

ROČNÍKOVÝ PROJEKT

STIRLINGŮV MOTOR

CAD

Kdo:

Václav Sedlák
Jakub Krátký
Matěj Novotný
Daniel Konečný

Komu: Ing. Igor Medek

Zadání:

- Výkresová dokumentace
- Pracovní postupy
- Výpočty + termodynamika
- Protokol se shrnutím celého projektu + realizace
- Informace k chování a ladění motoru
- Grafika s rendery a sponzoři

ÚVOD

Stirlingův motor, unikátní tepelný stroj s vnějším spalováním, byl patentován již roku 1816 skotským pastorem Robertem Stirlingem. Vyznačuje se zejména tichým chodem, vysokou spolehlivostí, nenáročností na obsluhu a možností využití libovolného zdroje tepla. Uplatnění nacházel z počátku převážně jako stacionární pohon nízkého výkonu (vodní čerpadla, ventilátory, šicí stroje) a pracoval při nižších teplotách z důvodu omezení tehdejší kvalitou dostupného materiálu. Po relativně dlouhou dobu existence Stirlingova motoru bohužel nedocházelo k jeho výraznému technologickému rozvoji. V posledních letech vstupuje tento typ motoru znovu do povědomí ve spojení s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla (kogenerační jednotky pro domácnosti).

Princip pracovního cyklu

Plyn je přesouván mezi kompresní ochlazovanou a expanzní ohřivanou částí motoru pomocí kinematicky vázaných pístů. U běžných pístových Stirlingových motorů je tento proces přečerpávání řešen dvěma způsoby, pomocí dvojice pracovních pístů nebo kombinací přemísťovacího a pracovního pístu. Vzájemný pohyb obou pístů je velmi podstatný. Je třeba zajistit, aby změny objemů v obou pracovních prostorech motoru neprobíhaly ve fázi a nedocházelo k současné kompresi a expanzi. Přesunem plynu mezi rozdílnými tepelnými hladinami se mění jeho střední teplota a tlak. Mění se tlak, během současné změny pracovního objemu, pak odpovídá mechanické práci cyklu. Pokud je míra práce pro expanzi větší, než míra práce pro kompresi, je generována užitečná práce a výkon.

V praxi se používají tři základní označení (alfa, beta, gamma), sloužící k rozdělení tří obvyklých typů konstrukčních řešení Stirlingova motoru. Tyto typy se liší konfigurací vzájemné polohy pístů neboli mechanismem přesouvání pracovního média

γ (gama) - modifikace

Pracovní píst je však umístěn v odděleném válci, čímž je rozdělen pracovní objem studené strany motoru. Tímto se dosahuje zjednodušení mechanismu pohonu na úkor mírného nárůstu škodlivého objemu, respektive snížení účinnosti motoru. Tato modifikace je často využívána u nízkoteplotních motorů a laboratorních modelů.

ROZBOR TERMODYNAMIKY OBĚHU STIRLINGOVA MOTORU

Přestože může být tepelný cyklus motoru popsán velmi jednoduchým způsobem v jeho idealizované formě, termodynamické procesy prakticky realizovaného pracovního cyklu se od tohoto idealizovaného popisu liší více než výrazně.

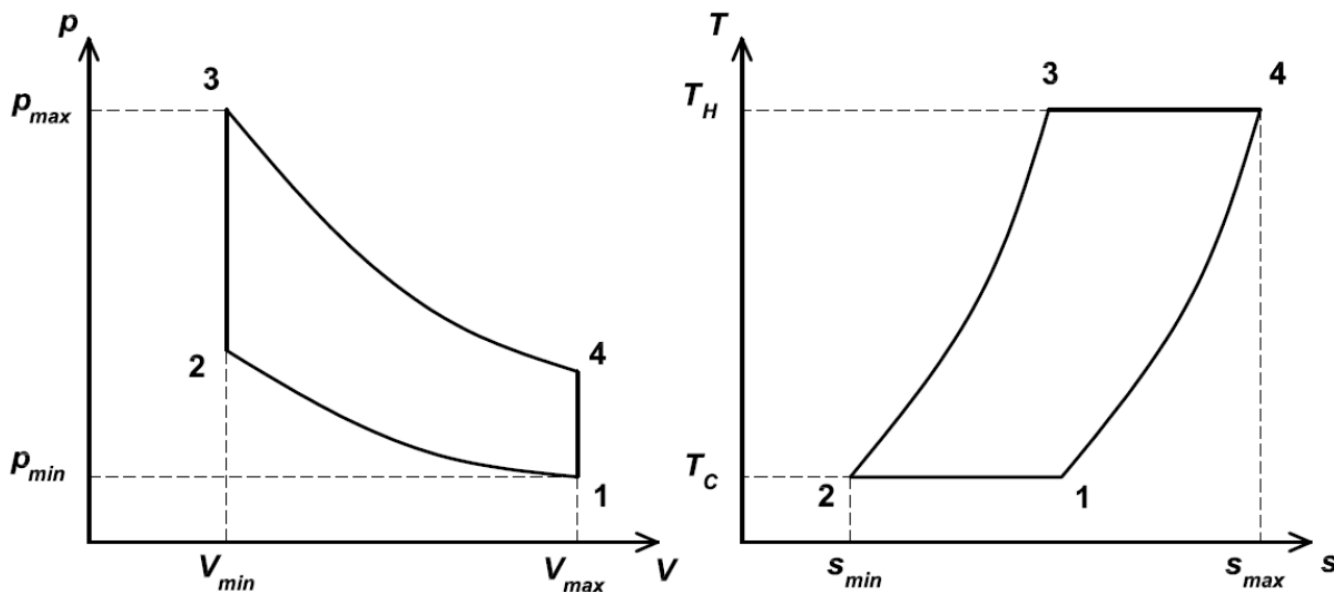
Ideální cyklus

Ideální Stirlingův cyklus sestává ze čtyř fází, dvou izotermických a dvou izochorických dějů, které jsou popsány pomocí stavové rovnice ideálního plynu

Stavová rovnice ideálního plynu:

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

kde:	p	tlak [Pa]
	V	objem [m ³]
	m	hmotnost [kg]
	r	měrná plynová konstanta [J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹]
	T	teplota [K]



p-V a T-s diagram ideálního Stirlingova cyklu

První fází cyklu je izotermická komprese (1) - (2), kterou provádí pracovní píst na studené straně motoru. Spotřebovaná práce je ve skutečném motoru poskytnuta obvykle setrvačником. V průběhu nárůstu tlaku je konstantní teplota (minimální teplota cyklu) udržována odváděním vznikajícího tepla chladičem. V konečném bodě této fáze je entropie na minimální hodnotě, systém je připraven přijmout maximální možné množství dostupné energie, která se po jejím uvolnění (předání pracovnímu médiu) přemění na užitečnou práci.

