ve spojení s termočlánkovou sondou

Postup měření:

Před započetím měření je nejprve třeba nastavit řemenový převod mezi Stirlingovým motorem a elektromotorem na převod 1:1 a řemen napnout. Dále je třeba umístit teplotní sondu multimetru na přemisťovací válec (poz. 32) a na multimetu nastavit měření teploty. Teplotní sondu teploměru Termo timer jsem umístil na žebrování přemisťovacího válce (poz. 6). Propojil jsem čidlo otáčkoměru s jeho vstupem a připojil jsem napájecí napětí, obr. 38. Poté jsem připojil

elektromotor k napájecímu napětí, zkontroloval směr otáčení a spustil měření času, fotografie č. 7. Po 5 minutách jsem odečítal otáčky motoru, teplotu na skleněném přemisťovacím válci a teplotu okolí.



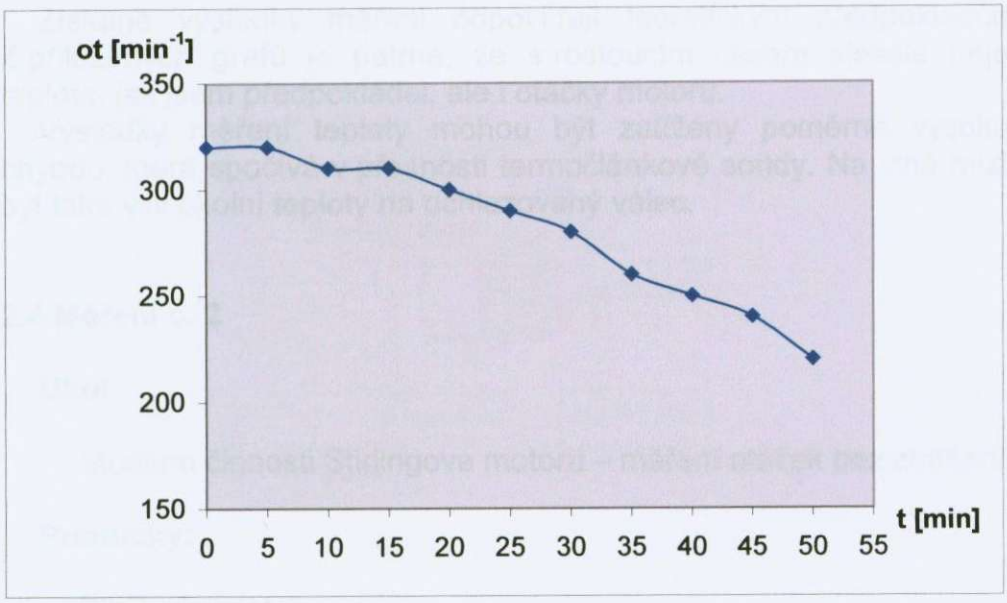
Obr. 38 Blokové schéma zapojení

Naměřené a vypočtené hodnoty:

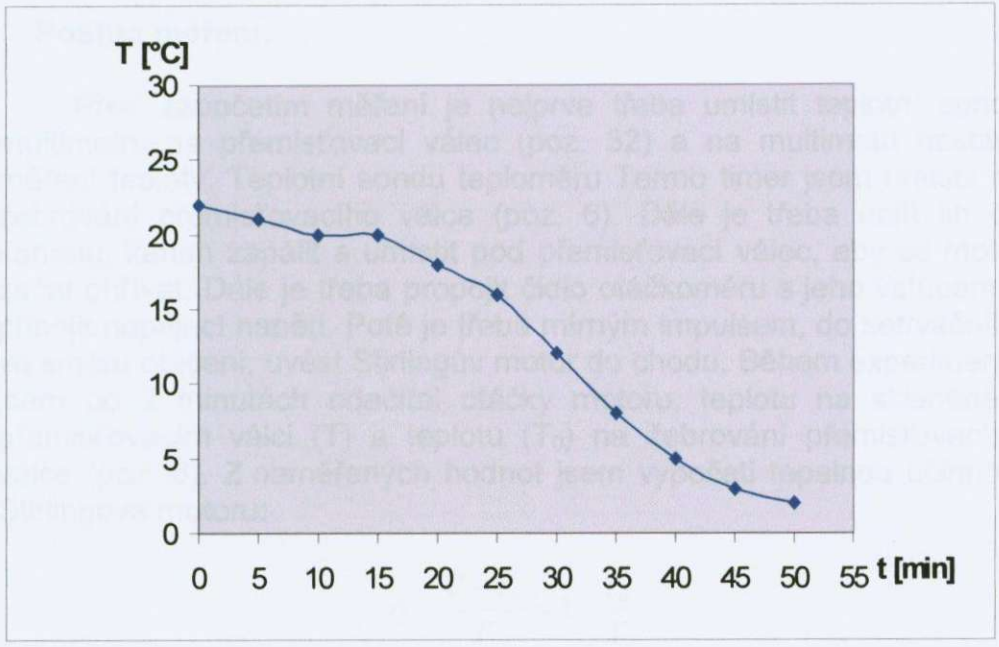
Čas [min]	Otáčky motoru [min^{-1}]	Teplota válce [°C]	Teplota okolí [°C]
0	320	22	22
5	320	21	22
10	310	20	22
15	310	20	22
20	300	18	22
25	290	16	22
30	280	12	22
35	260	8	22
40	250	5	22
45	240	3	22
50	220	2	22

Poznámka: Čas 0 min odpovídá okamžiku roztočení Stirlingova motoru a přibližnému ustálení otáček, tento náběh trval ~15s.

Graf závislosti otáček na čase:



Graf závislosti teploty na čase:



Diskuse:

Získané výsledky měření odpovídají teoretickým předpokladům. Z přiložených grafů je patrné, že s rostoucím časem klesala nejen teplota, jak jsem předpokládal, ale i otáčky motoru.

Výsledky měření teploty mohou být zatíženy poměrně vysokou chybou, která spočívá v přesnosti termočlánkové sondy. Na vině může být také vliv okolní teploty na ochlazovaný válec.

2.4 Měření č. 2

Úkol:

Studium činnosti Stirlingova motoru – měření otáček bez zatížení.

Pomůcky:

Stirlingův motor
Otáčkoměr
Teploměr Termo timer
Multimetr METEX M3860M ve spojení s termočlánkovou sondou

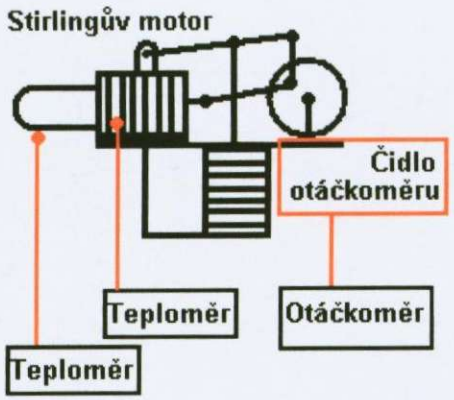
Postup měření:

Před započetím měření je nejprve třeba umístit teplotní sondu multimetru na přemisťovací válec (poz. 32) a na multimetu nastavit měření teploty. Teplotní sondu teploměru Termo timer jsem umístil na žebrování přemisťovacího válce (poz. 6). Dále je třeba nalít líh do kahanu, kahan zapálit a umístit pod přemisťovací válec, aby se motor začal ohřívat. Dále je třeba propojit čidlo otáčkoměru s jeho vstupem a připojit napájecí napětí. Poté je třeba mírným impulsem, do setrvačníku ve směru otáčení, uvést Stirlingův motor do chodu. Během experimentu jsem po 2 minutách odečítal otáčky motoru, teplotu na skleněném přemisťovacím válci (T) a teplotu (T_0) na žebrování přemisťovacího válce (poz. 6). Z naměřených hodnot jsem vypočetl tepelnou účinnost Stirlingova motoru:

$$\eta = \frac{T - T_0}{T} = 1 - \frac{T_0}{T}$$

Tepelná účinnost je největší teoretická účinnost přeměny tepelné energie na mechanickou práci.

Sestava Stirlingova motoru s měřícími přístroji při tomto měření je na obr. 39 a fotografii č. 8.



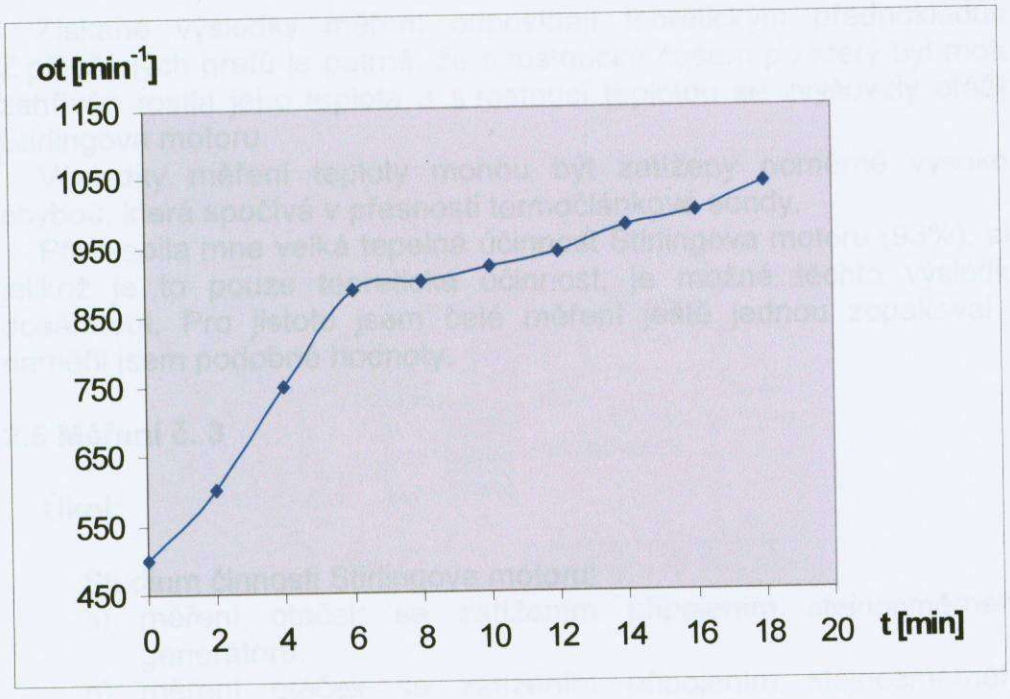
Obr. 39 Blokové schéma zapojení

Naměřené a vypočtené hodnoty:

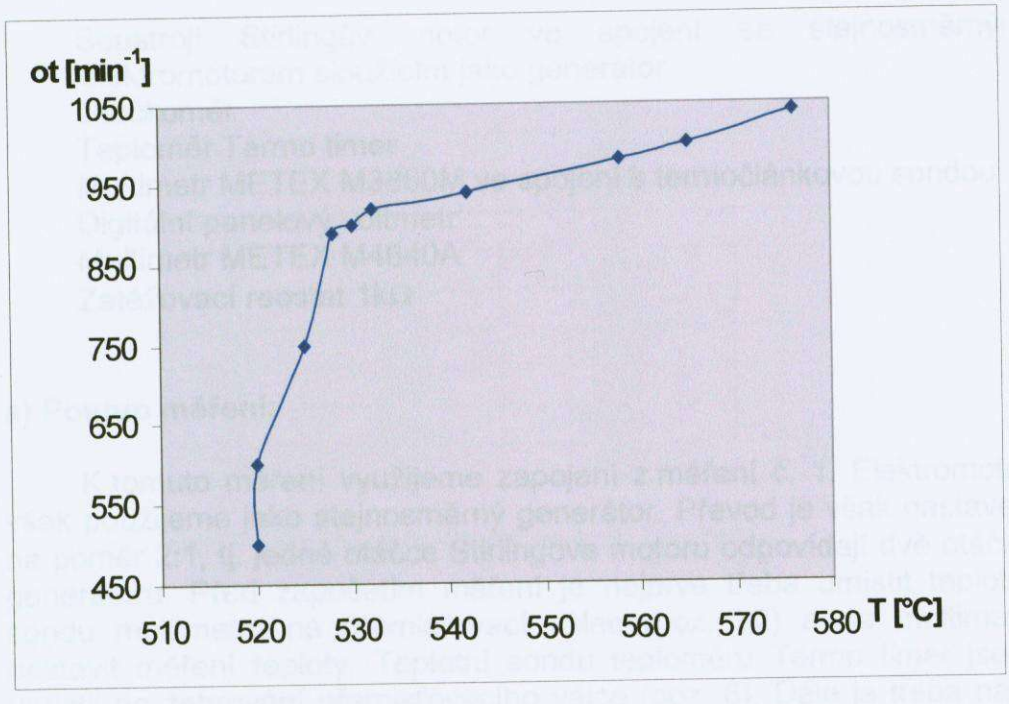
Čas [min]	Otáčky motoru [min^{-1}]	T [°C]	T_0 [°C]	η_T [1]
0	500	520	34	0,935
2	600	520	36	0,931
4	750	525	36	0,931
6	890	528	39	0,926
8	900	530	40	0,925
10	920	532	40	0,925
12	940	542	39	0,928
14	980	558	39	0,930
16	1000	565	39	0,931
18	1040	576	39	0,932

Poznámka: Čas 0 min odpovídá okamžiku roztočení Stirlingova motoru a přibližnému ustálení otáček, tento náběh trval ~15s.

Graf závislosti otáček na čase:



Graf závislosti otáček na teplotě:



Diskuse:

Získané výsledky měření odpovídají teoretickým předpokladům. Z přiložených grafů je patrné, že s rostoucím časem po který byl motor zahříván rostla jeho teplota a s rostoucí teplotou se zvyšovaly otáčky Stirlingova motoru.

Výsledky měření teploty mohou být zatíženy poměrně vysokou chybou, která spočívá v přesnosti termočlánkové sondy.

Překvapila mne velká tepelná účinnost Stirlingova motoru (93%), ale jelikož je to pouze teoretická účinnost, je možné těchto výsledků dosáhnout. Pro jistotu jsem celé měření ještě jednou zopakoval a naměřil jsem podobné hodnoty.

2.5 Měření č. 3

Úkol:

Studium činnosti Stirlingova motoru:

a) měření otáček se zatížením připojením stejnosměrného generátoru.
b) měření otáček se zatížením připojením stejnosměrného generátoru a tento generátor bude zatěžován reostatem.

Pomůcky:

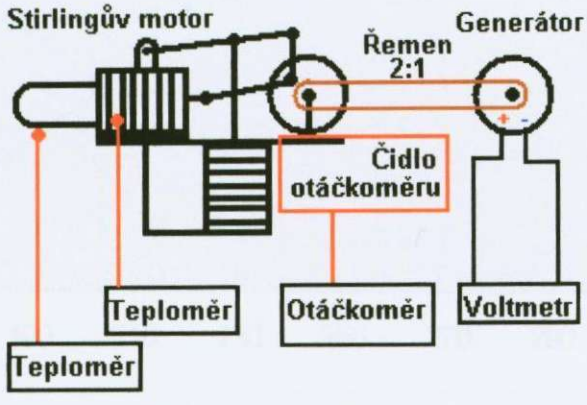
Soustrojí Stirlingův motor ve spojení se stejnosměrným elektromotorem sloužícím jako generátor
Otáčkoměr
Teploměr Termo timer
Multimetr METEX M3860M ve spojení s termočlánkovou sondou
Digitální panelový voltmetr
Multimetr METEX M4640A
Zatěžovací reostat 1kΩ

a) Postup měření:

K tomuto měření využijeme zapojení z měření č. 1. Elektromotor však použijeme jako stejnosměrný generátor. Převod je však nastaven na poměr 2:1, tj. jedné otáčce Stirlingova motoru odpovídají dvě otáčky generátoru. Před započetím měření je nejprve třeba umístit teplotní sondu multimetru na přemisťovací válec (poz. 32) a na multimetu nastavit měření teploty. Teplotní sondu teploměru Termo timer jsem umístil na žebrování přemisťovacího válce (poz. 6). Dále je třeba nalít

líh do kahanu, kahan zapálit a umístit pod přemisťovací válec, aby se motor začal ohřívat. Dále je třeba propojit čidlo otáčkoměru s jeho vstupem a připojit napájecí napětí. Poté je třeba mírným impulsem, do setrvačníku ve směru otáčení, uvést Stirlingův motor do chodu. Během experimentu jsem desetkrát odečetl otáčky motoru a výstupní napětí generátoru.

Sestava Stirlingova motoru s měřícími přístroji při tomto měření je na obr. 40 a fotografii č. 9.



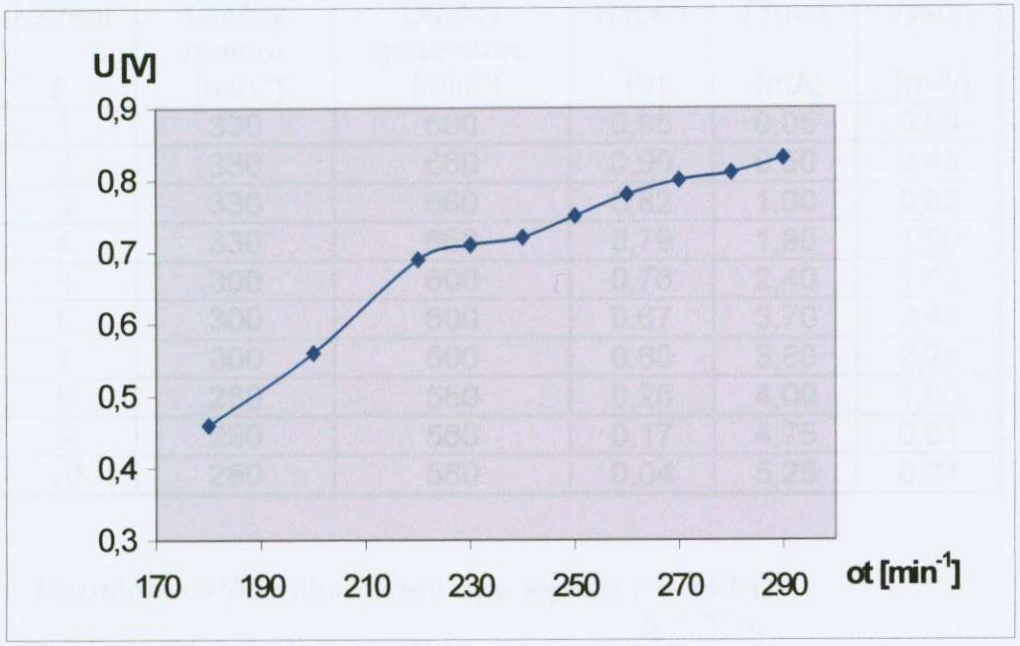
Obr. 40 Blokové schéma zapojení

Naměřené a vypočtené hodnoty:

Měření č.	Otáčky motoru [min^{-1}]	Otáčky generátoru [min^{-1}]	Napětí [V]
1	180	360	0,46
2	200	400	0,56
3	220	440	0,69
4	230	460	0,71
5	240	480	0,72
6	250	500	0,75
7	260	520	0,78
8	270	540	0,80
9	280	560	0,81
10	290	580	0,83

Poznámka: Při tomto měření byla teplota $T = 743°C$
$T_0 = 33°C$

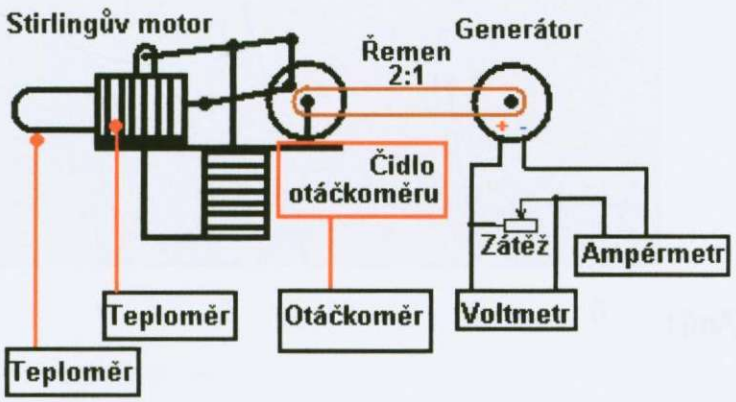
Graf závislosti napětí na otáčkách:



b) Postup měření:

K tomuto měření využijeme zapojení z měření č. 3a. Generátor zatížil reostatem 1kΩ. Během experimentu jsem desetkrát odečetl otáčky motoru, výstupní napětí generátoru a proud protékající zátěží.

Sestava Stirlingova motoru s měřícími přístroji při tomto měření je na obr. 41.



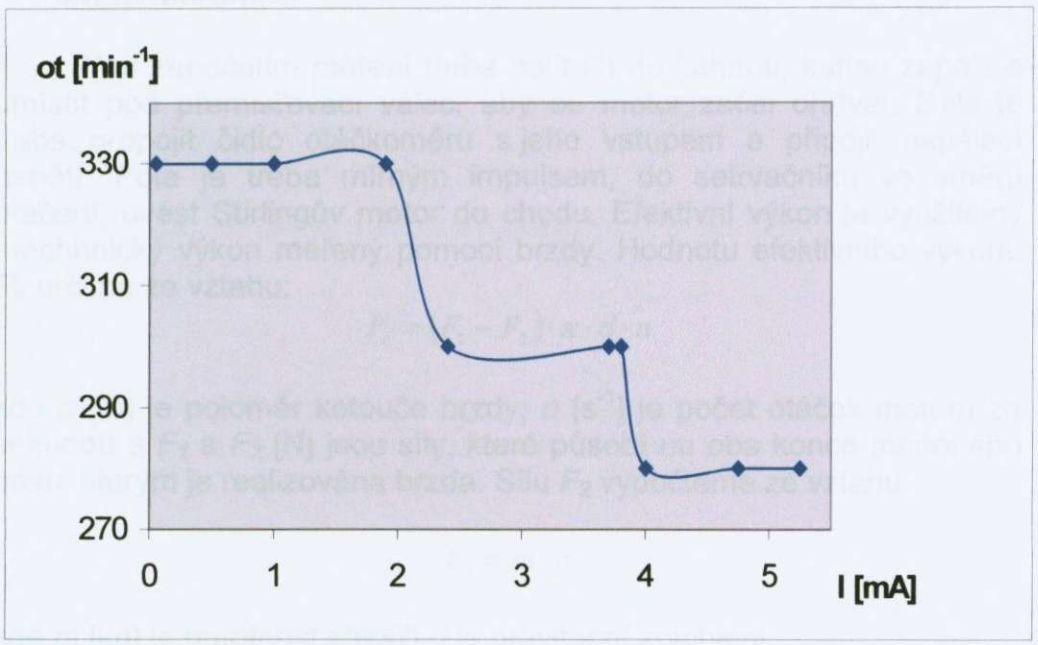
Obr. 41 Blokové schéma zapojení

Naměřené a vypočtené hodnoty:

Měření č.	Otáčky motoru [min^{-1}]	Otáčky generátoru [min^{-1}]	Napětí [V]	Proud [mA]	Výkon [mW]
1	330	660	0,95	0,05	0,05
2	330	660	0,90	0,50	0,45
3	330	660	0,82	1,00	0,82
4	330	660	0,79	1,90	1,50
5	300	600	0,76	2,40	1,82
6	300	600	0,67	3,70	2,48
7	300	600	0,60	3,80	2,28
8	280	560	0,25	4,00	1,00
9	280	560	0,17	4,75	0,81
10	280	560	0,04	5,25	0,21

Poznámka: Při tomto měření byla teplota $T = 743°C$
$T_0 = 33°C$

Graf závislosti otáček na zatěžovacím proudu:



Diskuse:

Získané výsledky měření odpovídají teoretickým předpokladům. U měření č. 3a je z přiloženého grafu patrné, že s rostoucími otáčkami rostlo i výstupní napětí na generátoru.

