



Středoškolská technika 2024

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

STIRLINGŮV MOTOR JAKO UČEBNÍ POMŮCKA

Jiří Lüftner

Střední průmyslová škola strojnická a Střední odborná škola prof. Švejcara, Plzeň,
Klatovská 109

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 12: Tvorba učebních pomůcek, didaktická technologie

Stirlingův motor jako učební pomůcka

The Stirling engine as a teaching aid

Autoři: Jiří Lüftner

Škola: Střední průmyslová škola strojnická a Střední odborná škola
profesora Švejcara, Plzeň, Klatovská 109, 301 00 Plzeň

Kraj: Plzeňský kraj

Konzultant: Ing. Josef Gruber

Plzeň 29. 2. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil/a jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Plzni dne 29. 2. 2024

.....

Jiří Lüftner

Poděkování

Mé poděkování patří hlavně konzultantovi této práce, Ing. Josefu Gruberovi, který měl se mnou dostatek trpělivosti a vždy mě, experimentátora, nasměroval správným směrem. Dále bych také rád poděkoval Ing. Přemyslu Čechurovi, mému kamarádovi za odbornou konzultaci a všem kamarádům a přátelům, kteří se mnou měli tu trpělivost a naposled i všem, kteří obětovali chvilku svého času a postavili si svůj Stirlingův motor! Díky všem!

Anotace

Tato práce zkoumá možnost využití Stirlingových motorů jakožto učební pomůcky. V teoretické části se zabývá a vysvětluje princip stroje a jeho současnost i historii. Následuje návrh a výroba funkčních demonstračních modelů, které jsou pak začleněny jak do školní výuky, tak i mimoškolní činnosti.

Klíčová slova

Stirlingův motor; demonstrační model; výuková pomůcka

Annotation

This thesis examines the possibility of using Stirling engines as teaching aids. In the theoretical part, it deals with and explains the principle of the machine and its present and history. This is followed by the design and production of functional demonstration models, which are then incorporated into professional teaching both at school and outside of school.

Keywords

Stirling engine; demonstration model; teaching aid

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Historie a princip	7
2.1	Vznik motoru	7
2.2	Využití v dnešním světě.....	8
2.2.1	Mikrogenerační jednotky	8
2.2.2	Solární elektrárny.....	9
2.2.3	Chlazení	9
2.2.4	Vesmírné aplikace.....	10
2.3	Základní principy	10
2.3.1	Hlavní části	11
2.3.2	Základní konfigurace	12
2.3.3	Stirlingův cyklus	13
2.3.4	Reálný provoz	14
2.4	Sumarizace poznatků	15
3	Praktický model	15
3.1	Teoretická část	15
3.1.1	Obecné stanovení a cíle	15
3.1.2	Motory typu LTD.....	15
3.1.3	Možnosti výroby	16
3.1.4	Zamyšlení se nad částmi motoru	17
3.1.5	Zdroje tepla	18
3.2	Praktická část	19
3.2.1	Prototypování.....	19
3.3	Konečné modely	22
3.3.1	Verze 1.....	22
3.3.2	Verze 2	23
3.3.3	Verze 3.....	24
3.3.4	Návod k výrobě.....	25
4	Možnosti zapojení do výuky	26
4.1	Výuka termomechaniky	26
4.1.1	Seznam veličin.....	26
4.1.2	Ideální plyn – stavová rovnice	27
4.1.3	Termomechanické děje	28
4.1.4	I. termodynamický zákon (První hlavní věta termodynamická).....	30
4.1.5	II. termodynamický zákon (Druhá hlavní věta termodynamická).....	30
4.1.6	Carnotův oběh.....	31

4.1.7	Stirlingův oběh.....	31
4.2	Zapojení do rámcových vzdělávacích programů	34
4.2.1	RVP pro základní vzdělávání	34
4.2.2	RVP pro gymnaziální vzdělávání	35
4.2.3	RVP pro střední odborné vzdělávání	35
4.3	Výukové struktury témat dle RPV	36
4.3.1	Základní vzdělávání – 2. stupeň	36
4.3.2	Střední odborné vzdělání - 23-41-M/01 Strojírenství.....	37
4.4	Vzdělávání žáků nadaných a mimořádně nadaných	38
4.5	Zájmové kroužky	38
4.6	Široká veřejnost	39
4.6.1	Zveřejnění návodu	39
5	Ověřování v praxi	40
5.1	Zkušenosti ze stavby	40
5.1.1	Časová náročnost	40
5.1.2	Problematika lepených spojů	40
5.1.3	Tření.....	40
5.1.4	Radost a nadšení	40
5.1.5	Vlastní přínos.....	41
6	Závěr	41
6.1	Možnosti do budoucna.....	41
7	Použitá literatura a další zdroje.....	42
8	Seznam obrázků a tabulek	43
9	Příloha 1: Návod na výrobu	45

1 Úvod

Již od útlého věku jsem byl fascinován technikou. Zajímal mě jakákoliv mechanická ústrojí a obzvláště stroje přeměňující tepelnou energii na rotační pohyb. Přes parní stroje jsem se dostal až k Stirlingovým motorům, pozapomenuté technologii, která se ovšem poslední dobou vrací zase ke slovu.

Pro práci byly stanoveny následující cíle:

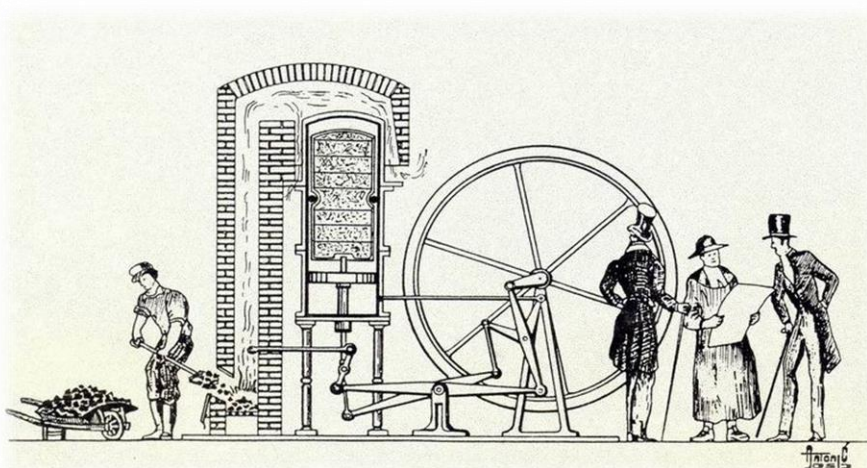
- Osvětlit samotný princip motoru.
- Prozkoumat možnosti využití Stirlingových motorů v dnešní době.
- Vytvořit jednoduchý funkční model, který bude snadno výrobitelný a bude demonstrovat základní princip motoru. Včetně vytvoření návodu tak, aby mohl model postavit každý.
- Zapojit tento demonstrační model do praktické výuky na školách. Zvážit možnosti v zájmových kroužcích a v jiných mimoškolních aktivitách či zapojení široké veřejnosti.

Další motivací pro zpracování této práce byla vlastní zkušenost autora s podmínkami na střední průmyslové škole. Jeden z problémů byla motivace a nadšení, tyto základní pobídky studia. Proto je hlavním cílem práce ukázat jednu z mnoha zajímavých možností, které průmyslové odvětví nabízí, a nadchnout žáky a studenty do vlastní činnosti ve studované oblasti.

2 HISTORIE A PRINCIP

2.1 Vznik motoru

Vznik se datuje do roku 1816, kdy si skotský farář a vynálezce Robert Stirling nechal patentovat svůj teplovzdušný motor s uzavřeným pracovním cyklem. První prakticky využitelný stroj byl postaven o dva roky později, měl výkon dvou koňských sil a sloužil k odčerpávání vody z dolu.



Obrázek 1: Původní návrh Stirlingova motoru [11]

Nejdůležitější inovací bylo použití takzvaného „ekonomizéru“, který se v dnešní době nazývá ustáleně regenerátor. Tato součást motoru, která funguje jako tepelný výměník k uschování tepelné energie, značně zvyšuje celkovou účinnost. Avšak až další vývoj motoru dokázal učinit

tento dočasně konkurenceschopným tehdejšími parními stroji. U těch bylo hlavní riziko spojeno s parními kotli, dodávajícími vodní páru, které často provázely výbuchy a ohrožovaly tak své okolí. A například v roce 1843 již byl Stirlingův motor dostatečně „vyspělý“, aby mohl pohánět celou slévárnu litiny ve skotském městě Dundee. [2]

Avšak postupné zdokonalování parních strojů a následný vývoj spalovacích motorů a elektromotorů takřka úplně vytlačil všechny Stirlingovy motory z konvenčních aplikací až do dnešních dnů. Za zmínku ještě stojí firma Philips, která se ve 30. letech 20. století zabývala možnostmi jejich využití jako přenosných zdrojů elektřiny. A byla to právě tato firma, která ustálila název „Stirlingův motor“ namísto do té doby používaného názvu teplovzdušný motor. [2]

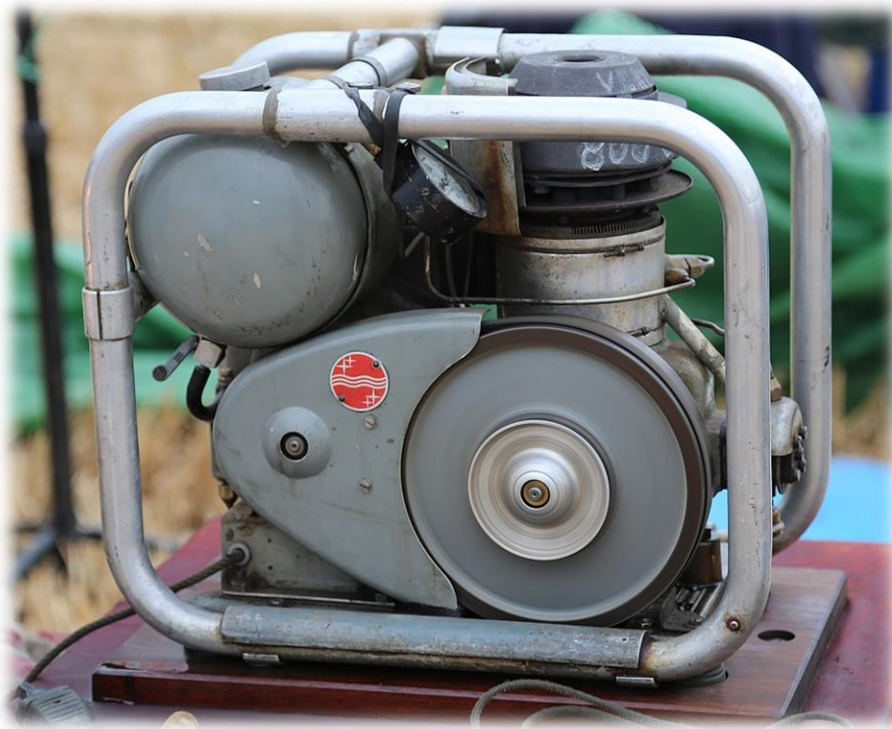
2.2 Využití v dnešním světě

Ač se tedy může zdát, že tento typ pohonu nemá v dnešní době využití, není to úplně tak pravda, Stirlingův motor má v moderním průmyslu své nezastupitelné místo. Ačkoliv ho asi nikdy nenalezneme například v automobilech či jiných masově vyráběných předmětech, v několika následujících aplikacích nalezl své využití.

2.2.1 Mikrogenerační jednotky

Jsou to zařízení, schopná využívat zbytkové teplo různého typu a přeměňovat ho na elektrickou energii. Jejich hlavní výhodou je schopnost využívat nízkopotenciální teplo, které je pro jiná využití bezcenné a je technologicky těžko zpracovatelné. [3]

Nejdiskutovanější jsou řešení využívající tohoto řešení u rodinných domů, kde doplňují systémy energetické nezávislosti budovy a využívají například zbytkové teplo z plynových kotlů.



Obrázek 2: Elektrický generátor využívající Stirlingův motor [2]

2.2.2 Solární elektrárny

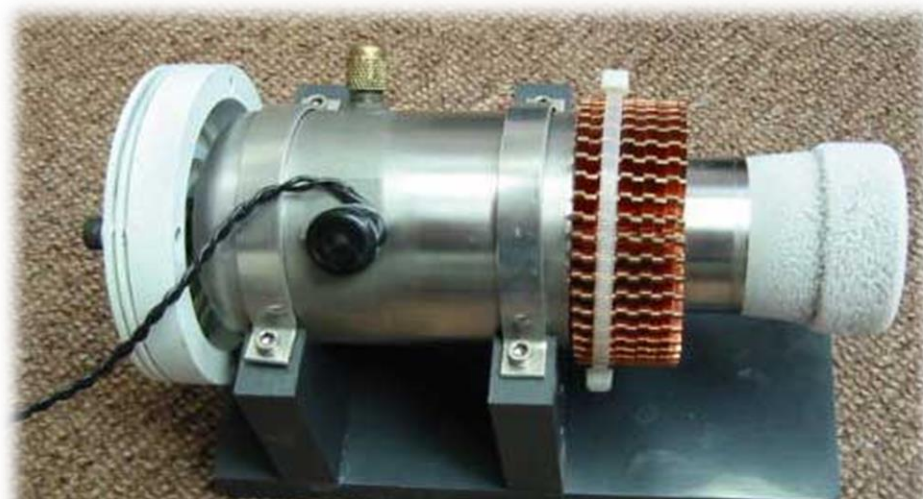
Ano, solární elektrárny nemusí být jen fotovoltaické články. Sluneční paprsky se dají pomocí sestav zrcadel nebo čoček koncentrovat do jednoho bodu, který bude ohříván. A toto teplo je již schopen Stirlingův motor přeměňovat na elektrickou energii. V praktických testech dokázala sestava přeměnit dopadající sluneční paprsky na elektrickou energii s účinností až 34 %, což je více než konvenční fotovoltaické články. [3] [13]



Obrázek 3: Solární elektrárna využívající Stirlingův motor [13]

2.2.3 Chlazení

Stejně jako každý elektromotor může fungovat jako generátor elektrické energie, může Stirlingův motor zastat funkci chladiče. Tedy přímo pomocí rotačního pohybu ochlazovat požadované zařízení. A přestože není schopné konkurovat v oblasti pístových kompresorů sloužících k chlazení, našel uplatnění na poli kryogenních technologií. V této oblasti, kdy