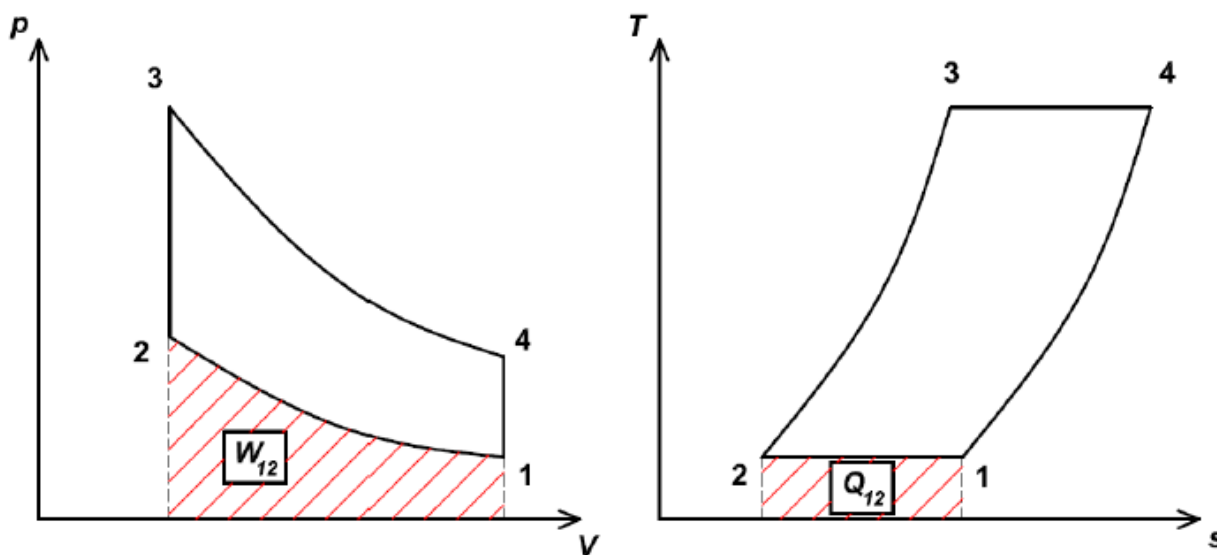
Výchozí tlak v bodě 1:

$$p_1 = \frac{m \cdot r \cdot T_1}{V_1} = p_{min}$$

Tlak v bodě 2:

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{V_2} ; (T_1 = T_2 = T_C)$$

Fáze (1-2) - plochy pod křivkami odpovídají spotřebované práci a odvedenému teplu



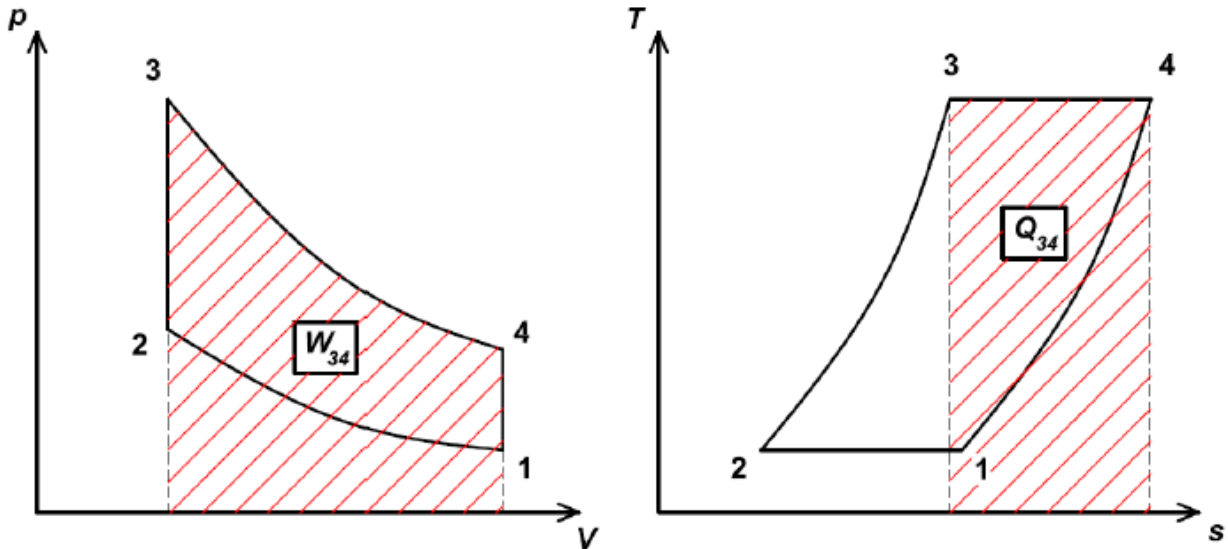
Druhá fáze cyklu je izochorický ohřev (2) - (3). Stlačený pracovní plyn se bez změny svého objemu přesouvá ze studené strany na teplou. Je tak dosažena maximální teplotní hladina cyklu. Teplo přijaté pracovním médiem je rovno vzrůstu jeho vnitřní energie, vykonaná práce je zde nulová.