U měření č. 3b je z přiloženého grafu patrné, že s rostoucím zatěžovacím proudem generátoru klesalo i výstupní napětí a mírně klesali i otáčky Stirlingova motoru.

2.6 Měření č. 4

Úkol:

Studium činnosti Stirlingova motoru – měření efektivního výkonu.

Pomůcky:

Stirlingův motor
Otáčkoměr
Siloměr Hahn&Kolb 708
Závažíčka

Postup měření:

Před započetím měření třeba nalít líh do kahanu, kahan zapálit a umístit pod přemisťovací válec, aby se motor začal ohřívat. Dále je třeba propojit čidlo otáčkoměru s jeho vstupem a připojit napájecí napětí. Poté je třeba mírným impulsem, do setrvačníku ve směru otáčení, uvést Stirlingův motor do chodu. Efektivní výkon je využitelný mechanický výkon měřený pomocí brzdy. Hodnotu efektivního výkonu P_e určíme ze vztahu:

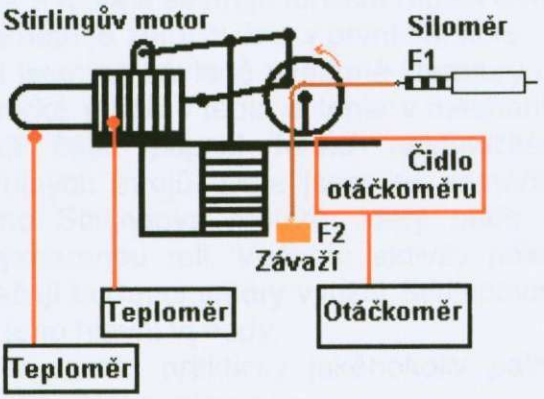
$$P_e = (F_1 - F_2) \cdot \pi \cdot d \cdot n$$

kde d [m] je poloměr kotouče brzdy, n [s^{-1}] je počet otáček motoru za sekundu a F_1 a F_2 [N] jsou síly, které působí na oba konce měděného pásu, kterým je realizována brzda. Sílu F_2 vypočteme ze vztahu:

$$F_2 = m \cdot g$$

kde m [kg] je hmotnost závaží g je gravitační zrychlení.

Sestava Stirlingova motoru s měřícími přístroji při tomto měření je na obr. 42 a fotografii č. 10.



Obr. 42 Blokové schéma zapojení

Naměřené a vypočtené hodnoty:

Otáčky motoru [min^{-1}]	F_1 [N]	m [g]	F_2 [N]	P_e [W]
300	0,4	20	0,2	0,37
270	0,6	25	0,25	0,57
240	0,8	30	0,29	0,77

Poznámka: Při tomto měření byl poloměr kotouče brzdy d = 9mm

Diskuse:

Z naměřených hodnot je patrné, že s rostoucím zatížením generátoru klesaly otáčky Stirlingova motoru a rostl efektivní výkon.

Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo přiblížit malou, ale pro rozvoj lidské společnosti významnou část fyziky, poukázat na vzájemný vztah mechanické práce a tepla a sestrojit funkční model Stirlingova motoru.

Teorie k tématu je zpracována v první kapitole - *Teoretická část*. V teoretický části jsem na základě uvedené literatury rozebral podstatu přeměny mechanické práce v teplo a tepla v mechanickou práci. Dále jsem v teoretické části popsal funkci nejdůležitějších a nejvíce používaných tepelných strojů. Dále jsem se zaměřil na popularizaci znovu objeveného Stirlingova motoru, který bude v budoucnu hrát v tomto oboru významnou roli. Veškeré aktivity některých světových výrobců již naznačují budoucí směry využití Stirlingova motoru. Tomuto všemu nahrávají jeho hlavní výhody:

- možnost použití prakticky jakéhokoliv paliva, neboť jde o motor s vnějším spalováním,
- minimální pravděpodobnost poruchy protože motor nemá zapalovací svíčky, karburátor ani vstřikování,
- tichý běh motoru – palivo je spalováno kontinuálně vně motoru, tudíž nevzniká téměř žádný hluk,
- minimální znečišťování životního prostředí, neboť je palivo spalováno za optimálních podmínek,
- bezpečný provoz, protože motor nemá vysokotlaký kotel jako parní stroj, nahrozí jeho výbuch,
- vysoká životnost daná minimem pohyblivých součástí a robusní konstrukce.

V druhé kapitole – *Praktická část*, je zpracován návrh a realizace funkčního modelu Stirlingova motoru a několik praktických měření na tomto motoru.

V měření č. 1 jsem ověřil využívání Stirlingova motoru jako chladícího stroje. Nedosáhl jsem si žádných závratně nízkých teplot, ale již jen to, že i s modelem se potvrdil teoretický předpoklad je povzbuzující. Pro další experimenty v táto oblasti využití Stirlingova motoru bych zkusil změnit parametry elektromotoru, který pohání Stirlingův motor.

V měření č. 2 jsem měřil otáčky Stirlingova motoru. Opět se potvrdil teoretický předpoklad, že se změnou teploty hořáku se mění otáčky motoru. V tomto případě není ideální použití kahanu, ale bylo by vhodnější použití zdroje tepla který jde regulovat a prostor přemisťovacího válce vhodně odizolovat a případně zavést chlazení vodou.

V měření č. 3 jsem měřil otáčky Stirlingova motoru zatíženého stejnosměrným motorem sloužícím jako generátor. Tento generátor

jsem dále zatěžoval reostatem. Pokusil jsem se tímto vytvořit elektrickou motorovou brzdu, ale můj záměr se mi nepovedl uskutečnit. Věřím, že změnou parametrů stejnosměrného motoru bych tohoto dosáhl.

V měření č. 4 jsem měřil efektivní výkon Stirlingova motoru zatíženého mechanickou brzdou. Tento výkon rostl s klesajícími otáčkami Stirlingova motoru.

V experimentech se Stirlingovým motorem se chystám pokračovat. Navrhl jsem úpravu tohoto motoru jehož pracovní plyn bude zahříván pomocí topné spirály elektrickým proudem. Tento motor je uveden ve fotogalerii na fotografii č. 11. Zatím je pouze sestaven, ale není odzkoušen. Dále mám ještě několik výkresových dokumentací funkčních modelů ostatních modifikací. Postupem času se chystám je zrealizovat.

Bakalářskou práci jsem doplnil několika vlastními fotografiemi konstrukce funkčního modelu Stirlingova motoru. Další fotografie ukazují jak probíhala jednotlivá má měření. Na zbývajících fotografiích jsou ukázky funkčních modelů Stirlingových motorů vyrobených našimi kolegy z partnerských učilišť v Eisenachu a Schwieberdingenu. Uvedené fotografie tvoří pouze nepatrnou část fotografií mnou pořízených, některá měření jsem natočil i na video.

Práce na tomto tématu mne velmi zaujala, bavila a byla pro mne velkým přínosem. Dozvěděl jsem se o staronovém technickém unikátu a o jeho možnostech využití. Shromáždil jsem díky ní velké množství zajímavých informací o Stirlingově motoru a celkově o tepelných strojích, jež využívám při praktické výuce mých žáků. Některé informace jsem již využil při konstrukci jednoválcového čtyřtaktního motoru s řízeným vstřikováním paliva do sacího traktu. Tento motor jsme s žáky prakticky sestrojili a prezentovali na výstavě Vzdělání a řemeslo v Českých Budějovicích v roce 2004, kde jsme sním vyhráli 1. cenu v technickém oboru a byla nám udělena i Zvláštní cena Hospodářské komory v Č. Budějovicích. Fotografie tohoto motoru je součástí fotografické přílohy.

Seznam použité literatury:

[1] http://www.sds.cz/docs/prectete/eknihy/dp/dp09.htm

[2] http://jaja.kn.vutbr.cz/~janirek2/dok/fyzika/Prednasky/Prednaska2.pdf

[3] http://cs.wikipedia.org

[4] HALLIDAY, D. – RESNICK, R. – WALKER, J.: *Fyzika, část 2 – mechanika – termodynamika.* VUT v Brně, nakladatelství VUTIUM, Brno 2003.

[5] KUBEŠ, P. – KYNCL, Z.: *Fyzika I.* skripta ČVUT, Praha 2003.

[6] NAVRÁTIL, J.: *Domácí kutil a ... tepelné čerpadlo.* Vlastní náklad 1997.

[7] SHULZ, H.: *Teplo ze slunce a země.* HEL, Ostrava, 1999

[8] ŠTOSS, M.: *Spalovací motory I.* skripta VUT, Brno 1989

[9] MACEK, J. - SUK, B.: *Spalovací motory I.* skripta FS ČVUT, Praha 1996

[10] http://cmp.felk.cvut.cz

[11] FRONK, J.: *Automobil a motocykl v obrazech. Díl první.* Naše vojsko, Praha 1960

[12] http://www.uvmv.cz

[13] http://www.bosch.cz

[14] http://www.motor-tuning.cz/v2/clanky/clVentily.php

[15] http://news.auto.cz/?article=4851

[16].KAMEŠ, J.: *Alternativní pohony automobilů.* BEN, Praha 2004

[17] CHANIN, N. S., ČISTOZVONOV, S. B.: *Avtomobilnyje rotorno-poršněvyje dvigateli.* Mašgiz, Moskva 1964

[18] http://www.mazda.cz

[19] MAYER, D.: *Pohledy do minulosti elektrotechniky.* Kopp, České Budějovice, 1999

[20] LANK, V. – VONDRA, M.: *Fyzika v kostce.* Fragment, Havlíčkův Brod, 1999

[21] http://stirling.wz.cz/index.html

[22] http://mve.energetika.cz/uvod/stirling.htm

[23] PÁTÝ, L. – PETR, J.: *Vakuová technika.* skripta ČVUT, Praha 1990

[24] http://mve.energetika.cz/uvod/stirling-rytina.htm

[25] MITTERMAIR, SAUER, WEISSE: *Zařízení se slunečními kolektory.* HEL, Ostrava, 1995

[26] http://artemis.osu.cz/molfs/1%20Termodynymika%20P2.doc

[27] MÍKA, J. – TOMČALA, J. – JANETA, P.: *Vlastnosti Stirlingova motoru.* Teplo, technika teplárenství 4/2001

[28] http://www.atmagazin.cz/zobraz_clanek.php?id=384&cislo=1_2004

[29] http://www.ricardo.co.uk

[30] http://www.stirling-engine.at

[31] http://www.avl.co.at

[32] http://www.stirlingenergy.com

[33] http://www.stmpower.com

[34] http://www.circ.cz

[35] YUKER, G.: *Dvigatěli Stirlinga.* Mašinostrojenije, Moskva 1985.

Seznam fotografií (s komentářem)

Fotografie č. 1	Jednotlivé vyrobené díly funkčního modelu Stirlingova motoru před sestavením.
Fotografie č. 2	Sestavený funkční model Stirlingova motoru γ-modifikace.
Fotografie č. 3	Detail sestavy a uchycení snímače otáček.
Fotografie č. 4	Sestava elektroniky otáčkoměru.
Fotografie č. 5	Sestava digitálního panelového voltmetru.
Fotografie č. 6	Sestava Stirlingova motoru se snímačem otáčkoměru a elektromotorem.
Fotografie č. 7	Sestava Stirlingova motoru s připojenými měřícími přístroji při měření č. 1.
Fotografie č. 8	Sestava Stirlingova motoru s připojenými měřícími přístroji při měření č. 2.
Fotografie č. 9	Sestava Stirlingova motoru s připojenými měřícími přístroji při měření č. 3.
Fotografie č. 10	Sestava Stirlingova motoru s připojenými měřícími přístroji připravená k měření č. 4.
Fotografie č. 11	Sestavený model Stirlingova motoru γ-modifikace ohřívaný topnou spirálou.
Fotografie č. 12	Funkční model čtyřválcového Stirlingova motoru γ-modifikace sestrojený žáky 2. ročníku oboru Strojní mechanik z partnerského učiliště v Eisenachu.
Fotografie č. 13	Funkční model vrtulníku poháněného Stirlingovým motorem γ-modifikace sestrojený žáky 2. ročníku oboru Strojní mechanik z partnerského učiliště v Eisenachu.

Fotografie č. 14 Funkční model Stirlingova motoru γ-modifikace v porovnání se zapalovačem. Původní model zvětšený čtyřikrát. Motor byl navržen a sestrojen žáky 2. ročníku oboru Strojní mechanik z partnerského učiliště v Eisenachu.

Fotografie č. 15 porovnání velikosti funkčního modelu vrtulníku a zvětšeného Stirlingova motoru γ-modifikace - Eisenach.

Fotografie č. 16 Funkční model dvouválcového Stirlingova motoru γ-modifikace sestrojený žáky z partnerského učiliště ve Schwieberdingenu.

Fotografie č. 17 Prezident USA J.Bush propagující bezpečnou energii pro 21. Století. V pozadí využití Stirlingova motoru při získávání elektrické energie ze slunečního záření.

Fotografie č. 18 Stirlingův motor o výkonu 25kW společnosti SES umístěný v ohnisku zrcadla (Solární elektrárna Sandia National laboratoře v Albuquuerqu v Novém Mexiku v USA).

Fotografie č. 19 Detail Stirlingova motoru o výkonu 25kW společnosti SES

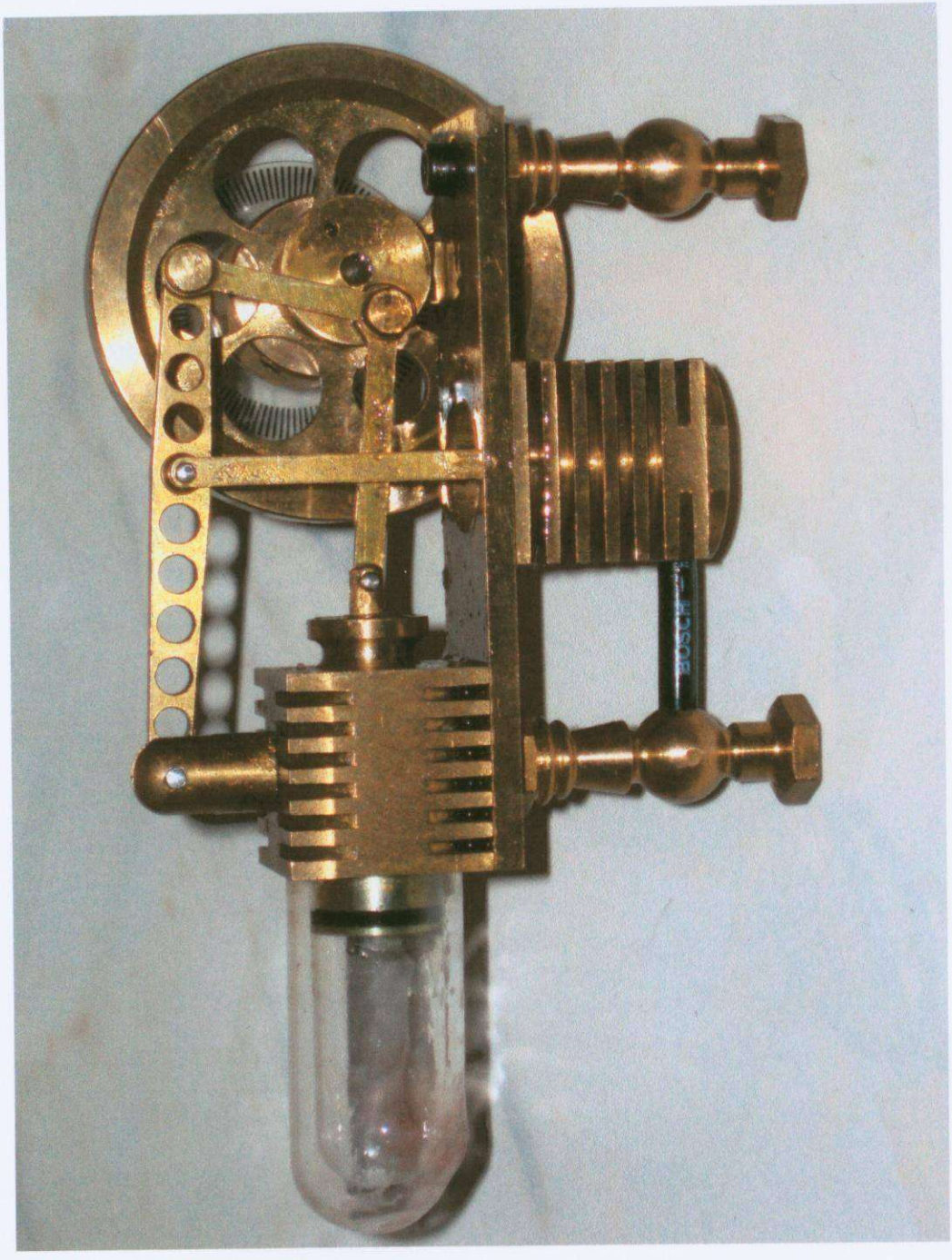
Fotografie č. 20 Funkční model jednoválcového čtyřtaktního zážehového motoru se vstřikováním do sacího traktu sestrojený žáky učiliště Robert Bosch v Českých Budějovicích.

Fotografie č. 21 Celkový pohled na Funkční model jednoválcového čtyřtaktního zážehového motoru se vstřikováním, v pozadí je zapojení řídící elektroniky vstřikování.

