



Středoškolská technika 2010

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

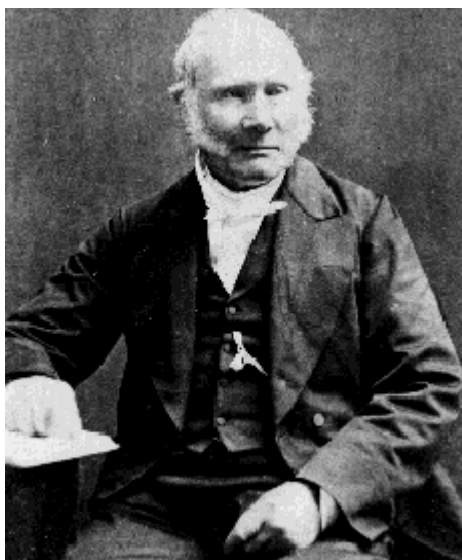
NÍZKOTEPLTNÍ STIRLINGŮV MOTOR

Petr Horký

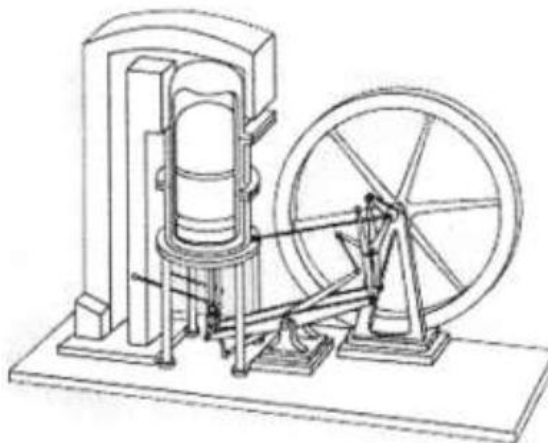
Integrovaná střední škola, 3.ročník
Kumburská 846, Nová Paka 509 31

1) Úvod

Projekt o nízkoteplotním Stirlingově motoru jsem si vybral proto, protože se mi zdá velmi zajímavé zpracovávat jakýkoliv zdroj tepla, z kterého mohu pomocí tohoto motoru získávat třeba elektrickou energii. Samozřejmě to má i jistá úskalí například v podobě malé účinnosti na jednotku hmotnosti. Stirlingův motor se tedy nehodí pro mobilní zařízení. Nejlepší využití pro Stirlingův motor je zpracovávání odpadního tepla. Velmi často se též můžeme setkat s využíváním slunečního záření pomocí parabolických zrcadel. Stirlingův motor je připisován skotskému pastoru jehož dobový portrét je na obr.1. Robert Stirling vynalezl tento motor v roce 1816. Později ho ještě zdokonalil. Jeho verze motoru je na obr.2.



Obr. 1 : Robert Stirling

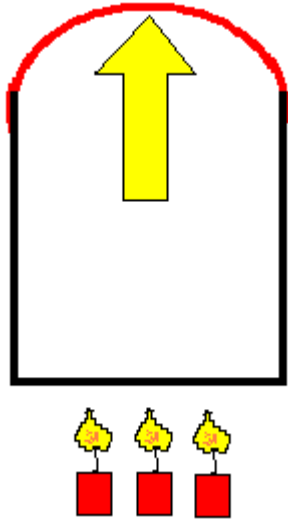


Obr. 2 : Původní motor R. Stirlinga

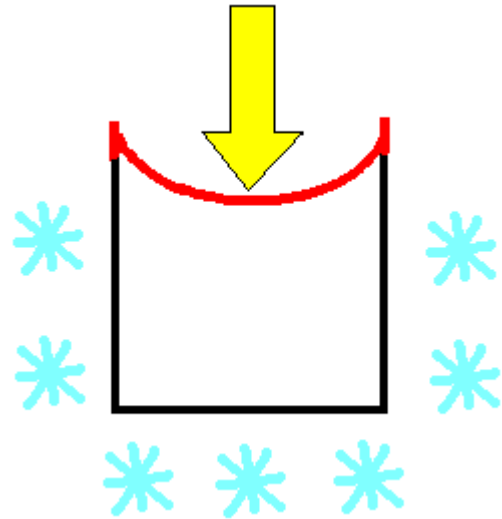
2) Charakteristika projektu

Stirlingův motor pracuje na základě roztažnosti látek. Změnou teploty docílíme zvětšení nebo zmenšení objemu dané látky. Nejlépe to pochopíme z následujícího příkladu. Máme uzavřenou nádobu, ve které je jisté množství vzduchu. Jednu stranu zakryjeme balónkem při pokojové teplotě 20 °C. Jestliže teď nádobu zahřejeme, zahřeje se tím i vzduch uvnitř. Vzduch zahřátím zvětší svůj objem, ale jelikož neměl kam uniknout, začal se

zvětšovat tlak v nádobě až vytlačil balónek ven (obr.3). Když teď nádobu zchladíme pod 20 °C, vzduch uvnitř zmenší svůj objem a vznikne podtlak, který natáhne balónek dovnitř (obr.4). Podobně jako balónek pracuje pracovní píst u Stirlingova motoru.