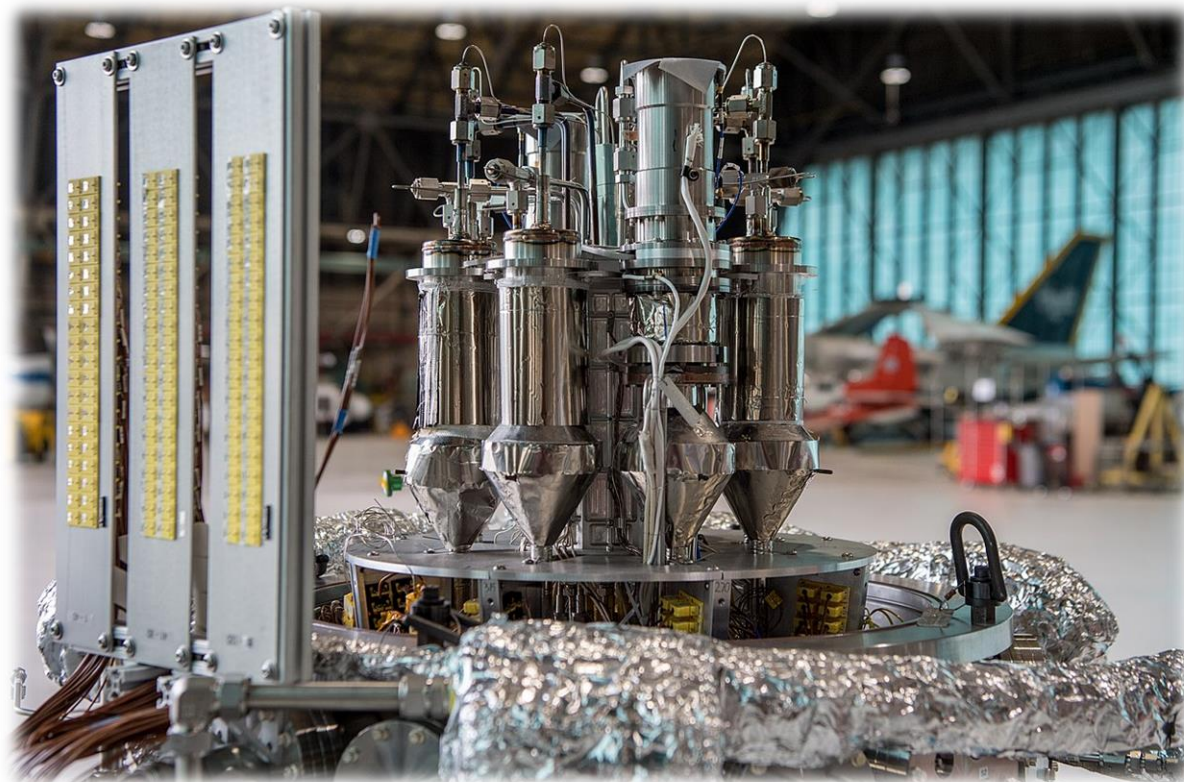


Obrázek 4: Stirlingův motor jako chladič [9]

cílové teploty, kterých se dosahuje jsou menší než 150 K, se hojně využívají Stirlingovy motory, které jsou schopné efektivně dosahovat těchto hodnot. [3]

2.2.4 Vesmírné aplikace

Posledním zajímavým využitím Stirlingových motorů jsou vesmírné aplikace. Zde získávají tepelnou energii z malého množství radioaktivního materiálu a přeměňují ji na elektrickou. Zajímavostí je, že se již nejedná o klasické motory s rotačním pohybem, ale o takzvané Stirlingovy motory s volným pístem, kde je výsledný pohyb lineární a pracuje tedy i s lineárním generátorem elektřiny. [12]



Obrázek 5: Stirlingův motor vyvinutý společností NASA [12]

2.3 Základní principy

Stirlingův motor je tepelný stroj, spalovací motor s vnějším spalováním, pracující s cyklickým stlačováním a expanzí pracovního plynu. Stlačováním při nízké teplotě pracovního plynu a expanzí při vysoké teplotě pracovního plynu probíhá přeměna tepelné energie většinou rotačním způsobem na mechanickou práci. Jde o motor s uzavřeným oběhem, s opakujícím se ohřevem a stálou náplní pracovního plynu. Uzavřený pracovní cyklus je definován jako termodynamický systém, ve kterém se s okolím nevyměňuje pracovní plyn, ale jen tepelná energie.

Tyto motory jsou schopny dosahovat teoretické účinnosti až 40 %, čímž tedy překonají i konvenční spalovací motory, avšak v reálném požití jsou tyto hodnoty nižší. Mezi jejich další výhody patří:

- Schopnost pracovat s jakýmkoliv zdrojem tepla.
- Tichý, plynulý chod.

- Jednoduchá obsluha.
- Spolehlivost.

Naopak mezi hlavní nevýhody náleží vysoká výrobní cena. Tento faktor je pro průmyslové využití klíčový, proto, ačkoliv je teoretická účinnost Stirlingova motoru vysoká, nikdy nenahradí konvenční spalovací motory. [2]

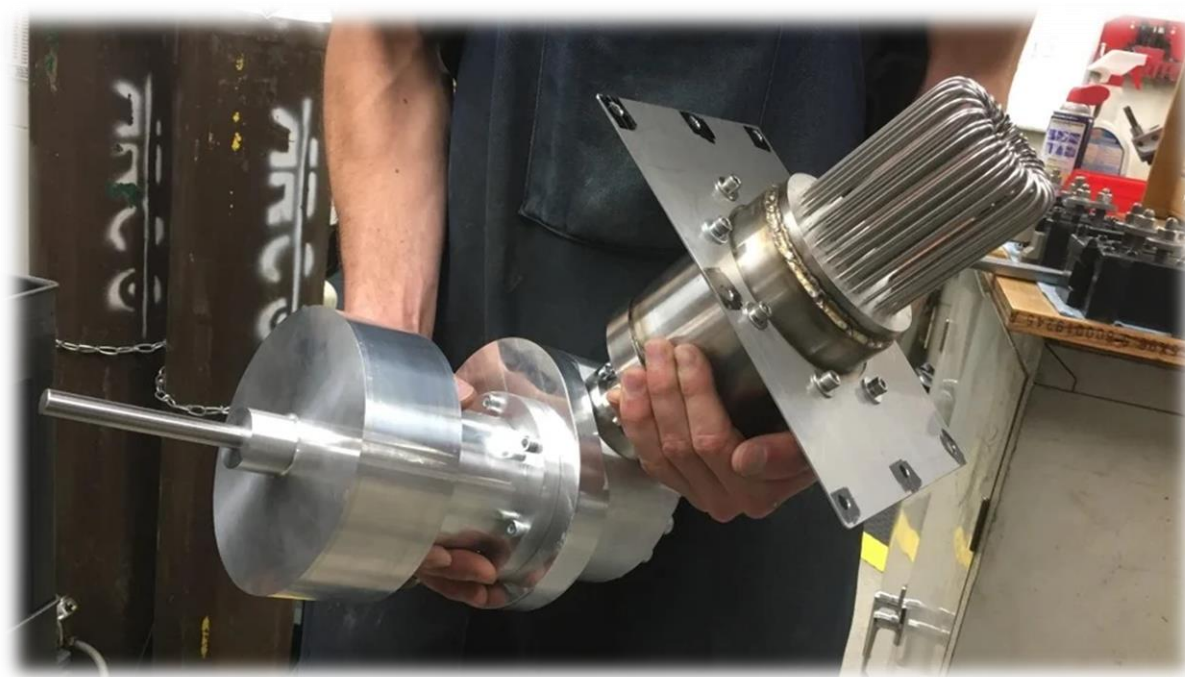
2.3.1 Hlavní části

2.3.1.1 Tepelný zdroj

Tepelný zdroj je základní prvek dodávající tepelnou energii celé soustavě. Zdroj tepla se nikdy nedostane fakticky do styku s pracovním plynem, a proto může být zdroj libovolný. Ať už spalování jakýchkoliv fosilních paliv, či naopak obnovitelné zdroje, ba dokonce jaderné reakce. Paleta možností je opravdu rozmanitá.

2.3.1.2 Ohříváč

U jednoduchých strojů zastupuje ohříváč pouze jedna vrstva materiálu, kterou z jedné strany ohřívá zdroj tepla a na druhé straně tuto energii přebírá pracovní plyn. U složitějších jednotek už hledáme kompromis mezi velikostí teplosměnné plochy a tzv. mrtvým objemem (nevyužitým objemem mezi úvratí pístu a spodním okrajem), kde mnohá komerční řešení končí u využití vnitřního i vnějšího žebrování, či u spousty malých trubic. [2]



Obrázek 6: Stirlingův motor s trubkovým ohříváčem [15]

2.3.1.3 Regenerátor

Regenerátor ve Stirlingově motoru je tepelný výměník, neboli krátkodobý zásobník tepla, umístěný mezi teplou a studenou stranou tak, že pracovní plyn přes něj prochází střídavě v jednom, nebo druhém směru. Jeho funkcí je uchovat v oběhu teplo, které by jinak bylo vyměněno s okolím, na teplotě mezi maximální a minimální teplotou oběhu. [2]

2.3.1.4 Chladič

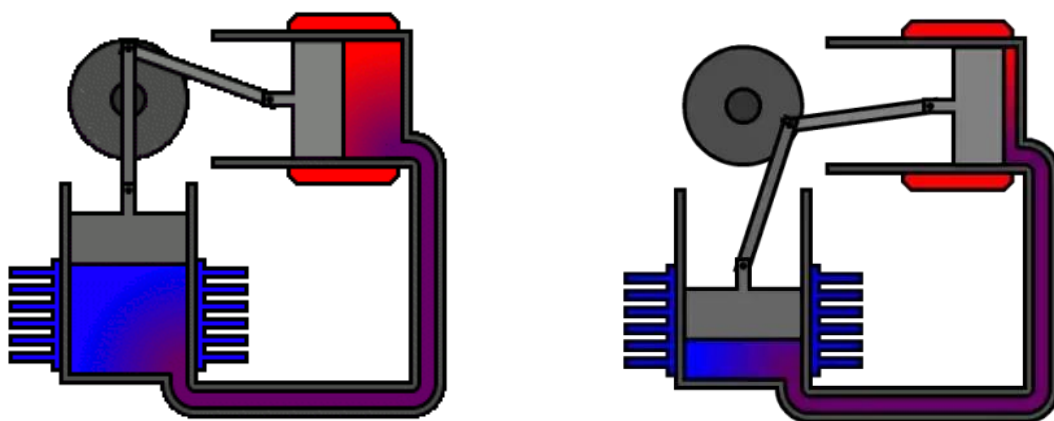
V menších motorech je často tvořen pouze stěnami studeného válce. Pak se teplo odvádí do okolního prostředí a chladná část tak dosahuje téměř teploty okolí. Pro dosažení vyššího výkonu je nutné zvýšit rozdíl teplot mezi částí ohřívanou a chladičem. Proto je zde často chladič tvořen výměníkem, který je ochlazován kapalinou, například vodou. [2]

2.3.2 Základní konfigurace

Mezi Stirlingovými motory můžeme na základě vnitřního uspořádání jednotlivých částí rozlišovat několik základních druhů. Tyto konfigurace jsou rozepsány níže. Avšak druhů a technických řešení tohoto motoru existuje nepřehledné množství, které využívají různé mechanické systémy.

2.3.2.1 Alfa

Modifikace Alfa má dva pracovní písty v oddělených válcích, jeden z nich je ohříván, druhý naopak chlazen. V teplém válci plyn expanduje při vysoké teplotě, kdežto ve studeném se plyn stlačuje při nízké teplotě. Tento typ má vysoký poměr výkonu k objemu, ale je zde technický problém s těsněním a mazáním pístu při vysoké teplotě. [1]



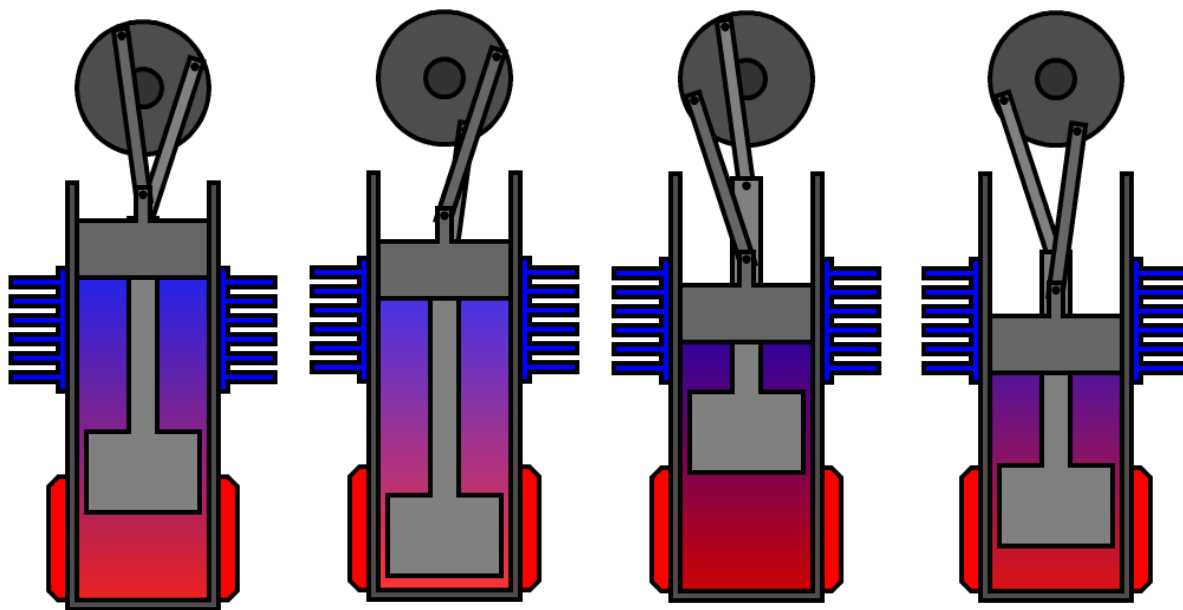
Obrázek 7: Konfigurace Alfa [1]

2.3.2.2 Beta

Modifikace Beta má jeden pracovní píst ve stejném válci jako přeháněč. Přeháněč je píst s vůlí kolem stěn válce a nedodává žádný výkon. Při běhu pouze přesouvá pracovní plyn z teplého prostoru do studeného a naopak. Při přesunu na teplou stranu válce plyn expanduje a působí tlakem na pracovní píst. Při přesunu na studený konec se plyn smrští a setrvačností stroje, zajištěná setrvačником, stlačí pracovním pístem plyn. Na rozdíl od Alfa modifikace se Beta typ, díky přeháněči, vyhnul technickým problémům s těsněním a mazáním pístu v horkém prostoru. [1]

2.3.2.3 Gama

Modifikace Gama je v principu stejná jako modifikace Beta s tím rozdílem, že pracovní píst je



Obrázek 8: Konfigurace Beta [4]

umístěn ve svém vlastním válci. Plyn může tedy volně procházet mezi oběma válci. Tato modifikace má za následek menší kompresní poměr, ale je mechanicky jednodušší, proto se využívá u menších demonstračních modelů. [1]

2.3.2.4 Stirlingův motor s volným pístem

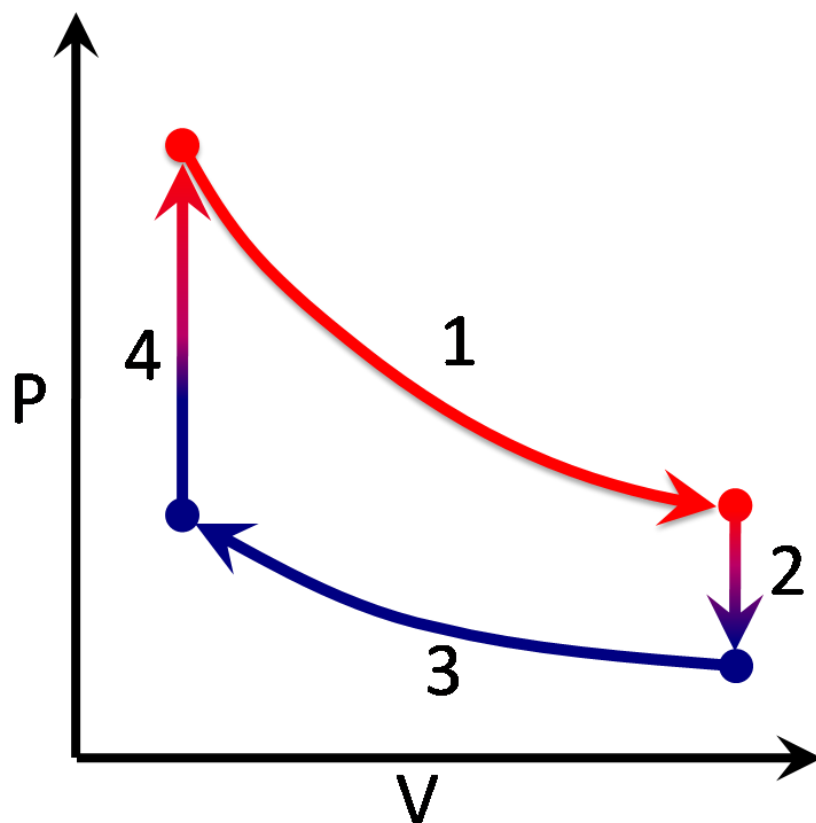
Mezi stroje s volnými písty se řadí například ty, které využívají kapalinové písty nebo membrány namísto pístů. Energie může být dodávána nebo odebírána lineárním elektrickým motorem nebo generátorem, lineárním čerpadlem či jiným lineárním zařízením. To odstraňuje nutnost použití klikového mechanismu a omezuje počet pohyblivých součástí.

