

Škoda Auto Vysoká škola o.p.s.

Studijní program: Průmyslový management

Výukový model Stirlingova motoru
Bakalářská práce

Štěpán Jäger

Vedoucí práce: Ing. František Starý



Škoda Auto Vysoká škola

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: Štěpán Jäger
Studijní program: Průmyslový management
Vedoucí práce: Ing. František Starý

Název práce: **Výukový model Stirlingova motoru**

Jazyková varianta: Čeština

Cíl: Cílem práce je popis funkce Stirlingova motoru a vytvoření modelu na základě obdobných řešení dostupných na internetu.

Rámcový obsah:

1. Popis funkce Stirlingova motoru
2. Rešerše demonstračních modelů Stirlingova motoru
3. Návrh výukového modelu Stirlingova motoru v CAD programu a jeho následný 3D tisk
4. Sestavení výukového modelu

Rozsah práce: 25 - 30 stran

Literatura:

1. EBRAHIMI, Masood. *Power Generation Technologies: Foundations, Design and Advances*. N/A: Elsevier Science & Technology, 2023. 666 s. ISBN 978-03-239-5369-6.
2. HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony*. Praha: Grada Publishing, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
3. PRŮŠA, Josef; BACH, Martin; STRÍTESKÝ, Ondřej. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research, 2019. 62 s.

Datum zadání: prosinec 2022

Datum odevzdání: prosinec 2023

Elektronicky schváleno: 10. 5.
2023

Štěpán Jäger
Autor práce

Elektronicky schváleno: 16. 5.
2023

Ing. František Starý
Vedoucí práce

Elektronicky schváleno: 16. 5.
2023

prof. Ing. Radim Lenort, Ph.D.
Garant studijního programu

Elektronicky schváleno: 17. 5.
2023

doc. Ing. Pavel Mertlík, CSc.
Rektor ŠAVŠ

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval(a) samostatně a použité zdroje uvádím v seznamu literatury. Prohlašuji, že jsem se při vypracování řídil(a) vnitřním předpisem Škoda Auto Vysoká škola o.p.s. (dále jen ŠAVŠ) směrnicí Vypracování závěrečné práce.

Jsem si vědom(a), že se na tuto závěrečnou práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, že se jedná ve smyslu § 60 o školní dílo a že podle § 35 odst. 3 je ŠAVŠ oprávněna mou práci využít k výuce nebo k vlastní vnitřní potřebě. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna podle § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách.

Beru na vědomí, že ŠAVŠ má právo na uzavření licenční smlouvy k této práci za obvyklých podmínek. Užiji-li tuto práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, mám povinnost o této skutečnosti informovat ŠAVŠ. V takovém případě má ŠAVŠ právo ode mne požadovat příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to až do jejich skutečné výše.

V Mladé Boleslavi dne 22.11.2023

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Františkovi Starému za veškeré informace, užitečné rady, připomínky a čas, který mi při řešení problematiky věnoval.

Obsah

Úvod.....	8
1 Stirlingův motor.....	9
1.1 Historie.....	9
1.2 Základní součásti motoru.....	10
1.2.1 Převodový mechanismus.....	10
1.2.2 Zdroj tepla.....	13
1.2.3 Ohřívač.....	14
1.2.4 Regenerátor.....	14
1.2.5 Chladič.....	14
1.3 Princip Stirlingova motoru.....	15
1.4 Konfigurace motoru.....	17
1.4.1 Konfigurace alfa.....	17
1.4.2 Konfigurace beta.....	17
1.4.3 Konfigurace gamma.....	18
2 Aplikace Stirlingova motoru.....	19
2.1 Nejvýkonnější motor.....	19
2.2 Ponorky.....	19
2.3 Solární elektrárny.....	20
2.4 Jaderné elektrárny.....	22
2.5 Automobilový průmysl.....	22
2.6 Kogenerační jednotka.....	22
3 Analýza existujících modelů dostupných na internetu.....	23
3.1 Hot Air Engine Car (Stirling Engine 3D Printed).....	23
3.2 Alpha Stirling engine DIY.....	24
4 Součásti motoru.....	25
4.1 Volba konfigurace.....	25
4.2 Součásti motoru.....	25
4.3 Návrh vlastního modelu.....	26
4.3.1 Verze 1.....	26
4.3.2 Verze 2.....	28
4.3.3 Verze 3.....	31
Závěr.....	34

Seznam literatury	35
Seznam obrázků a tabulek.....	37
Seznam příloh	38

Seznam použitých zkratk a symbolů

AIP Air independent propulsion systém

PETG Polyethylentereftalát

ABS Akrylonitrilbutadienstyren

Úvod

Stirlingův motor je tepelný motor, který využívá expanze a komprese pracovního plynu při odlišných teplotách. Vynalezen byl v roce 1816 skotským pastorem Robertem Stirlingem. V té době byly na scéně parní stroje, u kterých však často docházelo k výbuchům s ničivými následky.