Obr. 3 : Zvětšení objemu vzduchu



Obr. 4 : Zmenšení objemu vzduchu

3) Popis nízkoteplotního Stirlingova motoru

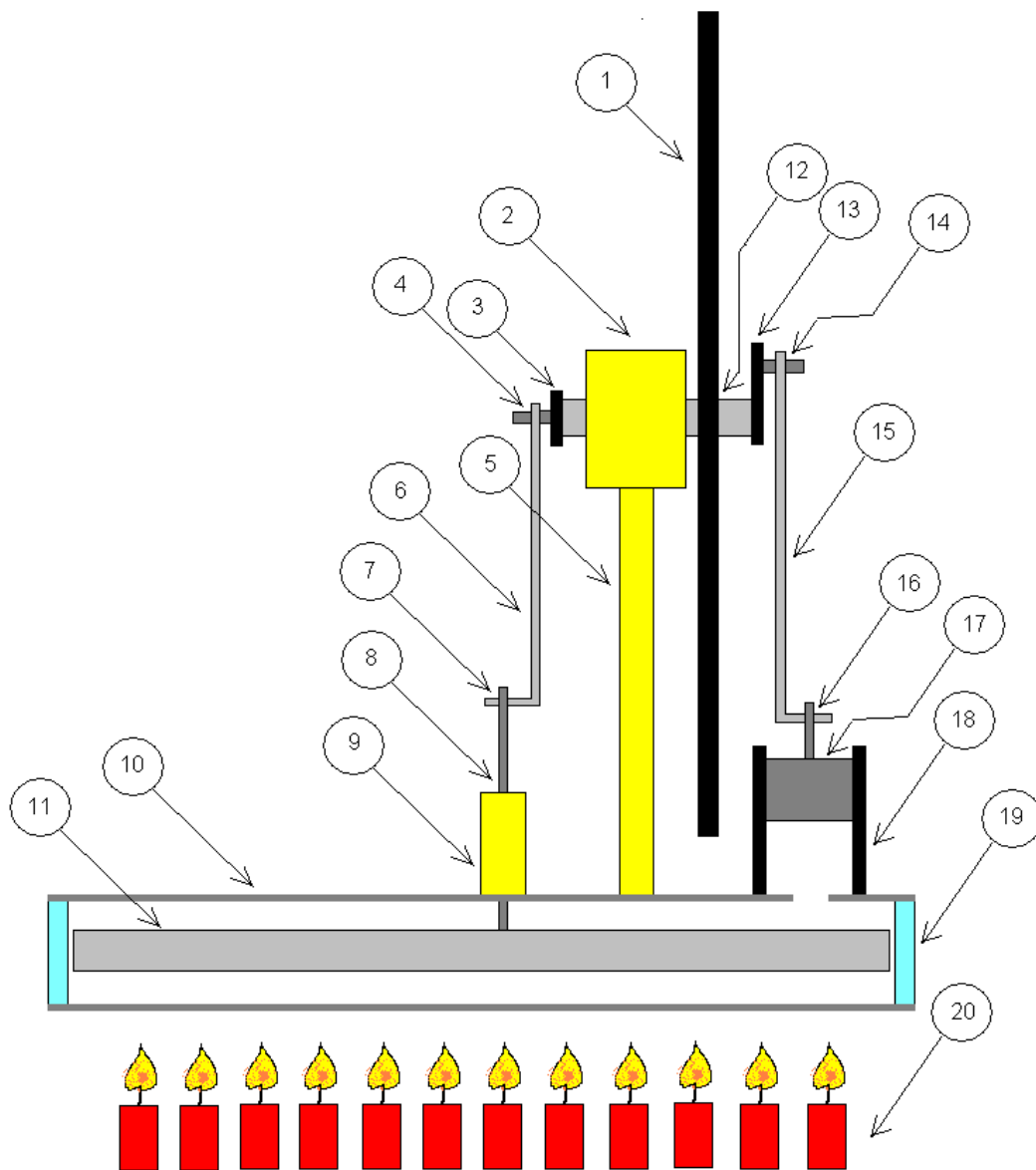
Pro představu jak vypadá nízkoteplotní Stirlingův motor slouží obr. 5. Pro lepší pochopení je na obrázku válec pracovního pístu a komora přeháněče kreslena v řezu.

1. Setrvačnick
2. Kliková skříň
3. Klika přeháněče
4. Pohyblivé spojení ojnice přeháněče s klikovou hřídelí
5. Pevné spojení klikové skříně s podstavou
6. Ojnice přeháněče
7. Pohyblivé spojení táhla přeháněče s ojnici
8. Táhlo přeháněče
9. Vodítko přeháněče
10. Podstava motoru
11. Přeháněč
12. Kliková hřídel
13. Klika pracovního pístu
14. Pohyblivé spojení ojnice pracovního pístu s klikovou hřídelí
15. Ojnice pracovního pístu
16. Pohyblivé spojení táhla pracovního pístu s ojnici
17. Pracovní píst