2.3.3 Stirlingův cyklus

Ideální Stirlingův oběh se skládá z těchto čtyř termodynamických dějů probíhajících v pracovní látce:

- **1 - Izotermická expanze** probíhá při stálé teplotě. Expanzní prostor a výměník tepla je udržován na vysoké teplotě. V pracovním plynu probíhá téměř izotermická expanze a plyn přijímá teplo z tepelného zdroje.
- **2 - Izochorické chlazení** probíhá při stálém objemu. Pracovní plyn se přesouvá přes regenerátor z teplé strany k studené. V regenerátoru je plyn ochlazován a odevzdává mu své teplo. Toto teplo bude nazpátek odevzdáno v dalším cyklu ohřevu.

- **3 - Izotermická komprese** probíhá při stálé teplotě. Kompresní prostor a výměník tepla je udržován na nízké teplotě. V pracovním plynu probíhá téměř izotermická komprese a plyn odevzdává teplo do chladiče.
- **4 - Izochorický ohřev** probíhá při stálé objemu. Pracovní plyn se přesouvá přes regenerátor ze studeného prostoru do teplého. V regenerátoru je plyn ohříván a přijímá teplo uchované z předchozí fáze chlazení.



Obrázek 9: Graf závislosti tlaku a objemu teoretického motoru [1]

Teoretická termická (tepelná) účinnost je rovna účinnosti v teoretickém Carnotově cyklu. Ten určuje nejvyšší dosažitelnou účinnost jakýmkoliv tepelným strojem. Reálná účinnost je vždy podstatně nižší, především vlivem ztrát, ať už daných samotným pracovním plynem, či ztrátami při přenosu tepla. [2]

Této problematice se dále věnuje kapitola 4.1

2.3.4 Reálný provoz

Z praxe známe reálná řešení několika vzniklých otázek. Jako pracovní médium se u menších strojů používá vzduch, avšak mnohem lepších výsledků dosahují stroje plněné vodíkem či héliem. Také velice záleží na samotném tlaku média. Stroje s vyšším tlakem, kde je tedy větší hmotnost pracovního plynu v termodynamickém cyklu, obecně dosahují vyšších výkonů. Avšak závisí to na mnoha faktorech, tudíž vždy se hledá vhodný kompromis pro dané řešení. Také samotné mazání je problematické. Proto se často místo přímého mazání používají spíše materiály s nízkým součinitelem smykového tření tzv. „samomazné“, jako například PTFE (teflon).

2.4 Sumarizace poznatků

Předchozí kapitoly tvoří jednoduchá skripta o Stirlingových motorech. Zabývají se základním principem motoru, částečně jeho historií a na závěr i možnostmi využití této technologie v dnešní době. Skripta mohou být využita jak učiteli na školách, tak i samouky zajímající se o tuto problematiku. Ideální je také jejich využití jako úvod do tématu před výrobou fyzického modelu.

Při jejich tvorbě bylo dbáno na zachování jednoduchosti a stručnosti, tak aby čtenář nebyl zahlcen velkým množstvím informací, ačkoliv toto téma je velice obsáhlé. Celý text je psaný tak, aby byl srozumitelný středoškolákům.

3 PRAKTICKÝ MODEL

Teoretická otázka principu a funkce je zodpovězena. Ale ta hlavní otázka pořád zůstává: je možné vyrobit z běžně dostupných materiálů demonstrační model?

3.1 Teoretická část

3.1.1 Obecné stanovení a cíle

Nejprve je třeba zvolit obecnou konfiguraci motoru, jako nejjednodušší se na první pohled jeví typ Gama. Dále je nutné určit pracovní teploty. Na chladné straně je možné počítat s teplotou okolí, tedy cca 20 °C, bez nutnosti aktivního chlazení, které by tuto teplotu snižovalo. Naopak na druhé straně, vzhledem k povaze stroje, je optimální co nejnižší teplota. Například aby motor mohl běžet pouze na hrnku vařící vody, tedy 100 °C. Nebo na čajové svíčke, kterou lze považovat za relativně bezpečný zdroj tepla v domácnosti. Z toho můžeme vyvodit základní požadavky na motor:

- Snadná a jednoduchá výroba.
- Výrobní materiály snadno sehnatelné.
- Konfigurace Beta.
- Malý teplotní rozdíl.
- Bezpečnost.

3.1.2 Motory typu LTD

Takzvané LTD – Low Temperature Different, česky přeloženo jako motory s malým teplotním rozdílem. Jsou schopné fungovat i při rozdílu mezi horkou a studenou stranou pouze v řádu jednotek stupňů. Pro demonstrační účely naprosto ideální, zaručují relativně bezpečný provoz a mají snadnou konstrukci bez využití materiálů s vysokými požadavky a pevnost a odolnost. [2]



Obrázek 10: Stirlingův motor typu LTD [10]

3.1.3 Možnosti výroby

Další otázkou je samotná výroba, která by měla být jednoduchá a dostupná. Proto je třeba nejdříve zhodnotit možnosti, které se nabízejí v dnešní době studentům středních škol.

3.1.3.1 3D tisk

Tato velice populární možnost všemožného prototypování a vyvíjení se jeví jako ideální pro výrobu chladných částí motoru, které nejsou, jakkoliv, namáhané teplem. Dostupnost 3D tiskáren již také nebývá problém, v dnešní době drtivá většina škol má k dispozici alespoň částečnou možnost 3D tisku. Tato metoda zavádí počítačové technologie na úkor manuálních úkolů.

3.1.3.2 Vyřezávání

„Klasická“ metoda konstruování struktur pomocí tenkých překližek, kartonu či plastových desek, které jsou do požadovaného tvaru vyřezávány a následně lepeny. Je ideální pro studené části motoru v případech, kdy není k dispozici 3D tiskárna, nebo je z pedagogických důvodů žádoucí zapojení manuální výroby.

3.1.3.3 Využívání již existujících předmětů

Nejjednodušší řešení problémů, kdy je na danou součást využita již existující součást, předmět původně určený pro jiné účely, avšak schopný zastávat i požadovanou funkci. Klasickým příkladem je využití nejrůznějších plechovek, které jsou tepelně odolné, relativně snadno se s nimi pracuje a odpadá tak nutnost složité práce s plechy.

3.1.4 Zamyšlení se nad částmi motoru

Fáze přemýšlení nad tím, jak by mohly být vyrobeny potřebné součásti demonstračního Stirlingova motoru. Jedním zdrojem inspirace je internet, kde lze najít opravdu vše, avšak ne vše je dobrý nápad. Postupně se začne skládat představa o celém stroji.

3.1.4.1 Zahřívání válec

Válec, který je namáhán teplem, nemůže být v podstatě vyroben z ničeho jiného než kovu. Ideální proto je plechovka, která je vesměs vyrobená z ocelového plechu a má válcový tvar. Její rozměr byl vzhledem k požadavkům na dostatečnou velikost modelu zvolen 100 mm, tento rozměr je používán výrobci potravin často.

3.1.4.2 Regenerátor



Obrázek 11: Plechovka od bonbonů

Pro tento prvek nelze použít takřka nic jiného než ocelovou vlnu, používanou jako brusný nástroj. Je snadno dostupná a splňuje hlavní fyzikální vlastnosti požadované po regenerátoru.



Obrázek 12: Ocelová vlna [14]

3.1.4.3 Přeháněč

Hlavní požadavkem, vyplývajícím z konstrukce motoru, je nízká hmotnost. Proto se na výrobu nabízí buďto možnost výroby z nějakého lehkého pevného materiálu, například balzového dřeva či kartonu, nebo výroby přímo z regeneračního materiálu (ocelová vlna).

3.1.4.4 Píst

U malých motorů se často nabízí možnost nahrazení klasického válce a přesně lícovaného pístu membránou. Toto řešení má řadu výhod, tou nejdůležitější je snadná výroba a dokonalá těsnost.

3.1.4.5 Setrvačnick

Tato součást musí být kruhová, což bývá při výrobě složité dosáhnout. Proto vznikla představa využít nějakého předmětu jako setrvačnicku. Jako nejjednodušší řešení se nabízí využití CD/DVD disků, které jsou dokonale kruhové.

3.1.4.6 Klikový mechanismus

Poslední na řadě je klikový mechanismus. U jednoválcového stroje obsahuje dvě kliková ramena, která jsou proti sobě pootočená o 90°. Jako nejjednodušší řešení se nabízí umístit setrvačnick mezi kliky a získat dva otevřené konce (jednostranné kliky), které jsou mnohem jednodušší na výrobu.

3.1.5 Zdroje tepla

Další oblastí přímo související se samotným motorem jsou zdroje tepla. V principu se nabízejí tři možnosti, které splňují tepelné požadavky motoru a jsou běžně dostupné:

- **Lihový kahan** – jednoduché řešení, nabízející snadnou obsluhu a možnost doplnění paliva.
- **Vařící voda** – nejbezpečnější zdroj, avšak tepelný výkon je značně omezený.
- **Svíčka** – alternativní možnost k lihovému kahanu, největší výhodou je snadná dostupnost v každé domácnosti.

3.2 Praktická část

3.2.1 Prototypování

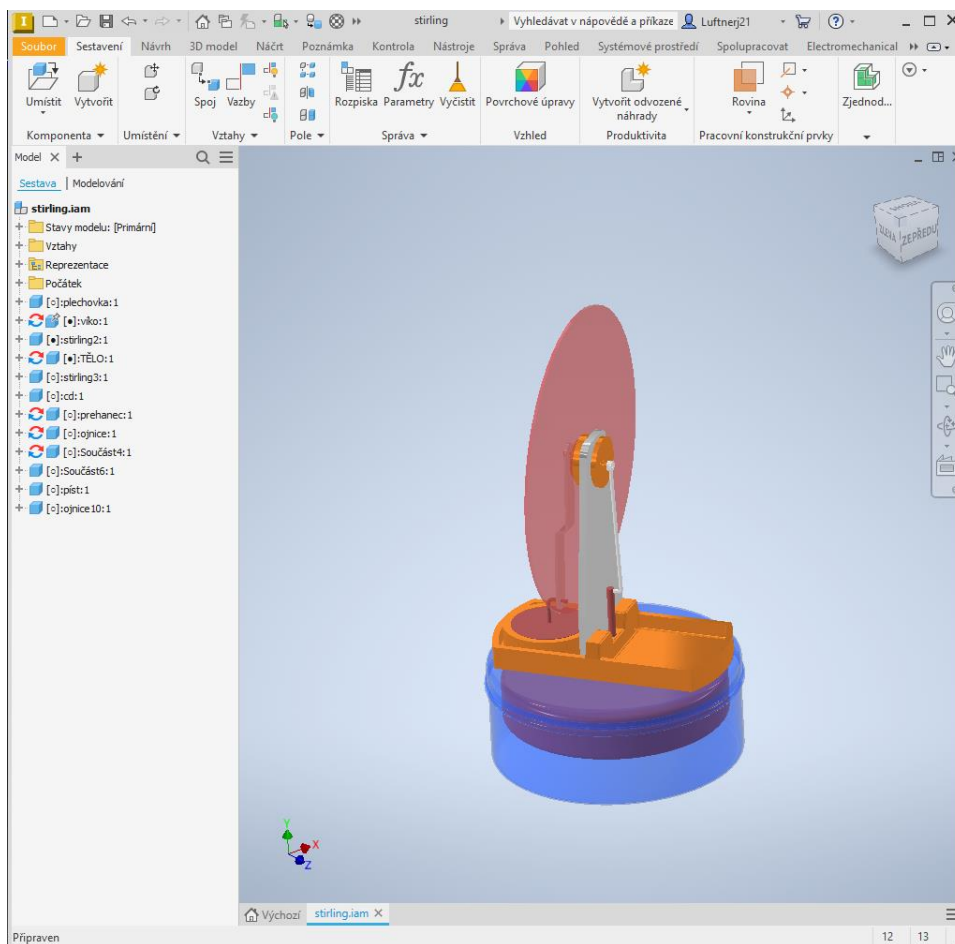
Základní myšlenky konstrukce, uvedené v teoretické části, je nyní zapotřebí prakticky realizovat. Cílem prototypování bylo vytvořit první funkční model a objevit případné konstrukční chyby.

3.2.1.1 *Inspirace z internetu*

Říká se, že co děláte, už někdo alespoň částečně udělal před vámi. A i v tomto případě je to pravdivé tvrzení. Proto byla práce započata rešerší na internetu, kde byla nalezena nejrozumnější řešení z oblasti konstrukce a designu.

3.2.1.2 *Vizualizace*

První a nejjednodušší vizualizace probíhala s pomocí tužky, papíru a představivosti. Nebylo zase tak obtížné složit si představu pomocí nejrozumnějších skic a náčrtů, při kterých byly stanoveny základní rozměry modelu. Následovalo přenesení tohoto návrhu do 3D modelovacího programu. Byl zvolen program Autodesk Inventor Professional 2024. V tomto programu byly vymodelovány všechny součásti motoru a složena celá sestava. Bylo tak ověřeno některá konstrukční řešení a zároveň tak i vznikly podklady pro 3D tiskárnu.



Obrázek 13: Vizualizace v programu Autodesk Inventor Professional 2024

3.2.1.3 První funkční prototyp:

Na první funkční prototyp byla využita verze využívající plechovou dózu jako pracovní komoru a membránový píst. Dle počítačového návrhu byly jednotlivé díly vyřezány ze třmilimetrové modelářské překližky. Membrána pracovního pístu pak z nafukovacího balónku a přeháněč z obalového kartonu. Po několika pokusech a úpravách byl stroj z těchto součástí uveden do chodu.



Obrázek 14: Funkční model

3.2.1.4 Další postup

Při pokusech o rozběhnutí prototypu číslo 1 bylo získáno několik cenných zkušeností, které ovlivnily další úpravy modelu. Hlavní poznatky:

- Motor musí běžet opravdu hladce, bez zbytečného tření. Energie po roztočení setrvačníku by měla být schopna otáčet celým ústrojím alespoň 3 sekundy. Mazání všech čepů je proto nezbytné
- Membrána musí být volná. Pryžový píst nesmí být přepnutý a musí klást co nejmenší odpor při zvedání a stlačování na pracovní dráze. Nafukovací balónek není ideální, je zbytečně silný. Po aplikaci mazacího oleje typu WD40 se pryž změkčuje a tím se snižuje její odpor. Jako vhodnější se jeví využití latexové rukavice.
- Ačkoliv kartónový přeháněč byl spíše improvizované řešení, naprosto vyhovuje dané aplikaci.
- Všechny spoje pracovního válce musí být maximálně těsné, jinak dochází k poklesu tlaku a motor není schopen běhu. Utěsnění pomocí vysokoteplotního silikonu je trochu nevzhledné, avšak plně funkční.

- Využití upravených trhacích nýtů je vyhovující. Hladký povrch v kombinaci s olejem má nízké tření.

Další postup v prototypování již zohledňoval různé metody výroby, a nakonec pak vyústil ve tři funkční typy motoru dle možností výroby.

3.3 Konečné modely

Verze modelů jsou rozděleny podle požadavků, jednak na výrobní možnosti a na náročnost výroby. V principu se modely od sebe neliší a jejich parametry jsou shodné. Proto je pro všechny platná tato tabulka specifikací:

Stirlingův motor V1		
Objem motoru	285	cm ³
Průměr pracovního pístu	30	mm
Průměr válce	98	mm
Průměr setrvačníku	120	mm
Zdvih přeháněče	6	mm
Zdvih pístu	5	mm
Rozsah otáček	60-240	s ⁻¹

Tabulka 1: Parametry motoru

Ke každé verzi byly sepsány vzdělávací cíle a další metodické informace konkrétní pro daný typ. Taktéž byl sestaven seznam materiálů a pomůcek k výrobě.