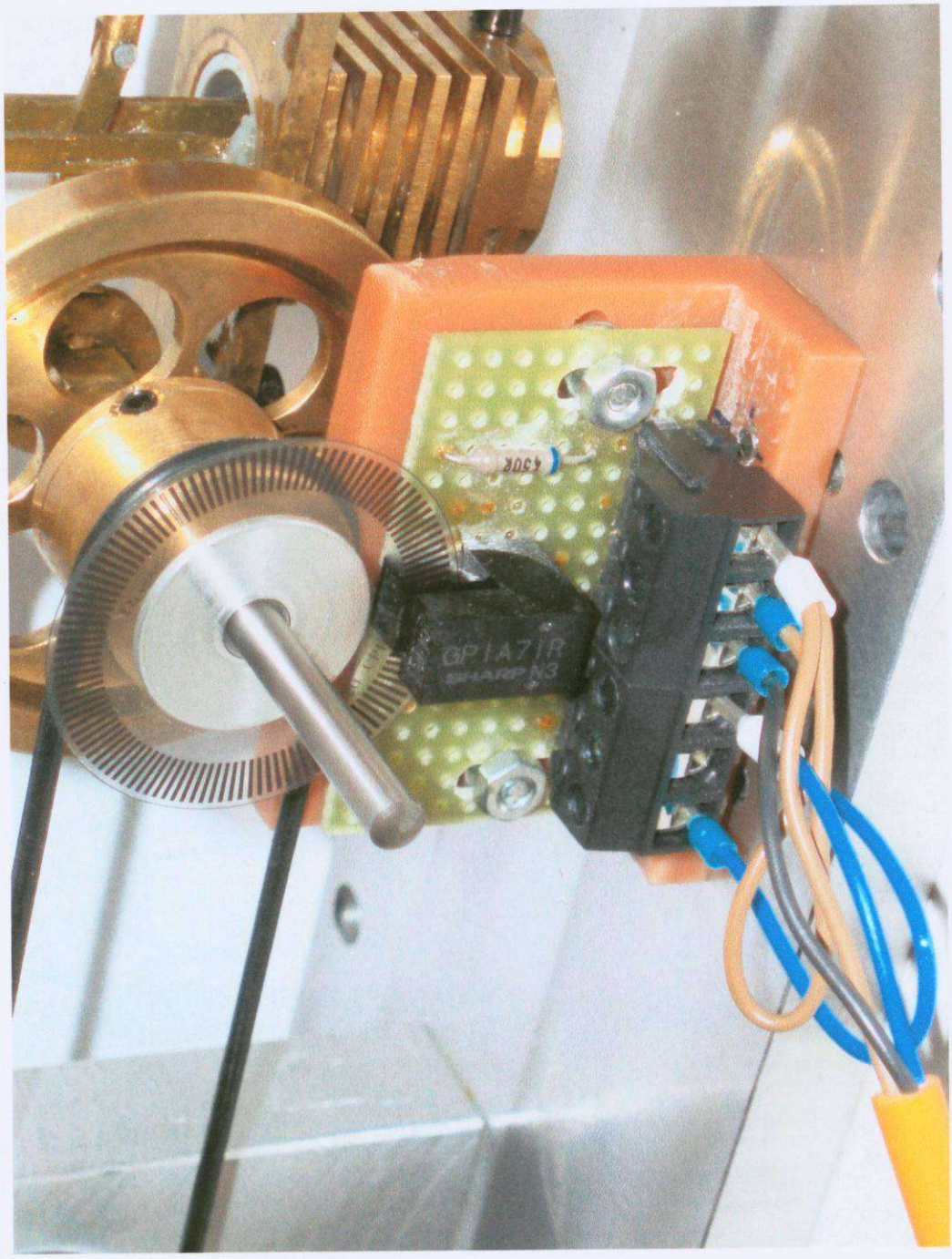
Fotogalerie



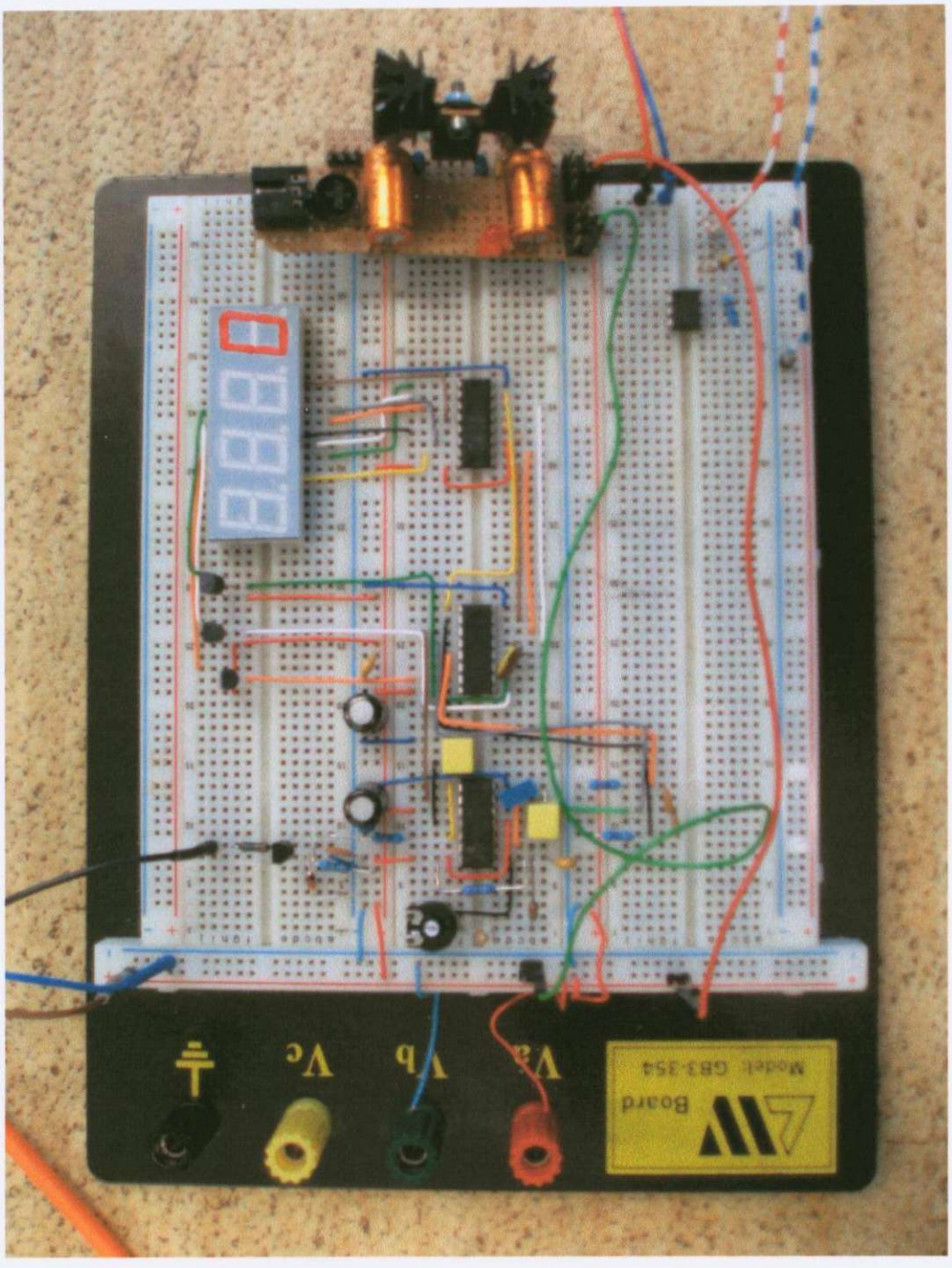
Fotografie č. 1



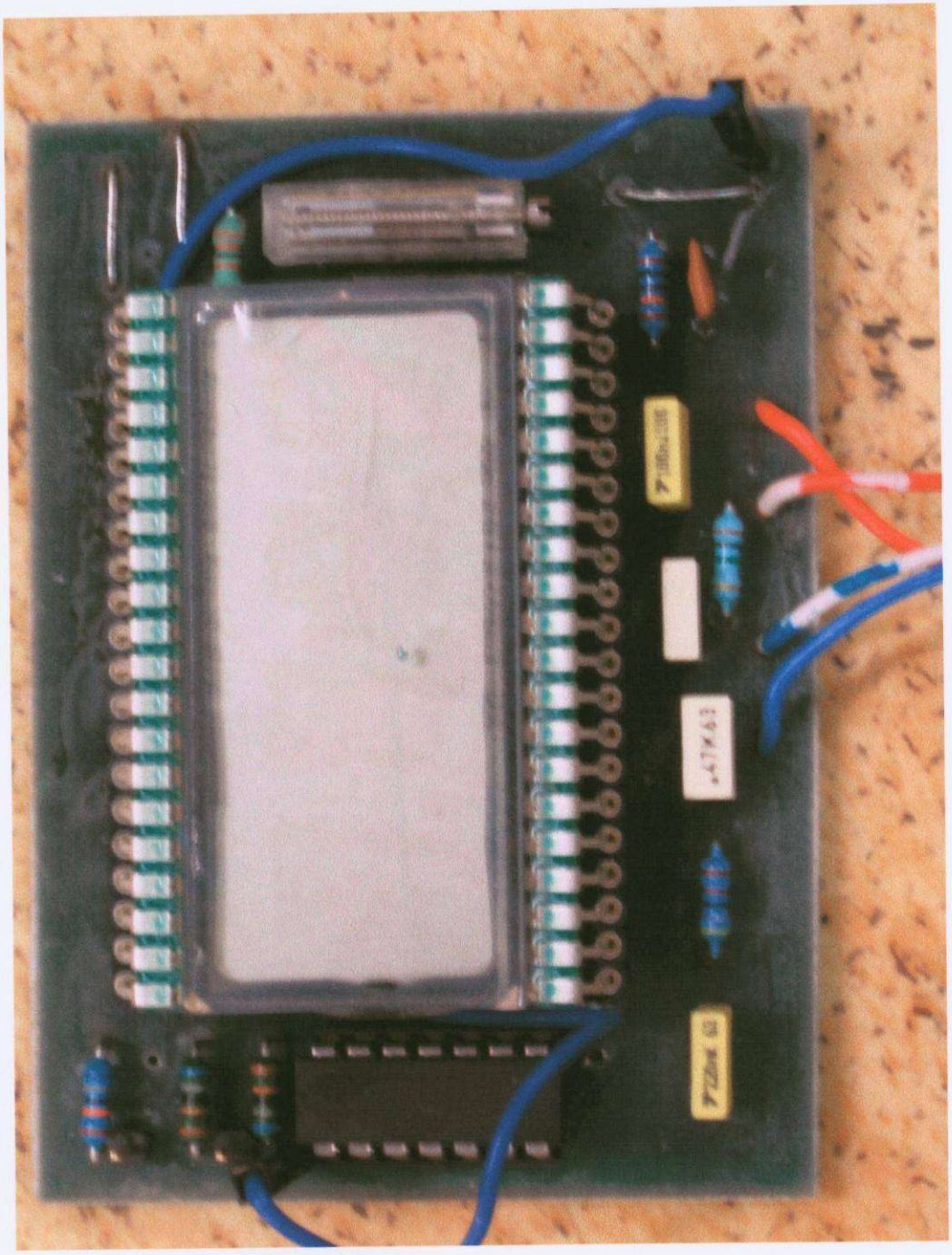
Fotografie č. 2



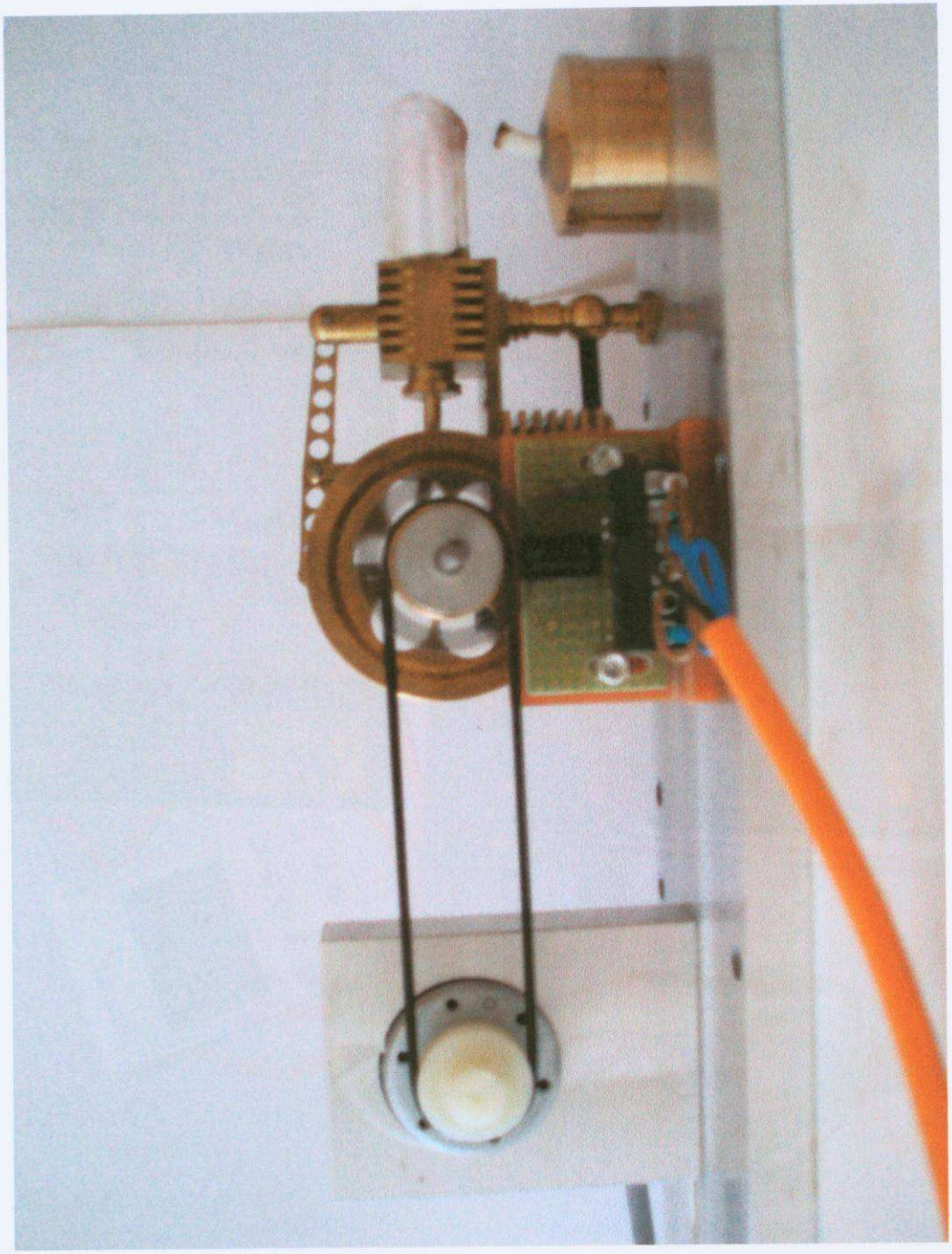
Fotografie č. 3



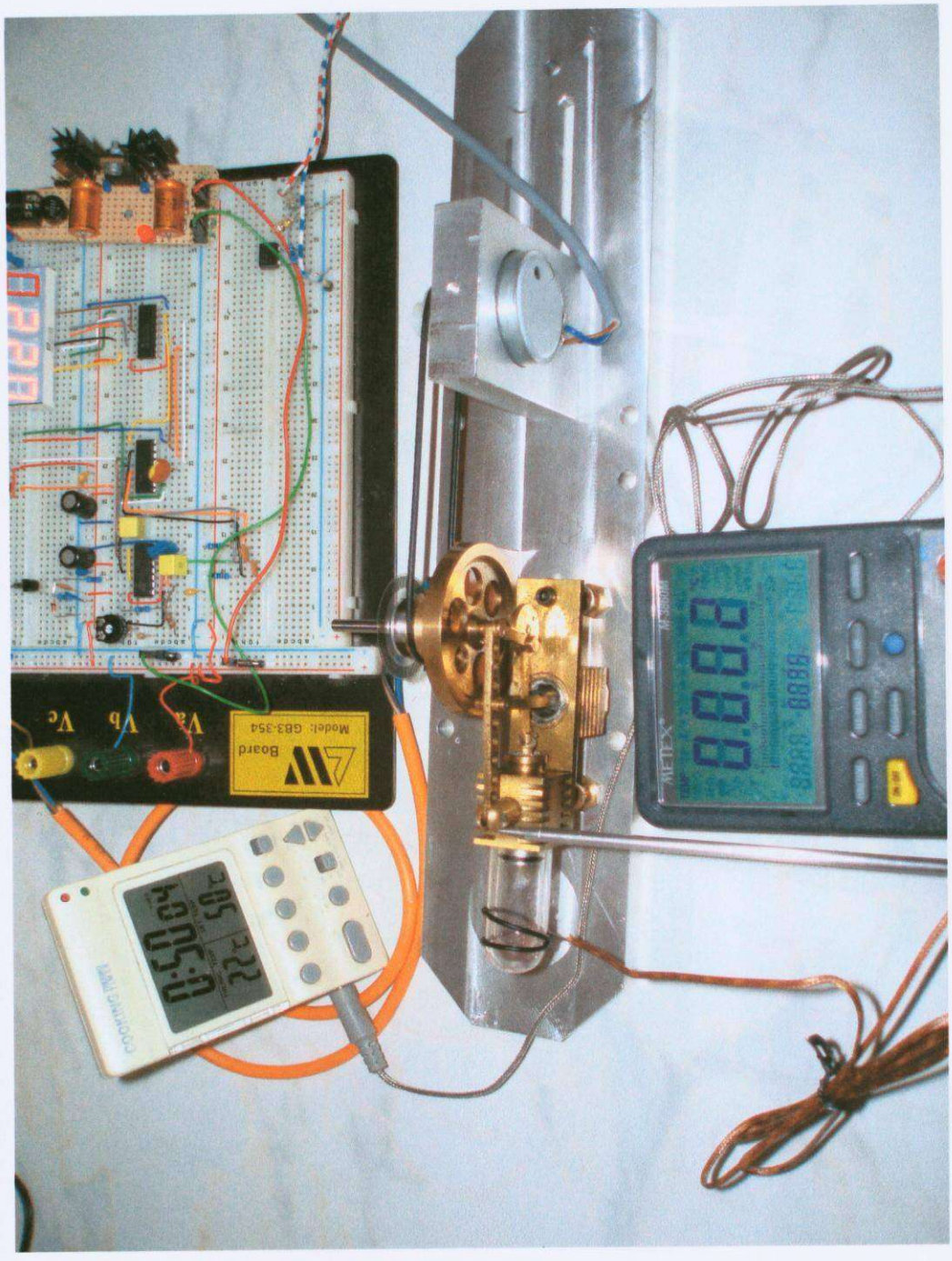
Fotografie č. 4



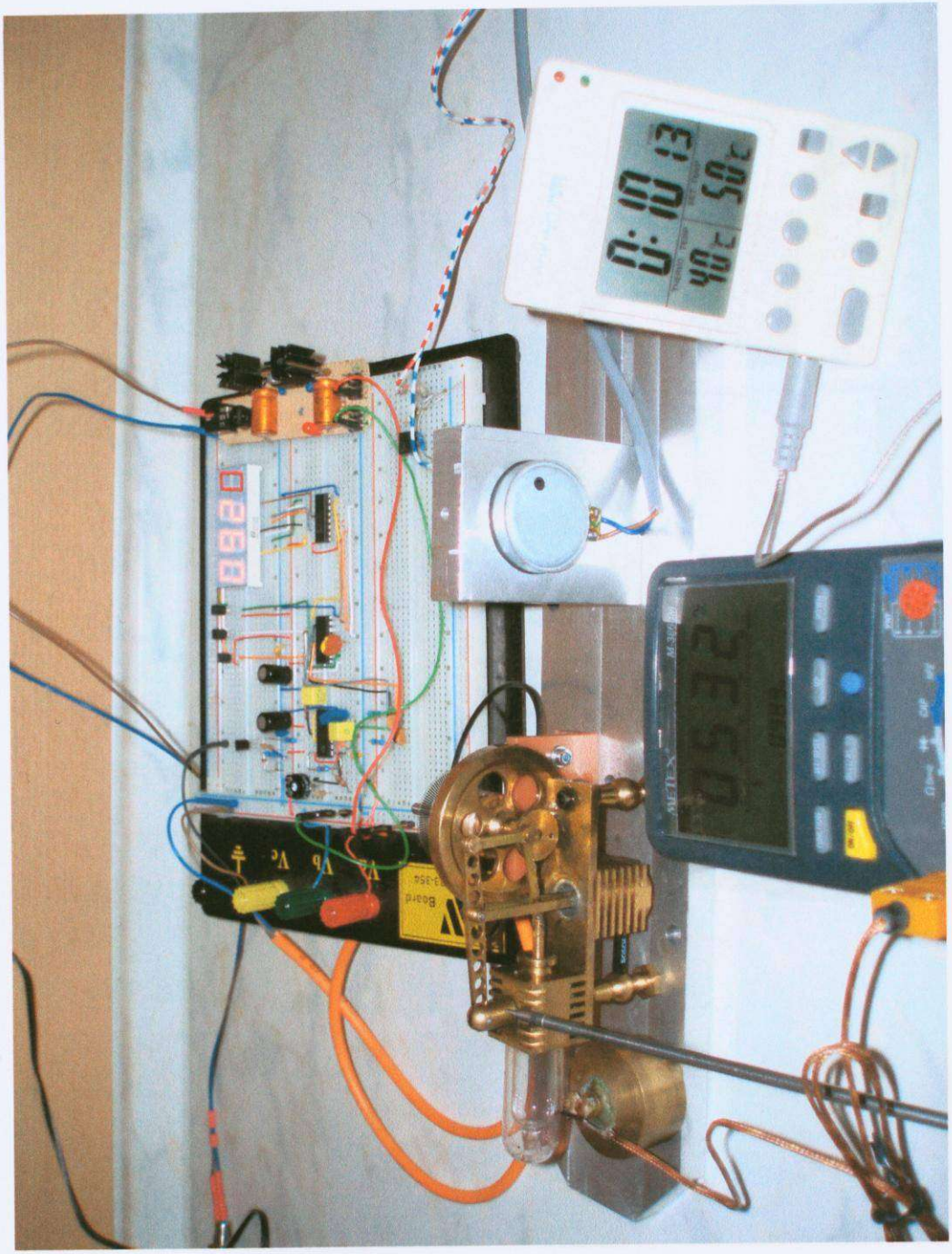
Fotografie č. 5



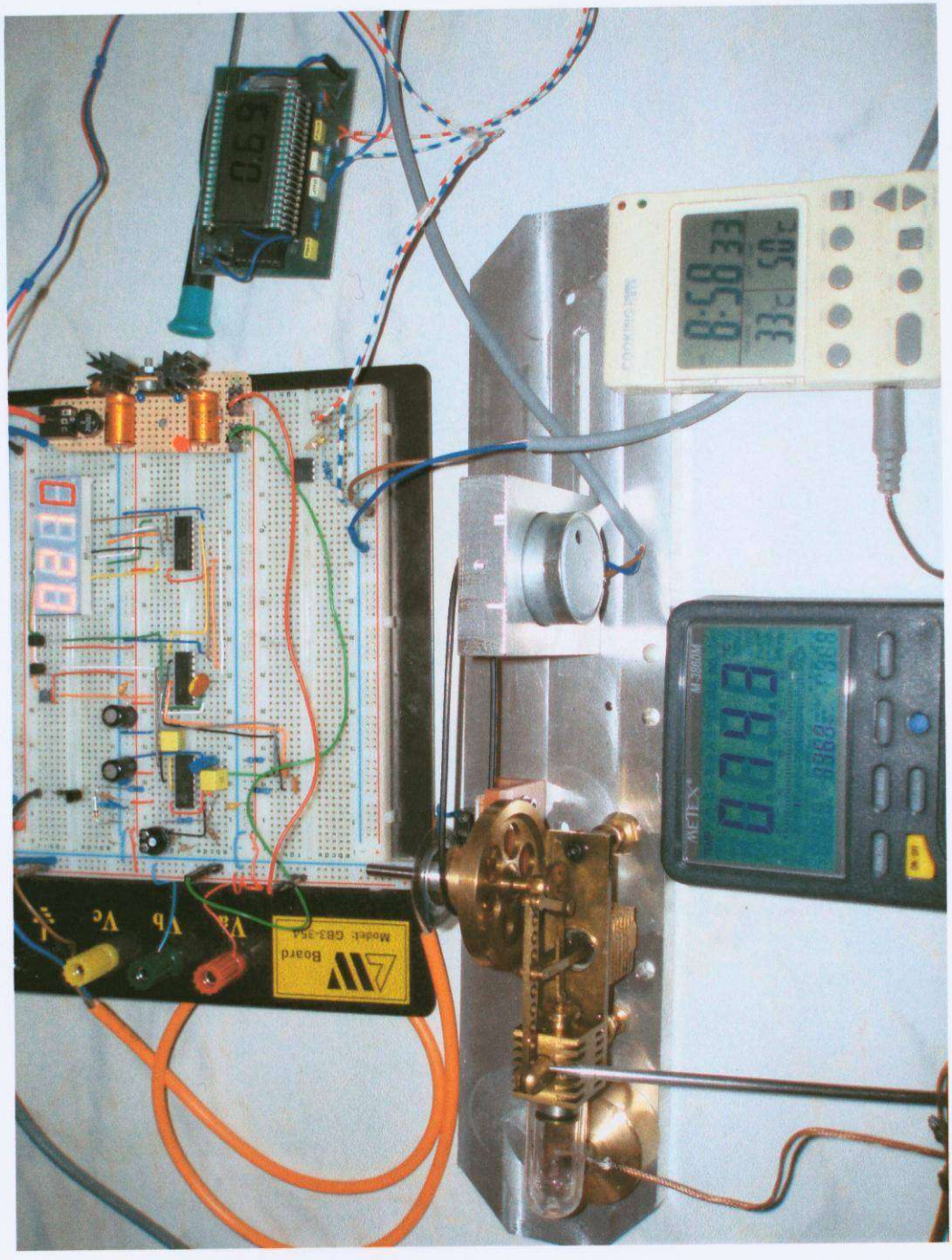
Fotografie č. 6



Fotografie č. 7



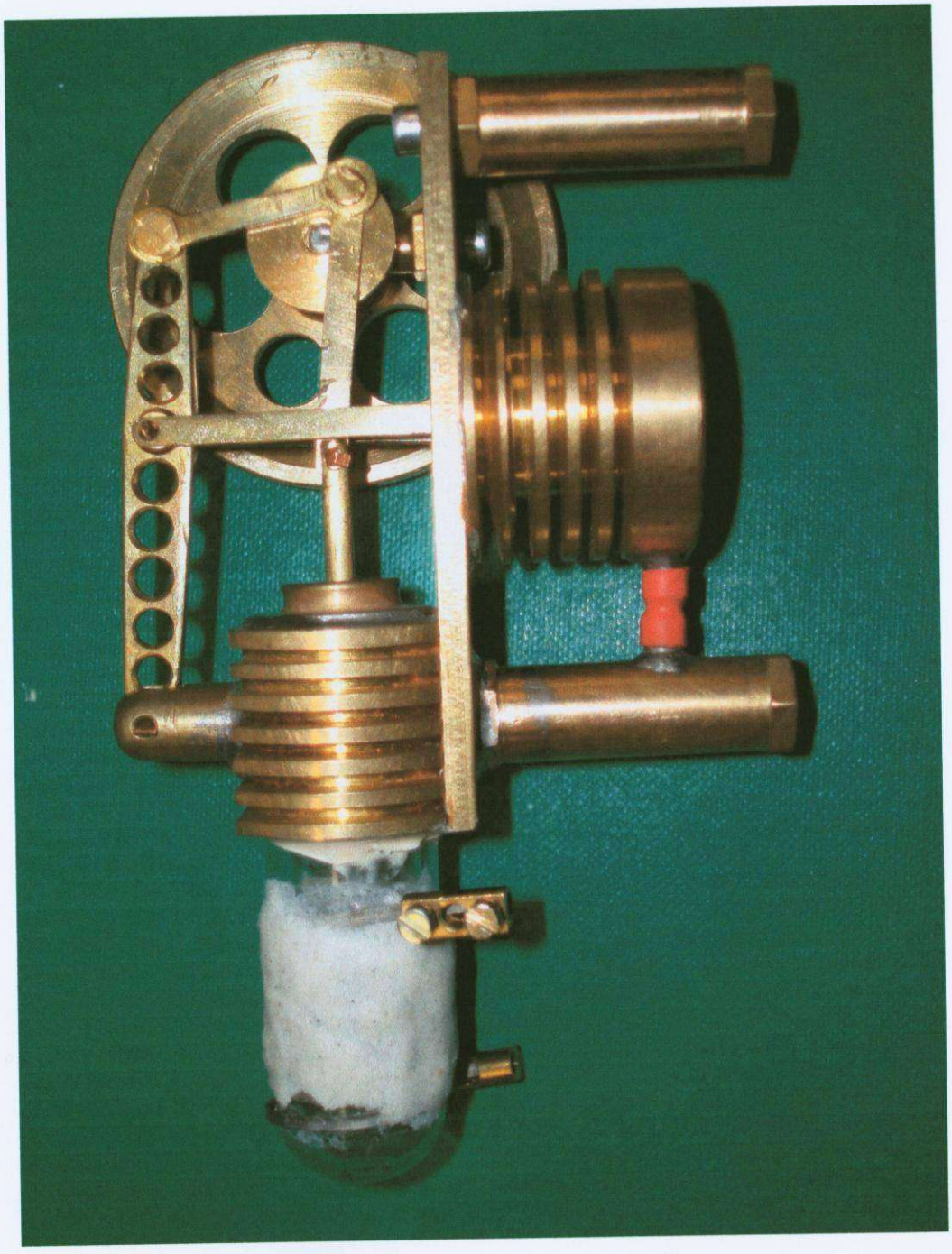
Fotografie č. 8



Fotografie č. 9



Fotografie č. 10

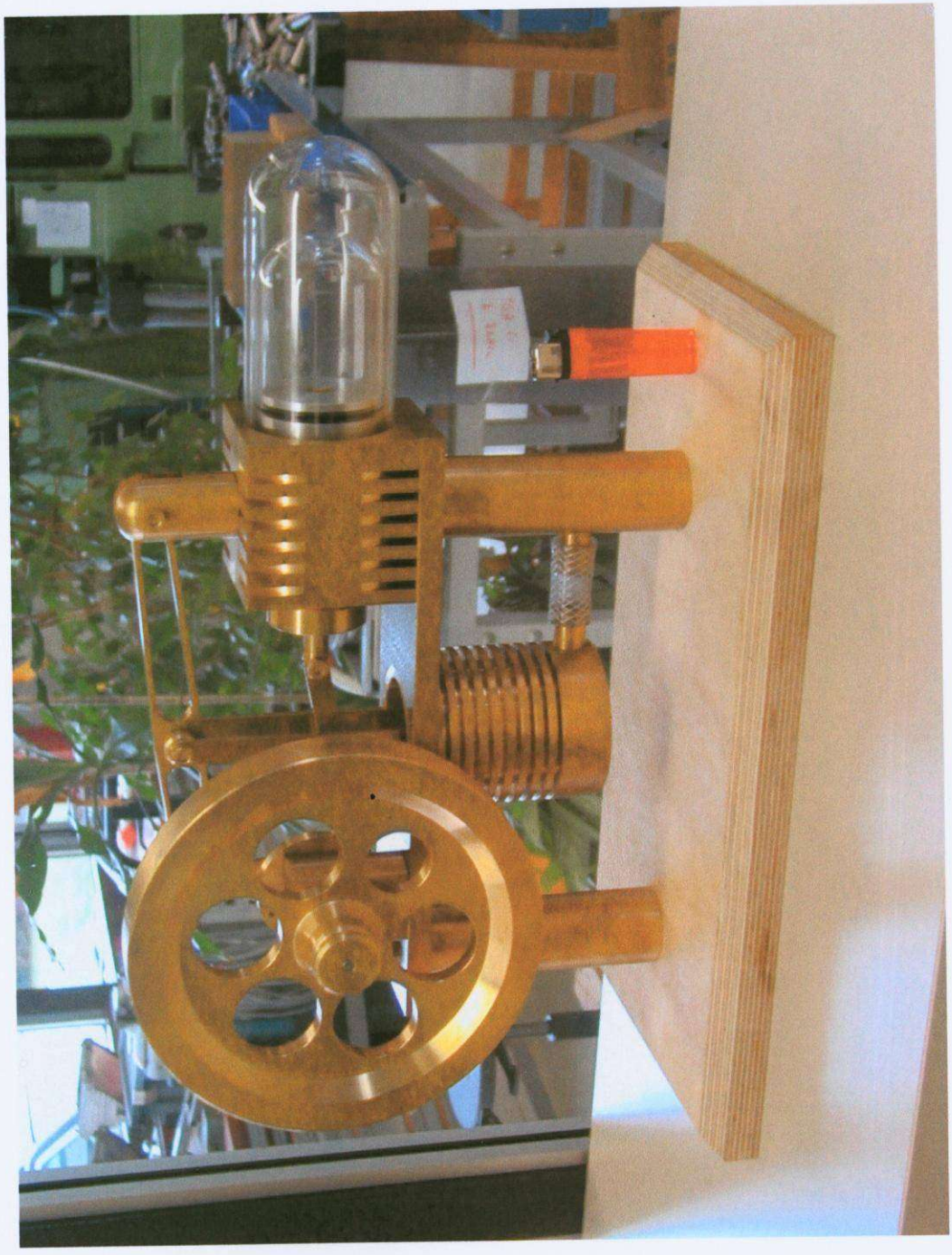


Fotografie č. 11



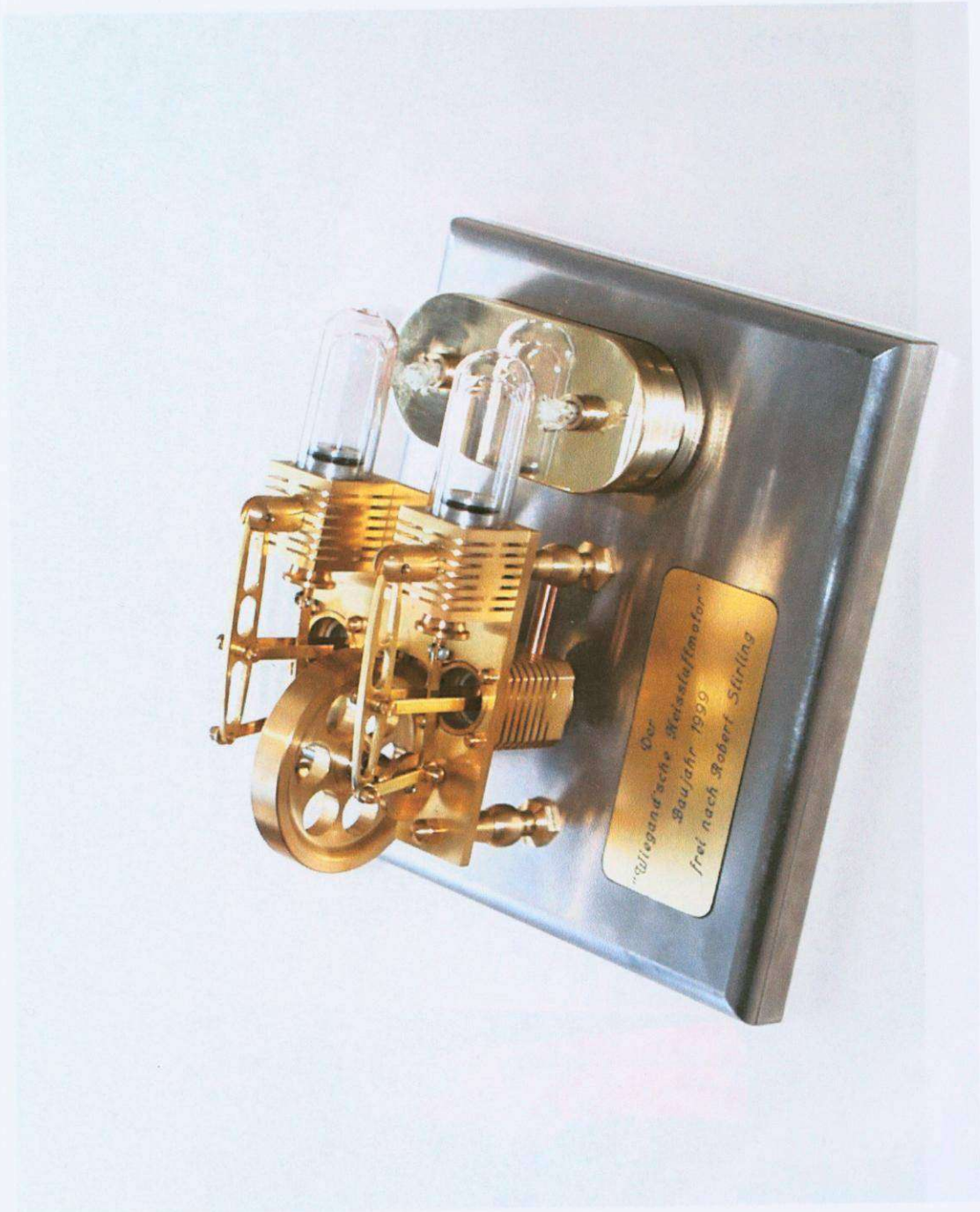
Fotografie č. 12

Fotografie č. 13



Fotografie č. 14

Fotografie č. 15



Fotografie č. 16



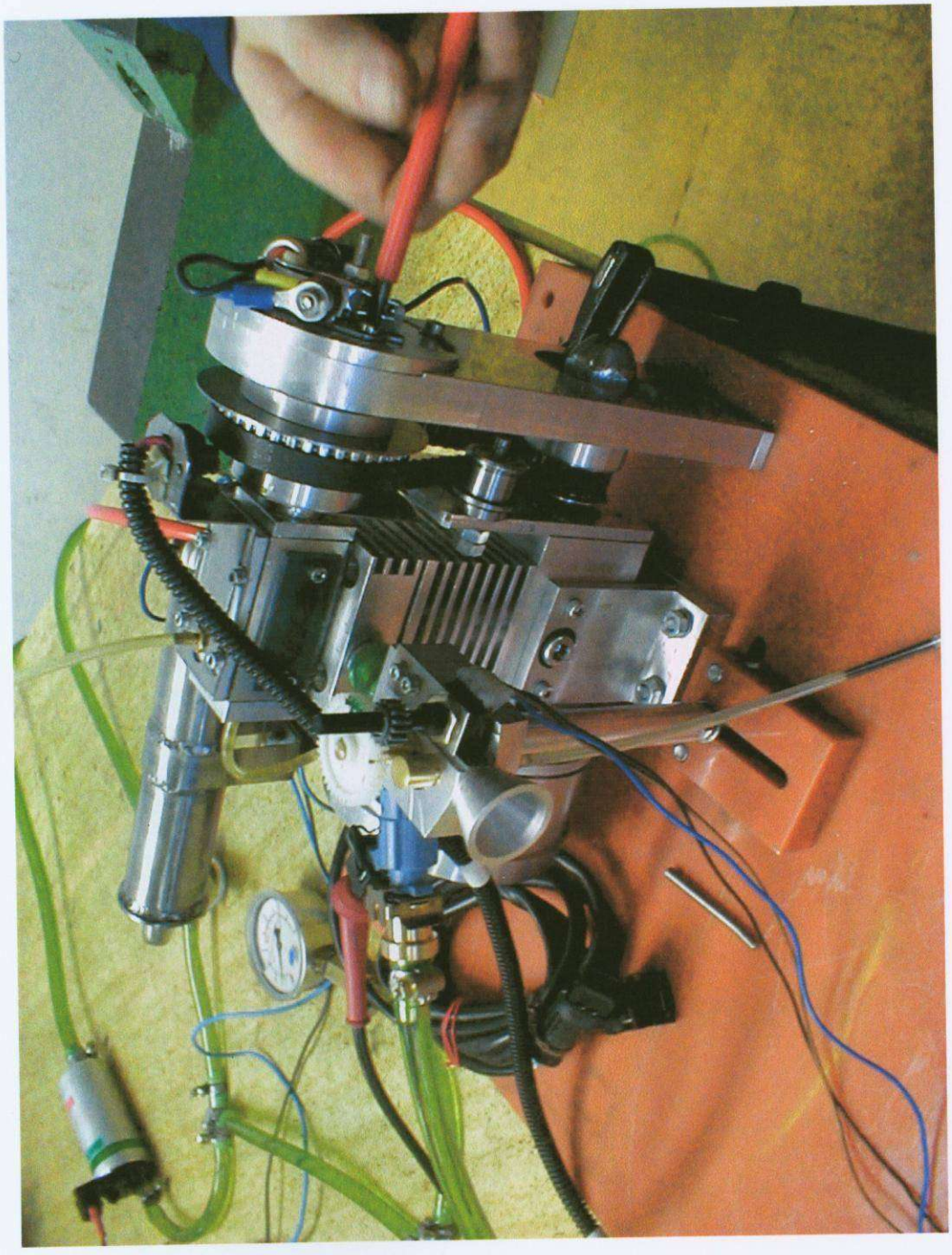
Fotografie č. 17



Fotografie č. 18



Fotografie č. 19



Fotografie č. 20



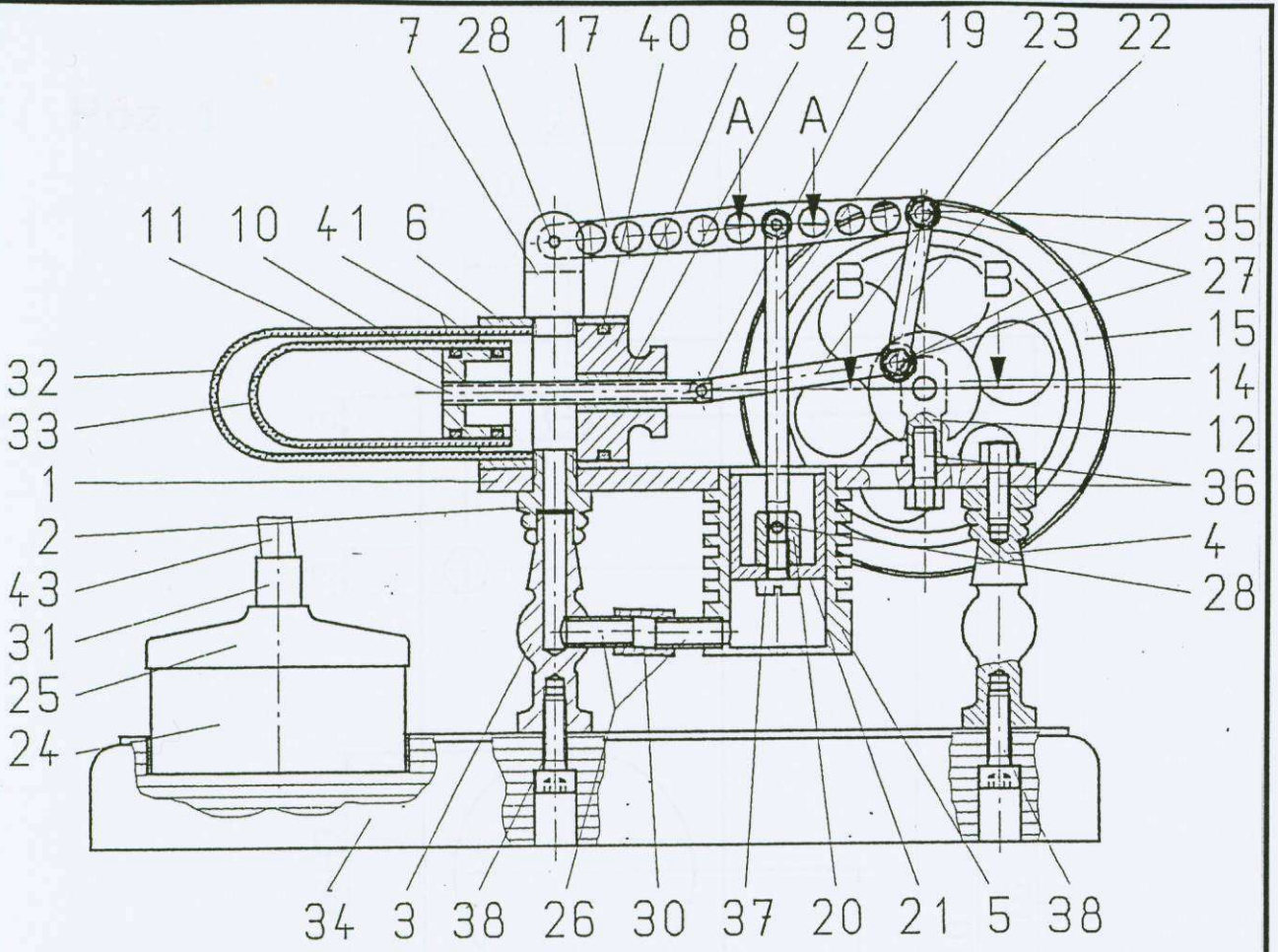
Fotografie č. 21

Seznam příloh (s komentářem)

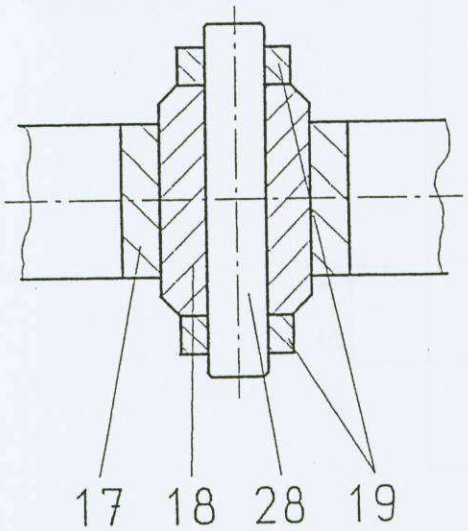
Příloha:

I - XVI	Výkresová dokumentace jednotlivých dílů funkčního modelu Stirlingova motoru.