18. Válec

19. Tepelný izolátor

20. Zdroj tepla



Obr. 5 : Konstrukční uspořádání jednotlivých dílů

4) Princip činnosti

Pro stručné vysvětlení činnosti Stirlingova motoru se budu držet obr. 5. Začneme tím, že motor je v poloze, při které se přehaněč nachází v horní části svého pohybu. Pracovní píst se tedy nachází v polovině svého zdvihu, protože kliky přehaněče a pracovního pístu spolu svírají 90° . Většina vzduchu, která je uzavřena uvnitř motoru se nachází pod přehaněčem. Přehaněč s tepelně izolační stěnou komory netěsní. To znamená, že vzduch uvnitř se může podle polohy přehaněče přemísťovat pod nebo nad něj. Čili v našem případě se většina vzduchu nachází pod přehaněčem, kde je zahříván od spodní desky. Vzduch se začne rozpínat. Obteče přehaněč a začne tlačit na pracovní píst. Ten přes táhlo, ojnici a klikovou

hřídel začne roztáčet setrvačnick. Zároveň se otáčivý pohyb přenese přes klikovou hřídel, ojnici a táhlo k přehaněči, který to postupně přesune dolů. Vytlačí vzduch, který ho obteče nad něj. Tam se ohřátý vzduch začne ochlazovat od vrchní desky. Jakmile se zchladí, zmenší svůj objem, vznikne podtlak a pracovní píst vtáhne zpět. Když jde pracovní píst dolů, zároveň přesouvá přehaněč nahoru. Tím se dokončil jeden cyklus motoru, který se stále opakuje a motor se točí. Z toho je jasně vidět, že užitečnou práci zde koná pracovní píst. Naopak přehaněč pouze přehání vzduch a tím řídí jeho rozpínání nebo smršťování. Další nezbytnou součástí motoru je setrvačnick. Hlavním úkolem setrvačnicku je překonání mrtvých bodů motoru. Během pracovní části do sebe akumuluje energii, kterou následně v mrtvém bodě uvolní v podobě svojí setrvačnosti a zabrání tak zastavení motoru. Hmotnost setrvačnicku musí být úměrná výkonu motoru. Lehký setrvačnick do sebe nedokáže naakumulovat dostatek energie pro překonání mrtvého bodu a naopak těžký setrvačnick slabší motor nedokáže roztočit.

Samozřejmě princip Stirlingova motoru je daleko složitější. Stirlingův motor pracuje s tzv. Stirlingovým cyklem, který se skládá z izochorických a izotermických dějů, ale účelem této práce je vysvětlit princip co možná nejjednodušeji, protože je určena jak pro lidi, kteří se tímto motorem také zabývají, tak pro lidi, kteří o něm nikdy neslyšeli.

5) Pracovní medium

Důležitou součástí motoru je vhodné pracovní medium. To by mělo splňovat několik základních vlastností. Jedná se o plyn, který musí být dobře tepelně vodivý. To zaručí dobré přestupy tepla od spodní desky do plynu a z plynu do vrchní desky. Dalším faktorem je tepelná roztažnost neboli jak hodně se změní objem plynu při změně teploty. Velmi dobrou tepelnou roztažnost má vodík a helium. Z bezpečnostních důvodů se v motorech používá spíše helium. Výkon motoru je také závislý na množství pracovní látky uzavřené v motoru. Proto se staví tzv. přetlakové motory, v kterých je pracovní medium pod vysokým tlakem. Většinou se tlak pohybuje v rozmezí 10 – 22MPa.

6) Vyvážení mechanismů

Pro stabilní chod motoru a potlačení vibrací je nezbytné vyvážení mechanismů přehaněče a pracovního pístu. Dobře vyvážit oba dva mechanismy není snadný úkol, ale výsledeklepší chod a mnohdy i zvětší maximální otáčky. Jednoduché statické vyvážení najdete na <http://betlemska-stirling.blog.cz/0702>. Jednoduchým výpočtem stanovíte hmotnost protizávaží. Toto vyvážení je vhodné spíše pro modely a menší stroje.

7) Moje konstrukce nízkoteplotního Stirlingova motoru

První model Stirlingova nízkoteplotního motoru :

V této části se budu věnovat mému prototypu nízkoteplotního Stirlingova motoru. Pro ověření funkce tohoto motoru jsem postavil model, na kterém jsem chtěl ověřit funkčnost celého zařízení a vlastnosti použitých materiálů. Celkový pohled na motor je na obr. 6.



Obr. 6 : Model Stirlingova motoru



Obr. 7 : Porovnání velikosti

Pro porovnání velikosti modelu s mobilním telefonem slouží obr. 7. Tento model se točí již při rozdílu teplot kolem $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. K pohonu tedy můžeme použít například hrnek s vařící vodou. Spodní deska je tedy zahřívána na asi $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Horní deska má teplotu okolo $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je to dáno teplotou okolního prostředí.

Použité materiály : Na izolační stěnu komory jsem použil novodurovou trubku o průměru 110mm. Spodní i horní desku tvoří ocelový plech o síle 1mm, rovněž všechny další části motoru jsou ocelové. Táhla a ojnice jsou ze svářecího drátu o průměru 1,6mm. Přehaněč je dutý, slepený z tvrdého papíru (čtvrtek). Spoje jsou lepeny pevným dvousložkovým epoxidem (min. pevnost 120kg). Jako setrvačnick jsem použil řezný kotouč o průměru 150mm a síle 1mm. Velikost zdvihu přehaněče a pracovního pístu se dá plynule měnit pomocí stavitelných klik. Kliková hřídel je uložena ve dvou kuličkových ložiskách.