Tlak v bodě 3:

$$p_3 = \frac{p_2 \cdot T_3}{T_2} = p_{max} ; (V_2 = V_3 = V_{min})$$

Následující fází je izotermická expanze (3) - (4). Zatímco expandující plyn koná práci, jeho konstantní teplota je udržována přívodem tepla v ohřívači. Získaná práce odpovídá množství přivedeného tepla, vnitřní energie zůstává konstantní.

Třetí fáze - plochy pod křivkami odpovídají vykonané práci a přivedenému teplu



Tlak v bodě 4:

$$p_4 = \frac{p_3 \cdot V_3}{V_4} ; (T_3 = T_4 = T_H)$$

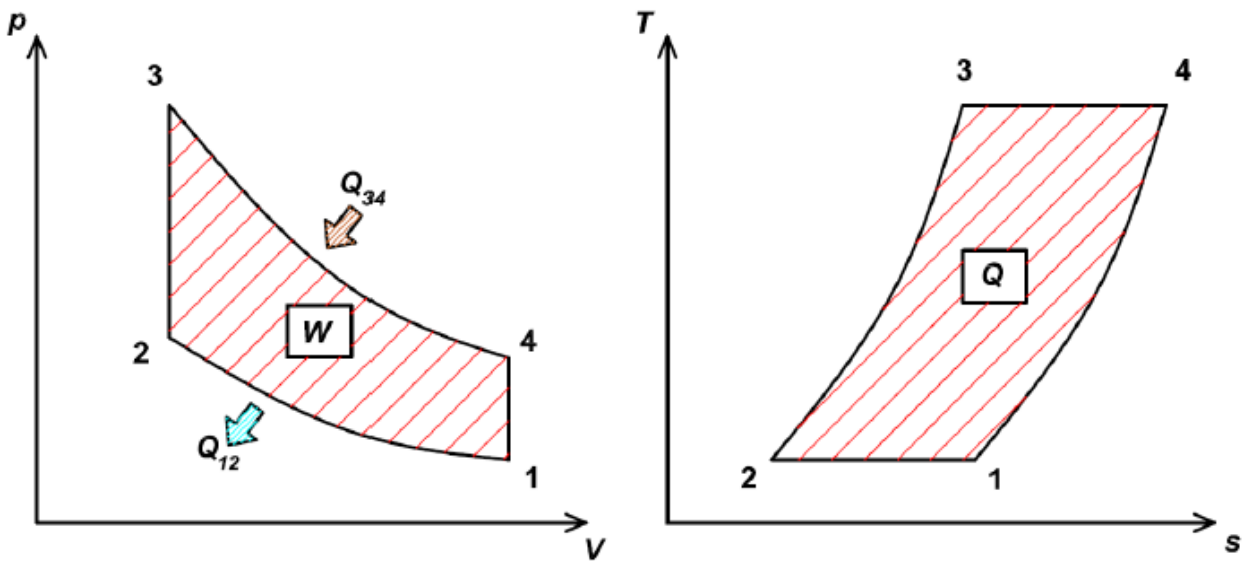
Poslední fází cyklu je izochorické ochlazení (4) - (1). Pracovní plyn se za konstantního objemu přesouvá zpět na studenou stranu a dosahuje minimální teploty oběhu. Výsledná práce je nulová, entropie a vnitřní energie pracovního plynu se snižují.

Množství práce spotřebované na stlačení plynu při teplotě T_C je menší než množství práce vykonané expandujícím plynem při teplotě T_H . Výsledkem je tedy užitečná mechanická práce cyklu.

Výsledná práce ideálního Stirlingova cyklu:

$$W = W_{12} + W_{34}$$

Ideální Stirlingův cyklus – celková práce, celkové teplo

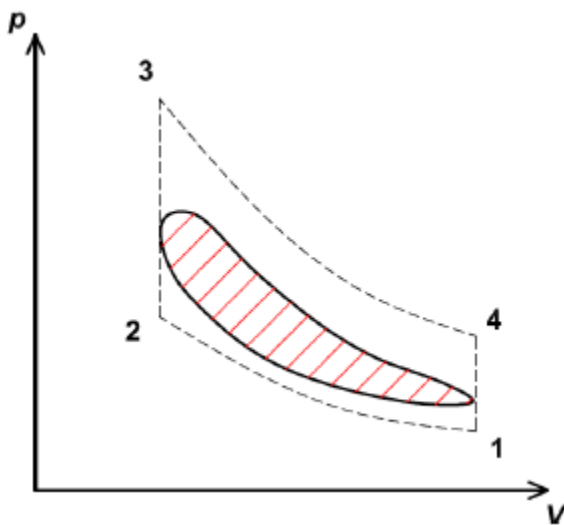


V ideálním oběhu nedochází k tepelným ztrátám, teplo přivedené je rovno práci vykonané, teplo odvedené je rovno práci spotřebované.

Ačkoliv je výsledná ideální účinnost pouze teoretická a v reálném cyklu nedosažitelná, nabízí jistý potenciál v budoucím technologickém rozvoji Stirlingových motorů.

Reálný cyklus

Realizace oběhu je doprovázena mechanickými a termodynamickými faktory, způsobujícími odchýlení od teoretického průběhu a výsledné práce ideálního cyklu.



INFORMACE O CHOVÁNÍ MOTORU A JEHO LADĚNÍ

Chování

Otáčky během měření plynule stoupaly, až dosáhly úrovně otáček nastavených předstihem. Vzhledem k nedostatku měřicí techniky, graf otáček není k dispozici.

Ladění

U stirlingova motoru se dá nastavovat vnitřní tlak, předstih a vyvažovat setrvačnick.

Předstih

Nastavení předstihu je zásadní pro chod motoru a velmi časově náročné. Nelze jej nastavovat za chodu motoru, ale jen v klidu. Po rozběhu se motor ustálí na optimálních otáčkách, které jsou dány předstihem. Předstih se nastavuje změnou úhlové polohy klikové hřídele, a čím vyšší otáčky tím je úhel větší. V základu je nastaven na 90° a mění se podle chování jednotlivých motorů. Pokud bychom dokázali měnit úhel předstihu za chodu motoru, tak by se dalo dosáhnout nejvyšších otáček, ale hrozilo by zničení motoru.