XVII	Katalogový list Stirlingova motoru α-modifikace s označením SOLO STIRLING 161 vyráběný firmou SOLO STIRLING GmbH se sídlem v Sindelfingenu – Německo.
XVIII	Katalogový list Stirlingova motoru α-modifikace s označením SOLO STIRLING 161 vyráběný firmou SOLO STIRLING GmbH se sídlem v Sindelfingenu – Německo.
XIX	Příklad instalace modulu SOLO STIRLING 161 o výkonu 8 – 26kW.
XX - XXVI	Katalogový list čidla GP1A70R/GP1A71R otáčkoměru.
XXVII - XXIX	Univerzální třímístný panelový čítač/otáčkoměr (Amatérské rádio A/4/94).
XXX - XXXI	Digitální panelový voltmetr s obvodem 7106 a LCD displejem.

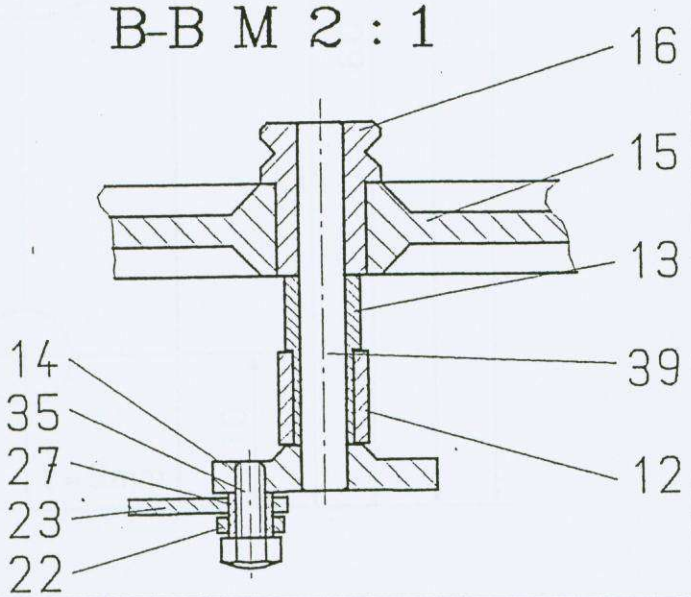
Přílohy



A-A M 5 : 1



B-B M 2 : 1

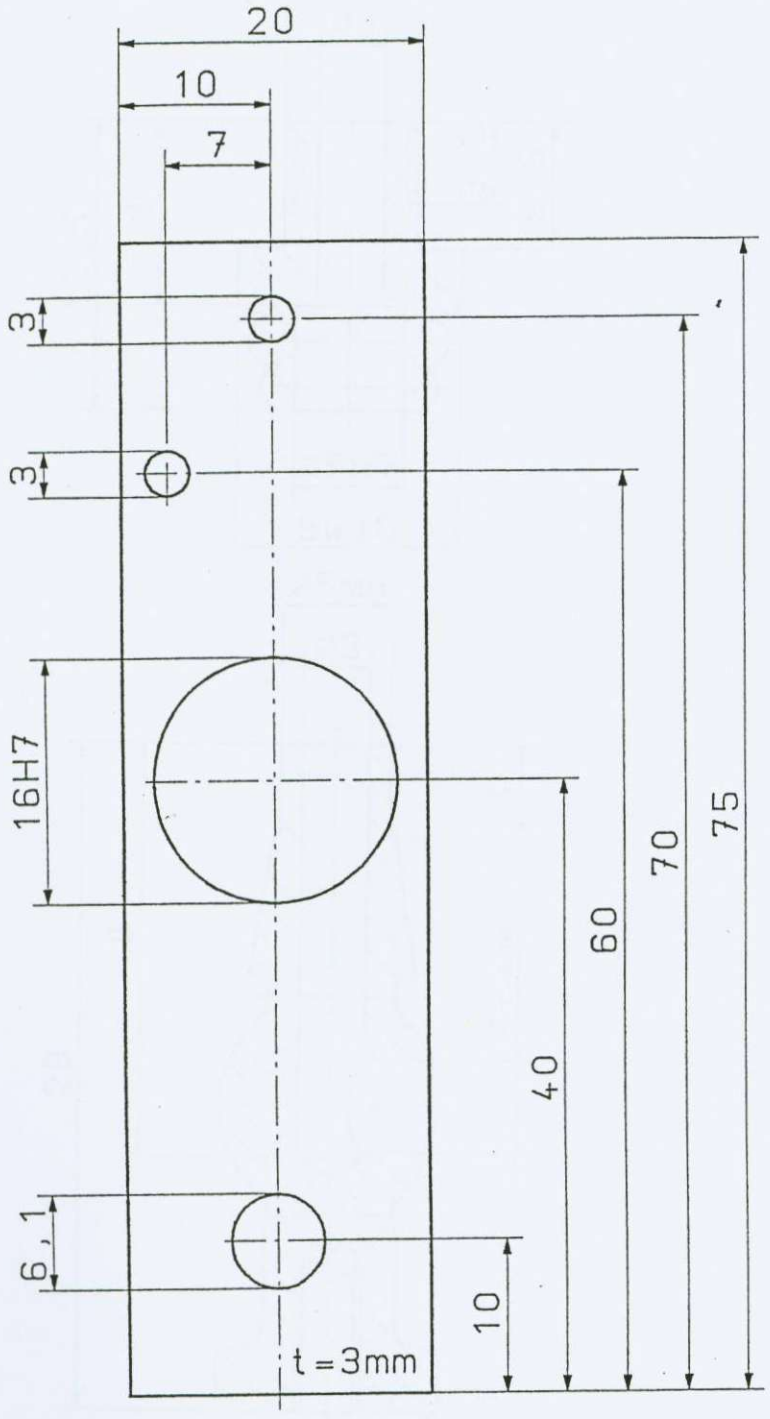


	Celkový pohled				
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar		
Povrch			R DIN ISO 1720		
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko		List
1 :1	**Stirlingův motor**	1
		ze 16

Poz. 1

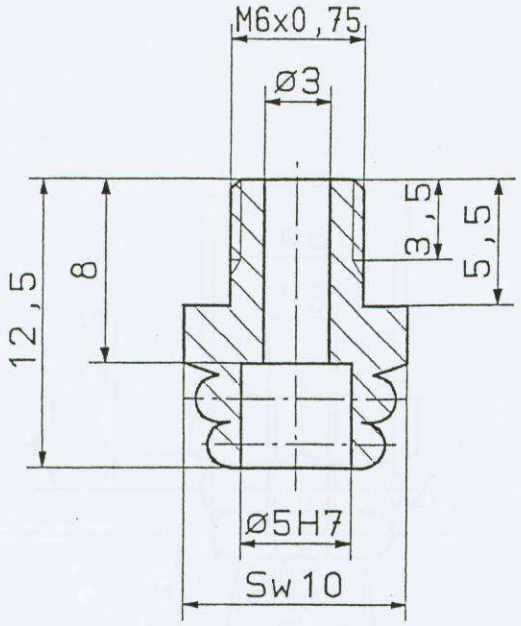


1	Destička	1	CuZn 20x3x75		
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar	16H7	+0,018
Povrch			R DIN ISO 1720		-0
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