Nedostatky tohoto motoru : V konstrukci tohoto motoru jsem udělal mnoho zásadních chyb hlavně ve výběru vhodných materiálů. Na spodní i horní desku by se hodil materiál s lepší tepelnou vodivostí než je ocel. Vhodný by byl hliník nebo měď. To by zaručilo lepší přestupy tepla. Těsnost motoru je poměrně dobrá. Vyvážení je hrubé pomocí několika ocelových podložek. Zásadní chybou byla povrchová úprava motoru barvou. Tím jsem částečně zaizoloval spodní i horní desku, což se negativně projevuje na chodu motoru. Spodní deska se déle zahřívá. Horní deska zase hůře předává teplo od pracovního media do okolního prostředí. V praxi se to projevuje tím, že horní deska se trochu zahřeje a tím se sníží výkon motoru, protože se sníží rozdíl teplot mezi spodní a horní deskou.

Shrnutí a využití získaných poznatků : I když se motor točil, stále nebyl dokonalý. Získané poznatky při jeho stavbě a provozu jsem využil při stavbě druhého prototypu. Věděl jsem jakým zásadním chybám se mám při jeho realizaci vyhnout.

Druhý model nízkoteplotního Stirlingova motoru : Od prvního modelu se liší hlavně použitím jiných materiálů, které se ukázali jako vhodnější. Spodní i horní deska je z hliníkového plechu o síle 1mm. Tím jsem zajistil dobré přestupy tepla mezi tepelným zdrojem a pracovním mediem. Vodítka přehaněče i válec pracovního pístu je z mosazi. Mosaz má lepší kluzné vlastnosti než ocel. Rovněž táhla, ojnice, paprsky setrvačnicku i čepy klikové hřídele jsou z mosazi. Přehaněč je z pěnového polystyrenu, který je velmi lehký. Izolační stěnu komory tvoří skleněný kroužek vyříznutý z 5l sklenice po okurkách o průměru asi 150mm. Ocelová je pouze kliková skříň a obruč setrvačnicku. Tyto části mají povrchovou úpravu barvou, protože na chod motoru nemají vliv. Pro usazení klikové hřídele jsou opět

použitá dvě kuličková ložiska. Ostatní části motoru jsou z hliníku, který jsem roztavil, odlil do ocelových trubek a následně opracoval na soustruhu. Také vzhled modelu je propracovanější (obr. 8, obr. 9 a obr. 10).



Obr. 8



Obr. 9



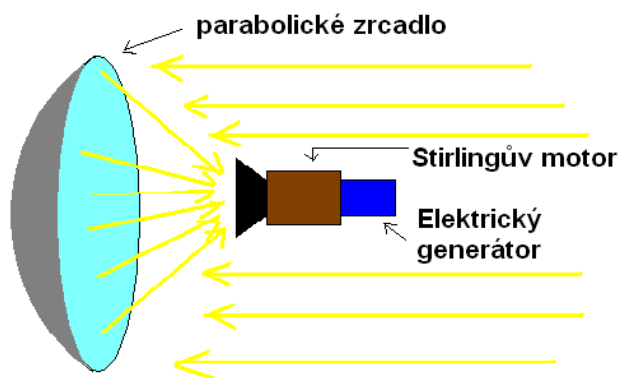
Obr. 10

8) Komerčně vyráběné Stirlingovy motory

Výrobou Stirlingových motorů se dnes zabývá mnoho firem. Stále se hledají vhodné konstrukční řešení, vhodná pracovní media a materiály. Přesto se už vyrábí autonomní jednotky o výkonu do 6 až 7 kW. Tyto jednotky jsou určeny pro sluneční elektrárny. Je dokázáno, že elektrárna se Stirlingovým motorem dokáže ze všech solárních systémů nejúčinněji přeměňovat sluneční energii na elektrickou. Jak vypadá sluneční elektrárna se Stirlingovým motorem je vidět na obr. 11. Princip této jednotky je na obr. 12. Zde použitý Stirlingův motor je naprosto odlišné konstrukce vyvinuté přesně pro tuto aplikaci.



Obr. 11 : Foto skutečné jednotky



Obr. 12 : Princip

Sluneční paprsky dopadající na plochu zrcadla jsou soustředěny do ohniska, kde zahřívají Stirlingův motor, který je napojen na elektrický generátor. Celá tato jednotka se automaticky natáčí za sluncem, aby sluneční paprsky dopadaly na plochu zrcadla kolmo. Tím je zajištěna maximální účinnost zrcadla a následně Stirlingova motoru. Parabolické zrcadlo je vyráběno z vysoce leštěného kovu. Plocha zrcadla je složena z několika malých částí z důvodu lehčí výroby.

9) Plány do budoucna

Vždy mě velmi lákalo si doma vyrábět vlastní elektřinu. Třeba jen pár desítek watů by mi stačilo. Důvodem jsou ceny energií, které se stále zdražují, ale to není jediný důvod. S mikroelektrárnou o výkonu pár watů bych toho stejně moc neušetřil, ale měl bych dobrý pocit z toho, že šetřím životní prostředí svojí vlastnoručně vyrobenou elektrárnou. Už kolikrát jsem se zabýval návrhem vlastní elektrárny, ale buď měla konstrukce nějaký nedostatek na kterém ztroskotala nebo byla materiálově náročná. Při stavbě obou dvou modelů Stirlingových motorů jsem se přesvědčil o tom, že podobné zařízení dokáží zkonstruovat. Od doby, kdy jsem poprvé slyšel o existenci stirlingova motoru, uplynulo hodně času. Nasbíral jsem mnoho zkušeností a informací, které bych chtěl v budoucnu využít víc, než jen na stavbu modelů.