3.3.1 Verze 1

K výrobě této verze není zapotřebí 3D tiskárny. Všechny díly jsou vyrobené ručně. Cílí tedy na pracovní zručnost, tudíž není třeba ovládat počítačové programy. Výroba je nejnáročnější, jak v oblasti pečlivosti, tak i s ohledem na nářadí, pomůcky a materiály. Výsledné díly nejsou přesné, proto je celý model koncipován s co nejmenšími nároky na přesnost.

Výchovné cíle:

- Rozvoj jemné motoriky rukou (skládání jemných mechanismů), trpělivosti..
- Rozvoj zručnosti (používání nástrojů a osvojování základních výrobních procesů a postupů).
- Rozvoj představivosti (skládání součástí dle plánu) a čtení technické dokumentace (orientace v technických výkresech).

Časová náročnost cca 3 hodiny stavby.

Požadavky na materiál:

Plechová dóza d100 x 40, překližka 3 mm, latexová rukavice, CD disk, trhací nýty 3 x 12, karton, ocelový drát 0,6 mm, vteřinové lepidlo, izolepa.

Nástroje:

Vrtačka, sada vrtáků do kovu, nůžky na plech, kladivo, kleště, vrták na dřevo průměr 30 mm, lupénková pilka, smirkový papír.



Obrázek 15: Model verze 1

3.3.2 Verze 2

Tato verze již zapojuje 3D tisk, veškeré díly tak mohou být vytištěny. Avšak je tu také možnost ruční výroby jednodušších dílů ručně, z jiného typu materiálu. Může tak cílit jak na rozvoj zručnosti, tak na práci v počítačových programech a osvojení technik práce s 3D tiskárnou.

Výchovné cíle:

- Rozvoj jemné motoriky rukou (skládání jemných mechanismů), trpělivosti.
- Rozvoj zručnosti (používání nástrojů a osvojování základních výrobních procesů a postupů).
- Rozvoj představivosti (skládání součástí dle plánu) a čtení technické dokumentace (orientace v technických výkresech).
- Praktické využití moderních technologií (zapojení 3D tisku) a získání zkušeností v práci s nimi (nastavení modelu pro tiskárnu).

Časová náročnost cca 2,5 hodiny stavby + čas tisku součástí.

Požadavky na materiál:

Plechová dóza d100 x 40, překližka 3 mm, latexová rukavice, CD disk, trhací nýty 3 x 12, karton, ocelový drát 0,6 mm, vytisknuté díly, vteřinové lepidlo, izolepa.

Nástroje:

Vrtačka, sada vrtáků do kovu, nůžky na plech, kladivo, kleště, vrták na dřevo průměr 30 mm, lupénková pilka, 3d tiskárna, smirkový papír.



Obrázek 16: Model verze 2

3.3.3 Verze 3

Tato verze využívá 3D tisku naplno. Podporuje a rozvíjí schopnosti práce jednak v modelovacích programech, tak i s 3D tiskárnami. Stavitel si nejprve musí upravit model

motoru typu 2 dle své představivosti, čímž získá model unikátní vzhled. Musí se dbát na to, aby kritické rozměry byly zachovány.

Výchovné cíle:

- Rozvoj jemné motoriky rukou (skládání jemných mechanismů), trpělivosti.
- Rozvoj představivosti (skládání součástí dle plánu) a čtení technické dokumentace (orientace v technických výkresech).
- Praktické využití moderních technologií (zapojení 3d tisku) a získání zkušeností v práci s nimi (nastavení modelu pro tiskárnu).
- Prohloubení znalostí v oblasti modelovacích programů (úprava modelu typu 2).
- Rozvoj kreativity a technického myšlení.

Časová náročnost cca 2 hodiny stavby + čas tisku součástí.

Požadavky na materiál:

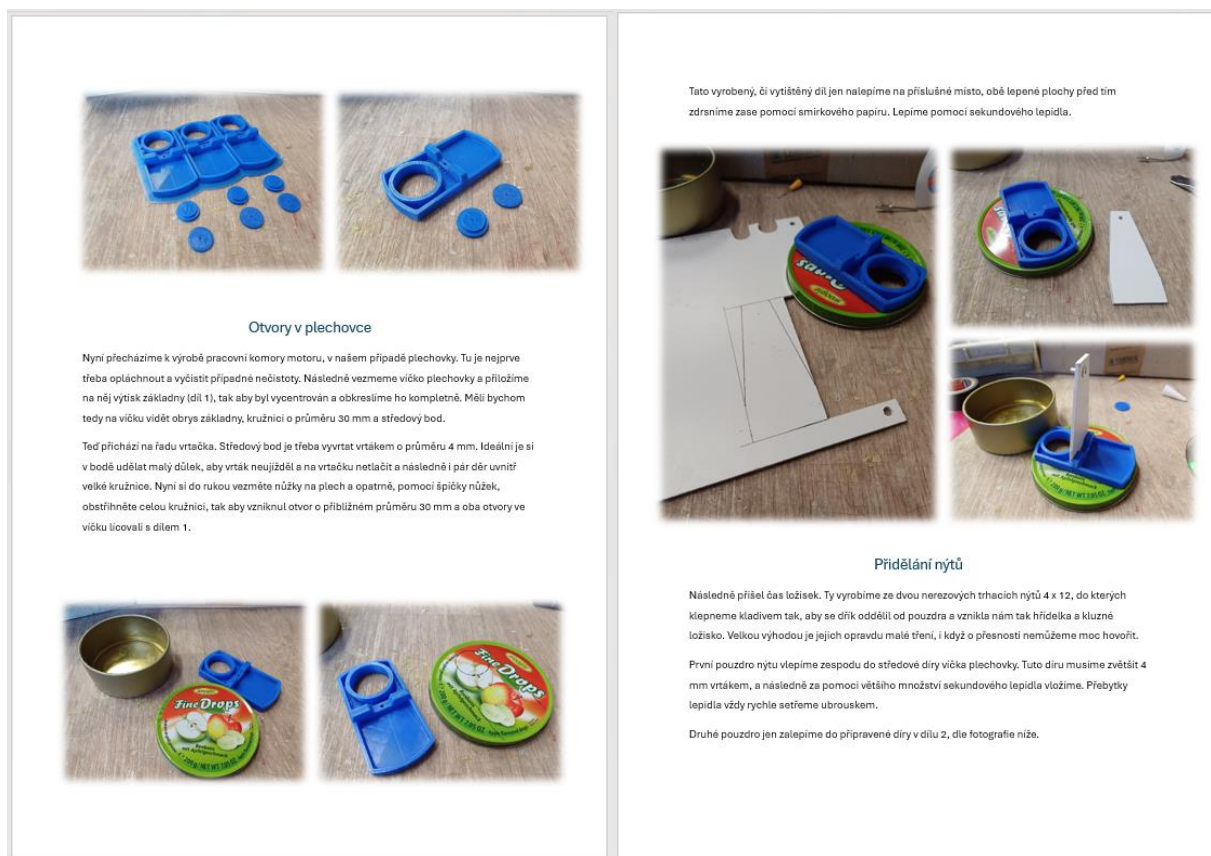
Plechová dóza d100 x 40, latexová rukavice, CD disk, trhací nýty 3 x 12, karton, ocelový drát 0,6 mm, vytisknuté díly, vteřinové lepidlo, izolepa.

Nástroje:

Vrtačka, sada vrtáků do kovu, nůžky na plech, kladivo, kleště, 3d tiskárna, smirkový papír.

3.3.4 Návod k výrobě

Byl vytvořen jednoduchý návod na výrobu, dle kterého lze model vyrobit. Zvolen byl druhý návrhový model, který se zdá jako nejuniverzálnější. Hlavním cílem bylo jednoduché a pochopitelné zpracování, dle kterého je případný zájemce schopný s jistou dávkou trpělivosti. Celý návod je doplněn názornými ukázkami a samotný soubor návodu je přiložen v přílohách (viz příloha 1).



Obrázek 17: Ukázky ze souboru návodu

4 MOŽNOSTI ZAPOJENÍ DO VÝUKY

Zásadní otázka stále zní: „Jak jde tedy model zapojit do výuky?“

4.1 Výuka termomechaniky

Nejzásadnějším odvětvím, které se nabízí, je výuka termodynamiky. A to jak na středoškolské, tak i vysokoškolské úrovni. Ve výuce model zaujímá praktické místo ve všech základních kapitolách, které jsou zmíněné níže. Model se dá využít i pro výuku v dalších kapitolách termomechaniky, které zde nejsou uvedeny, protože samotná nauka je velmi obsáhlá a komplexní. Model představuje jak propojení vykládané látky s praktickou ukázkou, tak i propojení a vytvoření návazností mezi jednotlivými tématy. Vytváří tak komplexní výukovou pomůcku podporující vysvětlení a pochopení látky, která zaujme a nadchne žáky. Zároveň nabízí možnost výroby samotné pomůcky žákem.

4.1.1 Seznam veličin

Symbol	Název	Jednotka
Q	teplo	J
V	objem	m^3
v	měrný objem	
c_v	měrná tepelná kapacita při $V = \text{konst.}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
T	teplota	K
m	hmotnost	kg

r	měrná plynová konstanta	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
η_s	účinnost Carnotova cyklu	1
η_c	účinnost Stirlingova cyklu	1

Tabulka 2: Seznam veličin

4.1.2 Ideální plyn – stavová rovnice

Základní znalost se týká vlastnosti ideálního plynu, který by měl být dokonale stlačitelný, nezkapalnitelný a bez vnitřního tření, přesněji řečeno měl by se řídit Gay-Lussacovým a Boyle-Mariotteovým zákonem. Řada reálných plynů (vzduch, kyslík, dusík) se řídí zákonitostmi ideálního plynu s dostatečnou přesností v širším rozmezí teplot a tlaků až na to, že měrná tepelná kapacita není konstantní. Užíváme proto střední měrné tepelné kapacity jako konstanty.

Stavová rovnice vycházející z uvedených dvou zákonů:

- 1) Boyle-Mariotteův zákon

$$\frac{v_1}{v} = \frac{p_2}{p_1} \Rightarrow v = v_1 \cdot \frac{p_1}{p_2}$$

Takto získaný objem změníme za stálého tlaku na objem v_2 .

- 2) Gay-Lussacův zákon

$$\frac{v_2}{v} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow v_2 = v \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

- 3) Kombinace (z obou vztahů vyjádřené objemy v_1, v_2):

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{v \cdot \frac{p_2}{p_1}}{v \cdot \frac{T_2}{T_1}} = \frac{p_2 \cdot T_1}{p_1 \cdot T_2}$$

$\Downarrow$

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = r$$

$$p \cdot v = r \cdot T$$

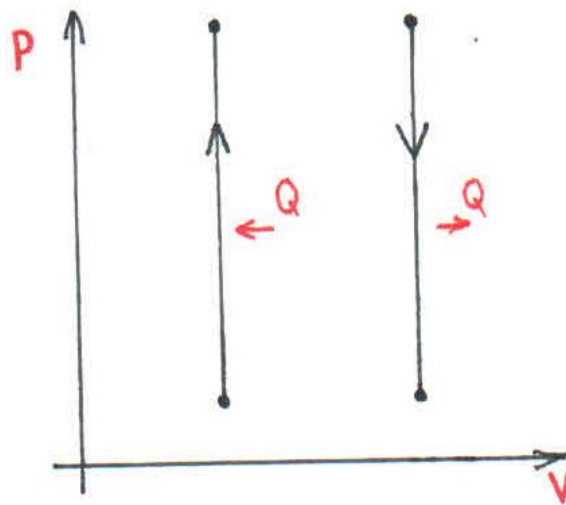
$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T$$

4.1.3 Termomechanické děje

4.1.3.1 Izochorický děj

Děj, při kterém je konstantní objem v soustavě. Znázorněn na níže uvedeném pv grafu. Rozdělujeme izochorický ohřev, při kterém je teplo přiváděno a izochorické chlazení, kdy je naopak teplo odebíráno. Oba tyto děje se odehrávají i v pracovním cyklu Stirlingova motoru.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

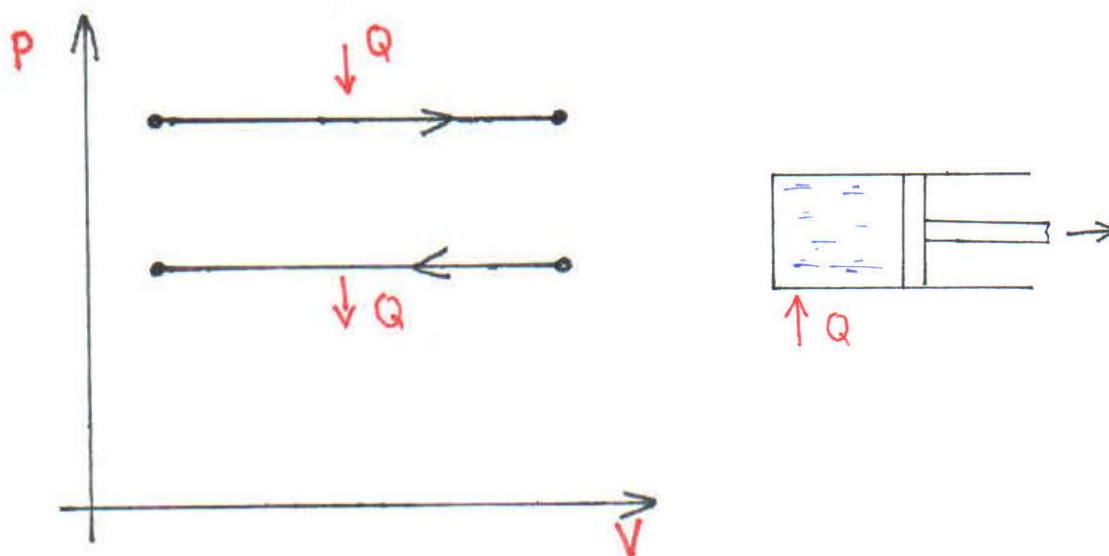


Obrázek 18: Diagram izochorického děje

4.1.3.2 Izobarický děj

Děj, při kterém je konstantní tlak v soustavě. Teplota i objem se však mění, a plyn proto koná práci. Můžeme si ho tedy představit jako uzavřený válec s pístem, kdy plynu ve válci přivádíme teplo, tedy jej zahříváme. Teplota i objem se zvětšuje a píst tedy koná práci a tlak uvnitř zůstává konstantní.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

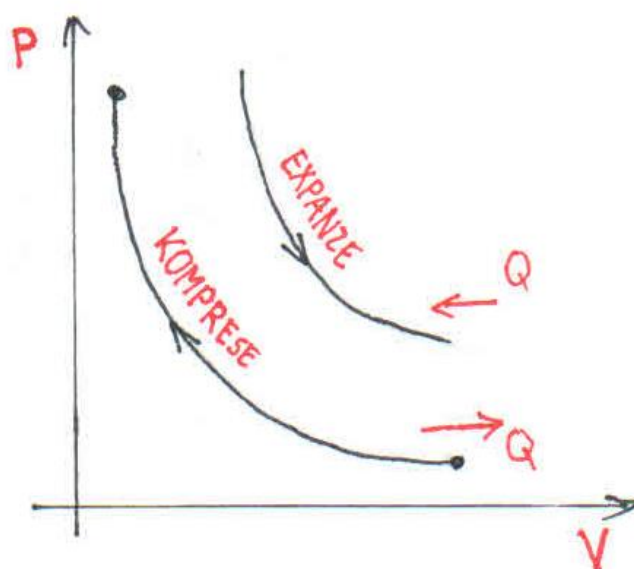


Obrázek 19: Znáornění izobarického děje

4.1.3.3 Izotermický děj

Děj, při kterém je konstantní teplota v soustavě. Tento děj má také dvě varianty. Buďto kompresi, kdy je teplo odváděno, nebo expanzi, kdy je naopak dodáváno. I tento děj se objevuje v pracovním diagramu Stirlingova motoru.