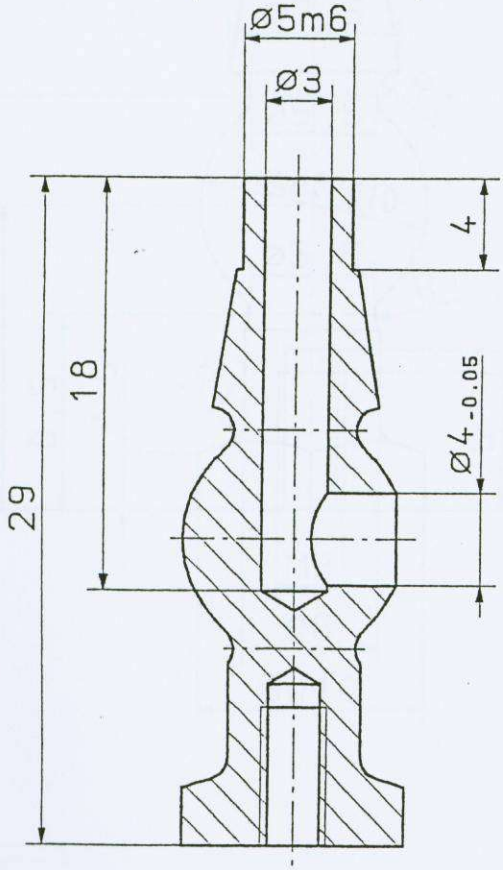
	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko		List
2 : 1	**Stirlingův motor**	2
		ze 16

Poz. 2



Poz. 3

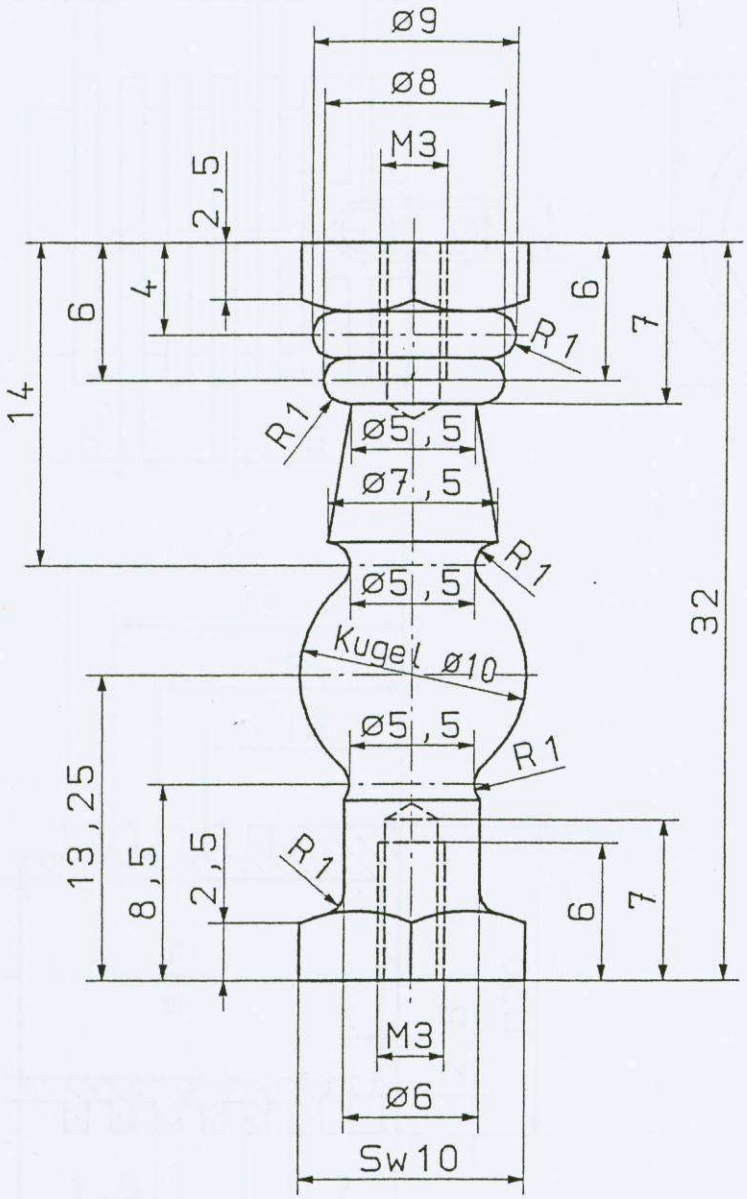


2	Šroub sloupku	1	CuZn HR10x50	5H7	+0,012
3	Levý sloupek	1	CuZn HR10x30		-0
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar	5m6	+0,008
Povrch			R DIN ISO 1720		+0,002
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko		List
3 : 1	**Stirlingův motor**	3
		ze 16

Poz. 4

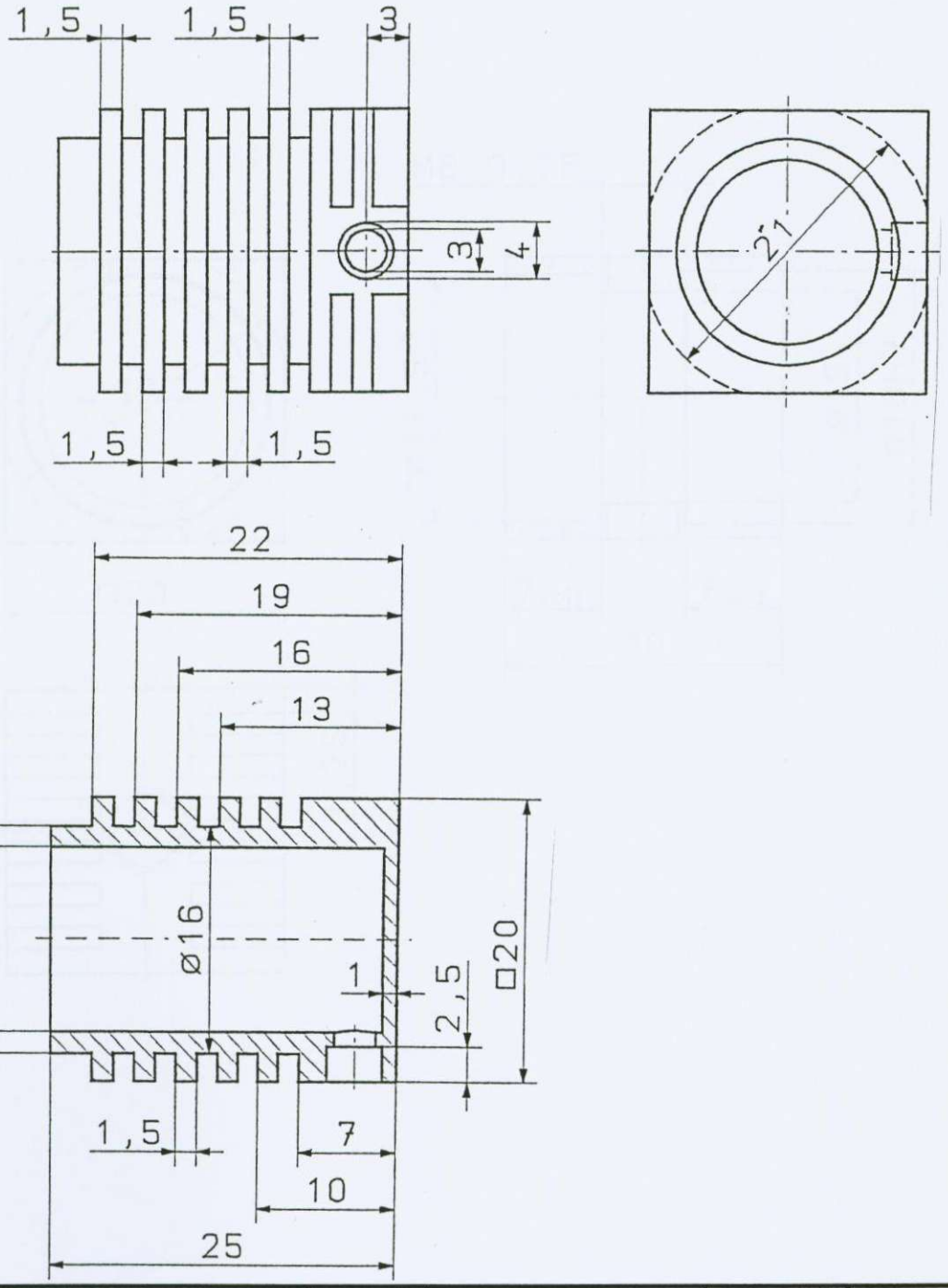


				5H7	+0,012
4	Pravý sloupek	1	CuZn HR10x55		-0
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar	5m6	+0,008
Povrch			R DIN ISO 1720		+0,002
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko	Stirlingův motor	List
3 : 1		4
		ze 16

Poz. 5

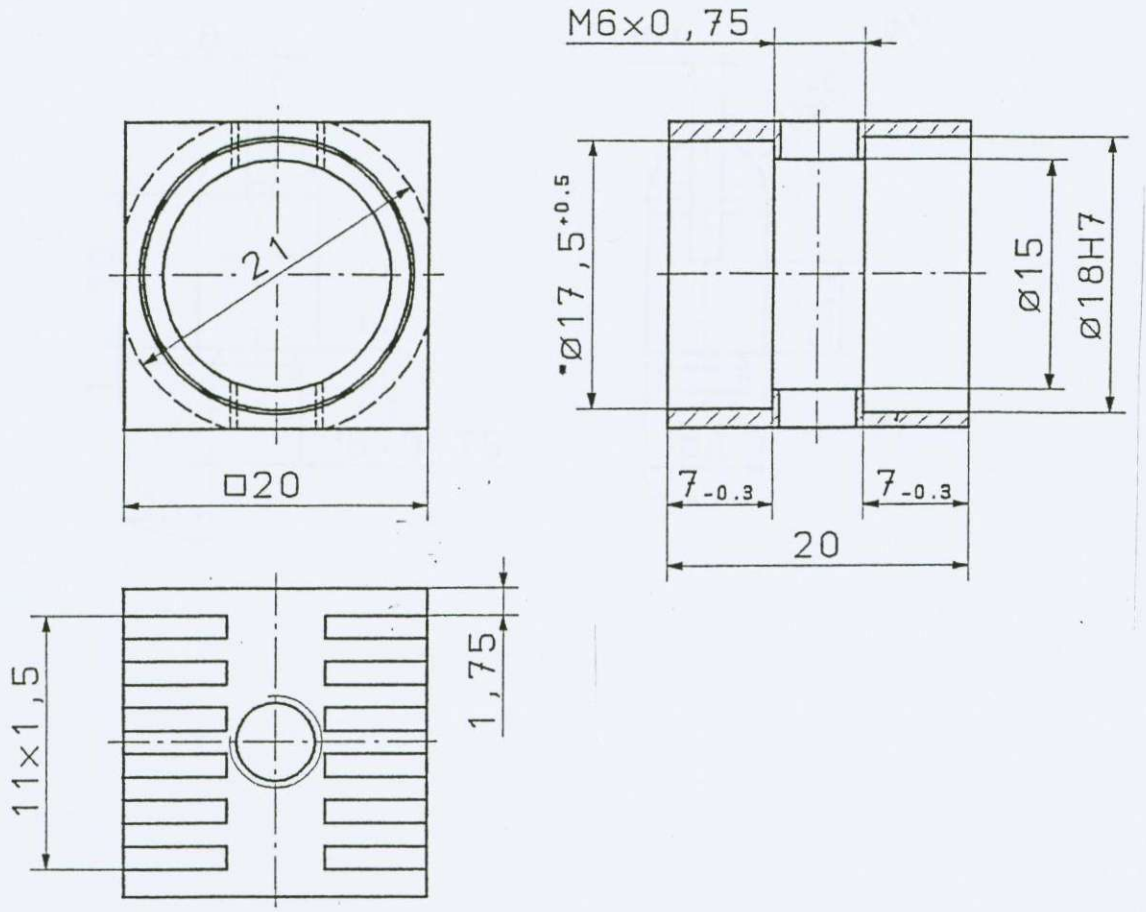


				16r7	+0,034
5	Válec	1	CuZn □20x35		+0,023
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar	13H7	+0,018
Povrch			R DIN ISO 1720		-0
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

	Nakresleno:	Kreslil:	
Datum:	28.10.2005	Košíček	
Změna:			

Měřítko		List
2 : 1	**Stirlingův motor**	5
		ze 16

Poz. 6

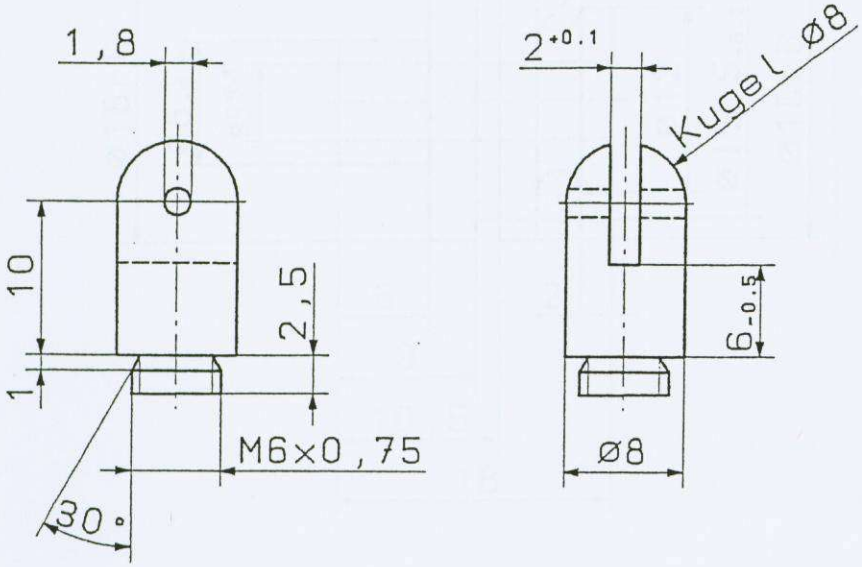


6	Nosník	1	CuZn □20x30		
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar	18H7	+0,018
Povrch			R DIN ISO 1720		-0
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko	Stirlingův motor	List
2 : 1		6
		ze 16

Poz.7

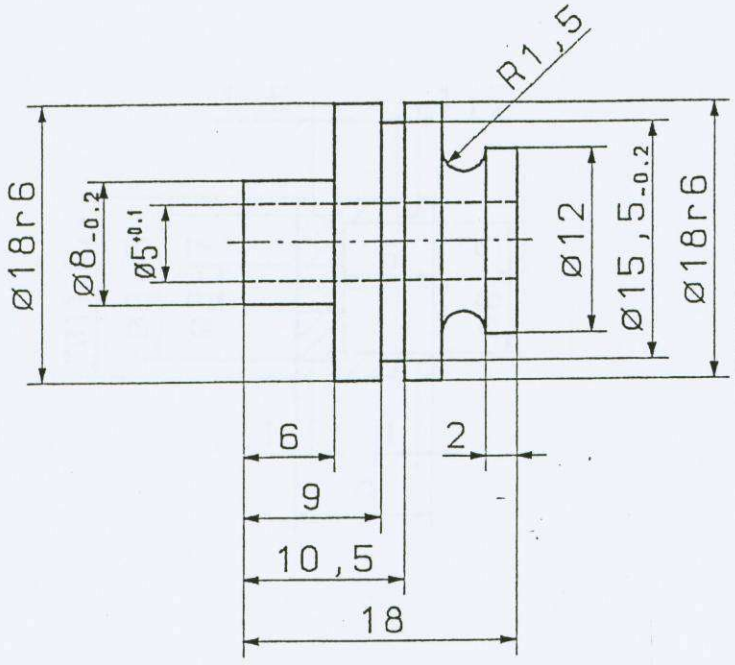


7	Sloupek vahadla	1	CuZn ø 8x20		
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar		
Povrch			R DIN ISO 1720		
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

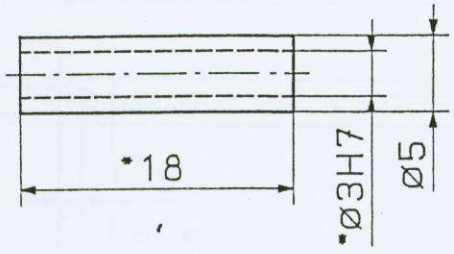
	Nakresleno:	Kreslil:	
Datum:	28.10.2005	Košíček	
Změna:			

Měřítko		List
2 : 1	**Stirlingův motor**	7
		ze 16

Poz. 8



Poz. 9

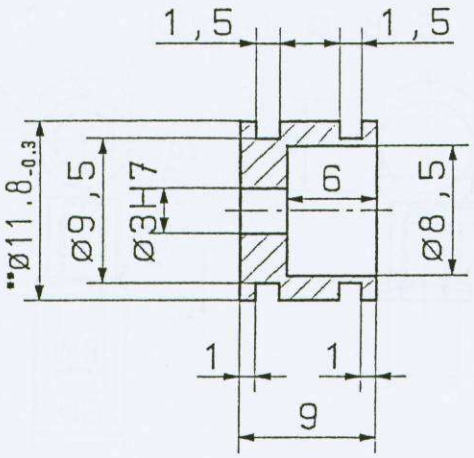


8	Vodítko	1	CuZn ø 20x20	18r6	+0,034
9	Ložisko	1	Cu-Sn6 ø 5x20		+0,023
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar	3H7	+0,012
Povrch			R DIN ISO 1720		-0
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

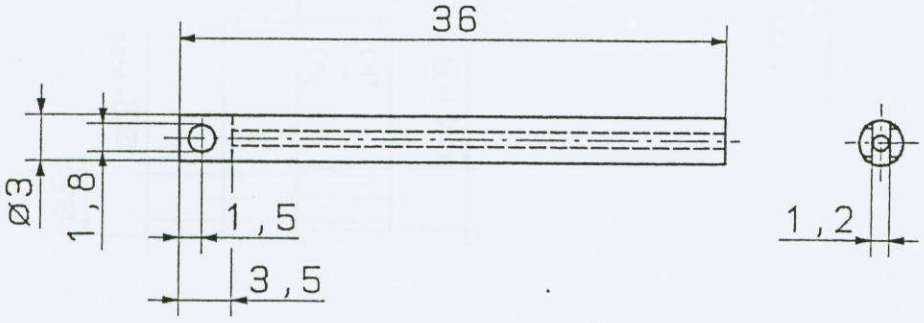
	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko	Stirlingův motor	List
2 : 1		8
		ze 16

Poz. 10



Poz. 11

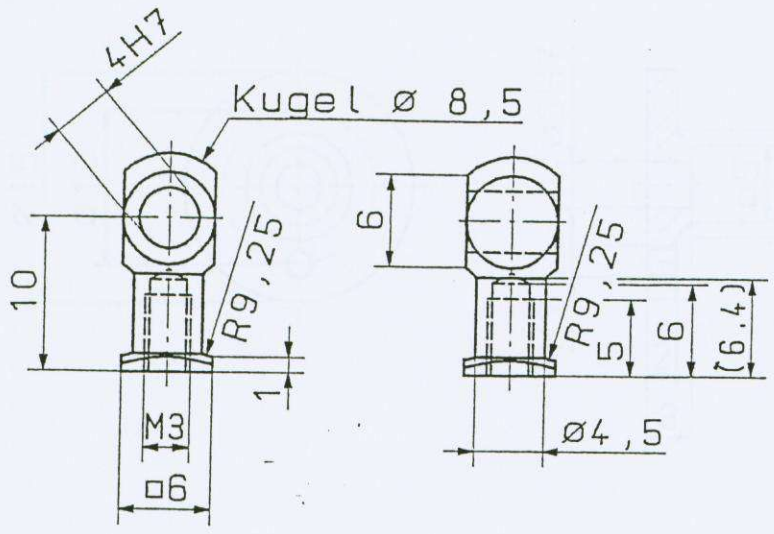


10	Píst	1	AlMgSi ø12x30		
11	Pístní tyč	1	CuZn Tr ø3x1x38		
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar	3H7	+0,012
Povrch			R DIN ISO 1720		-0
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

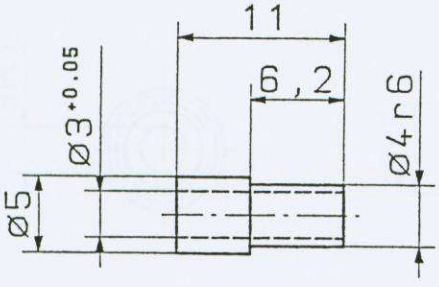
	Nakresleno:	Kreslil:	
Datum:	28.10.2005	Košíček	
Změna:			

Měřítko		List
2 : 1	**Stirlingův motor**	9
		ze 16

Poz. 12



Poz. 13

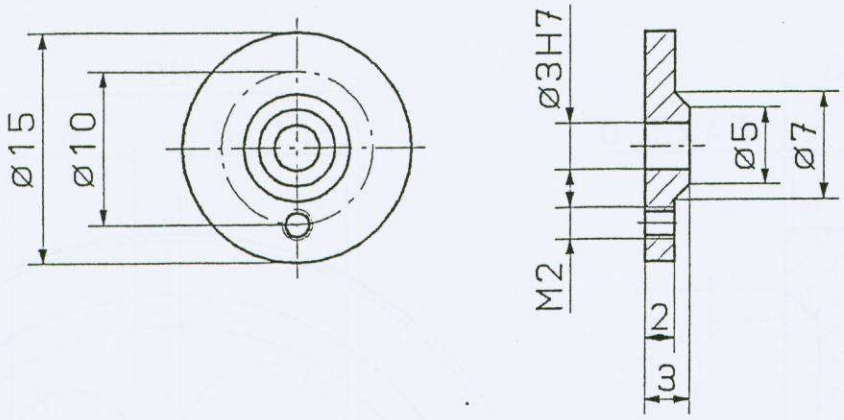


12	Stojan	1	CuZn □6x40	4r6	+0,023
13	Vložka	1	CuZn ø 5x20		+0,015
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar	4H7	+0,012
Povrch			R DIN ISO 1720		-0
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

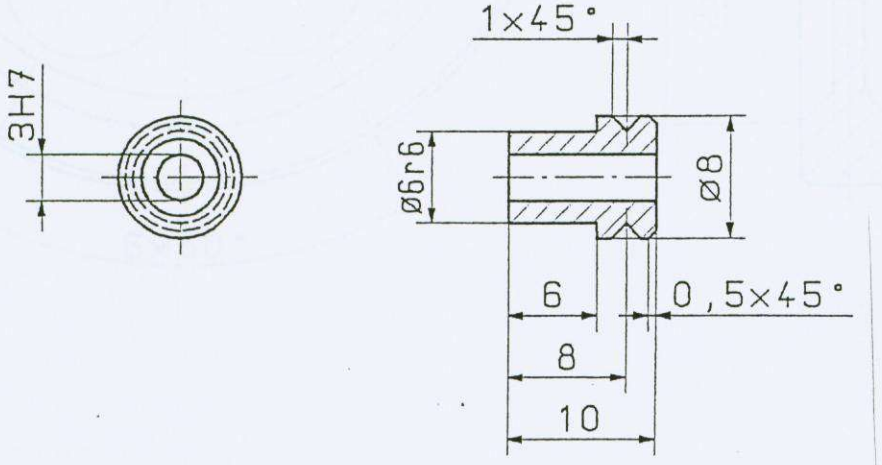
	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko	Stirlingův motor	List
2 : 1		10
		ze 16