Vývoj motoru se pozastavil krátce po jeho uvedení v 19. století, protože byly na vzestupu motory s vnitřním spalováním a elektromotory, přičemž rozvoj Stirlingova motoru narážel na v té době limitující technologické možnosti. V 60. letech 20. století ropná krize podnítila tendenci hledat alternativy k motorům s vnitřním spalováním. Od té doby se Stirlingův motor využívá v oblastech jako je energetika a vesmírný průmysl.

Jedná se o motor s vnějším spalováním, takže k jeho pohánění je možné využít odpadního tepla. Stirlingův motor se nejčastěji skládá ze zdroje tepla, setrvačníku, ohříváče (výměník teplé strany), regenerátoru, chladiče (výměník studené strany). Vždy však záleží na vybrané modifikaci.

Cílem bakalářské práce je provést rešerši současných poznatků o Stirlingově motoru, navrhnout a zkonstruovat funkční model a vytisknout jej za pomoci 3D tisku. V současné době koluje po internetu mnoho videí o domácí výrobě Stirlingova motoru. K sestrojení vlastního motoru mne vedly příležitosti ke zlepšení, které jsem zaznamenal při jejich rešerši. Dále pak touha po prohloubení znalostí v oblasti 3D tisku, jakožto technologie na vzestupu.

1 Stirlingův motor

Stirlingův motor je tepelný motor s vnějším spalováním. Od jiných motorů se vyznačuje absencí ventilů. O jeho patent se zasloužil Robert Stirling původem ze Skotska před více jak 200 lety. Pro jeho fungování je podstatný teplotní rozdíl mezi teplou a studenou komorou, který způsobí změny objemu pracovního média. Teplotního rozdílu může být dosaženo například spalováním, využitím geotermální energie, sluneční energie, ale i odpadního tepla (Hromádko, 2012).

1.1 Historie

Historie Stirlingova motoru sahá do první poloviny 19. století, kdy byl vyroben první motor. Své první využití našel v kamenolomu ve skotském Ayrshire, kde odčerpával vodu. Menší modely se pak využívaly například pro pohon zubních vrtaček, domácích ventilátorů i šicích strojů. Švédský vynálezce John Ericsson, kterému patří zásluhy za pancéřovou bitevní loď Monitor použitou při občanské válce v USA navrhl Stirlingův motor, který byl poháněn čistě sluneční energií (Hromádko, 2012).

Stirlingův motor narážel na technologické limity své doby. V době, kdy se na scéně začaly objevovat spalovací motory a elektromotory, jim Stirlingův motor nemohl konkurovat kvůli vysoké hmotnosti. To vedlo k pozastavení jeho dalšího vývoje. O další rozvoj se v roce 1938 postarala společnost Philips. V tu dobu výrobce radiopřijímačů. N. V. Philips došel k závěru, že čím nižší molekulovou hmotnost pracovní médium má, tím lépe. Proto se ukázalo, že helium či vodík jsou vhodnější, než vzduch (Hromádko, 2012).

V druhé polovině 20. století se nově vzniklá joint-venturová společnost United Stirling pokoušela najít alternativu ke konvenčním palivům, a tedy i pohonným jednotkám z důvodu ropné krize. Motor se jim vyvinout podařilo, nicméně měl z důvodu vysokého tlaku problémy s životností. Stejnomená společnost se v 70. letech 19. století pokoušela dostat svůj další motor V4X2 do osobních vozů. Do sériové výroby se ale nikdy nedostal, protože mezi slabé stránky Stirlingova motoru patří obtížná regulace výkonu (Hromádko, 2012).