Vyvažování setrvačnicku

Setrvačnick jsme vyvažovali pomocí šroubků M3, které jsme dávali do 3D tištěného setrvačnicku. Vyvažovalo se to kvůli rozdílným hmotnostem pístu a přeháněče. A kvůli excentricitám které na něj působily.



Vnitřní tlak

Vzhledem k tomu že po zahřátí motoru stoupne tlak a píst se přesune do horní úvratí, je potřeba před startem upustit přebytečný tlak. Toho jsme docílili pomocí ventilu. Toto nastavení jsme použili až u druhé verze motoru, ale jelikož jsme nemohli být u jeho spuštění na soutěži, tak jsme nemohli motor správně nastavit.



NÁSLEDNÁ REALIZACE PROJEKTU



Náš tým vznikl kvůli soutěži "Vyrob si svůj Stirlingův motor", o které jsme se dozvěděli díky panu učiteli Fišerovi. Z počátečních dvou členů se náš tým rozrostl až na devět členů.

Seznam členů:

Václav Sedlák

Jakub Krátký

Matěj Novotný

Daniel Konečný

Vojtěch Toman

Adam Polák

Dominik Rybář

Karel Fikr

Jakub Ševčík

MODEL 1

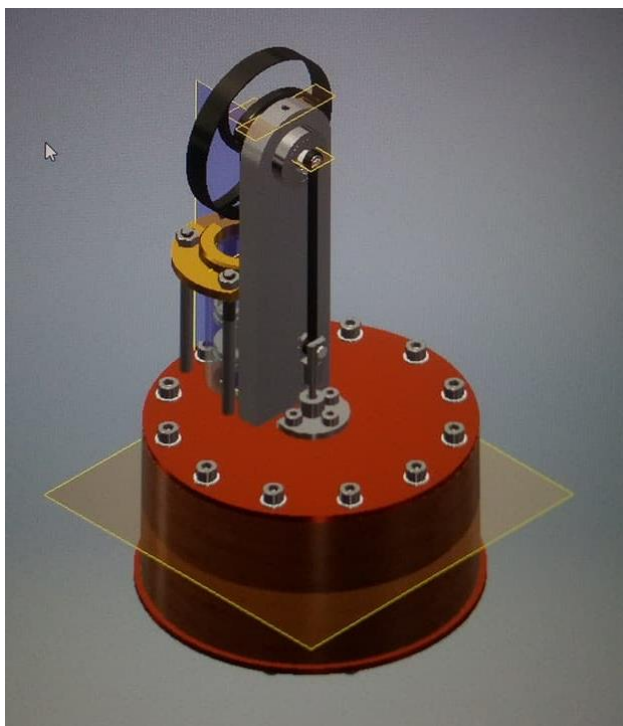
Při tvorbě našeho prvního prototypu jsme se inspirovali motory s nízkým tepelným spádem, které mají izolovanou komoru přeháněče pomocí plexiskla. V našem případě jsme použili kvůli vysoké teplotě borosilikátový skleněný válec. Dále jsme použili měděné desky pro lepší přenos tepla, abychom snížili přenos tepla mezi deskami, použili jsme nerezové šrouby. Také jsme použili díly z leteckého duralu a 3D tisk pro minimalizaci nákladů. Tento model nám hradila škola. Začali jsme oslovovat potenciální sponzory. Prvním z nich byla firma PMP Kovo, která nám poskytla měděné desky.

První problémy a slepé uličky:

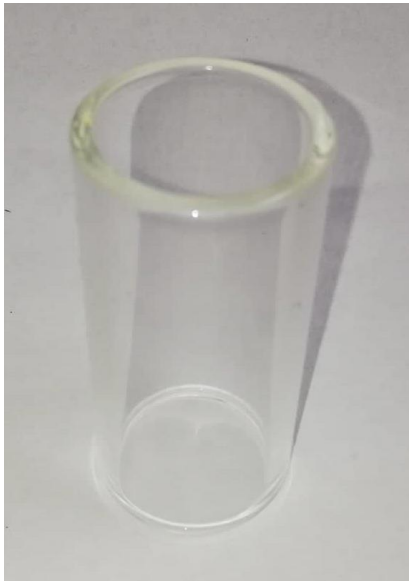
Při realizaci prvního modelu jsme se setkali s několika problémy. První problémy se objevily se skleněným válcem, který nám praskl při špatném utažení nerezových šroubů.



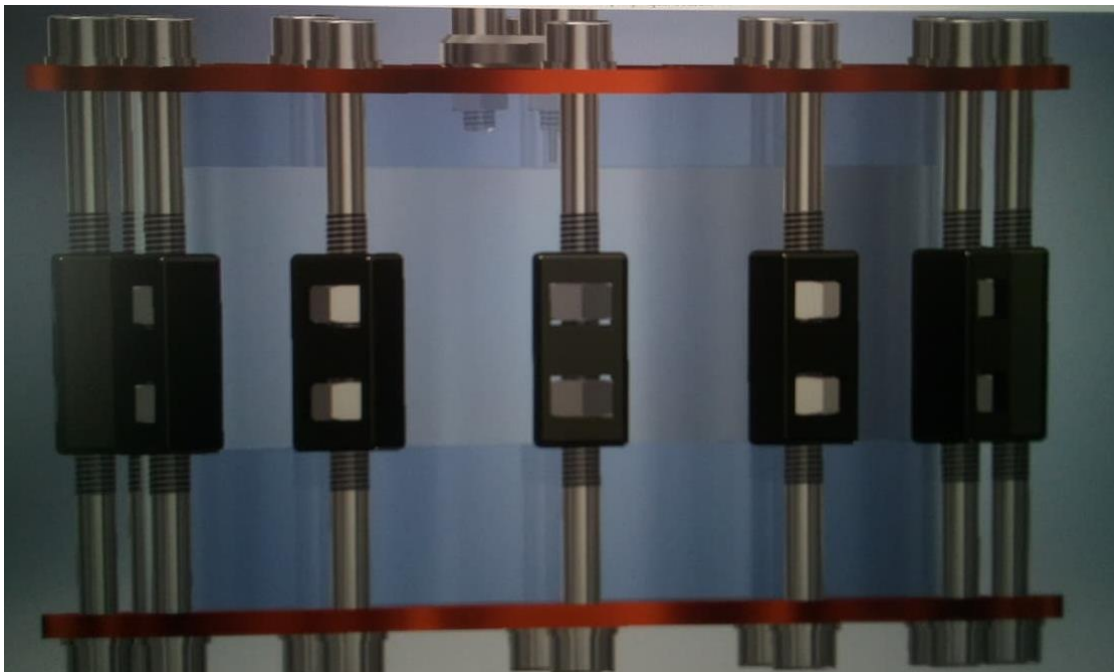
Dále jsme měli v plánu použít dřevěnou komoru místo skla, jako řešení předchozího problému. Nakonec jsme z toho ale upustili kvůli neznalosti teploty soutěžního kahanu. A místo toho jsme změnilí utahovací moment a použili více silikonu.