$$p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2$$

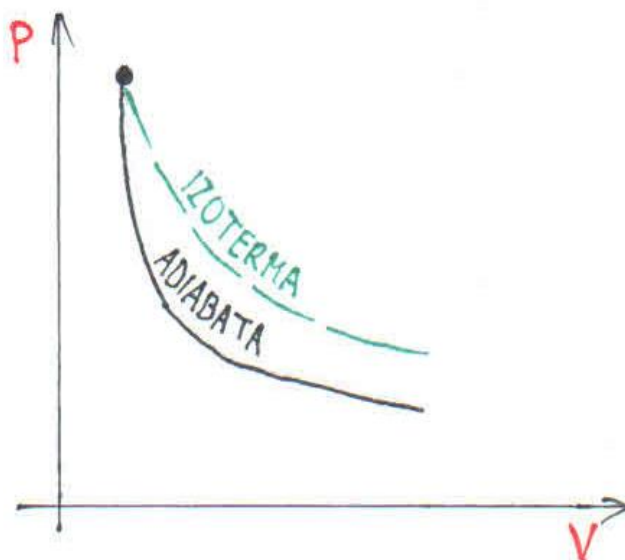


Obrázek 20: Diagram izotermického děje

4.1.3.4 Adiabatický děj

Děj, při kterém nedochází k tepelné výměně mezi okolím a soustavou., nastává tedy při dokonalé tepelné izolaci. K této změně se blíží komprese a expanze např. v moderních spalovacích motorech, kdy při vysokých otáčkách (tedy velmi krátké době jednoho cyklu) takřka nedochází k zmíněné tepelné výměně při expanzi a kompresi v motoru.

$$p_1 \cdot v_1^{\kappa} = p_2 \cdot v_2^{\kappa}$$



Obrázek 21: Diagram adiabatického děje

4.1.4 I. termodynamický zákon (První hlavní věta termodynamická)

„Teplo a práce jsou ekvivalentní.“

Tento zákon formuluje zákon zachování energie pro potřeby v termomechanice. Říká, že v izolované sestavě nemůže energie vznikat ani zanikat, pouze se přeměňuje druh energie na jinou. Hlavní myšlenkou je, že tepelnou výměnu lze využívat ke konání práce.

V praxi to lze jednoduše ukázat na modelu Stirlingova motoru, u kterého potřebujeme dodat tepelnou energii, aby ji stroj během svého cyklu mohl přeměnit na práci a udržet se v chodu.

4.1.5 II. termodynamický zákon (Druhá hlavní věta termodynamická)

„Teplo nemůže samovolně přecházet z teploty nižší na teplotu vyšší.“ [7]

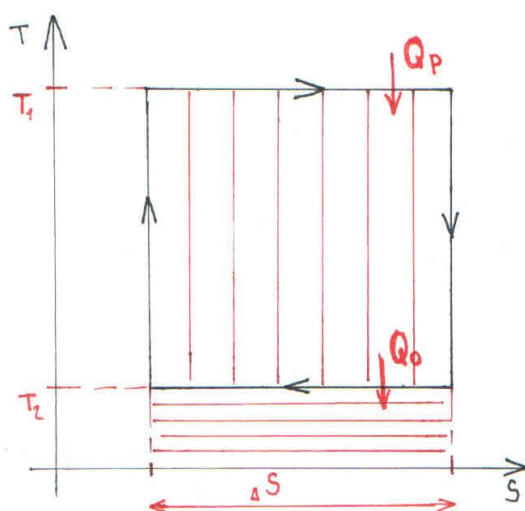
Doplňuje I. termodynamický zákon a vyvrací takzvané vratné děje, tedy fakt toho, že nelze vratně přeměňovat jednotlivé energie mezi sebou beze ztrát a děje nejsou vratné bez dodání další energie. Mluvíme tedy o směru samovolných přírodních dějů, kdy platí vždy směr k menší termodynamické uspořádanosti, tedy kdy tento méně uspořádaný stav má větší pravděpodobnost.

4.1.5.1 Entropie

S tím už nám úzce souvisí entropie. Což je umělá veličina, která v uzavřené soustavě roste, protože nám roste i neuspořádanost. Její růst vyjadřuje samovolné směřování uzavřené soustavy k menší uspořádanosti, v případě termomechaniky nejčastěji k vyrovnaní teplot. [7]

4.1.6 Carnotův oběh

Teoretický oběh, který dosahuje maximální možné účinnosti, ve skutečných podmínkách nereálné, můžeme se k němu pouze přibližovat. Skládá se ze dvou expanzí, adiabatické a izotermické a také dvou kompresí, adiabatické a izotermické.



Obrázek 22: Diagram přímého Carnotova oběhu

$$\eta_t = \frac{Q_p - Q_o}{Q_p} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

4.1.7 Stirlingův oběh

4.1.7.1 Teoretický

Samotný oběh se skládá z dvou izotermických a dvou izochorických dějů. Jeho oběh se tedy přibližuje Carnotovu, zvláště pak při malém rozdílu přivedeného a odvedeného tepla, což ale zároveň vylučuje drtivou většinu praktických využití.

Z daných dějů během oběhu Stirlingova motoru můžeme vypočítat teoretickou účinnost. Zajímavé je porovnání výpočtu motoru bez regenerátoru a s dokonalým regenerátorem. Regenerátor je prvek, který uchovává krátkodobě teplo, které by se jinak ztratilo při izochorických dějích v cyklu.

Pracujeme s absolutními hodnotami přivedeného a odvedeného tepla, znaménka přidělíme až ve výsledné rovnici pro tepelnou účinnost (názornější).

1-2 izotermický odvod tepla při T_2 konstantní

$$|q_{1,2}| = r \cdot T_2 \cdot \ln \frac{v_1}{v_2}$$

2-3 izochorický přívod tepla

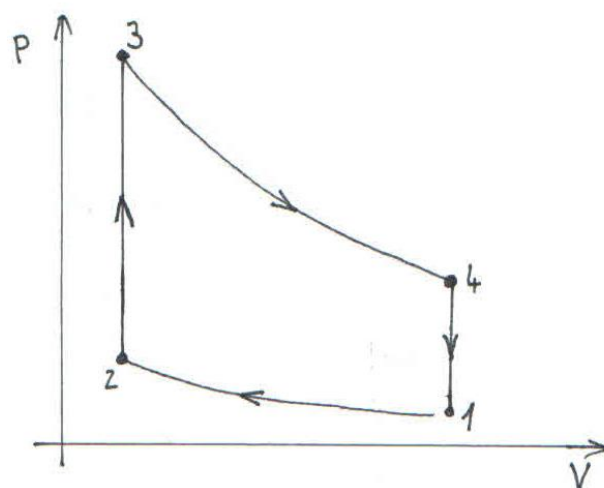
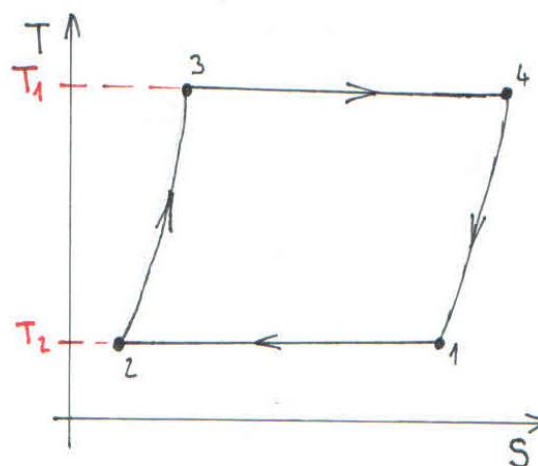
$$|q_{2,3}| = c_v \cdot (T_1 - T_2)$$

3-4 izotermický přívod tepla při T_1 konstantní

$$|q_{3,4}| = r \cdot T_1 \cdot \ln \frac{v_4}{v_3}$$

4-1 izochorický odvod tepla

$$|q_{4,1}| = c_v \cdot (T_1 - T_2)$$



Teoretická účinnost:

1) Bez regenerátoru

$$\eta_s = \frac{|q_p| - |q_o|}{|q_p|}$$

$$\eta_s = \frac{(|q_{2,3}| + |q_{3,4}|) - (|q_{1,2}| + |q_{4,1}|)}{(|q_{2,3}| + |q_{3,4}|)}$$

$$\eta_s = \frac{c_v \cdot (T_1 - T_2) + r \cdot T_1 \cdot \ln \frac{v_4}{v_3} - [r \cdot T_2 \cdot \ln \frac{v_1}{v_2} + c_v \cdot (T_1 - T_2)]}{c_v \cdot (T_1 - T_2) + r \cdot T_1 \cdot \ln \frac{v_4}{v_3}}$$

Obrázek 23: Diagram Stirlingova oběhu

$$\eta_s = \frac{r \cdot T_1 \cdot \ln \frac{v_4}{v_3} - r \cdot T_2 \cdot \ln \frac{v_1}{v_2}}{c_v \cdot (T_1 - T_2) + r \cdot T_1 \cdot \ln \frac{v_4}{v_3}} < \eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Označený výraz (část odvedeného tepla) zhoršuje tepelnou účinnost v porovnání s Carnotovým cyklem.

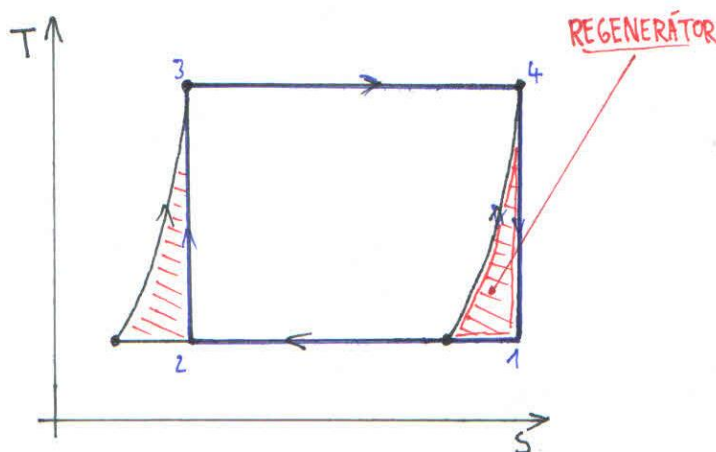
2) S regenerátorem

2-3 izochorický přívod tepla ... **dodá regenerátor**

$$|q_{2,3}| = c_v \cdot (T_1 - T_2)$$

4-1 izochorický odvod tepla ... **přijme regenerátor**

$$|q_{4,1}| = c_v \cdot (T_1 - T_2)$$



Obrázek 24: Stirlingův oběh zohledňující regenerátor

Práce, teoreticky získatelná z tepla (teplu přivedenému přidělíme kladné znaménko, teplu odvedenému záporné):

$$W = -|q_{1,2}| + |q_{2,3}| + |q_{3,4}| - |q_{4,1}|$$

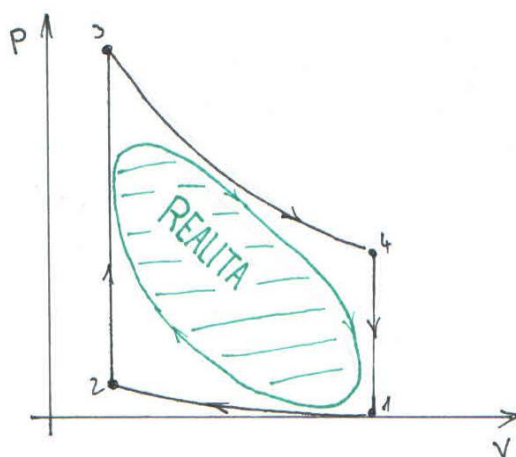
$$W = -|q_{1,2}| + |q_{3,4}|$$

$$\eta_s = \frac{|q_{3,4}| - |q_{1,2}|}{|q_{3,4}|} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \eta_c$$

Z těchto teoretických výpočtů vyplývá, že přidáním regenerátoru do soustavy se zvýší teoretická účinnost celku až na hranici Carnotova oběhu, tedy maxima, kterého lze teoreticky dosáhnout.

4.1.7.2 Praktický

Vlivem mechanických možností a ztrát soustavy, se reálný oběh vzdaluje od toho teoretického. Největší podíl na tom má samotný pohyb pístů a klikový mechanismus, který pozměňuje průběh oběhu, ale také tlakové a tepelné ztráty.



Obrázek 25: Reálný Stirlingův oběh

4.2 Zapojení do rámcových vzdělávacích programů

Model Stirlingova motoru jako vzdělávací pomůcka zapadá do rámcových vzdělávacích programů (dále jen RVP) vydávaných Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy, dle kterých se řídí výuka na státních školách.

4.2.1 RVP pro základní vzdělávání

Z tohoto RVP, určeného pro základní školy (dále jen ZŠ), byla vybrána následující témata.

4.2.1.1 Člověk a příroda

Zde se nachází cílový vzdělávací obor – **Fyzika**. Pro účely vzdělávací pomůcky je ideální kapitola s názvem **energie**. Kde se může uplatnit především jako zpestření výkladu o formách energie a přeměnách energie a také při výkladu o obnovitelných a neobnovitelných zdrojích energie.

Může posloužit jako demonstrační pomůcka, která zaujme žáky a zpestří vykládanou látku. Není zde žádoucí dopodrobna rozebírat samotnou činnost motoru, zásadní jsou zde banální vztahy, ií prostá ukázka přeměny energie v praxi. Naopak žádaná je diskuse o možnostech zdrojů energie vzhledem na životní prostředí.

4.2.1.2 Člověk a svět práce

Tady se nalézá stejnojmenný vzdělávací obor – **Člověk a svět práce**. Pro účely vzdělávací pomůcky jsou hned dvě podřízené kapitoly, a to **práce s technickými materiály** a **design a konstruování**. Obě kapitoly můžou využívat model jako stavebnici, kterou si žáci na hodinách postaví a zprovozní.

V kapitole práce s technickými materiály je dbáno více na celkový výrobní proces. Konkrétněji na čtení technické dokumentace a výběr a vlastnosti technických materiálů, ale také na dodržování bezpečnostních zásad a výběru vhodného nářadí. Koncepce modelu zajišťuje snadné pořízení výrobních materiálů, ale také relativní časovou nenáročnost, kdy bohatě stačí časová dotace v řádu nižších jednotek hodin.

V kapitole designu a konstruování je více dbáno na schopnost postupu dle daného psaného návodu a sestavování a údržbu jednotlivých mechanismů. Případně také na posuzování konstrukčních řešení a případných jejich úprav. Model v tomto případě tedy nabízí možnost

jednoduché polytechnické stavebnice, jejíž princip se zároveň prolíná s látkou probíranou v jiných předmětech a žáci si jí mohou celou sestavit dle přiloženého návodu.

4.2.2 RVP pro gymnaziální vzdělávání

Z tohoto RVP, určeného pro gymnázia, byly vybrány následující vzdělávací obory.

4.2.2.1 Fyzika

V tomto oboru se vybízí kapitola **stavba a vlastnosti látek**, která se mimo jiné zabývá termodynamikou. Teoretická část této oblasti je kompletně a dopodrobna rozepsána výše (viz kapitola 4.1). Zmiňovaný model zde může být využit ve třech rovinách:

- Jednak může sloužit pouze pro zpestření výuky, tedy na ukázkou s výkladem dané látky například o přeměnách energie, či termodynamických dějích.
- Nebo může sloužit přímo k rozboru, tedy jako střed zájmu výuky. Nabízí se kompletní rozbor principu, konkrétněji pojednání o termodynamických obězích, účinnosti či prostých zdrojích tepla. Studenti si tak vytvoří ucelený obrázek o termodynamice a o komplexnosti tepelných strojů.
- Poslední a neméně důležitou oblastí může být ochrana životního prostředí, a to konkrétně způsoby získávání energie, protože Stirlingův motor může získávat energii mnoha způsoby, viz kapitola 2.2.