Teoretická realizace elektrárny : Nepochybně jsem chtěl, abych teplo potřebné k chodu motoru mohl získat co možná nejsnáze. Výběr padl na sluneční elektrárnu. Při teoretickém návrhu jsem se držel ověřené konstrukce s parabolickým zrcadlem. Uvažoval jsem i o velké čočce, ale problém byl v tom, že jsem dostatečně velkou čočku ještě neviděl a pokud ano, tak by byla neúměrně drahá. Rovněž parabolické zrcadlo potřebné velikosti nepřipadalo v úvahu kupovat, protože by se mi asi nikdy nezaplátilo. Musel jsem hledat takové způsoby, aby většina dílů šla vyrobit doma bez větších obtíží. To, že si to vyžádá spoustu času a práce je nevyhnutelný fakt ale z mého hlediska nejschůdnější. Rád něco vyrábím vlastníma rukama. Také to sníží finanční náklady na minimum. Nejdůležitější je, aby zrcadlo mělo co možná největší účinnost. Toho se docílí vhodným materiálem na odrazové ploše a také zakřivením paraboly, i když čím menší zakřivení bude, tím vzdálenější bude ohnisko a naopak. Vychází to ze zákonů optiky, které zde nebudu podrobně rozebírat. Stačí, že úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Největší účinnost má rovinné zrcadlo, kde se účinnost odrazu pohybuje nad 95%. Zakřivení bych zvolil takové, aby ohnisko bylo od zrcadla vzdáleno asi 1 až 1,5 metru. Čím menší bude zakřivení paraboly, tím snáze se v domácích podmínkách také vyrobí. Jako odrazový materiál jsem uvažoval o alobalu. Ten by vyšel nejlevněji, ale měl by malou účinnost odrazu. Nejlepší řešení by bylo použití skleněných zrcadel. Aby se dodržela co největší plynulost zakřivení, museli by se rozřezat na malé kousíčky např.: na čtverečky velikosti 2x2 cm. Výsledný tvar zrcadla by byl rovněž čtvercový, což vůbec nevadí a naopak to usnadní výrobu podkladové desky. Velikost zrcadla bych zvolil 1x1 m, což by svým výkonem bohatě stačilo. Jako pohonná jednotka by sloužil nízkoteplotní Stirlingův motor podobné konstrukce popsané výše. V ohnisku za plného svitu bude i 1000 °C, ale nízkoteplotní verzi stačí bohatě 100 až 200 °C. Z toho vyplývá, že v době poledne se bude muset zrcadlo trochu zaclonit. Výhoda tohoto řešení nastává v době, kdy už slunce tolik nesvítí, aby udrželo v ohnisku dostatečně vysokou teplotu pro vysokoteplotní motory, ale teplota nižší okolo 150 °C tam ještě nějakou dobu bude. Jak dlouho bude záviset na velikosti zrcadla. Čili doba chodu elektrárny by se prodloužila od ranních hodin do pozdního odpoledne. Jelikož jsou tyto nízkoteplotní verze pomaloběžné, použil bych pomaloběžný generátor, který vyrábí proud již při nízkých otáčkách. Tím bych se vyhnul velkým převodům „do rychla“, v kterých by se ztrácelo příliš mnoho energie. Celý tento systém by se automaticky pomoci dvou motorů a řídicí elektroniky natáčel za sluncem. Podobný systém se užívá též u fotovoltaických systémů.

Případné využití vyrobené elektřiny : Elektřinu vyrobenou z této elektrárny bych uskladoval v akumulátoru, z kterého bych ji přes měnič používal na napájení drobných přístrojů.

Doufám, že jednou celý projekt s malou elektrárničkou budu schopen zrealizovat. Pro začátek jsem už schopný postavit funkční nízkoteplotní Stirlingův motor. Jelikož se zajímám o pomaloběžné třífázové alternátory, věřím že časem také postavím nějaký vzorek. Spojením těchto dvou věcí vznikne univerzální tepelný generátor, který stačí už jen zahřát.

10) Parabola

Výrobou paraboly se nakonec nemusím zabývat. Pouze ji doplním o odrazivou vrstvu, neboť tělo paraboly mi věnoval pan Ing. Malý. Fotografie paraboly je na obr. 13. Je vyrobená z laminátu, po kraji vyztužena „ husím krkem “ a vzadu je ocelový kruh se čtyřmi šrouby pro uchycení. Průměr paraboly je větší než 1,5 metru, což poskytuje plochu větší než $1,7 \text{ m}^2$. Kdybychom uvažovali, že na jeden metr čtverečný dopadne asi 1000 W sluneční energie, tak by výkon této paraboly i se ztrátami byl okolo 1 kW. To je velice slušný výkon, zcela dostačující pro výrobu sluneční elektrárny se Stirlingovým motorem.