1.2 Základní součásti motoru

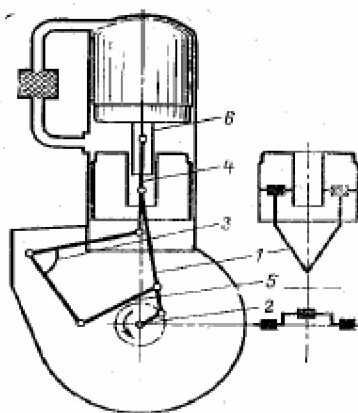
Stirlingův motor se skládá z převodového mechanismu, zdroje tepla, ohřívače, regenerátoru, chladiče a u některých konfiguracích z přeháněče.

1.2.1 Převodový mechanismus

Primární funkcí převodového mechanismu je převod pohybu. Obvykle se nachází mezi motorem a písty, kde mění pohyb přímočarý na pohyb rotační. U Stirlingova motoru se můžeme setkat s mechanismem klikovým, rombickým, se skloněnou deskou, Rossovým a Ringbovým (Míka, 2012).

Klikový mechanismus

První Stirlingův motor, který byl zapatentován byl konfigurace typu beta a využíval právě klikový mechanismus. Mechanismus je přímo spojený s kompresním pístem a s pákovým mechanismem přemístovacího pístu. Písty vykonávají pohyb dle sinusové závislosti. S tímto řešením se setkáme nejčastěji u konfigurací alfa či beta. Schéma klikového mechanismu je na Obr. 1 (Míka, 2012).

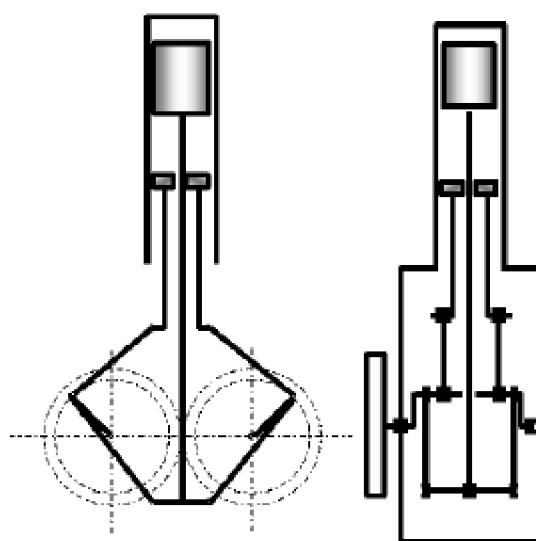


Zdroj: (Míka, 2012)

Obr. 1 Klikový mechanismus

Rombický mechanismus

Rombický mechanismus byl zpatentován v roce 1898 a společnost Philips jej využívala u konfigurace beta. Výhodou mechanismu je, že dva písty v jednom válci mohou vykonávat souosý pohyb. Přemísťovací i kompresní písty jsou spojeny každý vlastní pístnicí pevně s příčkou, kloubově spojenou se dvěma ojnici, kterými jsou opět kloubově spojeny se dvěma klikovými hřídeli. Klikové hřídele mají opačný směr otáčení zajištěný ozubeným převodem. Využívá se zde zdvojených, případně vidlicových ojníc. Zjednodušeně lze tvrdit, že se jedná o čtyři klikové mechanismy v jednom. Schéma rombického mechanismu je na Obr. 2 (Míka, 2012).

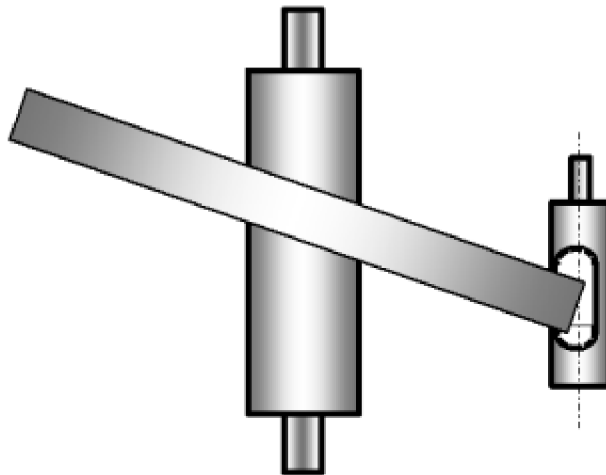


Zdroj: (Míka, 2012)

Obr. 2 Rombický mechanismus

Mechanismus se skloněnou deskou

Mechanismus se skloněnou deskou se využívá u dávkovacích čerpadel. Mechanismus je složen z rovnoběžné desky a šoupátek. Deska je umístěna rovnoběžně s osou válců. Šoupátka jsou uložena ve vedení skříňě a pevně spojena pomocí ojníc s písty. Osy pístů jsou rovnoběžné s osou otáčení desky a rozmístěny po obvodu s fázovým posunem α . Maximálně lze sestrojít mechanismus o 4 válcích. Tento mechanismus se využívá u konfigurace alfa. Mechanismus se skloněnou deskou je na Obr. 3 (Míka, 2012).