4.2.3 RVP pro střední odborné vzdělávání

Do této oblasti spadá velké množství oborů, ale není účelné se v této práci zabývat všemi, proto se zaměřuje na jeden a objektivně ho zpracovává, přestože Stirlingův motor by jistě našel kvalitní uplatnění jistě i jinde. Byl zvolen obor vzdělání 23-41-M/01 Strojírenství, ze kterého byly vybrány následující kurikulární rámce.

4.2.3.1 Fyzikální vzdělávání

V tomto rámci se probíraná látka takřka dokonale shoduje s látkou určenou RVP pro gymnázia v oboru fyziky, proto text psaný výše v podkapitole 4.2.2.1 platí i pro tuto podkapitolu.

4.2.3.2 Odborné vzdělávání – projektování a konstrukce

V tomto rámci se studenti jednak zabývají samotným konstruováním, ale i potřebnými vztahy s matematicko-přírodovědnými složkami vzdělávání. Proto se zde může zabíhat do detailní konstrukce Stirlingova motoru a jednotlivých konstrukčních řešení. Také řešení použitých materiálů vzhledem k zatěžování a rozdílným fyzikálním vlastnostem. Je zde také oblast technické dokumentace, která nabízí možnost řešení výkresové dokumentace k jednotlivým dílům, či celé sestavě.

4.2.3.3 Odborné vzdělávání – stavba a provoz strojů

Jak už samotný název napovídá, tento rámec se zabývá stavbou a provozem strojů. Částečně tak navazuje na předchozí rámec projektování a konstrukce, který rozvíjí směrem k řešení konkrétních konstrukčních řešení v oblasti mechanismů a jednotlivých součástí strojů. Zde tedy model nalézá možná uplatnění při ukázce řešení jednoduchých mechanismů a strojních součástí, či také v oblasti údržby a provozu strojů.

4.3 Výukové struktury témat dle RPV

Za pomoci AI Copilot byly vytvořeny následující struktury výuky některých témat určených v předchozí kapitole 4.2 dle RPV. Ačkoliv byly následně ještě upraveny, představují ukázkou, že umělá inteligence se dá prakticky využívat při přípravě výuky a tím usnadňuje práci pedagogům, kteří mohou svůj čas investovat jinde.

4.3.1 Základní vzdělávání – 2. stupeň

Naplnuje vzdělávací obor Člověk a svět práce: práce s technickými materiály, design a konstruování.

Vstupní požadavky

Znalost základních pojmů: energie, energetický zdroj, teplo, práce, skupenství látek, tlak a síla.

Úvod

Stručný přehled strojů využívajících tepelných výměn pro konání mechanické práce – tepelných motorů, zmapování znalostí žáků.

Krátký přehled o historii Stirlingova motoru.

Vysvětlení základních principů, jak Stirlingův motor funguje.

Hlavní část

Výhody a nevýhody: Vysvětlení, proč byly Stirlingovy motory vyvinuty jako alternativa k parním strojům a jaké mohou mít výhody v dnešní době.

Design: Jak je konstruován Stirlingův motor realizovatelný v domácích podmínkách, jaké jsou potřebné materiály a nástroje.

Praktická část

Jak postavit domácí Stirlingův motor: Jednoduchý návod k vytvoření motoru z běžně dostupných materiálů. Využití 3D tisku. Možné problémy a kritická místa systému (těsnost versus tření apod.).

Předpokladem pro realizaci tématu jsou vhodně připravené polotovary součástí a stavební plánek s návodem.

Závěr

Souhrn toho, co bylo prezentováno.

Diskuse o možných aplikacích Stirlingových motorů.

Otázky a odpovědi

Čas na otázky žáků a diskusi o prezentovaném materiálu.

Ověření znalostí

Které stroje využívají tepla k získání mechanické práce?

Jak se liší Stirlingův motor od spalovacího (např. zážehového – benzínového) motoru?

Jaké mohou být zdroje tepla?

Jaké jsou výhody a nevýhody Stirlingova motoru?

4.3.2 Střední odborné vzdělání - 23-41-M/01 Strojírenství

Naplnuje rámce Odborné vzdělávání – stavba a provoz strojů a Odborné vzdělávání – projektování a konstrukce

Vstupní požadavky

Znalost základních pojmů z termodynamiky plynů. Klíčová slova: ideální plyn, stavová rovnice, vratné změny stavu, první a druhý zákon termodynamiky, Carnotův oběh, tepelná účinnost.

Úvod

Krátký přehled o historii Stirlingova motoru.

Vysvětlení základních principů, jak Stirlingův motor funguje.

Hlavní část

Typy Stirlingových motorů: Vysvětlení rozdílů, vlastností a použití.

Design: Jak jsou Stirlingovy motory konstruovány, kritická místa konstrukce, probrání jednotlivých součástí a jaké materiály jsou vhodné.

Výhody a nevýhody: Diskuse o tom, proč byly Stirlingovy motory vyvinuty jako alternativa k parním strojům a jaké mohou mít výhody v dnešní době.

Teoretická část

Stavová rovnice ideálního plynu: Vlastnosti ideálního plynu, odvození stavové rovnice.

I. a II. termodynamický zákon: Vysvětlení obou zákonů, jejich reálné dopady a důležitost.

Stirlingův oběh: Jednotlivé děje v oběhu, grafické řešení, podobnost s Carnotovým oběhem a význam regenerátoru a teoretická účinnost.

Závěr

Souhrn toho, co bylo prezentováno.

Diskuse o možných aplikacích Stirlingových motorů v dnešní době a o udržitelnosti získávání energie.

Otázky a odpovědi

Čas na otázky od studentů a diskusi o prezentovaném materiálu.

Ověření znalostí

Jak funguje Stirlingův motor?

Z jakých změn stavu se skládá teoretický oběh motoru s ideálním plynem?

Jaký přínos má regenerátor?

Kdy je použit přemístovací píst a jakou má funkci?

Vyhledejte praktické aplikace Stirlingova motoru a možné zdroje tepla.

4.4 Vzdělávání žáků nadaných a mimořádně nadaných

„Nadaným žákem se pro účely vyhlášky č. 27/2016 Sb. rozumí jedinec, který při adekvátní stimulaci vykazuje ve srovnání s vrstevníky vysokou úroveň v jedné či více oblastech rozumových schopností, intelektových činností nebo v pohybových, manuálních, uměleckých nebo sociálních dovednostech.“ [8]

„Za mimořádně nadaného žáka se v souladu s vyhláškou č. 27/2016 Sb. považuje žák, jehož rozložení schopností dosahuje mimořádné úrovně při vysoké tvořivosti v celém okruhu činností nebo v jednotlivých oblastech rozumových schopností, v pohybových, manuálních, uměleckých nebo sociálních dovednostech.“ [8]

Relativně novou kapitolou je vzdělávání žáků nadaných a mimořádně nadaných. K těmto žákům musí mít školy speciální přístup, tak aby měli co nejlepší podmínky k seberealizaci vzhledem k jeho individuálním možnostem. I samotná výuka by měla být přizpůsobena tak, aby měli co nejlepší prostředí a mohli se dále rozvíjet.

I v této situaci můžeme využívat Stirlingova motoru. Samozřejmostí je přizpůsobení zadání konkrétnímu jedinci, ale nabízí se zde hned několik možných typových řešení v případě nadaných a mimořádně nadaných žáků.

- **Teoretické řešení:** Žák se může zabývat Stirlingovým motorem jakožto teoretickým modelem, u kterého lze s rozvinutými znalostmi v oblasti termomechaniky spočítat mnoho dějů, či samotná účinnost a rozvíjet tak znalosti v oblasti technické termodynamiky a matematiky.
- **Praktické řešení:** Vhodné pro velice zručné žáky, cílem je vytvoření plně funkčního modelu, který lze pak dále upravovat s cílem získání většího výkonu, či otáček a rozvíjet tak vlastní přínos modelu.
- **Konstrukční řešení:** Kombinované řešení, které podporuje kreativitu žáka, cílem je od začátku navrhnout svůj vlastní model Stirlingova motoru a dále ho případně vyrobit, zvážit konstrukční řešení a pokusit se nalézt nejlepší řešení. Žák tak získává cenné praktické zkušenosti s konstrukcí podržené výsledným praktickým modelem.

4.5 Zájmové kroužky

Zvláštní kategorií jsou zájmové kroužky převážně technického charakteru. Zde je velmi široké pole působnosti, proto se zde uplatnění hledá jednoduše. Výroba demonstračního modelu na kroužku představuje zajímavý praktický projekt s funkčním výsledkem, který zaujme.

Zároveň tento projekt funguje jako nástroj pro popularizaci vědy a technické praxe obecně. Je proto žádoucí vést se žáky diskusi o Stirlingově motoru, jeho historii, principech a také o jeho využití v moderním světě, či otázkách udržitelnosti.

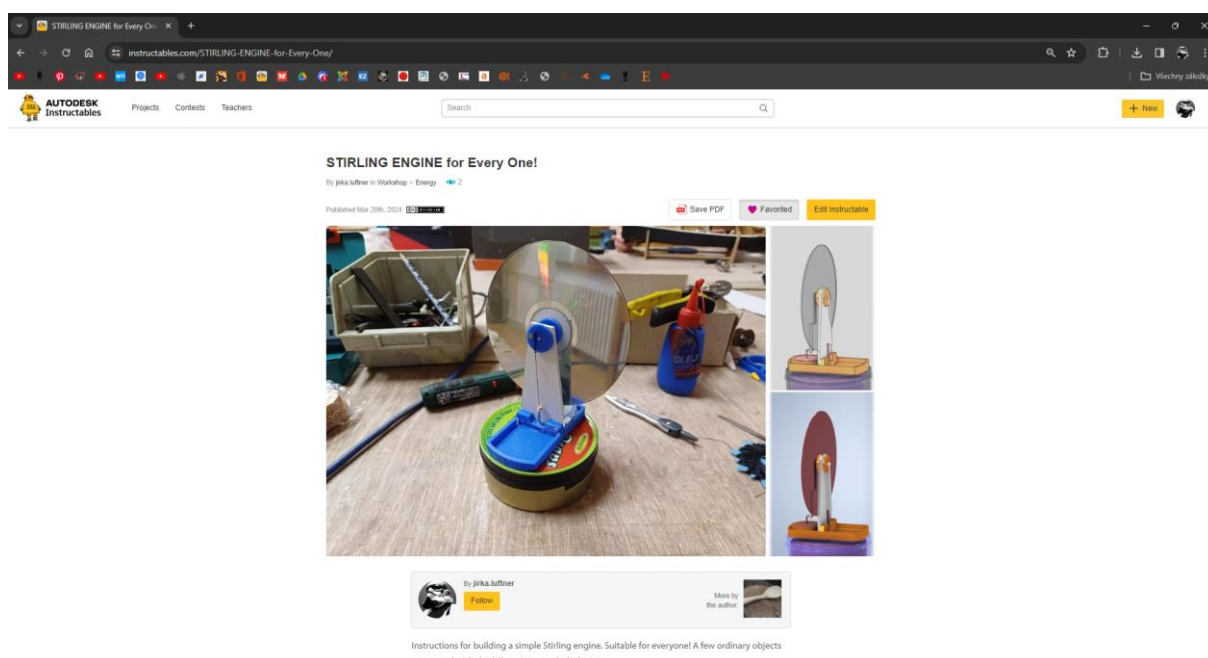
4.6 Široká veřejnost

Poslední kategorií je široká veřejnost, protože „člověk žije, dokud se učí, nehledě na věk.“ Z tohoto důvodu nemá smysl se fixovat jen na nejmladší generaci, ale naopak ukázat možnosti opravdu všem. Možnost postavit si svůj Stirlingův motor kdykoliv, jednoduše, z běžně dostupných materiálů. Ať už je to projekt v rámci rodiny, či jen jako volnočasová aktivita, bude to mít pro stavitele svůj přínos.

I když hlavní je rozvoj daného jedince, každý vyrobený model je unikát, něco osobního. Věc, která může nadchnout a být prvním krůčkem v cestě vedoucí k technice, bez ohledu na věk. Nesmíme také zapomínat na fakt, že z několika součástí se pod rukama zrodí model, který se roztočí, a to je vždy nepopsatelná radost, krásný pocit, vdechnutí života mechanickému stroji, opravdová fascinace.

4.6.1 Zveřejnění návodu

Návod na výrobu (viz kapitola 3.3.4 a příloha 1) byl nejprve přeložen do anglického jazyka a následně zveřejněn na stránce *Instructables.com*, která sdružuje mezinárodní komunitu kutilů, kteří sdílejí návody na své projekty a vzájemně se inspirují. Tato internetová stránka se jeví jako ideální prostředek pro sdílení návodu. V návodu je popsán celý postup výroby i s fotodokumentací a jsou přiloženy i podklady pro 3d tisk jednotlivých dílů. Navržený model jsi tak může vyrobit opravdu každý!



Obrázek 26: Internetový návod

5 OVĚŘOVÁNÍ V PRAXI

5.1 Zkušenosti ze stavby

Samozřejmostí bylo vyzkoušet stavbu modelu, konkrétně typového řešení 2. Byly postaveny celkem 4 testovací modely se studenty ve věku 16-18 let, kteří projevují náklonost k technice. Z jejich postupu stavby byly získány cenné zkušenosti.

5.1.1 Časová náročnost

Z praxe vyplynulo, že na stavbu celého modelu, když všechny materiály a pomůcky jsou nachystané, stačí úplně bohatě 90 minut. Díky využití sekundového lepidla, není třeba dlouhým technologických pauz a model vzniká velice rychle.

5.1.2 Problematika lepených spojů

Jediným velkým problémem postupu se ukázalo samotné lepení. Je třeba používat dostatek lepidla tak, aby spoje byly opravdu těsné a dostatečně prosycené, v opačném případě se stroj nerozběhne, či s velkými problémy.

5.1.3 Tření

Jako další zkušenost vyplývá, že je opravdu nezbytné snížit tření v celé sestavě na naprosté minimum. Ať už za pomoci oleje, či seřízení jednotlivých součástí, aby kladly co nejmenší odpor.

5.1.4 Radost a nadšení

Avšak u každého stavitele se projevila euforie při prvním rozběhu zbrusu nového modelu. Pocit toho, že pod jejich rukami vzniknul za pár desítek minut stroj, který je schopen přeměňovat

teplo přímo na mechanickou práci, je opravdu nezapomenutelný a naprosto fascinující. Všichni stavitelé byli naprosto nadšení!

5.1.5 Vlastní přínos

Za poslední zmínku stojí další úpravy stavitele, protože po chvílích první euforie se vždy vyskytly myšlenky, jak motor upravit, aby běžel lépe, déle, výkonněji... Což je přesně to, co bylo účelem, podnícení zvědavosti a nutkání vnoření se více do problematiky, ať už termomechaniky, či jen tepelných motorů.

6 ZÁVĚR

Stanovené cíle byly rámcově splněny. Na konci práce stojí hned tři typy funkčních modelů, které jsou relativně jednoduše vyrobitelné z běžně dostupných materiálů. Také byla provedena rešerše využití této technologie v 21. století, která shrnuje všechna zásadní využití. Samotná výuková pomůcka byla začleněna do rámcových vzdělávacích programů, kde našla stabilní pozici protínající hned několik vzdělávacích oborů a oblastí jak na základních školách, tak i na gymnáziích a středních odborných školách. Také je nápomocná při podpoře nadaných a mimořádně nadaných žáků, či při mimoškolních aktivitách a osobním rozvoji jedinců. Stala se tak velmi komplexní a zároveň všestrannou pomůckou, která našla své místo.