Poz. 14



Poz. 16

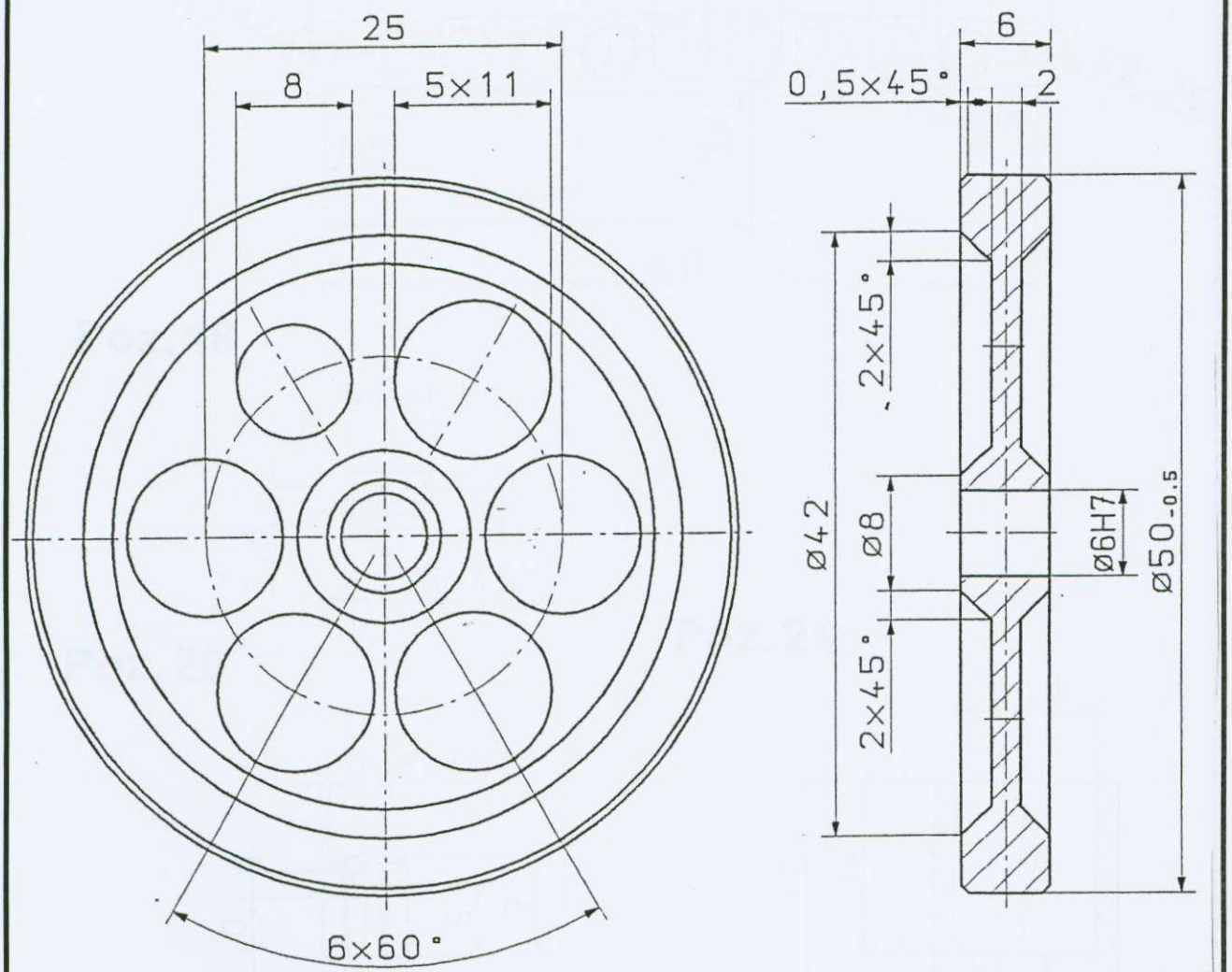


14	Klikovka	1	CuZn ø15x20	3H7	+0,010
16	Řemenice	1	CuZn ø 8x20		-0
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar	6r6	+0,016
Povrch			R DIN ISO 1720		+0,010
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko	Stirlingův motor	List
2 : 1		11
		ze 16

Poz. 15

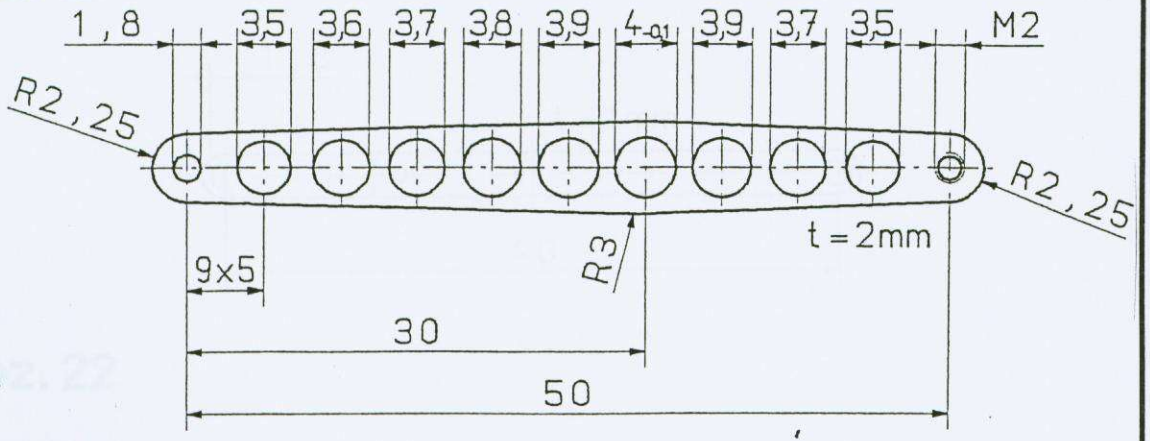


				6H7	+0,012
15	Setrvačník	1	CuZn ø50x10		-0
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar		
Povrch			R DIN ISO 1720		
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

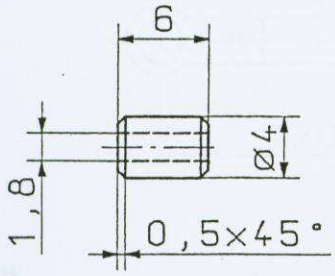
	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko		List
2 : 1	**Stirlingův motor**	12
		ze 16

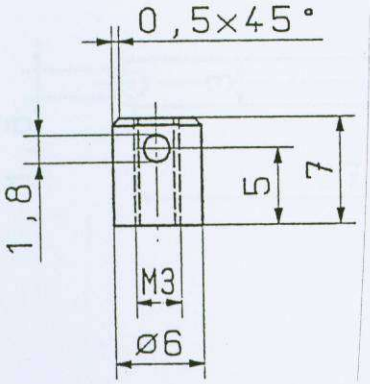
Poz. 17



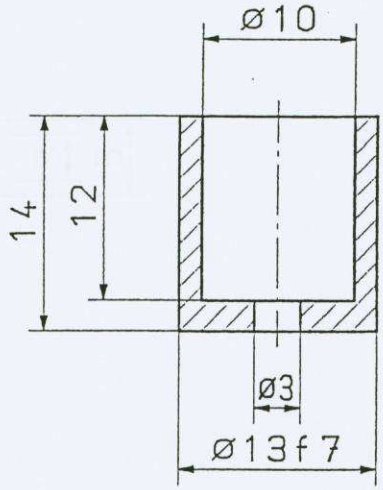
Poz. 18



Poz. 20



Poz. 21

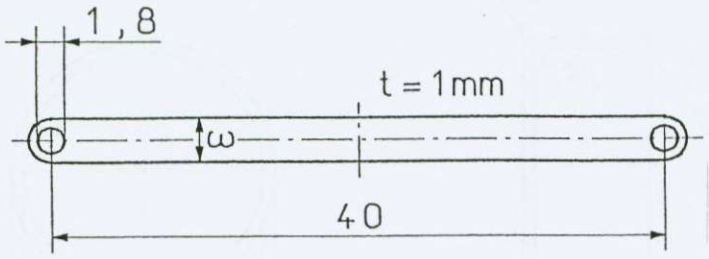


17	Vahadlo	1	CuZn 2x6x60		
18	Pouzdro vahadla	1	CuZn ø4x8		
20	Článek	1	CuZn ø6x25		
21	Pracovní píst	1	AlMgSi ø13x30		
Pozice	**Název**	**Kusů**	**Materiál Polotovar**	13f7	-0,016
Povrch			**R DIN ISO 1720**		-0,034
Rozměry bez tolerancí dle			**DIN 7168 - m**	**Tolerance**	**Odchylka**

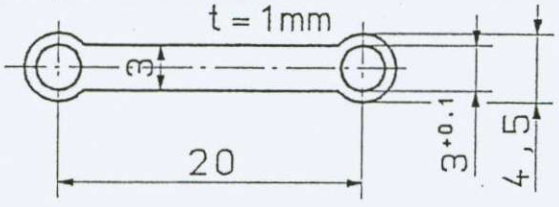
	Nakresleno:	**Kreslil:**
Datum:	**28.10.2005**	**Košíček**
Změna:		

Měřítko	***Stirlingův motor***	**List**
2 : 1		**13**
		ze 16

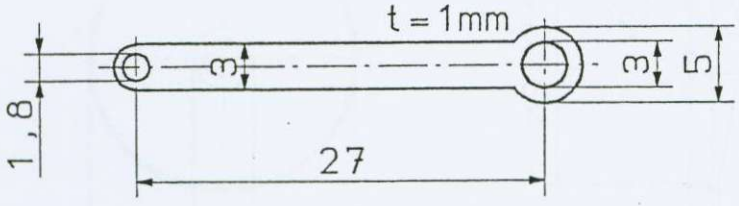
Poz. 19



Poz. 22



Poz. 23

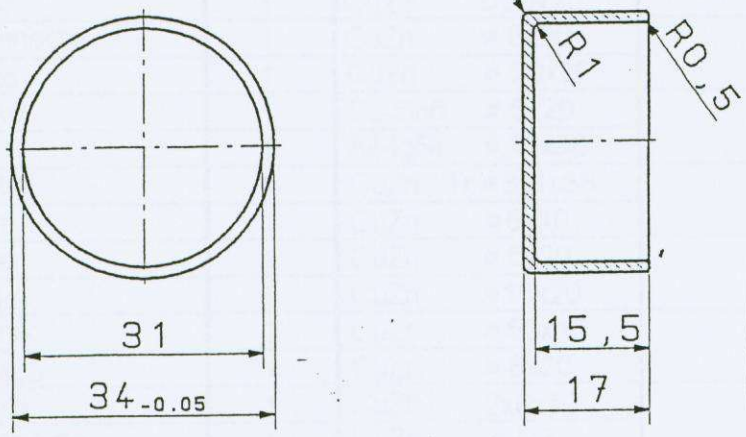


19	Ojnice pístu	2	CuZn 1x3x45		
22	Ojnice vahadla	1	CuZn 1x6x27		
23	Ojnice	1	CuZn 1x6x33		
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar		
Povrch			R DIN ISO 1720		
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

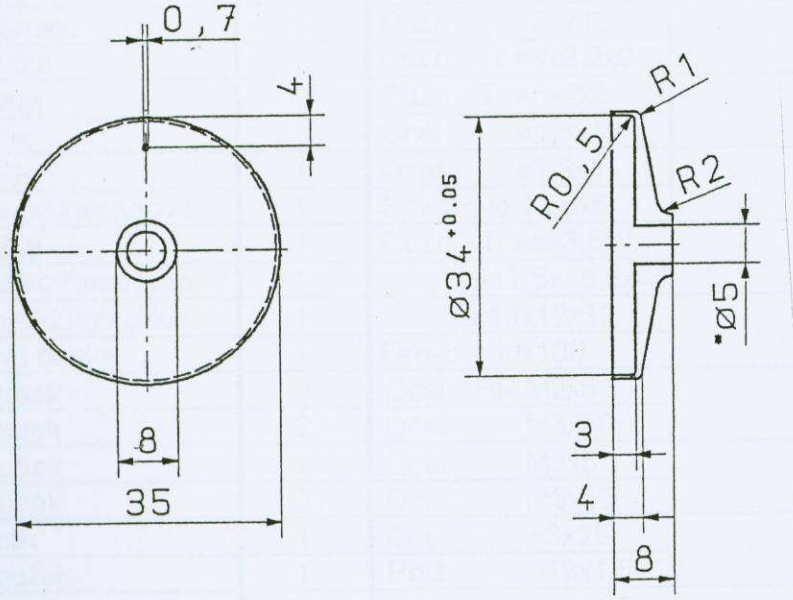
	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko	Stirlingův motor	List
2 : 1		14
		ze 16

Poz. 24



Poz. 25



24	Kahan	1	CuZn ø35x20		
25	Víčko kahanu	1	CuZn ø35x12		
Pozice	Název	Kusů	Materiál Polotovar		
Povrch			R DIN ISO 1720		
Rozměry bez tolerancí dle			DIN 7168 - m	Tolerance	Odchylka

	Nakresleno:	Kreslil:
Datum:	28.10.2005	Košíček
Změna:		

Měřítko	Stirlingův motor	List
1 : 1		15
		ze 16

1	Destička	1	CuZn 20x3x75		
2	Šroub sloupku	1	CuZn HR10x50		
3	Levý sloupek	1	CuZn HR10x30		
4	Pravý sloupek	1	CuZn HR10x55		
5	Válec	1	CuZn □20x35		
6	Nosník	1	CuZn □20x30		
7	Sloupek vahadla	1	CuZn ⌀ 8x20		
8	Vodítko	1	CuZn ⌀ 20x20		
9	Ložisko	1	Cu-Sn6 ⌀ 5x20		
10	Píst	1	AlMgSi ⌀ 12x30		
11	Pístní tyč	1	CuZn Tr⌀3x1x38		
12	Stojan	1	CuZn □6x40		
13	Vložka	1	CuZn ⌀ 5x20		
14	Klikovka	1	CuZn ⌀15x20		
15	Setrvačník	1	CuZn ⌀50x10		
16	Řemenice	1	CuZn ⌀ 8x20		
17	Vahadlo	1	CuZn 2x6x60		
18	Pouzdro vahadla	1	CuZn ⌀4x8		
19	Ojnice pístu	2	CuZn 1x3x45		
20	Článek	1	CuZn ⌀6x25		
21	Pracovní píst	1	AlMgSi ⌀13x30		
22	Ojnice vahadla	1	CuZn 1x6x27		
23	Ojnice	1	CuZn 1x6x33		
24	Kahan	1	CuZn ⌀35x20		
25	Víčko kahanu	1	CuZn ⌀35x12		
26	Trubička	2	CuZn Tr⌀4x3,2x9		
27	Vložka	2	CuZn Tr⌀3x2x3		
28	Kolík	3	Ocel ⌀1,8x10		
29	Kolík	1	Ocel ⌀1,8x4		
30	Spojovací trubička pryžová	1	Smršťovací ⌀6x6		
31	Vložka	1	CuZn Tr⌀5x3,5x8		
32	Skleněný válec-Zkumavka	1	⌀17,5x16,5x44		
33	Skleněný píst - Zkumavka	1	⌀13x12x32		
34	Základová deska	1	Dřevo 150x100		
35	Šroubek	2	Ocel HR M2x5		
36	Šroubek	2	Ocel M3x10		
37	Šroubek	1	Ocel M3x6		
38	Šroubek	2	Ocel M3x15		
39	Kolík	1	Ocel ⌀3x25		
40	O kroužek	1	Pryž ⌀18x1,5		
41	O kroužek	2	Pryž ⌀12x1,5		
43	Knot	1	⌀3,5x30		
Pozice	**Název**	**Kusů**	**Materiál Polotovar**		
Povrch			**R DIN ISO 1720**		
Rozměry bez tolerancí dle			**DIN 7168 - m**	**Tolerance**	**Odchylka**

	Nakresleno:	**Kreslil:**
Datum:	**28.10.2005**	**Košíček**
Změna:		

Měřítko	**Stirlingův motor**	**List** 16 ze 16

SOLO STIRLING 161

microKWK-Modul
microCHP-Module

solo STIRLING ENGINE
.ART OF TECHNOLOGY











STIRLING Engine
hat geschlossene „Arbeitsräume", in denen ein Edelgas den optimalen thermodynamischen Prozess durchläuft.

STIRLING Engine
erhält über einen speziellen Wärmetauscher die erforderliche Antriebsenergie.
Das externe Brenner-System FLOX® zeichnet sich durch Variabilität aus.
Flüssige, gasförmige, sowie feste (biogene) Brennstoffe können problemlos verwendet werden; wie auch Strahlungswärme, z. B. konzentrierte Sonnenenergie (Parabolspiegel in Almeria DLR).

STIRLING Engine
Die niedrigen Schadstoff-Emissionen werden ohne Katalysator erzielt.
Kein vergleichbares System erreicht diese Werte.

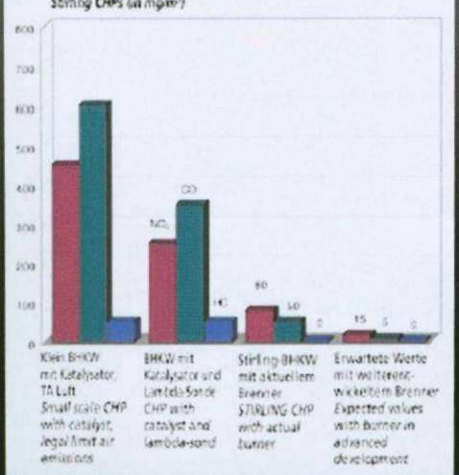
STIRLING Engine
ist ein prädestinierter „Langläufer". Die geschlossene Bauweise lässt keine Verbrennungsrückstände in das Motorinnere gelangen.
Es gibt keinen Ölverbrauch und keinen Ölwechsel.
Die Wartungsintervalle liegen bei 5.000 – 8.000 Stunden (Ziel 10.000 Std).

STIRLING Engine
ist leistungsgeregelt und stufenlos modulierbar von 2 - 9,5 kWel. 8 - 26 kWth.

STIRLING Engine
eine ideale technologische sowie sozioökologische Lösung der weltweit zunehmenden Bedeutung von dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung.

Schadstoff-Emissionen an NOx, CO, Partikel/ HC von konventionellen und Stirling BHKW's (in mg/m³)

Exhaust emissions of NOx, CO, soot, HC, of conventional and Stirling CHPs (in mg/m³)



STIRLING Engine
features sealed operating chambers. Within these chambers inert gas completes an optimum thermo-dynamic cycle.

STIRLING Engine
derives the requited energy for propulsion from a special heat exchanger. The external burner system FLOX® is outstanding in its versatility. Neither liquid, gaseous, nor solid (biogenic) fuels present a problem; nor does radiation heat, such as concentrated solar energy (parabolic mirror at Almeria, DLR, German Centre for Aeronautic and Space Research).

STIRLING Engine
The low emission of harmful substances are achieved without catalyst.
No other comparable systems reach these values.

STIRLING Engine
lends itself to continuous use over long periods. The sealed design prevents combustion residue contaminating the engine. There is no oil consumption or oil change. Service intervals are between 5.000 – 8.000 operating hours (our target is 10.000 hours).

STIRLING Engine
is adaptable directly to any required performance between 2 - 9,5 kWel., 8 - 26 kWth.

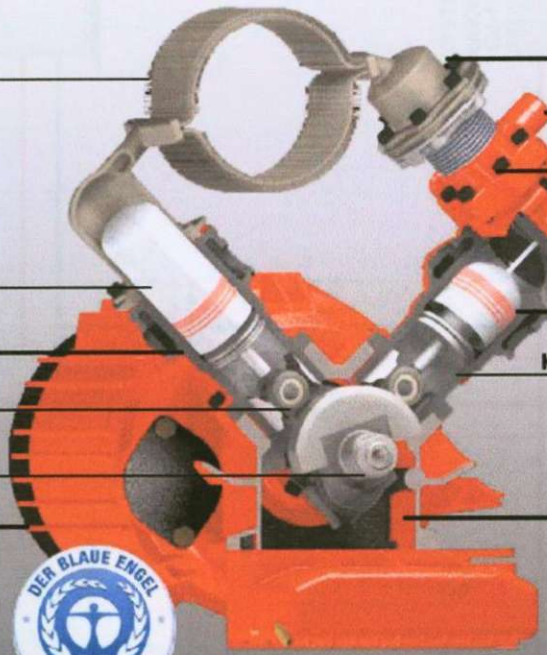
STIRLING Engine
An ingenious way to present an ideal technological and socio-ecological solution to the world-wide increasing importance of de-centralized power-heat-transfer.

* FLOX® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Fa. WS Wärmeprozesstechnik.
FLOX® is a registered trademark of WS Wärmeprozesstechnik.

SOLO STIRLING 161

microKWK-Modul
microCHP-Module

solo STIRLING ENGINE
.ART OF TECHNOLOGY



DER BLAUE ENGEL weil energieeffizient



STIRLING-Motor:
externe Verbrennung

OTTO-Motor:
interne Verbrennung





Technische Daten *STIRLING Engine* Erdgas-BHKW-Modul:		Technical Data *STIRLING Engine* natural gas CHP module:
Elektrische Leistung	2 - 9,5 kW	Electrical power
Wärmeleistung	8 - 26 kW	Thermal power
Elektrischer Wirkungsgrad	24 %	Electrical efficiency
Gesamtwirkungsgrad (Brennwerttechnik)	92 - 96 %	Total efficiency (higher heating value technology)
Arbeitsgas	Helium	Working gas
Wartungsintervall	5.000 - 8.000 h	Service interval
Emissionen CO, max.	50 mg/m³	Emissions CO, max.
Emissionen NOx, max.	80 mg/m³	Emissions NOx, max
Emissionen HC, max.	2 mg/m³	Emissions HC, max.
Ölverbrauch	keinerlitone	Oil consumption
Abmessungen L x B x H	1.280 x 700 x 980 mm	Dimensions L x W x H
Gewicht	480 kg	Weight

SOLO STIRLING GmbH Postfach 60 01 52 D 71050 Sindelfingen Telefon 07031/301-0 Telefax 07031/301-225 info@stirling-engine.de www.stirling-engine.de

Technische Dokumentation
SOLO STIRLING 161 microKWK-Modul

Beispiel für ein hydraulisches Gesamtschema SOLO STIRLING 161 microKWK-Modul

GP1A70R/GP1A71R

OPIC Photointerrupter with Encoder Functions

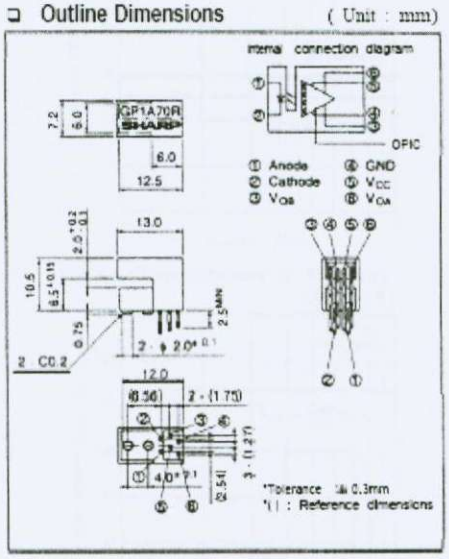
■ Features

1. 2-phase (A, B) digital output
2. Sensing accuracy
   (GP1A70R Disk slit pitch : 1.14mm)
   (GP1 A71 R Disk slit pitch : 0.7mm)
3. PWB mounting type
   (Lead bending type)
4. TTL compatible output
5. Compact, lightweight

■ Applications

1. Printers
2. Copiers
3. Numerical control machines

❑ Outline Dimensions (Unit : mm)



*"OPIC" (Optical IC) is a trademark of the SHARP Corporation.
An OPIC consists of a light-detecting element and signal-processing circuit integrated onto a Single Chip.