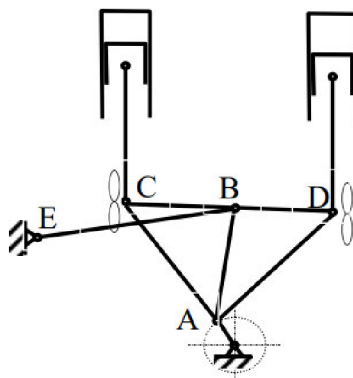


Zdroj: (Míka, 2012)

Obr. 3 Mechanismus se skloněnou deskou

Rossův mechanismus

Mechanismus využívá výhod klikového a pákového převodu. Funguje na principu otáčející se kliky spojené pohyblivě s trojúhelníkovým jařmem ACD. Jařmo umístěné ve středu horní strany je pohyblivě spojeno s pákou EB, kloubově uchycenou v motorové skříni. V bodech C a D se nachází klouby s jařmy připojenými k ojnicím pístů. Jařmo vykonává cyklický kyvadlový pohyb obou konců jařma C a D díky otáčení klik. Pohyb je převeden na pracovní a přemísťovací píst. Rossův mechanismus je na Obr. 4 (Míka, 2012).

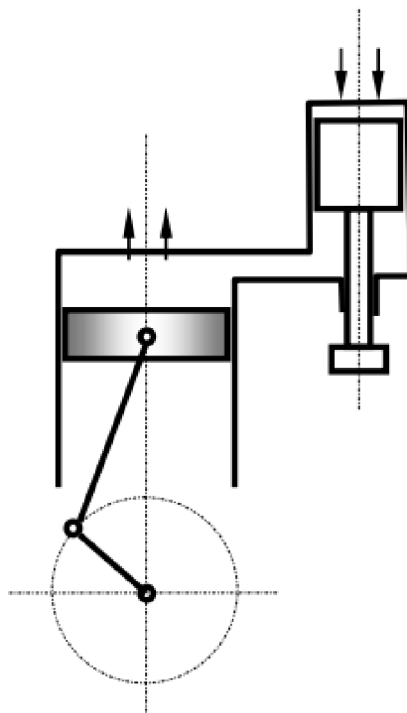


Zdroj: (Míka, 2012)

Obr. 4 Rossův mechanismus

Ringbomův mechanismus

Často bývá přezdíván jako mechanismus hybridní, protože spojuje klikový mechanismus pracovního pístu a volný píst. Pohyb pracovního pístu je udáván klasickým klikovým mechanismem, na rozdíl od přemístovacího pístu, který se pohybuje v závislosti na rozdílu tlaků pracovního média a působení gravitační síly. Ringbomův mechanismus je na Obr. 5 (Míka, 2012).



Zdroj: (Míka, 2012)

Obr. 5 Ringbomův mechanismus

1.2.2 Zdroj tepla

Jako zdroj tepla lze v případě Stirlingova motoru využít téměř cokoli od otevřeného ohně po sluneční záření. Pro jeho fungování je podstatný teplotní rozdíl, kterého lze u menších motorů dosáhnout například i svíčkou, nebo hrnkou s horkou vodou. Jelikož se jedná o motor s vnějším spalováním, kde nedochází ke kontaktu spalin s vnitřními částmi motoru, nabízí se využití tepelných zdrojů takových, které by například u klasických spalovacích motorů způsobily poškození. Lze tedy využít i skládkových plynů (Woodford, 2021).

1.2.3 Ohřivač

Jinými slovy výměník teplé strany. U menších motorů, podobně jako u chladiče, postačí jako ohřivač stěna teplého prostoru. Pro zvýšení účinnosti lze využít vnější žebrování, které však zvýší prostorovou náročnost motoru (Škorpík, 2013).