6.1 Možnosti do budoucna

Další případný postup práce nabízí několik možností, směrů, kterými se dá postupovat. Je možné se vydat cestou vytvoření demonstračního modelu čistě určeného pro učitele, který je dostatečně velký a názorný. Mohl by sloužit jak na středních školách a gymnáziích, tak na druhém stupni základních škol, kde by jistě našel využití. Nebo naopak jde dále pokračovat v cestě výukové pomůcky, kterou si tvoří sami žáci. Zde je jednak prostor v úpravách konstrukce samotného motoru tak, aby byl výrobně co nejjednodušší, nebo naopak v možnosti využití jiných mechanismů a uspořádání.



Obrázek 27: Finální Stirlingův motor

7 POUŽITÁ LITERATURA A DALŠÍ ZDROJE

[1] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Stirlingův motor [online]. c2024 [citováno 18. 2. 2024]. Dostupné z:

https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Stirling%C5%AFv_motor&oldid=23645648

[2] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Stirling engine [online]. c2024 [citováno 29. 2. 2024]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stirling_engine&oldid=1195626422

[3] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Applications of Stirling engine [online]. c2024 [citováno 2. 03. 2024]. Dostupné z:

https://en.wikipedia.org/wiki/Applications_of_the_Stirling_engine

- [4] BICKFORD, Riley. Stirling engines, complete cycle [online]. c2017 [citováno 1. 3. 2024]. Dostupné z: https://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2017/Riley_Bickford/riley_bickford/CompleteCycle.html
- [5] BOUŘ, Petr, JADNÍK L., ŠEBEK M. Stirlingův motor [online]. c2012 [citováno 1. 3. 2024]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2011-2012/Leto12/proc/stirling.pdf>
- [6] MOREN, Jan. Stirling [online]. c2008 [citováno 2. 3. 2024]. Dostupné z: <https://janneinosaka.blogspot.com/2008/05/stirling.html>
- [7] GRUBER, Josef. MECHANIKA VI, termomechanika [online]. c2012 [citováno 12. 3. 2024]. Dostupné z: https://site-1952005.mozfiles.com/files/1952005/mec6_txt.pdf
- [8] ČESKO. Vyhláška o vzdělávání žáků se speciálními vzdělávacími potřebami a žáků nadaných , § 27 odst. 2 vyhlášky č. 27/2016 Sb. [online]. c2016 [citováno 2. 3. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-27#cast4>
- [9] Stirling Cycle Coolers. The Next Generation of Cooling - Stirling Cycle [online]. c2005 [citováno 2. 3. 2024]. Dostupné z: <https://www.procooling.com/index.php?func=articles&disp=47>
- [10] NAKAHARA, Hiroko. Stirling engine from Kontax [online]. c2016 [citováno 6. 3. 2024]. Dostupné z: <https://cmps-people.ok.ubc.ca/jbobowsk/Stirling/what.html>
- [11] RUBENS, Ben. The Stirling engine [online]. c2022 [citováno 1. 3. 2024]. Dostupné z: <https://paleo-energetique.org/en/paleoinventions/the-stirling-engine/>
- [12] NASA. Powering Up NASA's Human Reach for the Red Planet [online]. c2023 [citováno 2. 3. 2024]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/game-changing-development-program/powering-up-nasas-human-reach-for-the-red-planet/>
- [13] KANELLOS, Michael. Stirling Solar Goes Live: How Does it Compare to Mirrors? [online]. c2024 [citováno 12. 3. 2024]. Dostupné z: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/stirling-solar-goes-commercial>
- [14] NEJLEVNEJSIPODLAHY. Co je to WOLFCRAFT ocelová vlna? [online]. c2024 [citováno 4. 3. 2024]. Dostupné z: <https://magazin.nejlevnejsipodlahy.cz/clanek/co-je-to-wolfcraft-ocelova-vlna/>
- [15] SAINDONE, Luke. Thermodynamic Theory of the Ideal Stirling Engine [online]. c2020 [citováno 7. 3. 2024]. Dostupné z: <https://blog.mide.com/thermodynamic-theory-of-the-ideal-stirling-engine>

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

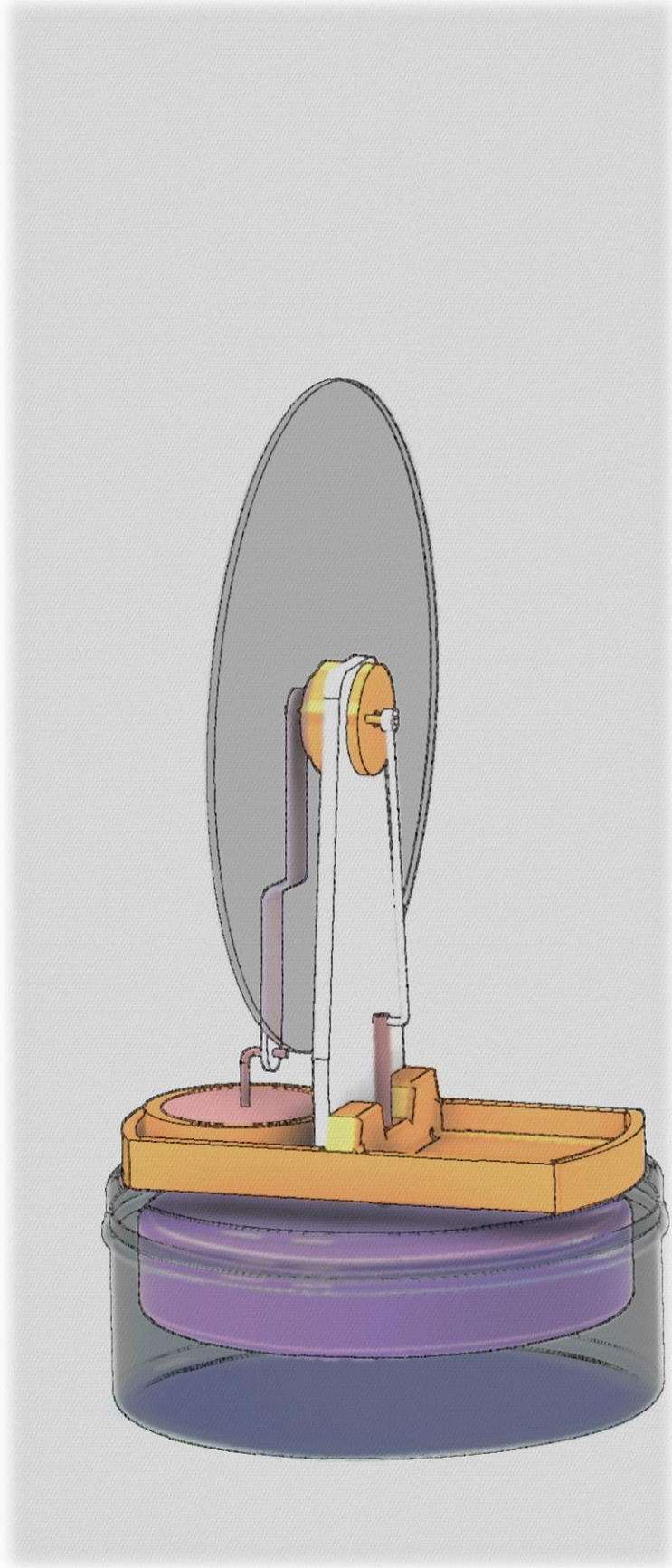
Obrázek 1: Původní návrh Stirlingova motoru [11]	7
Obrázek 2: Elektrický generátor využívající Stirlingův motor [2]	9
Obrázek 3: Solární elektrárna využívající Stirlingův motor [13]	9
Obrázek 4: Stirlingův motor jako chladič [9]	9
Obrázek 5: Stirlingův motor vyvinutý společností NASA [12]	10
Obrázek 6: Stirlingův motor s trubkovým ohříváčem [15].....	11
Obrázek 7: Konfigurace Alfa [1]	12

Obrázek 8: Konfigurace Beta [4]	13
Obrázek 9: Graf závislosti tlaku a objemu teoretického motoru [1].....	14
Obrázek 10: Stirlingův motor typu LTD [10].....	16
Obrázek 11: Plechovka od bonbonů	17
Obrázek 12: Ocelová vlna [14]	18
Obrázek 13: Vizualizace v programu Autodesk Inventor Professional 2024.....	20
Obrázek 14: Funkční model.....	21
Obrázek 15: Model verze 1	23
Obrázek 16: Model verze 2.....	24
Obrázek 17: Ukázky ze souboru návodu	26
Obrázek 18: Diagram izochorického děje	28
Obrázek 19: Znázornění izobarického děje	29
Obrázek 20: Diagram izotermického děje	29
Obrázek 21: Diagram adiabatického děje	30
Obrázek 22: Diagram přímého Carnotova oběhu	31
Obrázek 23: Diagram Stirlingova oběhu	32
Obrázek 24: Stirlingův oběh zohledňující regenerátor	33
Obrázek 25: Reálný Stirlingův oběh.....	34
Obrázek 26: Internetový návod.....	40
Obrázek 27: Finální Stirlingův motor	42
 Tabulka 1: Parametry motoru	 22
Tabulka 2: Seznam veličin.....	27



tomas

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST



Materiál a pomůcky

Základ všeho toho, co musíte udělat před samotnou stavbou, je zajistit si vše potřebné. Nebojte se, není to zas tak obtížné.

1.1.1 Materiál

Plechovka 98 x 38 mm

3d tištěné díly

Tenká latexová rukavice

Ocelový drát 1 mm

Nerezový trhací nýt 4 x 12 mm

Karton

CD disk

Hřebík průměru 1,5 mm

Nit

1.1.2 Pomůcky

Vrtačka

Sada vrtáků do oceli

Kleště

Nůž

Nůžky na plech

Kladívko

Sekundové lepidlo

Izolepa

Smirkový papír

9.2 Vytisknutí dílů

Následuje krok, ve kterém je třeba si vytisknout, či nechat vytisknout všechny potřebné díly na 3D tiskárně. V zásadě je jedno, z jakého materiálu budou vytisknuty, protože žádný z dílů není nikterak zásadně namáhán. Barevnou kombinaci volte dle svých osobních preferencí. Stejně tak i samotné nastavení modelu pro tiskárnu, každá tiskárna je jiná, a proto vždy ke zkušenostem s daným strojem, či se nebojte říct o pomoc.

Vytisknuté díly budou ještě potřebovat trochu péče, avšak s tím následující kroky počítají. Není také od věci jen rámcově přeměřit rozměry výtisků, jestli s rozumnou tolerancí ($\pm 0,5$ mm) sedí.



9.3 Otvory v plechovce

Nyní přecházíme k výrobě pracovní komory motoru, v našem případě plechovky. Tu je nejprve třeba opláchnout a vyčistit případné nečistoty. Následně vezmeme víčko plechovky a přiložíme na něj výtisk základny (díl 1), tak aby byl vycentrován a obkreslíme ho kompletně. Měli bychom tedy na víčku vidět obrys základny, kružnici o průměru 30 mm a středový bod.

Teď přichází na řadu vrtačka. Středový bod je třeba vyvrtat vrtákem o průměru 4 mm. Ideální je si v bodě udělat malý důlek, aby vrták neujížděl a na vrtačku netlačit a následně i pár děr uvnitř velké kružnice. Nyní si do rukou vezměte nůžky na plech a opatrně, pomocí špičky nůžek, obstrihněte celou kružnici, tak aby vzniknul otvor o přibližném průměru 30 mm a oba otvory ve víčku lícovaly s dílem 1.





9.4 Nalepení základny

Když se povedl předchozí krok, můžeme postoupit dále. K samotnému nalepení dílu 1, víčku plechovky. Oba lepené povrchy (spodní strana dílu 1, víčko plechovky) je nutné zdrsnit pomocí brusného papíru (hrubost není podstatná). Tím zajistíme lepší přilnutí lepidla.

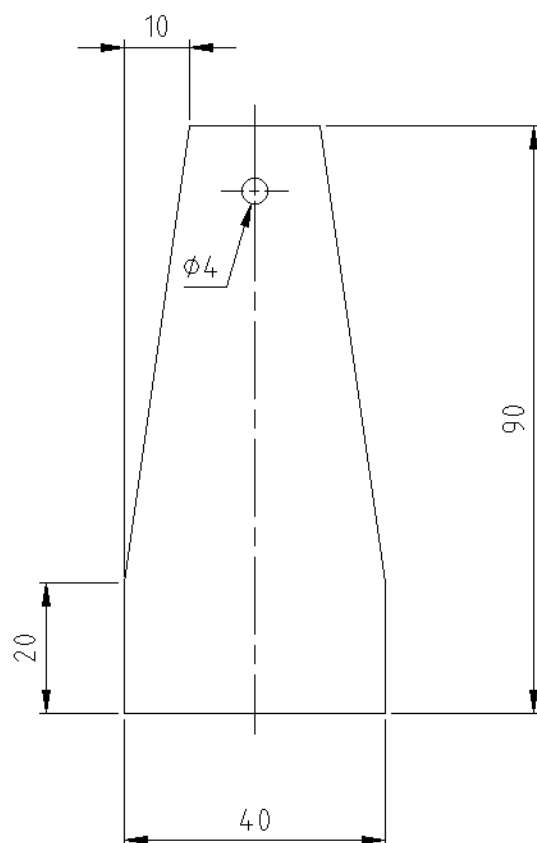
Naneseme na plechové víčko dostatečnou vrstvu sekundového lepidla a následně přiložíme díl jedna tak, aby nám obě díry lícovaly a pořádně sevřeme, tak aby **spoj byl dokonale těsný**. To je naprosto kritické pro celou funkčnost motoru, protože i malá netěsnost způsobí nefunkčnost.



9.5 Vyřiznutí a nalepení druhého dílu

Postupujeme dále, na díl číslo dva. Tento díl buďto může být vytištěný, či je třeba ho přeskreslit na zvolený materiál (překližka či plastová deska o tloušťce 3 mm), vyřiznout pilkou, zabrousit hrany a následně vyvrtat díru pro ložisko.

Tento vyrobený či vytištěný díl jen nalepíme na příslušné místo, obě lepené plochy před tím zdrsíme zase pomocí smirkového papíru. Lepíme pomocí sekundového lepidla.



9.6 Přidělání nýtů

Následně přišel čas na zhotovení ložisek. Ty vyrobíme ze dvou nerezových trhacích nýtů 4 x 12, do kterých klepneme kladivem tak, aby se dřík oddělil od pouzdra a vznikla nám tak

hřídelka a kluzné ložisko. Velkou výhodou je jejich opravdu malé tření, i když o přesnosti nemůžeme moc hovořit, v případě lze také použít malá kuličková ložiska.

První pouzdro nýtu vlepíme zespodu do středové díry víčka plechovky. Tuto díru musíme zvětšit 4 mm vrtákem, a následně za pomoci většího množství sekundového lepidla vložíme. Přebytky lepidla vždy rychle setřeme ubrouskem. Také lze místo sekundového lepidla použít jakékoliv rychleschnoucí dvojsložkové lepidlo.

Druhé pouzdro jen zalepíme do připravené díry v dílu 2, dle fotografie níže.



9.7 Setrvačnick

Na řadě je první pohyblivá část. Do vytištěného dílu č. 3 vlepíme za pomoci sekundového lepidla náš CD disk, dáváme pozor, aby byl opravdu dobře a pevně přiložen. Dále zvětšíme středovou díru 2,5 mm vrtákem a vlepíme do této díry naši osičku tak, aby jedna strana byla srovnaná s hranou setrvačnicku. Už zbývá jen zvětšit díru na první kliku vrtákem o průměru 1,5 mm a vložíme (nelepíme) do ní zkrácený malý hřebík.