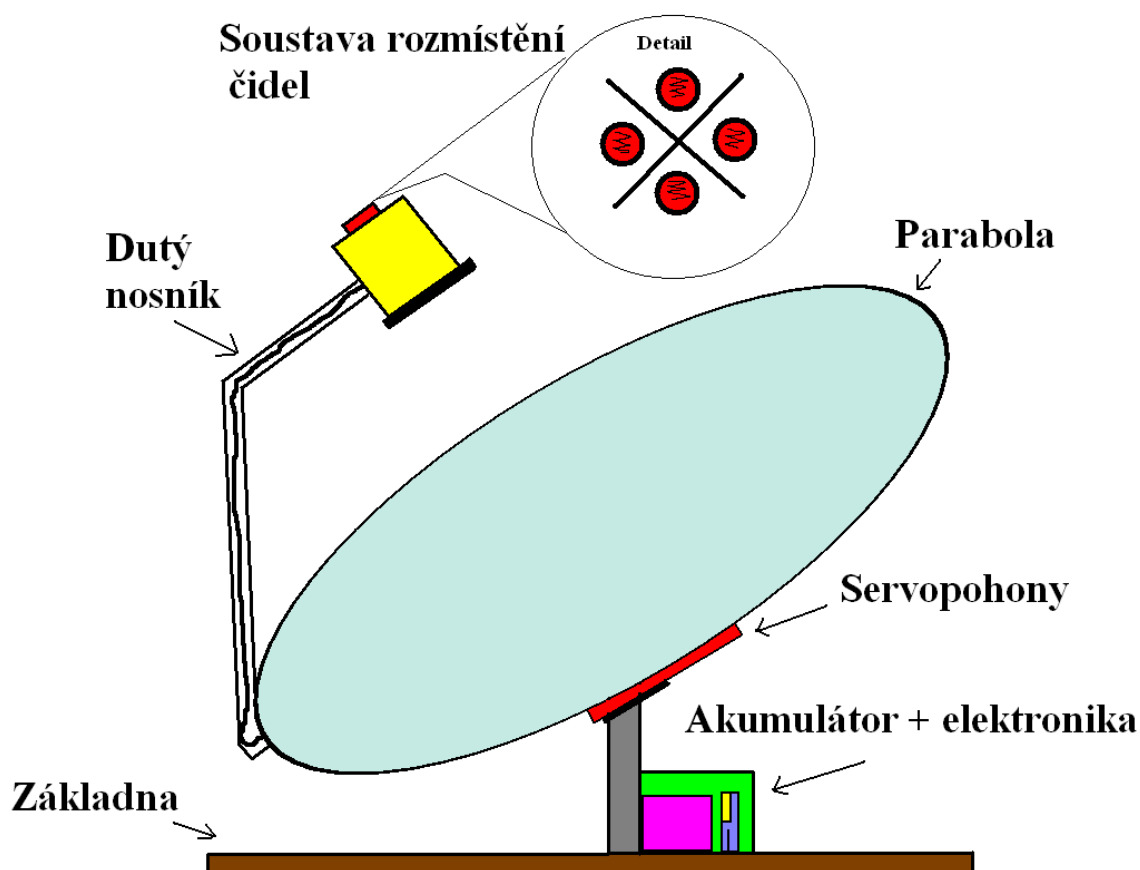


Obr. 13 : Parabola (bez odrazivé vrstvy)

11) Návrh konstrukce

Při návrhu jsem se snažil o co nejjednodušší konstrukci. Celý celek bude držet na centrálním podstavci a hlavním nosníku. Nízkoteplotní Stirlingův motor s pomaloběžným generátorem bude připevněn na dutém nosníku v ohnisku paraboly. Tento celek bude rozdělovatelný. Bude tvořit univerzální motorgenerátor, který se v případě potřeby bude moci použít i na jiný zdroj tepla než je slunce (např.: kamínka, táborový oheň). Dutý nosník svým