1.2.4 Regenerátor

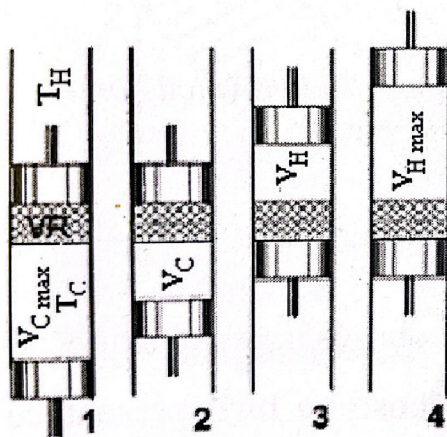
Regenerátor se zpravidla nachází mezi teplým a studeným válcem a slouží jako dočasný zásobník tepla. Jeho primárním cílem je zvýšit účinnost motoru pomocí uchování tepla, které jím prochází. Nejčastěji bývá tvořen jemnými dráty o průměru menším než 0,1 mm. Regenerátor by měl vyhovovat třem základním požadavkům. Umožnit regeneraci požadovaného množství tepla, způsobovat co nejmenší tlakové ztráty a měl by mít minimální mrtvý objem. Ke zjištění potřebné velikosti regenerátoru je potřebná znalost množství regenerovaného tepla, parametry proudění a teplotní rozdíl mezi pracovním médiem a maticí regenerátoru (Škorpík, 2013).

1.2.5 Chladič

Jedná se o tepelný výměník motoru, který slouží k odvádění tepla. U menších motorů jako chladič vystačí pouze stěna studeného válce, která odvádí teplo do okolního prostředí. Pro zvýšení účinnosti chladiče lze využít chladicí kapaliny, případně vzduchu (Škorpík, 2013).

1.3 Princip Stirlingova motoru

Stirlingův motor pracuje na principu komprese studeného plynu a expanzi teplého. Jako pracovní plyn lze využít vzduch, dusík, helium a vodík. Z fyzikálního pohledu se zde střídá děj izotermický (děj s konstantní teplotou) s izochorickým (děj s konstantním objemem). Průběh fungování Stirlingova motoru konfigurace beta je na Obr. 6.



V_H – teplý prostor, V_C – studený prostor, T_C, T_H – příslušné teploty plynu,
 V_R – objem regenerátoru

Zdroj: (Kameš, 2010)

Obr. 6 Průběh pracovního procesu Stirlingova motoru

Cyklus motoru lze rozdělit do 4 fází (Ebrahimi, 2023; Kameš, 2010):

- 1→2 izotermická komprese,
- 2→3 izochorický přívod tepla,
- 3→4 izotermická expanze,
- 4→1 izochorický odvod tepla do regenerátoru.

Fáze 1 (Kameš, 2010):

Horní píst se nachází v poloze, kde objem $V_H = 0$. Spodní píst při stejné teplotě T_C o maximálním objemu plynu $V_{C_{max}}$. Během izotermické komprese narůstá tlak na diagramu z polohy 1 do 2 na tlak p_2 . Průběh tlaku a objemu je na Obr. 7.

Fáze 2 (Kameš, 2010):

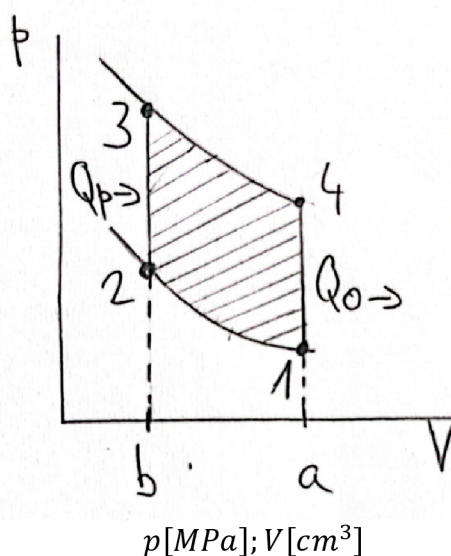
Horní a spodní píst vykonává pohyb o stejném směru i rychlosti. Izochorická změna plynu přesouvá plyn skrze regenerátor do teplého prostoru V_H o teplotě T_H . Nárůst teploty v teplé oblasti způsobuje nárůst tlaku pracovního média na hodnotu p_3 . V momentu, kdy píst dosáhne své horní úvrati se již žádný plyn ve studené oblasti nenachází $V_c = 0$. Dochází k izochorickému přívodu tepla.