9.8 Klika

Setrvačnick i s jednou klikou je tedy hotov a přesouváme se na druhou stranu hřídele ke druhé klice. Tu tvoří díl číslo 4, u kterého je montáž opět jednoduchá. Je třeba zase a znovu vyvrtat středovou díru a celý kus zalepit na hřídelku tak, aby šlo se setrvačnickem otáčet, ale nebyla tam zbytečná vůle (ideální je vůle okolo 1 mm). Důležité je si dát pozor, aby druhá klika byla o **90° potočená** oproti té druhé. Následně uštipnout přečnávající část hřídelky a převrtat díru, do které, stejně jako na druhé straně, zalepit zkrácený hřebík. Teď již stačí kápnout olej tak, aby zatekl do pouzdra a rotační část je hotová.



9.9 Membrána

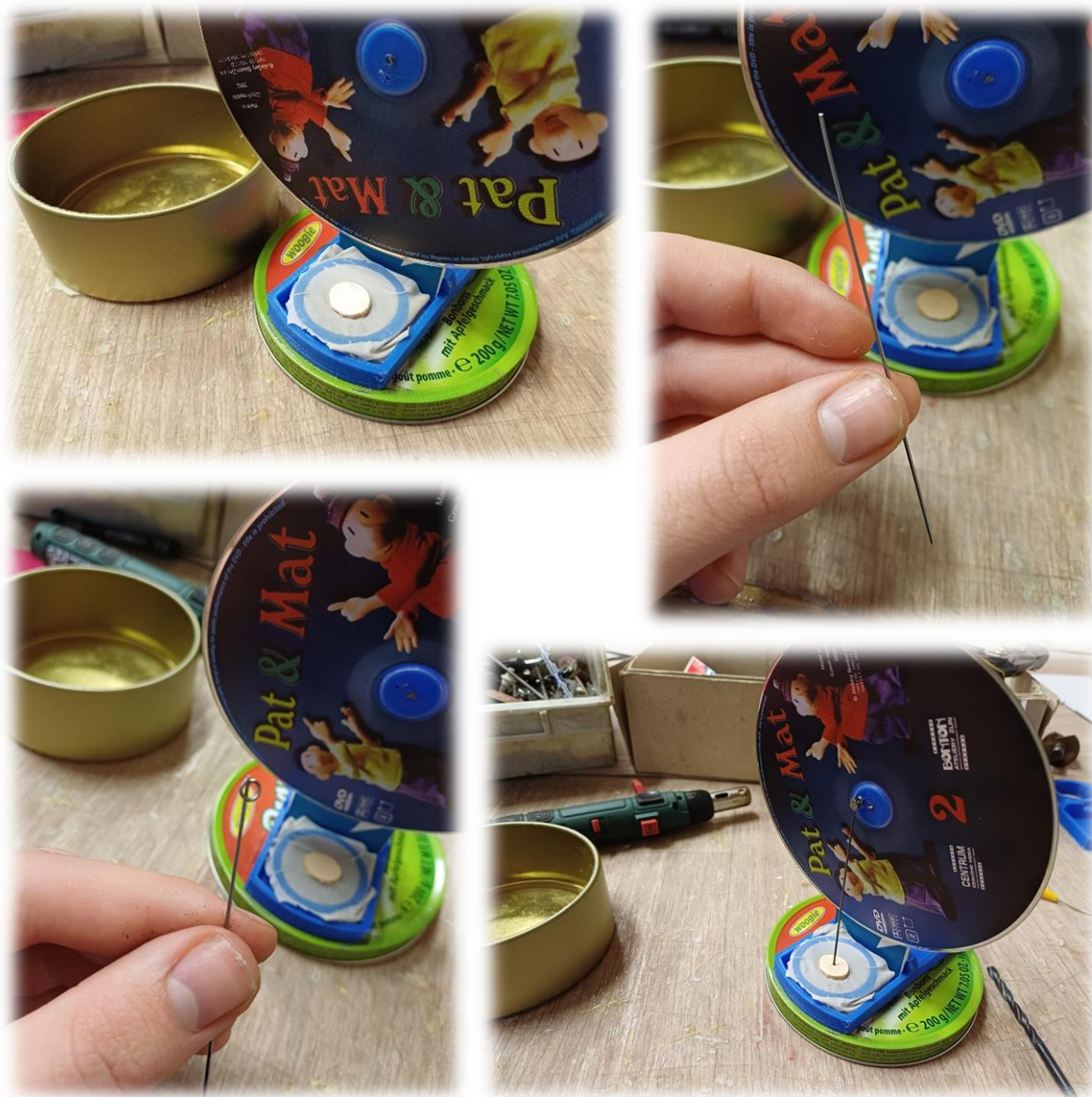
Čas vytvořit pracovní píst motoru – membránu. Vezmeme tenkou latexovou rukavici, ze které vystříháme čtverec materiálu o přibližné délce strany 40 mm. Následně smirkovým papírem zdrsíme čelní stranu kruhové díry na dílu 1. Na tuto plochu naneseeme po celé ploše sekundové lepidlo a přiložíme latexový čtverec tak, aby byl co nejméně napnutý, ale ne zvrásněný. Celý spoj pořádně přitiskneme a zkontrolujeme vizuálně těsnost.



9.10 Ojnice

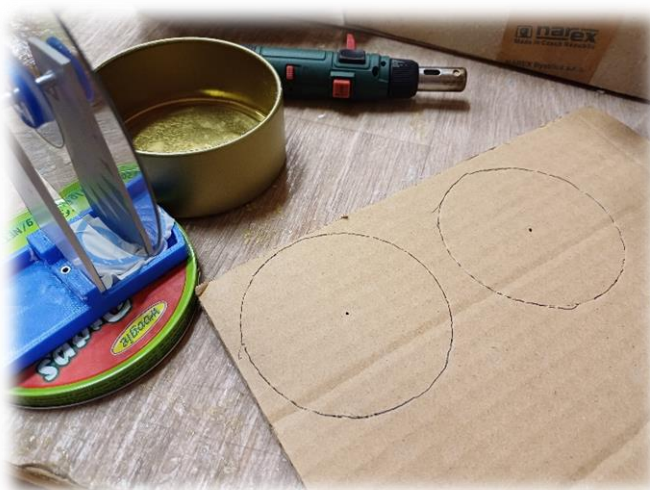
Nyní nastává čas spojit membránu a kliku pomocí první ojnice. Nejprve si uřízneme kolečko kartonu o průměru přibližně 10 mm, ten nalepíme pomocí sekundového lepidla doprostřed membrány. Následně si připravíme náš drát, zhruba kousek o délce 100 mm. Jeden kousek zapíchne a následně zalepíme do kartonové části. Setrvačnick nastavíme tak, aby první klika byla vodorovně se středem setrvačnicku (tedy v půlce výšky) a fixem označíme tuto pozici na

naší ojnici. V tomto místě, pomocí špičky kleští, ohneme ojnici tak, aby vytvořila očko, které bude sedět na hřebíku. Ideální je předtím v tomto místě rozžhavit ojnici a pak nechat pomalu vychladnout, aby šla lépe ohnout (jednoduché žíhání). Očko ojnice vložíme přes hřebík, namázneme olejem a spoj je hotový. Membrána by se měla pohybovat při otáčení setrvačníkem.



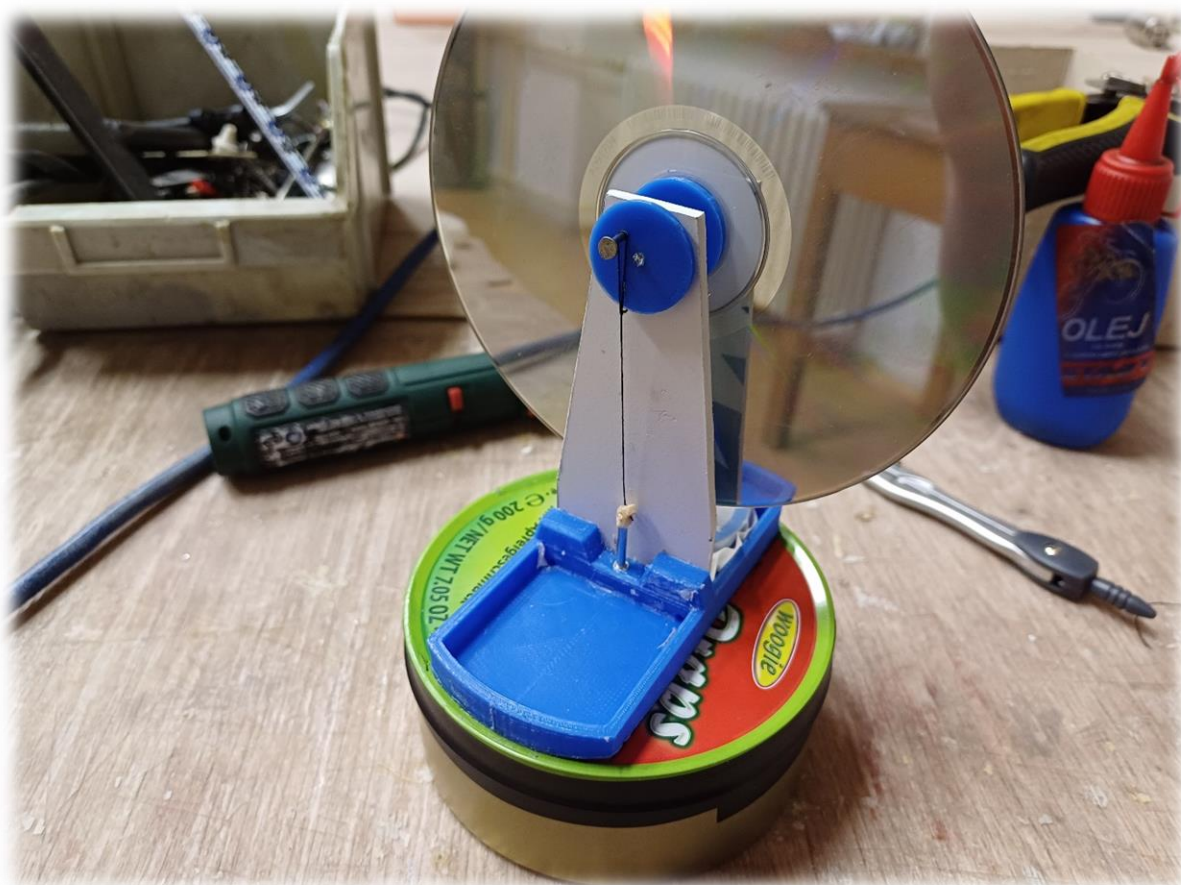
9.11 Výroba přeháněče

Poslední velkou součástí je přehaneč. Na karton o tloušťce cca 6 mm nakreslíme dvě kružnice o průměru 88 mm, které následně vyřízneme nožem a slepíme k sobě, je možno použít sekundové lepidlo, či obyčejné lepidlo na papír. Do středu vzniklého válce vlepíme tlustou stranou trhací nýt a přeháněč je na světě.



9.12 Spojení přeháněče

Ted' již zbývá jen spojit přeháněč s klikou. Nejprve ho vložíme skrz středové pouzdro víčka tak, aby dosedl až na víčko a kliku nastavíme do horní úvrati (nejvyšší poloha). Nyní si vezmeme nit' od délce cca 120 mm, na jednu stranu uvážeme očko, které se navlékne na hřebík a druhý konec nalepíme na špičku nýtu přeháněče pomocí sekundového lepidla. Nyní by se při otáčení setrvačníku měl pohybovat nahoru a dolů a hladce i přeháněč.



9.13 Příprava před během

Poslední přípravy před během:

- Zkontrolujte, že motor běží hladce a nikde nedře, případné vady odstraňte.
- Na všechna kontaktní místa oceli kápněte olej.
- Spoj víčka a plechovky pojistěte pomocí izolepy.
- Ujistěte se, že přeháněč hladce klouže dolů a že všechny spoje jsou těsné.
- Nalijte trochu vody do vany dílu 1, jako chladicí kapalinu.

9.14 Běh

Nyní už nezbývá nic jiného, než začít motor zahřívát zespodu a poprvé ho popostrčit a pak už si jen užívat běhu motoru, který jste jsi právě sami postavili! Jako vhodný zdroj tepla se nabízí jakákoliv svíčka, či zapalovač, případně také hrnek vroucí vody, který nabízí omezený čas běhu.

Nezapomínejte také na **bezpečnost při manipulaci s otevřeným ohněm**, vždy mějte při ruce vodu na případné hašení vzniklého požáru!



9.15 Proč to neběží?

Nabízejí se dva hlavní důvody:

- **NETĚSNOST** – S největší pravděpodobností někde uniká vzduch z motoru, zkontrolujte proto spoj víčka s dílem 1 a případně ho dotěsněte pomocí lepidla či silikonu.
- **PŘÍLIŠNÉ TŘENÍ** – Zkontrolujte, že váš motor po roztočení setrvačníku je schopen se točit pomocí setrvačnosti alespoň následující 4 sekundy. Pokud ne, zaměřte se na všechny části a pokuste se minimalizovat tření a nejrůznější drhnutí.

9.16 Úpravy motoru

Samotná jednoduchá konstrukce motoru nabízí možnost uživatelského přizpůsobení a optimalizace konstrukce, nebo případně k dalšímu vývoji celé nové konstrukce stroje.

Nabízí se několik možností, kam směřovat další rozvoj motoru:

- Změna materiálu přeháněče z kartonu na regenerační materiál typu jemná ocelová vlna.
- Optimalizace klikového mechanismu motoru.

- Zajištění izolace mezi horkou a studenou stranou motoru
- Přidání aktivního chlazení.

10 ALTERNATIVNÍ VERZE BEZ 3D TISKU

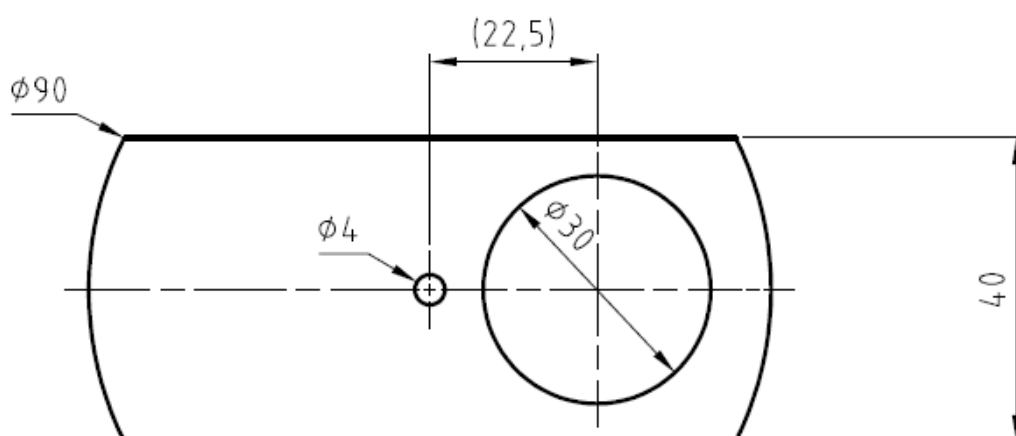
Nezoufejte, pokud nemáte přístup k možnosti 3d tisku, či ho jen nechcete využívat. Celý model jde také postavit bez toho. Stavba bude malinko náročnější, avšak nic, co by v domácích podmínkách s trochou šikovnosti nešlo zvládnout.

V podstatě jde jen o nahrazení tištěné základny (díl 1) a dílů klikového mechanismu.

10.1 Výroba základny

Dle přiložené dokumentace se z 3 mm překližky, či plastové desky vyříznou hlavní část základny, na kterou se vlepí membrána. K vyříznutí je optimální využít lupenkové pilky a následně díl zabrousit pomocí smirkového papíru. K samotnému lepení využijeme sekundového lepidla.

Při následném připojení dílu dva využijeme nějaké podpory spoje (takzvané „zavětrování“), například kousku dřevěného hranolu, který vyztuží spoj.



10.2 Další postup

Celá další výroba je čistě ve vašich rukou. Inspiraci lze převzít z postupu výroby modelu uvedeného výše, který lze prakticky celý jen zopakovat. Neskrývá se zde moc nástrah, které by mohly ztížit dodělení motoru.