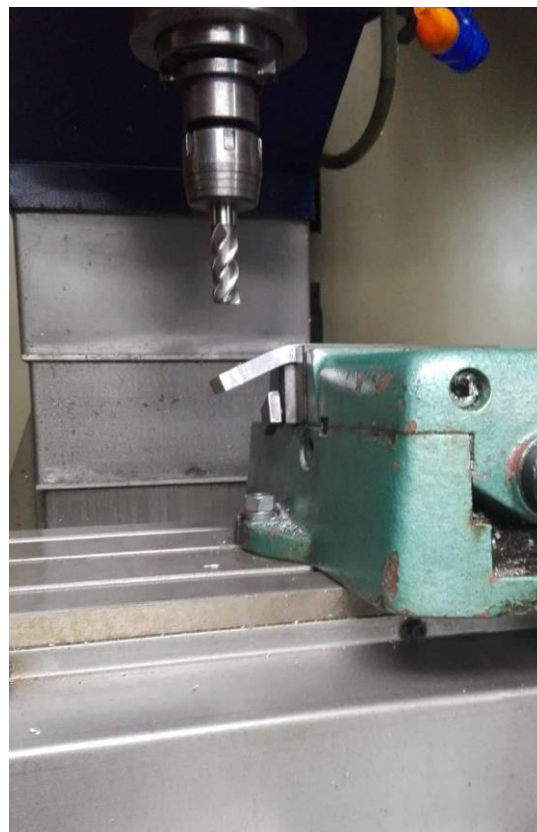
Dalším problémem byl netěsnící a nepřesný skleněný pracovní válec, který nám poskytli organizátoři soutěže. Problém jsme vyřešili výměnou za mosazný válec.



Následující problém nastal s plastovou izolací šroubů. Které jsme použili kvůli menšímu přenosu tepla. Po vyzkoušení tohoto způsobu jsme zjistili, že se plast kvůli vysoké teplotě velmi deformoval. A přešli jsme na použití průchozích nerezových šroubů.



Jeden z dalších problémů byla výroba. Ze začátku jsme tápali v praktické části. Ale časem se naše dovednosti zlepšovaly.

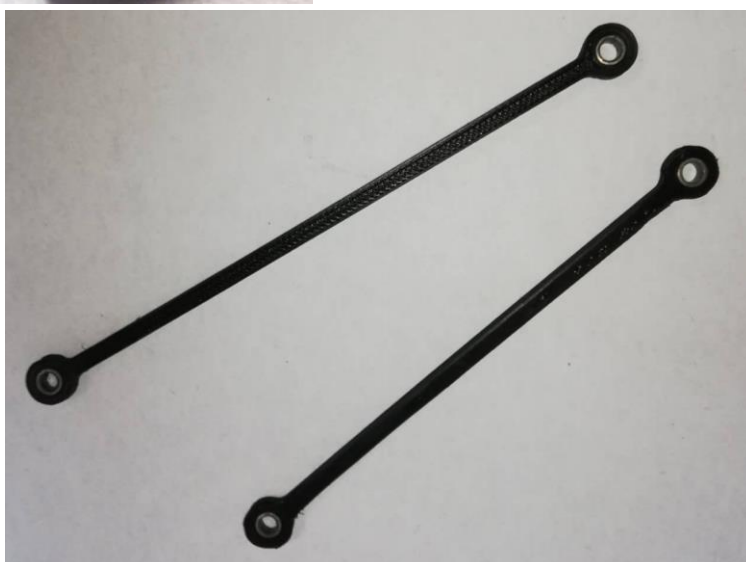


Technické inovace provedené u 1. modelu

Naše výhody oproti konkurenci byly v tom. Že jsme použili měděné desky vypálené na laseru.



Také použití 3D tisku bylo výhodné. Tištěné součásti byly setrvačnick, ojnice, unašec a jádro v pístu.



Dále jsme pro lepší tepelnou účinnost použili chladič vyrobený u nás ve škole z koupeného polotovaru a tepelný štít vypálený na laseru.



1. ROČNÍK SOUTĚŽE

První ročník měl dvě kola, jedno zkušební a druhé soutěžní. V prvním kole se nám motor sice nerozběhl, ale seznámili jsme se s organizátory soutěže a předali nám pár potřebných informací.



Ve druhém kole se nám už dařilo lépe. Soutěž se konala 22.5. 2019 a bylo v ní 18 soutěžních motorů. Soutěž probíhá ve třech kategoriích: nejvyšší otáčky, technické inovace a design.

V kategorii technických inovací jsme obsadili 1. místo. S nejvyššími otáčkami jsme se umístili na 3. místě s 802 ot/min a v designu jsme se umístili také na 3. místě.