Fáze 3 (Kameš, 2010):

Spodní píst je v pozici horní úvrati při $V_c = 0$. Horní píst dále vykonává pohyb, až do své horní úvrati při V_{Hmax} . K redukci tlaku na hodnotu p_4 dojde při izotermické expanzi.

Fáze 4 (Kameš, 2010):

Aby se píst dostal do původního stavu, musí plyn projít díky izochorické přeměně přes regenerátor do chladné oblasti. Tím dojde k poklesu tlaku.



Zdroj: (Upraveno dle Kameš, 2010)

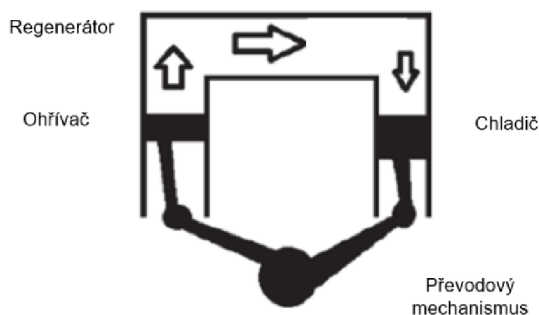
Obr. 7 Diagram p-V

1.4 Konfigurace motoru

U Stirlingova motoru se nejčastěji setkáme s rozdělením do konfigurací alfa, beta a gama (Ebrahimi, 2023).

1.4.1 Konfigurace alfa

Bývá považována za konfiguraci s nejjednodušší konstrukcí. Obsahuje dva regenerátorem oddělené válce, jeden studený a druhý teplý. Ve válcích se nachází písty. Mezi výhody konfigurace alfa patří výhodný poměr výkonu a objemu. Pro správné fungování však vyžaduje důkladné utěsnění soustavy. Konfigurace alfa je zobrazena na Obr. 8 (Gupta, Sharma a Sunny 2017).

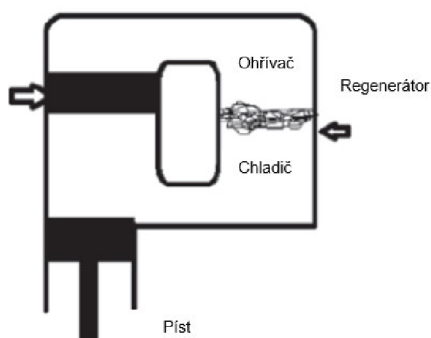


Zdroj: Upraveno dle (Gupta, Sharma a Sunny 2017)

Obr. 8 Konfigurace alfa

1.4.2 Konfigurace beta

Na rozdíl od konfigurace alfa jsou písty uloženy v jediném válci. Přemístěvač přesouvá pracovní médium mezi teplou (expanzní) a studenou (kompresní) oblastí. Jedná se o konstrukčně složitější konfiguraci. Schéma konfigurace beta je na Obr. 9 (Gupta, Sharma a Sunny 2017).

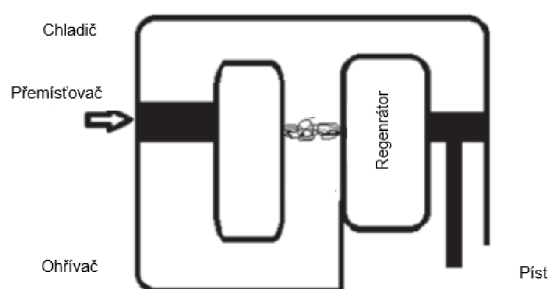


Zdroj: Upraveno dle (Gupta, Sharma a Sunny 2017)

Obr. 9 Konfigurace beta

1.4.3 Konfigurace gamma

Od konfigurace alfa se liší polohou pracovního pístu. Ten je umístěn v odděleném válci. Tímto je zajištěno rozdělení pracovního objemu studené strany motoru. Přemístovač přemísťuje pracovní médium mezi teplou a studenou oblastí. V oblasti studené se nachází přemístovač a píst. Pracovní médium prochází skrze chladič, regenerátor a ohřivač. Schéma konfigurace gamma je na Obr. 10 (Gupta, Sharma a Sunny 2017).