■ Absolute Maximum Ratings (Ta= 25°C)

Parameter		Symbol	Rating	Unit
Input	Forward current	I_F	50	mA
	*1Peak forward current	I_{FM}	1	A
	Reverse voltage	V_R	6	V
	Power dissipation	P	75	mW
Output	Supply voltage	V_{CC}	7	V
	Low level output current	I_{OL}	20	mA
	Power dissipation	P_O	250	mW
Operating temperature		T_{opr}	0 to + 70	°C
Storage temperature		T_{stg}	- 40 to + 80	°C
*2 Soldering temperature		T_{sol}	260	°C

*1 Pulse width≤100μ s, Duty ratio 0.01
*2 For 5 seconds

"In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that occur in equipment using any of SHARP's devices, shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest version of the device specification sheets before using any SHARP's device."

Fig. 3-a Duty Ratio vs. Frequency (GP1 A70R)

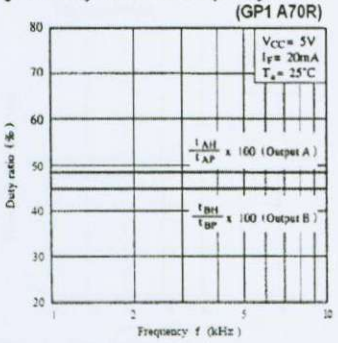


Fig. 3-b Duty Ratio vs. Frequency (GP1 A71 R)

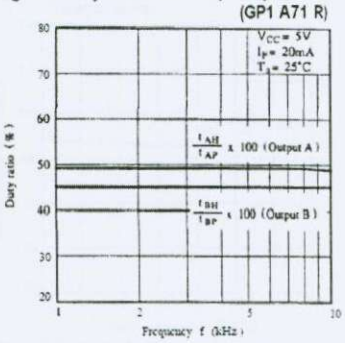


Fig. 4-a Phase Difference vs. Frequency (GP1 A70R)

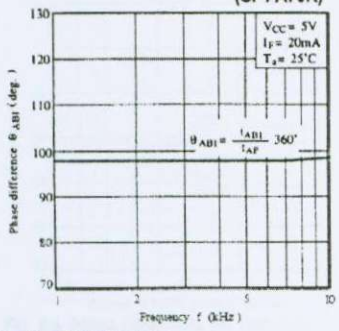


Fig. 4-b Phase Difference vs. Freauency (GP1 A71 R)

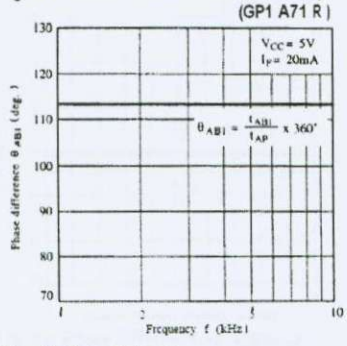


Fig. 5-a Duty Ratio vs. Ambient Temperature (GP1 A70R)

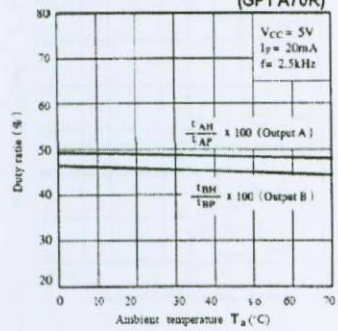


Fig. 5-b Duty Ratio vs. Ambient Temperature (GP1A71R)

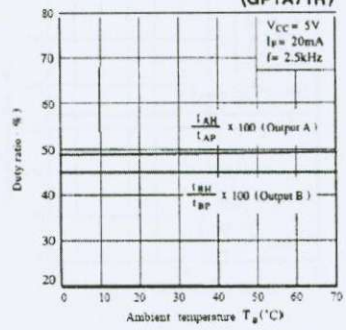


Fig. 6-a Phase Difference vs. Ambient Temperature

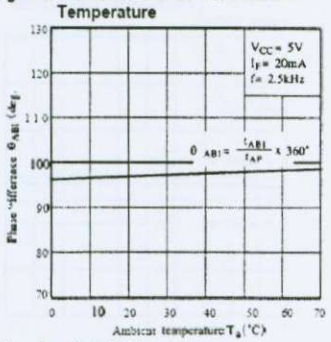


Fig. 6-b Phase Difference vs. Ambient Temperature

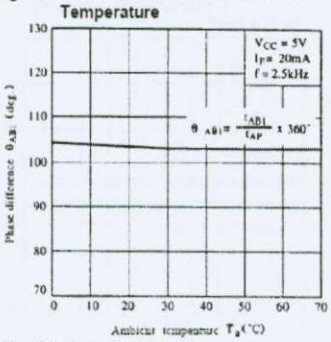


Fig., 7-a Duty Ratio vs. Distance (Xdirection) (GP1A70R)

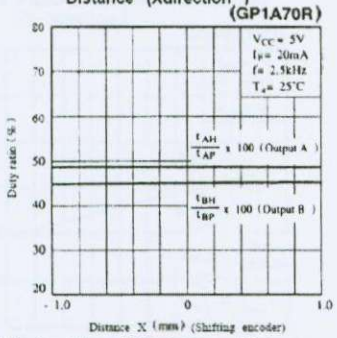


Fig. 7-b Duty Ratio vs. Distance (X direction) (GP1A71R)

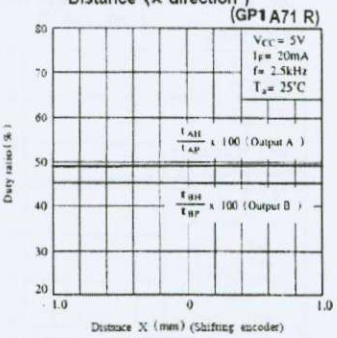


Fig. 8-a Phase Difference vs. Distance (X direction) (GP1A70R)

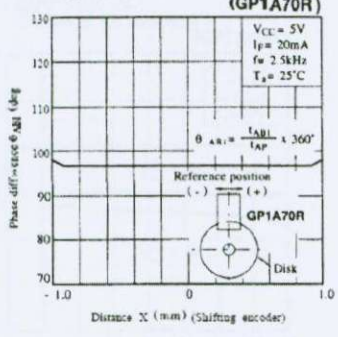


Fig. 8-b Phase Difference vs. Distance (X direction) (GP1A71R)

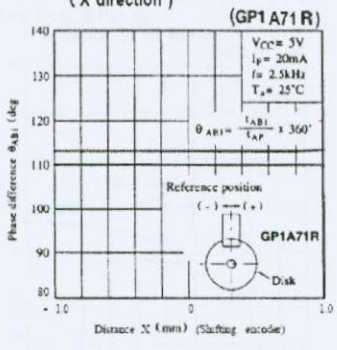


Fig. 9-a Duty Ratio vs. Distance (Ydirection)

(GP1A70R)

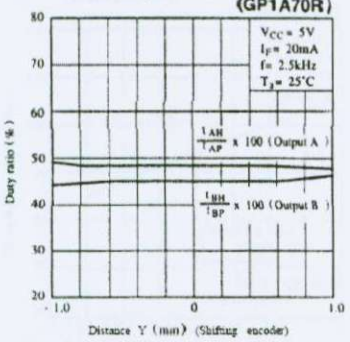


Fig. 9-b Duty Ratio vs. Distance (Y direction)

(GP1A71R)

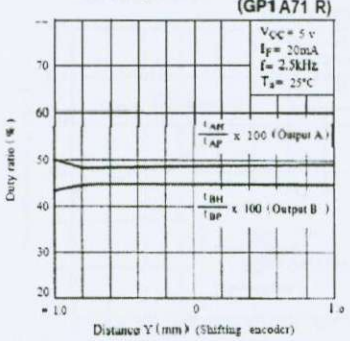


Fig.10-a Phase Difference vs. Distance (Y direction)

(GP1A70R)

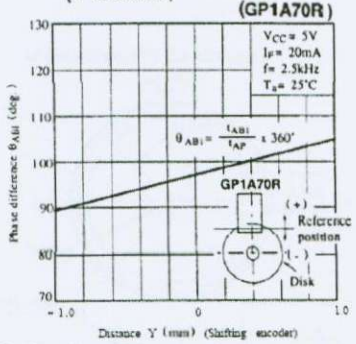


Fig.10-b Phase Difference vs. Distance (Y direction)

(GP1A71R)

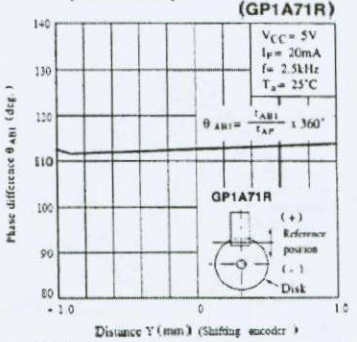


Fig.11-a Duty Ratio vs. Distance (Z direction)

(GP1A70R)

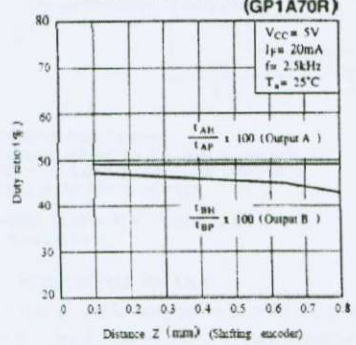


Fig.11-b Duty Ratio vs. Distance (Z direction)

(GP1A71R)

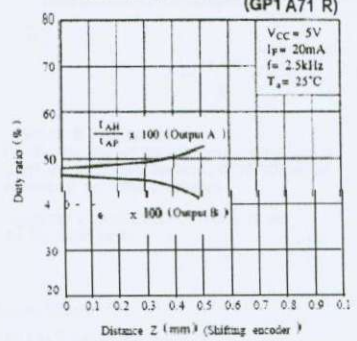


Fig.12-a Phase Difference vs. Distance (Z direction)

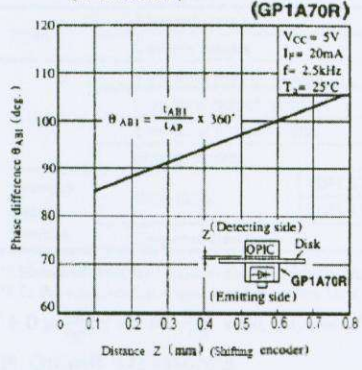
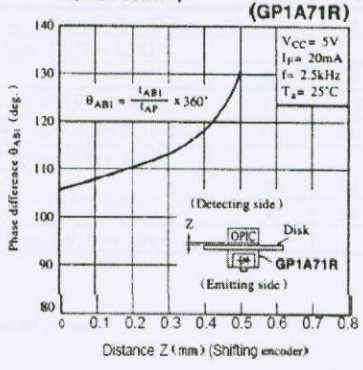
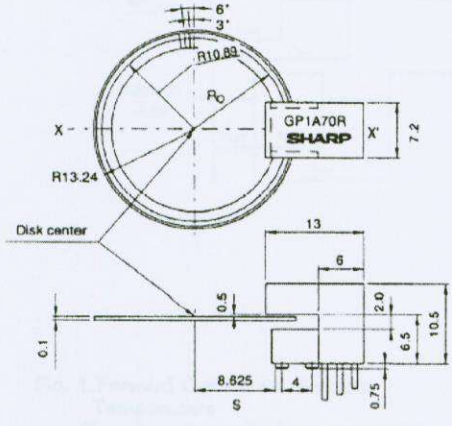
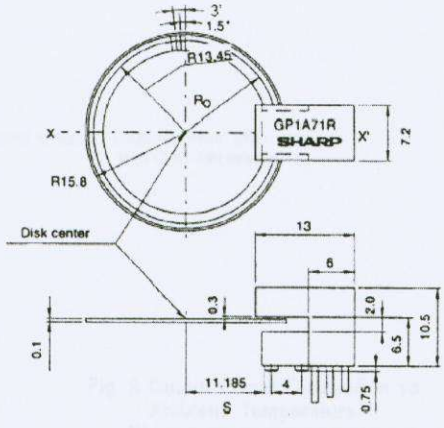


Fig.12-b Phase Difference vs. Distance (Z direction)



<Measurement Conditions> (Unit : mm)





<GP1A70R Basic Design>
R_O (distance between the disk center and half point of a slit) and S (installing position of GP1A70R) will be provided by the following equations.

R_O=N/60 x 10.89 (mm) N : number of slits
S= R_O-2.265 (mm)

<GP1A71R Basic Design>
R_O (distance between the disk center and half point of a slit) and S (installing position of GP1A71R) will be provided by the following equations.

R_O=N/120 x 13.45 (mm) N: number of slits
S= R_O- 2.265 (mm)

❑ Precautions for Use

(1) This device is designed to be used under the condition of I_F = 20mA

(2) It is recommended that a by-pass capacitor of more than 0.01 μF be added between V_{CC} and GND near the device in order to stabilize power supply line.

(3) As for other general cautions, refer to the chapter "Precautions for Use".

■ Electro-optical Characteristics

(Ta= 25°C unless otherwise specified)

Parameter			Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Input	Forward voltage		V_F	I_F = 20mA, Ta= 25°C	-	1.2	1.4	V
	Reverse current		I_R	V_R= 3V, Ta= 25°C	-	-	10	μA
output	Operating supply voltage		V_{CC}		4.5	5.0	5.5	V
	High level output voltage		V_{OH}	● 5V, I_F=20mA	2.4	4.9	-	V
	Low level output voltage		V_{OL}	● IOL= 8mA, V_{CC}=5V, I_F= 20mA	-	0.1	0.4	V
	Supply current		I_{CC}	*4 V_{CC}= 5V, I_F= 20mA	-	5	20	mA
Transfer characteristics	Duty ratio	GP1A70R	*5 D_A, D_B	*3 V_{CC}= 5V, I_F= 20mA, f = 2.5kHz	25	50	75	%
		GP1A71R			25	50	75	%
	Response frequency		$f_{MAX.}$	*3 V_{CC}= 5V, I_F= 20mA	-	-	10	kHz

*3 Measured under the condition shown in Measurement Conditions.
*4 In the condition that output A and B are low level.
*5 D_A: $\frac{t_{AH}}{t_{AP}}$ x 100, D_B: $\frac{t_{BH}}{t_{BP}}$ x 100, Duty ratio: Average disk rotation time per turn

■ Output Waveforms

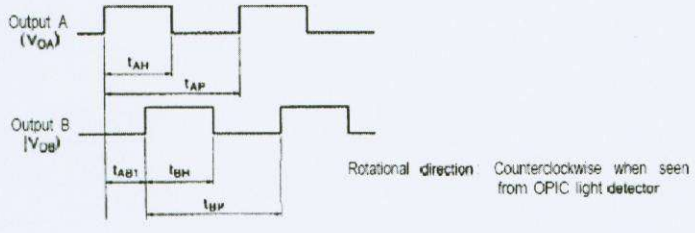


Fig. 1 Forward Current vs. Ambient Temperature

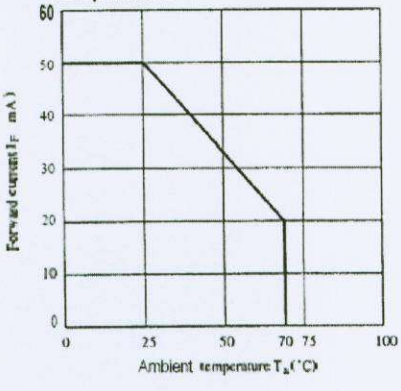
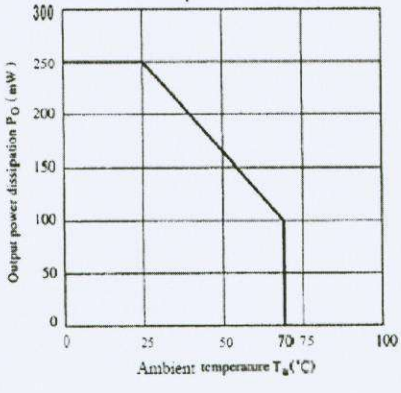


Fig. 2 Output Power Dissipation vs. Ambient Temperature



IR-Reflex-Gabellichtschranke mit Drehgeberfunktion

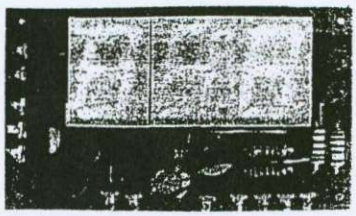
Der Empfängerteil des Bausteins enthält einen IC,
der 2 phasenversetzte, TTL-kompatible Rechtecksignale
bereitstellt.
Anhand der beiden Impulsfolgen können mit dem GP 1 A70R
die Drehzahl und die Drehrichtung ermittelt werden.
Hierbei beträgt die maximale Signalfrequenz 10 kHz.
Mit der 120er Taktscheibe sind somit Drehzahlen
von max. 5000 U/min. möglich.
Die Ausgänge sind TTL-kompatibel(2OmA).
Die im Lieferumfang enthaltene Taktscheibe
verfügt über eine gedrehte Aluminium-Präzisionsnabe
mit Madenschraubenfixierung.

Bestellnummern

185019 GP1A70R
Taktscheibe, 120 Takte

Univerzální třímístný panelový čítač/otáčkoměr

Zdeněk David



Třímístný panelový čítač je konstruován jako univerzální modul pro všestranné použití. Největší předností modulu jsou malé rozměry, jednoduchost zapojení, potřeba pouze jediného napájecího napětí a poměrně malá spotřeba proudu. Malé rozměry a jednoduché připojení umožňují použít tento modul v měřicích přístrojích, např. jako jednoduchý čítač, otáčkoměr, prostý čítač impulsů, měřič kmitočtu místo stupnice v tónovém generátoru, počítač kol k autodráze, digitální stopky apod.

Technické údaje

Zobrazení: 3 místa.
Vstupní úroveň: CMOS.
Napájecí napětí: min. 4,5 V; max. 5,5 V.
Odběr ze zdroje: asi 80 mA.
Maximální kmitočtový rozsah modulu čítače: 1 MHz.
Rozměry modulu čítače: 5,5 x 3,5 cm.

Popis zapojení modulu čítače

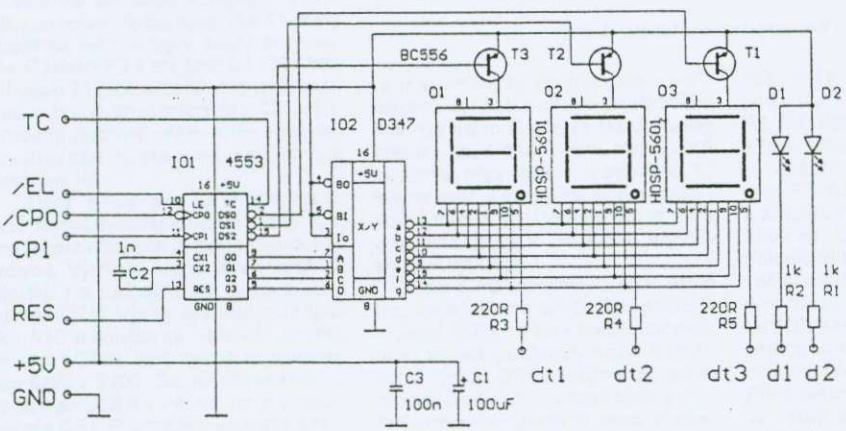
Modul je osazen integrovaným obvodem IO1 - 4553. Tento obvod je složen ze tří synchronních čítačů BCD, tří čtyřbitových střadačů, multiplexeru s vlastním oscilátorem a z výstupních obvodů. Vstup čítače je na vývodu 12 (/CPO), který reaguje na sestupnou hranu impulsu, a vývodu 11 (CP1), který reaguje na náběžnou hranu. Tyto vstupy mohou být buzeny impulsy s menší strmostí hran. Jeden z těchto vstupů může být použit pro čítané impulsy a druhý pro jejich hradlování. Okamžitý stav čítače je možné uchovat blokováním střadače, tj. přivedením úrovně H na vývod 10 (/EL). Výstup přenosu (TC - vývod 14) je v úrovni H při stavu čítače 999, jinak je v úrovni L. Výstup přenosu TC slouží pro kaskádní řazení dalších obvodů, nebo jej lze použít k detekci přetečení. Kmitočet vnitřního oscilátoru multiplexeru je určen kapacitou externího kondenzátoru C2. Přivedením úrovně H na vývod 13 (RES) čítač se vynuluje a zablokuje se oscilátor multiplexeru (displej zhasne).

Integrovaný obvod IO2 - D347 je dekodér a proudový budič sedmisegmentového displeje. Displeje pracují v multiplexním režimu a jejich společné anody jsou spínány tranzistory T1, T2 a T3. Desetinné tečky displeje jsou vyvedeny přes rezistory R3, R4 a R5 na pájecí špičky na desce s plošnými spoji. Připojením některé pájecí špičky na zem se rozsvítí příslušná desetinná tečka. Svítivé diody D1, D2 slouží k doplňující indikaci funkce modulu. Připojením některé pájecí špičky na zem se rozsvítí příslušná LED (např. pro indikaci Hz-kHz, indikaci blokování apod.). Napájecí napětí je blokováno kondenzátory C1 a C3.

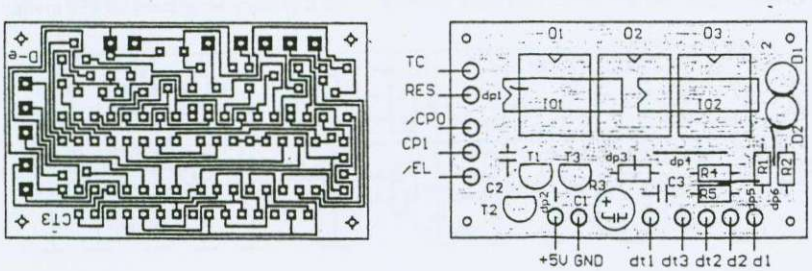
Popis zapojení modulu jednoduché časové základny

Jednoduchá časová základna zajišťuje správný časový sled jednotlivých operací v čítači. Je osazena časovačem NE555 v astabilním režimu. Stabilita tohoto časovače je pro třímístnou indikaci vyhovující díky výborné teplotní stabilitě integrovaného obvodu.