Č.	JMÉNO	OBEC	I	II	Č.	JMÉNO	OBEC	I	II
1	Johana MILNEROVÁ	Praha	407	471	11	Jan KRYZAN	Dačice	720	799
2	Antonín ČAPEK	Podm.-Klany	331	480	12	Tomáš SUCHÁNEK Dan STAVÍK	Uničov	273	385
3	Lukáš JURICA	Lyse nad Labem	0	154	13	Matyáš KOBLAS	Uničov		pneumotor
4	Anders TALAB	Trutnov	450	399	14	Dominik Rohan	Slovensko Francie	507	659
5	Jan MARTINEK	Jaroměř	229	305	15	JESSE	Praha	0	
6	Matyáš PRŮHA	Praha	0	0	16	Vašek SEDLAKA spol.	Jedovnice	569	802
7	Anna DROZDOVÁ	Chrudim	332	381	17	Jakub TVRZ Anna HOSPODARSKÁ	Sokolov	423	378
8	Jakub ZÁSTĚRA	Dačice	251	473	18	Dominik	Slovensko		Pneumotor
9	Ladislav MATL	Dačice	139	905	19				
10	Jan POLÁČEK	Dačice	725	854	20				

STIRLING 2019



Komora ze skla, aby nevedla teplo SUPER! navíc vidíme dovnitř – balzový přehaněč s aluminiovým stíněním + velmi malé zdvihy – tudíž stačí malý, 3D vytištěný setrvačnick, navíc pečlivě vyvážený. Pracovní píst je z duralového kroužku s nalisovaným, vytištěným středem. V kroužku jsou vysoustružené drážky pro lepší těsnost.

Ojnice mají malinká ložiska, pracovní válec z mosazi je pro nižší tření stříknut teflonem. Na spodku motoru je nerezový límec pro odvod tepla, které by ohřívalo horní část motoru.

Ve spojitosti s nízkými hmotnostmi se jako progresivní zřejmě ukazují nízké zdvihy, umožňující vyšší otáčky.


V prvním kole jsem jim tyto nízké zdvihy vytknul s tím, že se nedokáže využít energie expanze plynu. Pro měření otáček to zřejmě nevede.

Motor měl velice jemný, tichý chod se stálou tendencí k vyšším otáčkám.

Věřím, že se s ním po úpravách a dalšími jednoválcovými motory ještě setkáme.

- Jiří Toman – Organizátor soutěže

Po úspěchu v soutěži jsme dostali nabídku na rozhovor od novin. Následně o nás vyšly dva články.

deník klub 



Sestrojili stroj, který pohání ponorky. Pracovali jsme jako firma, těší studenta

Dvakrát třetí místo a jednou dokonce



Studenti fungovali jako firma

JAN CHÁRVAČEK

Praha, Jedovnice – Třetí místo v kategorii maximální otáčky, stejné umístění v kategorii design a nakonec zlato v kategorii technické inovace. Tým studentů z 2. A průmyslovky v Jedovnicích zazářil v celostátní soutěži Postav si svůj Stirlingův motor.

Akci pořádalo Národní technické muzeum v Praze a průmyslová škola v Betlémské ulici. „Na to, že jsme byli v soutěži poprvé a na motoru začali pracovat vlastně až po Novém roce, je to podle mě parádní úspěch. Původně jsme měli dvě družstva, ale pak se sloučila do jednoho. Byla to týmová práce a každý člen tý-

mu má na úspěchu svůj podíl,“ říká student druhého ročníku Matěj Novotný.

VEDOUČÍ, MLUVČÍ...

Stirlingův motor je tepelný stroj pracující s cyklickým stlačováním a expanzí vzduchu nebo jiného plynu. Stlačováním při nízké teplotě a expanzí při vysoké nastavá transformace tepelné energie na mechanickou práci. „Stirlingovy stroje jsou využitelné od topení a chlazení až k pohonu pono-

rek. Můžou pracovat jako tepelné čerpadlo pro chlazení a topení,“ stojí v internetové encyklopedii.

Po přihlášení do soutěže dostala průmyslovka návod a základní sadu dílů. Škola dala mladým lidem k dispozici dílny a zaplatila převážnou část projektu. „Studenti v týmu fungovali v podstatě jako firma. Rozdělili si pozice. Vedoucí, mluvčí, výpočtář, konstruktéři, ekonom, technolog. Každý měl přidělený určitý díl, který vyráběl ve školních dílnách. Pracovali také doma. Na 3D tiskárnách nebo ve spřátelených

firmách rodičů a dalších institucích,“ popisuje práci studentů učitel Karel Fišer.

Dodává, že k výrobě motoru použili chlapci jak klasické technologie (frézového a CNC obrábění, tak řezání dílů laserem, 3D tisk a další. „Za největší úspěch považují umístění v kategorii otáček, ve které jsme jich s naším strojem dosáhli osm set dvě za minutu. A pak ocenění v kategorii inovace. Příští rok se chceme soutěže zúčastnit znovu a připravit pro každou kategorii jeden stroj,“ říká sedmnáctiletý student Matěj Novotný.

V budoucnu by se jednovnickí studenti chtěli pustit do stavby parního stroje.

Rozdělí si deset tisíc „popelnic“

Sudice – Obvzatilův obet...

Lepší přístup k lanovce posuzují ochránci

Audit: město hospodařilo

MODEL2

Při realizaci druhého soutěžního modelu jsme vycházeli hlavně ze znalostí získaných v prvním ročníku.

Další problémy a slepé uličky

Po zkušenostech z minulého ročníku s plastovou izolací šroubů jsme navrhli izolaci pomocí kompozitu. Ale kvůli vysoké ceně výroby jsme od toho museli nakonec upustit. Výrobní cena byla cca 15.000 Kč.



Následující problém byl s praskajícím unašečem. Který jsme se snažili 3x obrobit ale nakonec jsme jej vytiskli.



Další problém byl se vzpěrnou tuhostí ojníc, které jsme měli 3D tištěné. Nakonec jsme je udělali z ultralehkých tenkostěnných hliníkových trubiček.



Poslední problém byl s nedostačujícím pasivním chladičem, který jsme nakonec vyměnili za průtokový chladič.