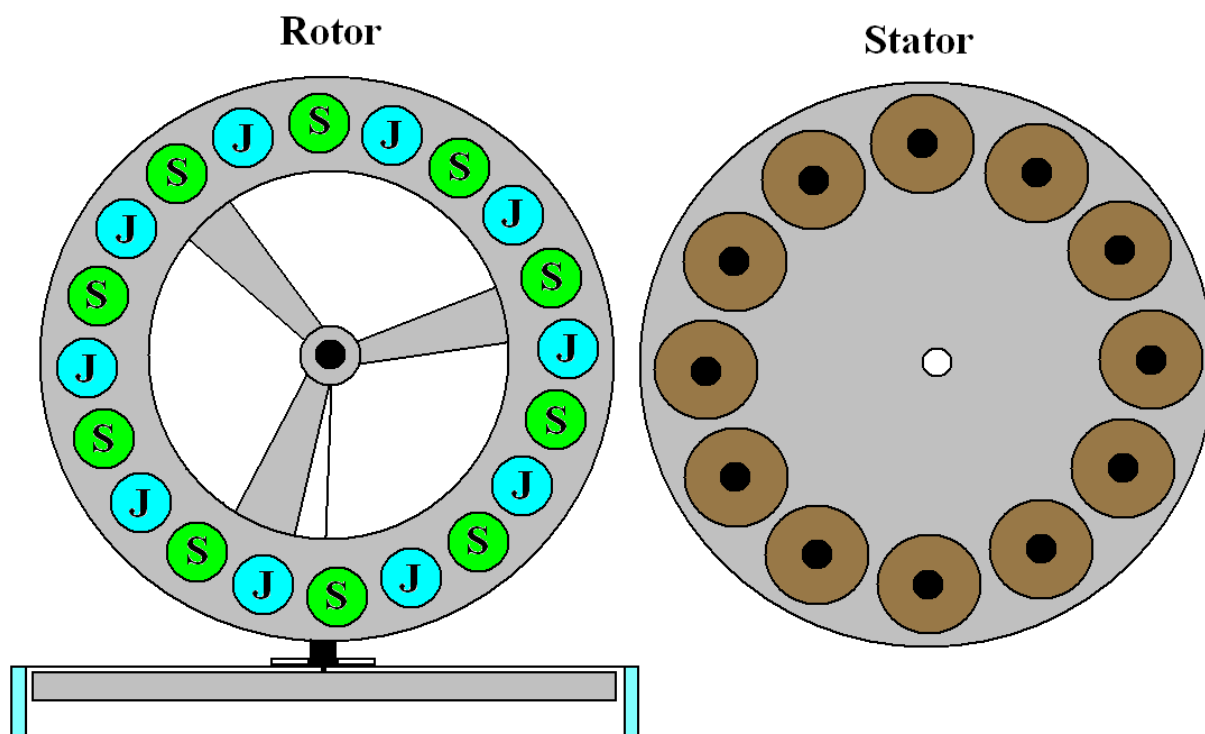
profilem zajistí dostatečnou tuhost a zároveň za použití komerčně vyráběného Jaklu i jednoduchost konstrukce. Zároveň jím povedou dráty od generátoru, čímž budou chráněny proti povětrnostním podmínkám a slunečnímu záření. Nad motorem v ose paraboly bude umístěna soustava čtyř čidel, která bude zaznamenávat polohu slunce. U hlavního nosníku bude ještě umístěna zakrytý akumulátor a elektronika, která bude řídit správné nabíjení akumulátoru a ovládání servopohonů ke sledování slunce. Celý komplet je na obr. 14.



Obr. 14 : Konstrukční řešení

12) Třífázový alternátor

Jak jsem již zmínil, použitý generátor by měl být pomaloběžný. Případné řešení je na obr. 15. Rotor je plně integrován do Stirlingova motoru. Slouží zároveň jako setrvačnick. Rotor je tvořen deseti permanentními magnety. Vždy se střídá severní a jižní pól, aby se dosáhlo změny magnetického toku a tím indukce elektrické energie v cívkách statoru. Každá fáze je tvořena čtyřmi cívkami (celkem 12 kusů cívek). Samozřejmě tyto hodnoty se mohou měnit na základě výkonu Stirlingova motoru.



Obr. 15 : Třífázový pomaloběžný alternátor

13) Nízkoteplotní Stirlingův motor – 3. verze

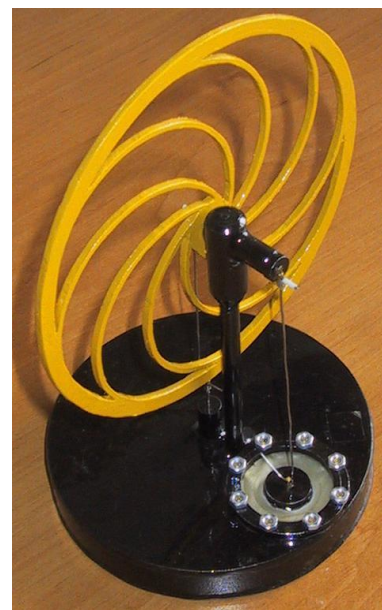
Později jsem postavil ještě další motor, u kterého jsem použil místo pracovního pístu membránu, což se ukázalo jako nejlepší řešení a zároveň mnohem jednodušší. Foto motoru je na obr. 16, 17, 18. Tento motor má otáčky mnohem vyšší než jeho dva předchůdci a zároveň dokáže pracovat s mnohem menším teplotním rozdílem. Nyní se na jeden hrnek točí přes půl hodiny.



Obr. 16 :



Obr. 17 :



Obr. 18 :

14) Závěr

Nyní jsem začal pracovat na nízkoteplotním Stirlingově motoru, který bude obsahovat výše zmíněný alternátor. Jestliže bude dosahovat dobrých výsledků, zamontuji ho do budoucí elektrárny. Na obr. 19 a 20 je již hotová komora přeháněče. Šrouby jsou ze spodní strany zapuštěny, aby motor dobře seděl na zdroji tepla (obr. 21). Velikost těchto desek je vidět na obr. 22 v porovnání s motorem verze 3.