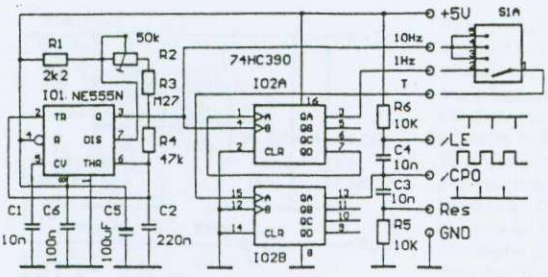
Základní kmitočet časové základny je 10 Hz a je určen kapacitou kondenzátoru C2, odporem rezistorů R3, R4 a nastavením odporového trimru R2. Impulsy jsou přivedeny na špičku 10 Hz a současně na vstup IO2A, vývod 4, kde jsou děleny deseti. Pro získání impulsů s aktivní délkou 0,1 s přivedeme



Obr. 1. Zapojení základního modulu čítače



Obr. 2. Deska s plošnými spoji a rozmístění součástek modulu čítače



Obr. 3. Časová základna pro modul čítače

impulsy o kmitočtu 10 Hz na špičku T. Impulsy ze špičky T jsou přivedeny do vstupu IO2B, vývod 15, kde se jejich kmitočet dělí dvěma. Pro získání impulsů s aktivní délkou impulsu 1 s přivedeme impulsy o kmitočtu 1 Hz do vstupu T. Z výstupu IO2, vývod 13, se odebírají impulsy pro řízení modulu čítače. Zapojíme je na vstup modulu čítače /CP0. Výstup impulsů Res, upravený derivačním článkem C3R5, ovládá nulování modulu čítače při každém novém cyklu měření. Tento výstup propojíme se vstupem modulu čítače RES. Výstup impulsů /LE upravený derivačním článkem C4R6 ovládá zápis stavu čítače do střadače po každém ukončeném cyklu měření. Zapojíme jej na vstup modulu čítače /EL. Délka nulovacího a zapisovacího impulsu je daná časovou konstantou RC a je velmi malá. Napájecí napětí je blokováno kondenzátory C5 a C6.

Vstupní zesilovač s děličkou kmitočtu

Vstupní zesilovač zvětšuje citlivost modulu čítače. Lze jej použít i pro jiné čítače. Vstupní citlivost je 40 mV, odběr proudu 10 mA. Měřený signál je přiveden na polem řízený tranzistor T1, který zajišťuje velký vstupní odpor zesilovače. Rezistor R2 s diodami D1, D2 chrání vstup T1 proti přepětí. Signál je zesílen a tvarován tranzistory T2 a T3. Vhodný pracovní režim a tím i citlivost zesilovače nastavíme odporovým trimrem R5.

Signál z kolektoru T3 je dále tvarován čtyřmi dvouvstupovými hradly IO1, na jejichž vstupech je Schmittův klopný obvod. Výstupní signál je vyveden na špičku f a současně na vstup děličky deseti IO2A). Výstup je vyveden na špičku f/10 a současně na další děličku deseti (IO2B), jejíž výstup je přiveden na špičku f/100. Signál přivedeme na přepínač S1B a z něj na vstup modulu čítače CP1. Pro měření kmitočtů s rozsahem 999 Hz použijeme impulsy z časové základny 1 Hz a pro měření kmitočtů s rozsahy 9,99 kHz, 99,9 kHz, 999 kHz impulsy z časové základny 10 Hz, zvolené přepínačem S1A. Signály z časové základny - /LE, /CP0 a Res připojíme na modul čítače.

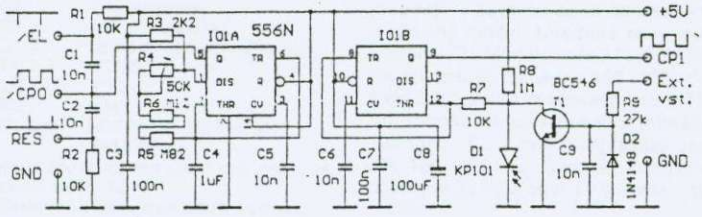
Prostý čítač impulsů

Prostý čítač impulsů lze použít např. pro počítání kol k autodráze, k registraci počtu prošlých osob, počitadlo k naviječce apod. Impulsy o úrovni CMOS přivedeme na vstup CP1 modulu čítače. Je-li použit mechanický snímač (např. kontakty jazýčkového relé), připojíme jeho kontakty mezi vstup CP1 a zem (GND) a zapojíme rezistor s odporem 10 kΩ z vývodu CP1 na +5 V. U autodráhy způsobí průjezd auta, které má umístěno na podvozku malý magnet, sepnutí kontaktů jazýčkového relé. Na vstup čítače se tak dostávají impulsy, které čítač počítá. Vstup RES zapojíme přes rezistor s odporem 10 kΩ na zem a zapojíme spínač (tlačítko) jedním kontaktem na vstup RES a druhým na +5 V. Sepnutím spínače se čítač vynuluje.

Vstup /CP0 zapojíme na +5 V, vstup /EL zapojíme na GND. Pro počítání impulsů můžeme také použít fotoelektrický snímač, používaný pro otáčkoměr. Jeho výstup CP1 zapojíme na vstup modulu čítače CP1, ostatní signály z fotoelektrického snímače nepoužijeme. Snímací fotodiodu umístíme tak, aby průjezd auta přerušil světelný paprsek žárovky. Žárovku napájíme ze zdroje 5 V a umístíme ji naproti snímacímu fototranzistoru.

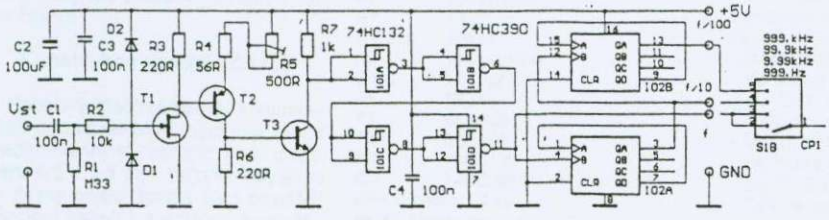
Měření rychlosti otáčení

Otáčkoměr je nutným doplňkem pro přesné měření otáček modelářských spalovacích a elektrických motorků. Rozsah měření otáčkoměru je 0 až 99900 ot/min. Snímání otáček je fotoelektrické - přerušováním světelného paprsku vrtulí nebo snímáním odrazů světla odrazovými ploškami. Může to být např. kousek bílé samolepicí pásky nalepené na tmavém pozadí, nebo naopak na světlou rotující část nalepíme proužek matně černé samolepicí pásky. Místo samolepicí pásky lze použít barevný lak. Elektrické impulsy z fotodiody D1 nebo z vnějšího vstupu (vývod ext. vst.) jsou přivedeny do integrovaného obvodu IO1B - NE556, který vytváří impulsy pravoúhlého průběhu pro další zpracování v modulu čítače. Druhá polovina časovače NE556 vytváří vlastní časovou základnu otáčkoměru. Aktivní délka hradlovacího impulsu na výstupu IO1A (vývod 5) je 0,6 s a je určena kapacitou kondenzátoru C4, odporem rezistorů R5 a R6 a nastavením odporového trimru R4. Rozsah měření otáčkoměru lze změnit podle potřeby změnou hodnot C4, R5, R6, R4. Výstupy /EL, /CP0, RES slouží k řízení modulu čítače.

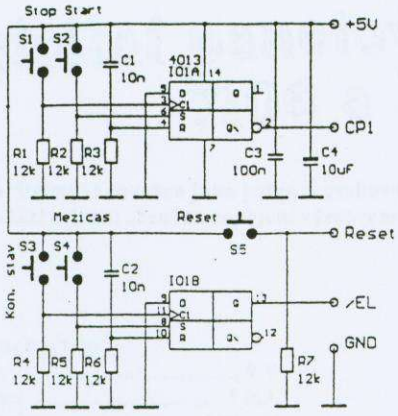


Obr. 5. Modul měření rychlosti otáčení

Otáčkoměr nastavíme nf generátorem. Přivedeme na vnější vstup signál o amplitudě alespoň 1 V o kmitočtu 1500 Hz, což odpovídá 90000 ot/min. Fotodiodu D1 dokonale zastíníme, aby vnější vstup nebyl ovlivňován. Odporovým trimrem R4 nastavíme údaj čítače na 900. Nestačí-li k tomu rozsah trimru, změníme odpor rezistoru R6. Tím je celé nastavení otáčkoměru skončeno. Přivedením signálu na vnější napěťový vstup umožňuje otáčkoměr měřit otáčky automobilových motorů. V tom-



Obr. 4. Vstupní zesilovač pro modul čítače



Obr. 6. Zapojení modulu digitálních stopek

to případě nezapojujeme fotodiodu D1, nebo ji dokonale zastíníme, aby nebyl ovlivňován vnější vstup. Pro měření rychlosti otáčení s rozsahem 0 až 99900 ot/min čtyřdobého čtyřválce změníme C2 na 470 nF, R4 na 50 kΩ, R5 na 820 kΩ a R6 na 180 kΩ. Hradlovací impuls se pak zkrátí na 0,3 s. Otáčkoměr nastavíme nf generátorem přivedením signálu na o amplitudě alespoň 1 V a kmitočtu 1000 Hz na externí vstup . Tomuto kmitočtu odpovídá 30000 ot/min. Odporovým trimrem R4 nastavíme údaj čítače na 300. Tím je celé nastavení otáčkoměru pro čtyřdobý čtyřválec hotové. Signál z přerušovače přivedeme na vnější vstup, zem otáčkoměru propojíme s kostrou vozu. Napájecí napětí je blokováno kondenzátory C3, C7 a C8.

Digitální stopky

Modul čítače lze použít i jako stopky k měření času. Stopky jsou ovládány pěti tlačítky: start, stop, mezičas, konečný stav a reset. Stopky se spouštějí tlačítkem "start". Chceme-li kdykoli v době měření zjistit mezičas, stiskneme tlačítko mezičas, na displeji se zobrazí časový údaj a přitom stopky měří nepřetržitě dál. Konečný stav čítače se zobrazí stisknutím tlačítka "kon. stav". Chceme-li měření ukončit, stiskneme tlačítko "stop". Sepnutím spínače reset se na displeji zobrazí stav 000. Pro měření času do 999 s přivedeme impulsy o kmitočtu 1 Hz, pro měření času do 99,9 s přivedeme impulsy o kmitočtu 10 Hz na vstup modulu čítače /CP0. Z časové základny pro čítač použijeme pouze impulsy ze špiček 1 Hz a 10 Hz. Ostatní signály z časové základny nepoužijeme.

Konstrukce modulu čítače

Panelový čítač/otáčkoměr je konstruován jako univerzální modul na desce s jednostrannými plošnými spoji o rozměru 5,5 x 3,5 cm. Nejprve zapájíme do desky pájecí špičky (pro pozdější připojení kabelů) a drátové propojky. Pro propojky použijeme vodič o průměru 0,5 mm (např. zbytky vývodů z rezistorů). Potom zapájíme integrované obvody, rezistory, kondenzátory, tranzistory a jako poslední dvě upravené jednořadové objímky na displej. Pro displej potřebujeme dvě objímky s patnácti piny. Jednořadová 15pinová objímka se běžně nevyrábí. Proto použijeme 20pinovou, kterou zkrátíme na 15 pinů. Kondenzátory je nutné zapájet tak, aby jejich vývody byly co nejkratší. Při osazování elektrolytického kondenzátoru dbáme na správnou polaritu, u integrovaných obvodů, tranzistorů a diody dbáme na správnou orientaci vývodů. Po pečlivém zapájení předepsaných součástek připojíme kabely pro měření. Máme-li k dispozici napájecí napětí větší než 5 V, použijeme stabilizátor napětí. Vhodný je např. typ 7805, z něhož pak napájíme modul čítače a další doplňky.

Seznam součástek

Modul čítače

R1, 2	1 kΩ
R3, 4, 5	220 Ω
C1	100 µF/10 V rad.
C2	1 nF/keramický
C3	100 nF/keramický
D1, 2	LED 3 mm s malým příkonem
T1, 2, 3	BC556
IO1	4553
IO2	D347
O1, 2, 3	HDSP-5601 (HDSP-5501, SA52-E'WA)

jednořadová objímka („sokl") 15 pinů, 2 ks
pájecí špička 12 ks
Deska s plošnými spoji DCT3, vyvrtaná

Modul časové základny

R1	2,2 kΩ
R2	50 kΩ, trimr
R3	270 kΩ
R4	47 kΩ
R5, 6	10 kΩ
C1, 3, 4	10 nF/keramický
C2	220 nF/MKT
C5	100 µF/10 V rad.
C6	100 nF/keramický
IO1	NE555
IO2	74HC390

pájecí špička 5 ks
deska s plošnými spoji TBC3

Vstupní zesilovač

R1	330 kΩ
R2	10 kΩ
R3, 6	220 Ω
R4	56 Ω
R5	500 Ω, trimr
R7	1 kΩ
C1, 3, 4	100 nF
C2	100 µF/10 V
D1, 2	1N4148
T1	BF245
T2	BC556B
T3	BC546B
IO1	74HC132
IO2	74HC390

pájecí špička 7 ks
deska s plošnými spoji ZCT3

Modul fotoelektrického snímače

R1, 2, 7	10 kΩ
R3	2,2 kΩ
R4	50 kΩ, trimr
R5	820 kΩ
R6	120 kΩ
R8	1 MΩ
R9	27 kΩ
C1,2,5,6	10 nF/keramický
C3, 7	100 nF/keramický
C4	1 µF/MKT
C8	100 µF/10 V
D1	KP101
D2	1N4148
T1	BC546
IO1	NE556

pájecí špička 8 ks
deska s plošnými spoji FSC3

Seznam součástek modulu digitálních stopek

R1 až 7	12 kΩ
C1, 2	10 nF/keramický
C3	100 nF/keramický
C4	10 µF/10 V
IO1	4013
TI 1 až 5	PC17

pájecí špička 5 ks
deska s plošnými spoji STC3

Sadu součástek lze objednat na dobírku na adrese DAVID - elektronik, Teyschlova 15, Brno 635 00. V následujícím přehledu je cena za sadu součástek včetně vyvrtané desky s plošnými spoji, v závorce cena za osazený a oživený modul. Uvedené ceny jsou včetně DPH. Modul čítače 270 (320) Kč, modul časové základny 120 (160) Kč, modul vstupního zesilovače 145 (185) Kč, modul fotoelektrického snímače 125 (165) Kč a modul digitálních stopek 150 (190) Kč. K cenám účtujeme poštovné 29 Kč a obal 6 Kč. Jsme plátci DPH.

\+ + +



Když se mi dostal ke zpracování tento článek, rozhodl jsem se modul čítače použít ke zmodernizování svého prastarého generátoru *RC* (s jedním OZ), který používám již mnoho let. Kmitočet čtu na stupnici – dodnes nakreslené provizorně tužkou.

Modul čítače jsem chtěl doplnit jednoduchou časovou základnou a použít jej místo dosti nepřesné mechanické stupnice. Do uzávěrky tohoto čísla AR se mi však podařilo osadit a „oživit" pouze modul čítače. Slovo oživit jsem dal do uvozovek – oživovat nebylo co, neboť modul pracoval na první zapojení.

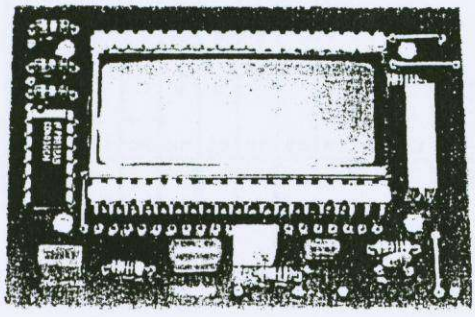
Pro konstrukci vlastních zařízení s popsaným modulem čítače bych rád doplnil údaje z článku:

– Modul čítá na vstupu CP0 při sestupné hraně impulsu, pokud je na vstupu CP1 úroveň L. Při úrovni H na CP1 je vstup CP0 zablokován.
– Modul čítá na vstupu CP1 při náběžné hraně impulsu, pokud je na vstupu CP0 úroveň H. Při úrovni L na CP0 je vstup CP1 zablokován.

Belza

Digitální panelový voltmetr s obvodem 7106 a LCD displejem

Panelový voltmetr je navržen jako jedno rozsahový universální měřící modul k zabudování do nejrůznějších přístrojů. Celé zapojení vychází z doporučeného zapojení výrobcem A/D převodníku 7106.



Technické parametry:

Napájení ..... 9 V
Odběr proudu ..... 1 mA
Základní rozsah ..... 200 mV
Displej ..... LCD 13 mm
Plošný spoj ..... 8 x 6 cm

Modul má základní citlivost 200 mVss. Základní citlivost můžeme upravit na 2 V změnou součástek: R4 -470k, P1 –22k, C4 –47nF. Pokud budete měřit větší napětí než je základní citlivost, potom musíte doplnit vstupní dělič. Modulem můžete měřit i ss proud, to ale obnáší doplnit proudový bočník mezi vstupní svorky HI a LO. Modul musí být napájen ze samostatného zdroje napětí 9 V. V žádném případě se nesmí vstupní svorky spojovat s napájecím napětím. Pájecí body LO - HI jsou vstupní svorky modulu. Desetinné tečky se zobrazují přivedením napájecího napětí + 9V na pájecí body h1, h2, h3. Tečka h1 je první tečka od prava atd.

Pár slov k sestavení modulu: Plošný spoj vyvrtat vrtáčkem 0,8 mm. Po vyvrtání osaďte spoj dle popisu od drátových propojek až po displej všechny součástky. Pozor na správnou pozici IO a displeje.K pájení je nejlepší použít mikropájku, proto že oba integrované obvody jsou v provedení CMOS a tyto součástky jak je známo jsou citlivější na statickou energii. Nastavení modulu je velice jednoduché. Na pájecí body 0V a +9V připojte 9V baterii. K nastavení modulu postačí tužková baterie na, kterou připájíme trimr 1k viz schéme. Ke vstupní svorkám připojte paralelně digitální voltmetr s nastaveným rozsahem 200mV. Trimrem který je na tužkové baterii nastavte výstupní napětí 190mV a trimrem P1 nastavte stejný údaj, jak je na voltmetru. Tím by bylo nastavení skončeno a modul připraven k zabudování. Plastový rámeček se připevní roztavením sloupků, které vyčnívají z rámečku a jsou nasunuty do plošného spoje.

Použité součástky:

R1 ..... M1
R2 ..... 22k
R3 ..... 1M
R4 ..... 47k (470k)
R5, 6, 7 ..... M68

P1 ..... 1k (22k)

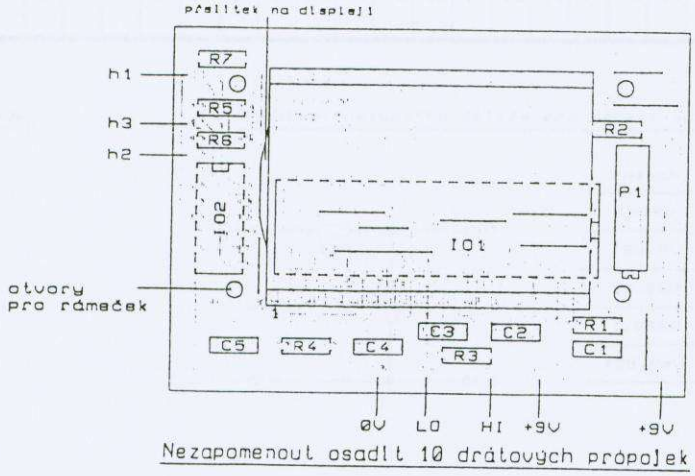
C1 ..... 100pF/ker.
C2 ..... 100n/MKT
C3 ..... 10n/MKT
C4 ..... 470n/MKT (47n)
C5 ..... 220n/MKT

IO1 7106
IO2 4030

Displej 4DR821B

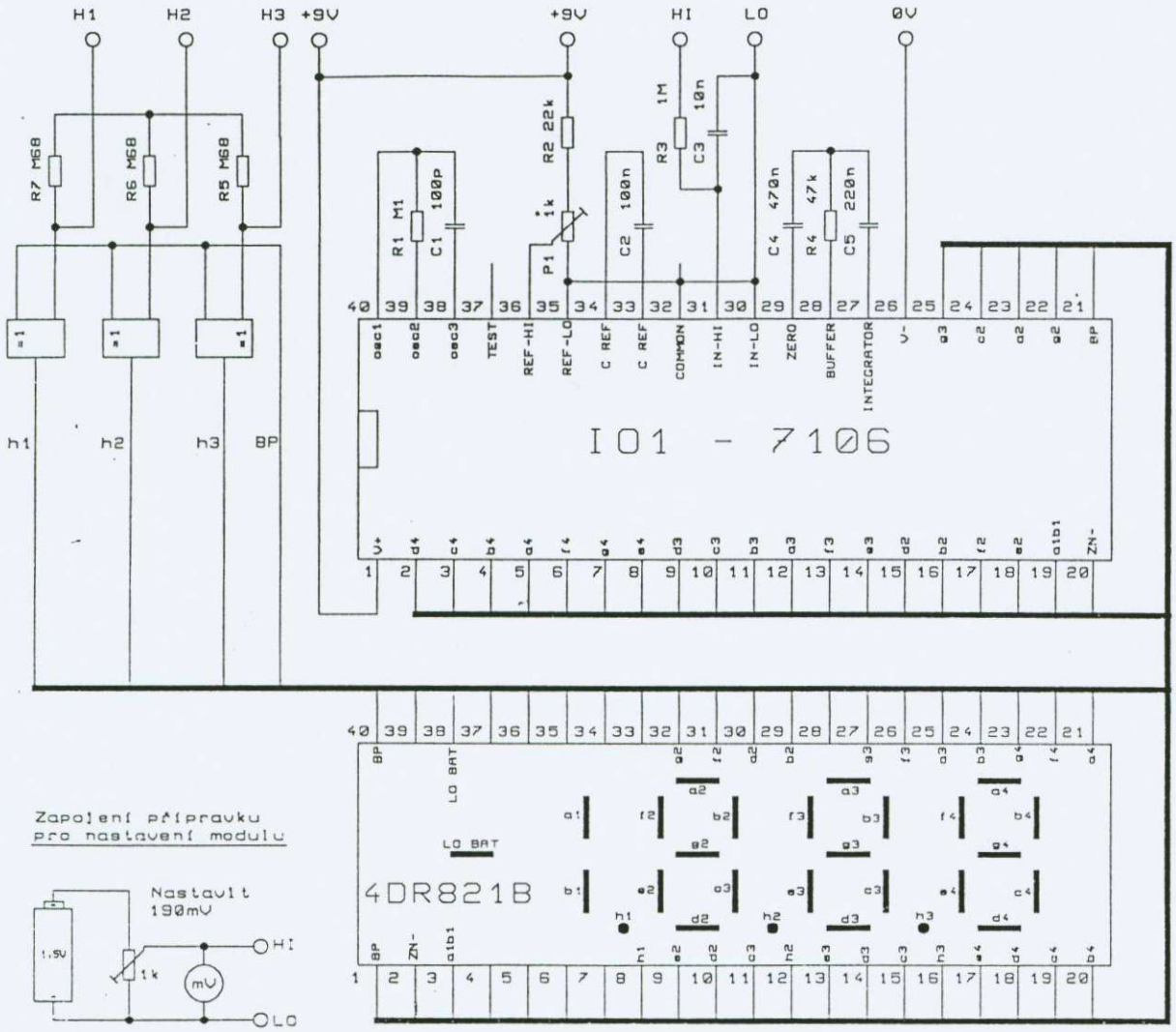
Plastový rámeček na displej

Hodnoty součástek uvedené v závorkách jsou určeny pro citlivost 2V. Tyto součástky nejsou součástí stavebnice.



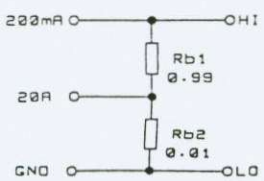
Nezapomenout osadit 10 drátových propojek

Schéma zapojení modulu

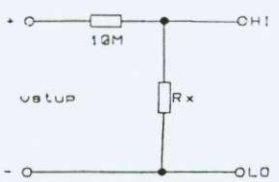


Zapojení přípravku pro nastavení modulu

Zapojení bočníků pro měření proudu



Zapojení vstupního děliče pro měření napětí



rozsah	Rx
1999V	1k
199,9V	10k
19,99V	101k
1,999V	1,1M
199,9mV	-