Technické inovace a vylepšení u 2. modelu

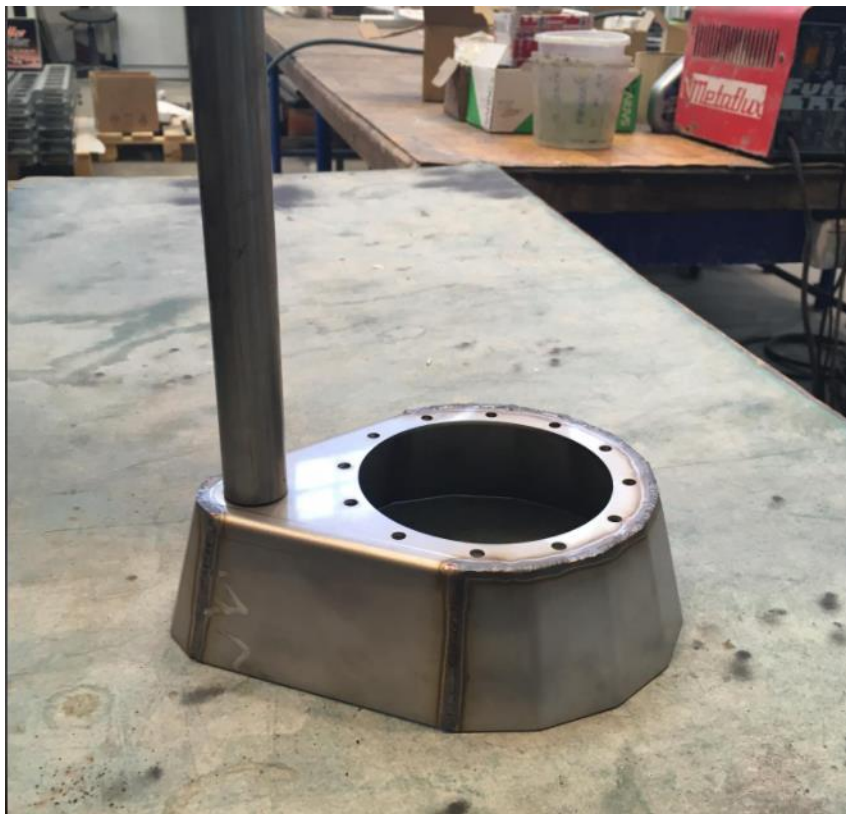
Oproti předchozímu modelu jsme zlepšili většinu věcí. Jedno z prvních vylepšení byl kevlarový oplet, který jsme použili místo průchozích šroubů.



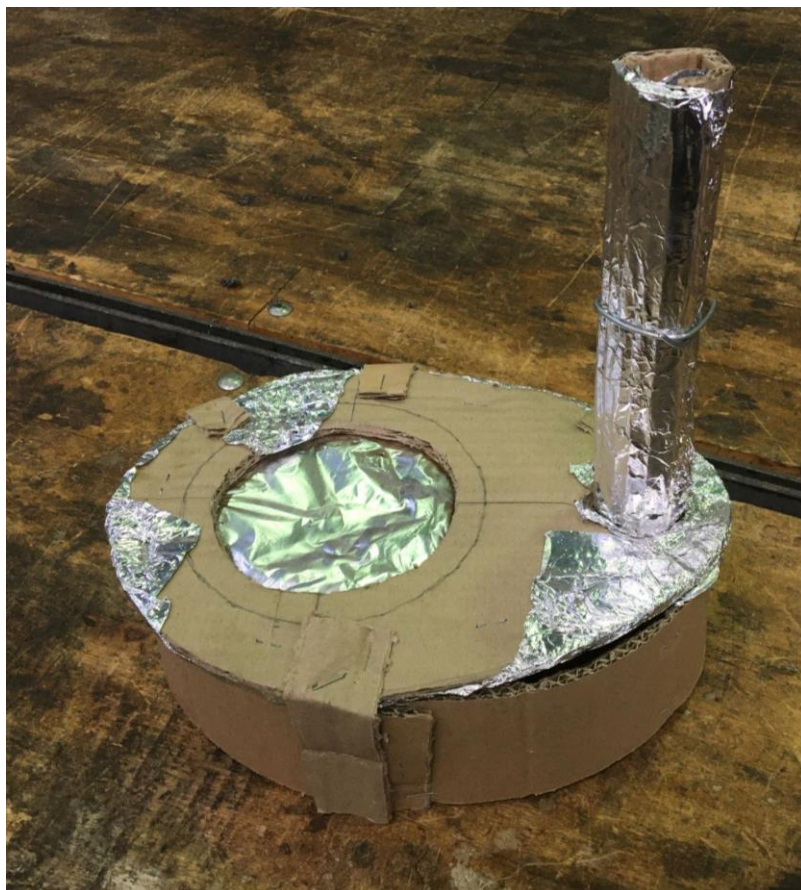
Na lanku jsme si vyzkoušeli tahovou zkoušku, abychom zjistili jeho pevnost.



Následovně jsme vylepšili tepelný štít. Který jsme nechali vyrobiť ve firmě PMP Kovo.



Před zadáním do výroby jsme si udělali funkční model.



Jako příští vylepšení jsme přidali vlastní ventil na regulaci tlaku v motoru.



Posledním z vylepšení bylo použití mini ložisek na uložení kliky.



2. ROČNÍK SOUTĚŽE

Dne 2. 12. 2020 jsme se zúčastnili finále 14. ročníku soutěže Vyroba si svůj Stirlingův motor v Národním technickém muzeu v Praze. Soutěž probíhá ve třech kategoriích: nejvyšší otáčky, technické inovace a design.

V kategorii technických inovací a designu jsme se umístili na 1. místě a v kategorii nejvyšších otáček na 3. místě.