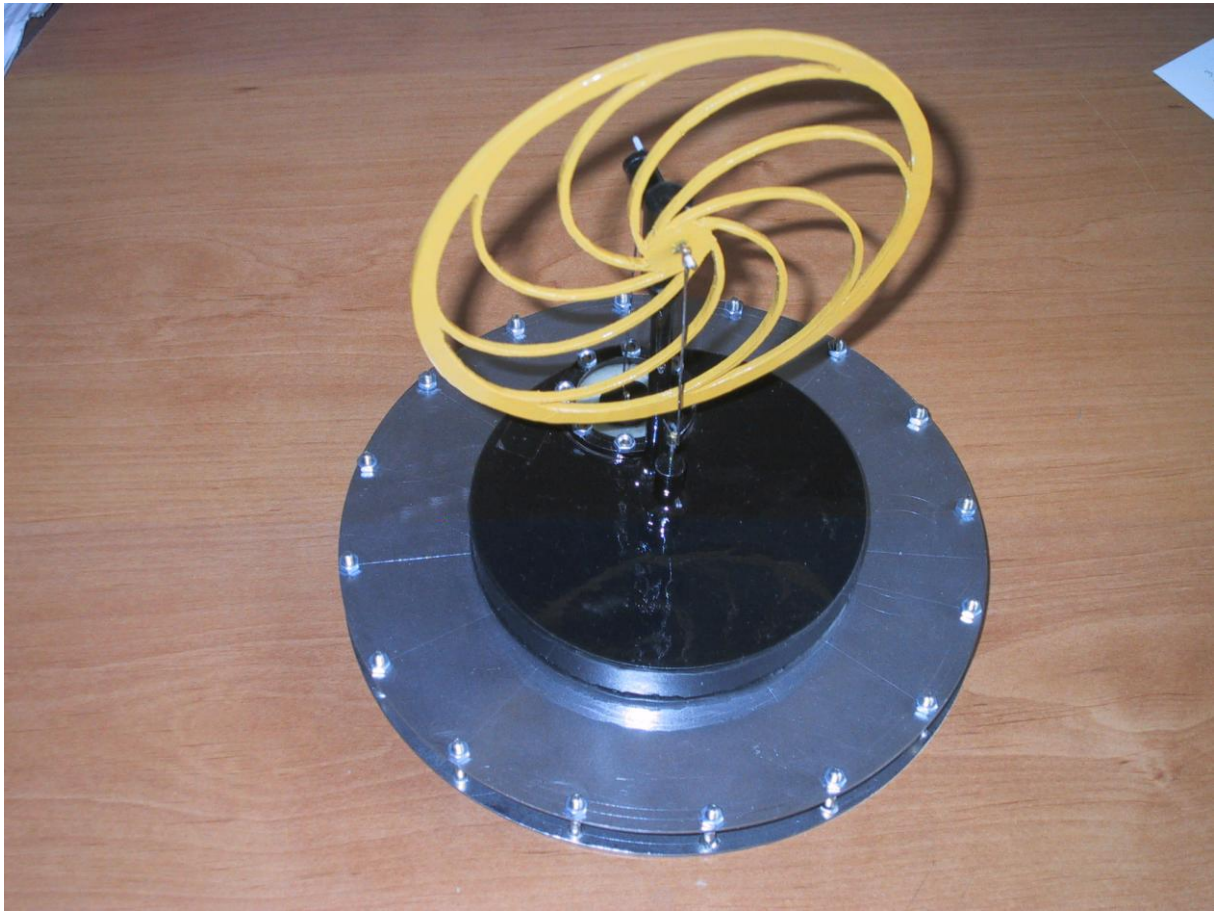
Obr. 19 : Komora přeháněče motoru verze 4



Obr. 20 : Komora přeháněče



Obr. 21 : Zapuštění šroubů



Obr. 22 : Porovnání velikosti

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Luboši Malému za užitečné rady při zpracovávání tohoto projektu včetně poskytnutí všech informací o soutěži ENERSOL a výstavě StreTech. Také mi věnoval výše popsanou parabolu pro moji elektrárnu, čehož si velmi vážím.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci zpracovával sám včetně všech třech funkčních vzorků. Rovněž všechny doprovodné obrázky jsou mojí prací (pouze fotografie obr. 1, obr. 2 a obr.11 jsou použity z internetu).

Zdroje

1. <http://www.stirling.cz/stirlingovy-motory-aplikace.html>
2. <http://www.21stoleti.cz/view.php?cislocclanku=2008052007>
3. <http://betlemska-stirling.blog.cz/0702>
4. <http://mve.energetika.cz/uvod/stirling.htm>
5. <http://www.stirling.cz/tedom-stirlinguv-motor-princip.html>
6. http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/stirling.pdf
7. vlastní zkušenosti ze stavby tří prototypů

Obsah

1)	Úvod	1
2)	Charakteristika projektu	1,2
3)	Popis nízkoteplotního Stirlingova motoru	2,3
4)	Princip činnosti	3,4
5)	Pracovní medium	4
6)	Vyvážení mechanismů	4
7)	Moje konstrukce nízkoteplotního Stirlingova motoru	4,5
8)	Komerčně vyráběné Stirlingovy motory	6
9)	Plány do budoucna	7,8
10)	Parabola	8
11)	Návrh konstrukce	8,9
12)	Třífázový alternátor	9,10
13)	Nízkoteplotní Stirlingův motor – 3. verze	10
14)	Závěr	11,12
	Poděkování	13
	Čestné prohlášení	13
	Zdroje	13

Příloha



Nízkoteplotní Stirlingův motor



Oba modely



Oba modely



Detail pracovního válce a pístu



Celá sestava



Tepelný zdroj – hrnek s převařenou vodou
(100°C)



Nízkoteplotní Stirlingův motor – 3. verze