2020	DNEVO	ŠKOLA	I	II
1	Jakub Krpáček a spol.	SPŠ Jedovnice	678	523
2	Václav Maštera	Gym. Třebíč	648	604
3	LamDa	CLR PBIS	300	382
4	Jan Martinek	Jaroměř	454	451
5	Payel Skála Práha Křemencova		720	781
6	Marek Tváz	Gym. Sokolov	283	396
7	Rubíněk Pastorek	Slavonice PBIS	233	1+1
8	Kat. Dažice	SOUZ	0	
9	KRATKÝ	JEDOVNICE	0	

Motor je výsledkem celoroční práce týmu kluků 4. ročníku SPŠ Jedovnice a navazuje na jejich ložskou konstrukci. Vidíme svařovanou základnu s komínkem, který odvádí horké spaliny stranou. Na ní je měděná deska – mezikruží, skleněný válec (nevede teplo!) a horní měděná deska. Obě Cu desky jsou přitaženy kevlarovým lankem, šrouby umožňují jejich napínání. Na horní Cu desce – studené straně je 3D vytištěný průtokový chladič. Jako příslušenství motoru je vysoká nádoba s hadičkou. Ledem zchlazená voda je vedena rychlospojkou do chladiče, kde protéká labyrintem (vyšší součinitel přestupu tepla) a vytéká hadičkou do nádržky pod stolem. Černý šroub – imbus ovládá kulový ventil – tím je možné nastavit atmosférický tlak v závislosti na poloze pracovního pístu. Poprvé použito !!

Motor má bytelný stojan, mosazný válec s velmi odlehčeným pístem. Ojnice jsou sice odlehčené, ale relativně těžké, skrývají však v klikách miniaturní, kuličková ložiska. Setrvačnick je produkt 3D tisku. Má na sobě i protizávaží – výběžek zároveň sloužící pro měření otáček optickou závorou. Přehaněč je balzový s hliníkovým stíněním.

Jedovnický motorek je jeden z nejpropracovanějších, které jsme v soutěži měli.

- Jiří Toman – Organizátor soutěže

Poslední stránky jsou grafika + poděkování sponzorům

ZÁVĚR

Cílem tohoto projektu je vyvíjet a vyrábět Stirlingovy motory typu gama. Vypracovat výkresovou dokumentaci, výrobní postupy, výpočty, protokol a grafiku.

K vypracování projektu jsme použili znalosti získané studiem na SPŠ Jedovnice, internet a konkrétně diplomové práce z VUT.

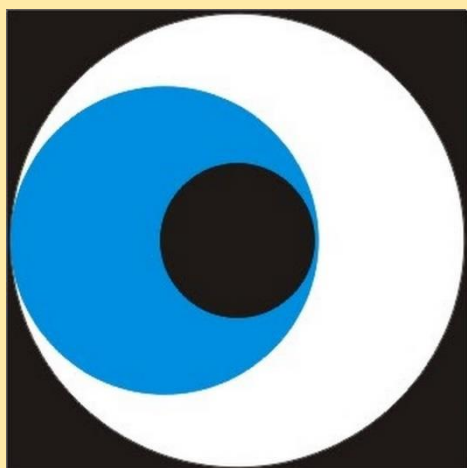
Sponzoři soutěže

Postav si svůj

Stirlingův motor

pro tým

PinkFlyWheel



**Střední průmyslová škola
Jedovnice**



PMP
KOVO

PMP KOVO

Zpracování plechu a výroba plechových dílů

ELMATEST

ELMATEST

*Programovací služby pro testovací produkty
TeradyneProductionBoard.*



DAVAZ – *Dodavatel ložisek, nářadí, nástrojů,
řemenů, řetězů, ...*



HYDROCOM Brno – *konstrukce, výroba, montáž
hydraulických zařízení*



Těsnění Pokorný

13. ROČNÍK SOUTĚŽE (2019)

Dosažené výsledky:

3. Místo v naměřených otáčkách

3. Místo v designu

1. Místo v technické inovaci



Č.	JMÉNO	OBEC	I.	II.	Č.	JMÉNO	OBEC	I.	II.
1	Johana MILNEROVÁ	Praha	407	471	11	Jan KRYZAN	Dačice	720	797
2	Antonín ČAPEK	Podměklany	331	480	12	Tomáš SUCHÁNEK Dan STAVÍK	Uničov	273	385
3	Lukáš JURICA	Lysá nad Labem	0	154	13	Matyáš KOBLAS	Uničov		pneumotor
4	Anders TALAB	Trutnov	450	399	14	Dominik Bohan	Slovensko Francie	507	659
5	Jan MARTINEK	Jaroměř	229	305	15	JESSE	Praha	0	
6	Matyáš PROUZA	Praha	0	0	16	Vašek SEDLAK	Jedovnice	569	802
7	Anna DROZDOVÁ	Chrudim	332	381	17	Jakub IVKZ Anna HOSPODÁŘSKÁ	Sokolov	423	378
8	Jakub ZASTĚRA	Dačice	251	413	18	Dominik	Slovensko		Pneumotor
9	Ladislav MATL	Dačice	939	905	19				
10	Jan POLÁČEK	Dačice	725	854	20				

STIRLING 2019

Přehled všech týmů a jejich otáček

14. ROČNÍK SOUTĚŽE (2020)

Dosažené výsledky:

3. Místo v naměřených otáčkách

1. Místo v designu

1. Místo v technické inovaci



2020	JMEVO	SKOLA	I	II
1	Jakub Kratoch a spol.	SPSS Jedovnice	678	523 III
2	Václav Mašeka	Gym. Tábors	548	604 II
3	LamDa CLR	PBIS	300	382
4	Jan Hartmanek Jaremek		454	451
5	Payel Skala Maha	Křemencova	720	781 I
6	Matej Tvaz	Gym. Sokolov	283	396
7	Dominik Pasbirek Slovan	PBIS	233	141
8	Kat. Dačice	SOUZ	0	
9	KRATKY	JEDOVNICE	0	

Přehled týmů a jejich otáček

(zdroj - web pana Tomana)

Členové týmu

Václav Sedlák

Jakub Krátký

Matěj Novotný

Daniel Konečný

Adam Polák

Karel Fikr

Jakub Ševčík