Zdroj: Upraveno dle (Gupta, Sharma a Sunny 2017)

Obr. 10 Konfigurace gamma

2 Aplikace Stirlingova motoru

Se Stirlingovým motorem se nesetkáme příliš často v porovnání s jeho největším konkurentem spalovacím motorem s vnitřním spalováním, který dnes nalezneme ve většině automobilů. Při požadavku na dosažení stejného výkonu u Stirlingova motoru, jako u motoru s vnitřním spalováním budou náklady na výrobu Stirlingova motoru násobně vyšší než u motoru s vnitřním spalováním. V dnešní době se Stirlingův motor nejvíce využívá v oblasti výroby elektrické energie (Hromádka, 2012; Ferel, 2021):

- Využití sluneční energie v oblastech s minimálním ročním úhrnem $2\,000\text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$.
- Výroba elektrické energie spalováním plynů s nízkou výhřevností nebo plynů těžko spalitelných a biomas. Zde výhodou Stirlingova motoru je, že zplodiny vzniklé při spalování nepřichází do kontaktu s vnitřními částmi motoru. U motorů s vnitřním spalováním by zplodiny poškozovaly například písty nebo lopatky zařízení. Důležité je však zmínit, že přestože v případě aplikace Stirlingova motoru nedochází ke kontaktu zplodin s vnitřními částmi, dochází k zanášení rekuperačního výměníku, který je potřeba čistit.
- Produkce elektrické energie z obnovitelných zdrojů – peletek.
- Dále ho můžeme najít v ponorkách, jaderných a solárních elektrárnách.

2.1 Nejvýkonnější motor

V posledních letech usiluje Čína o vývoj vysoce kvalitních motorů různých druhů. Nedávno se jim podařilo vyvinout nejvýkonnější Stirlingův motor na světě, který nalezne využití při výrobě elektřiny a pohonu ponorek. Výkon motoru je 320 kW a účinnost 40 % (Xuanzun, 2021).

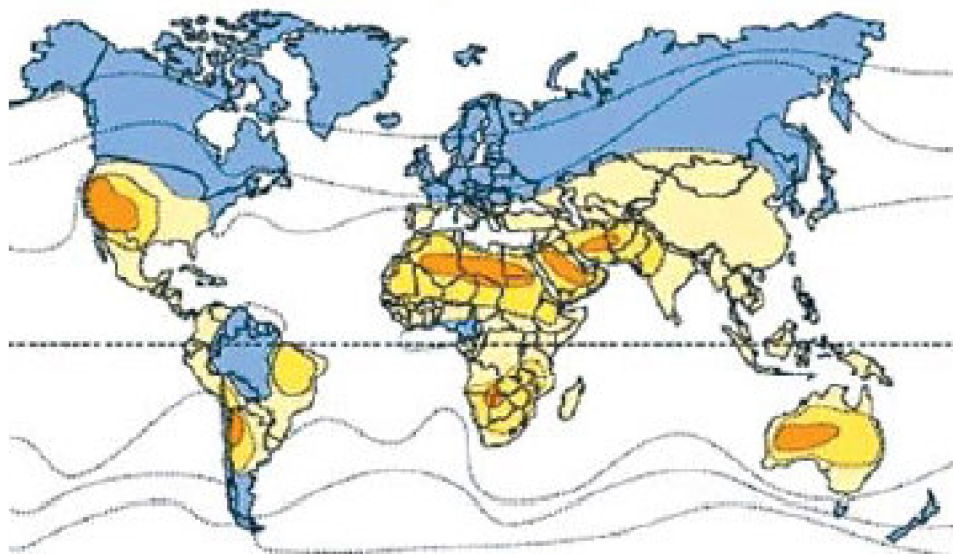
2.2 Ponorky

Za obou světových válek byly ponorky při plavbě na hladině poháněny Dieslovými motory a při plavbě pod hladinou elektromotory z energie uložené v akumulátorech. Akumulátory bylo potřeba dobíjet, což se dělo při plavbě na hladině, kdy jsou ponorky nejsnadněji lokalizovatelné a nejzranitelnější. Jako řešení se nabízel jaderný pohon, který je však nákladný a nevhodný pro menší ponorky.

AIP (air independent propulsion) systém využívá přednosti Stirlingova motoru, kterou je tichý chod. AIP se skládá z řady technologií a umožňuje ponorkám operovat pod vodní hladinou po dobu omezených zásob vzduchu. Stirlingův motor se využívá víceválcový s dvojčinnými písty. V trupu ponorky jsou umístěny čtyři zásobníky. V prvním se nachází motorová nafta a v druhém helium pro kompenzaci vzniklých ztrát. Ve zbylých dvou se nachází kyslík a dusík, jejichž kombinace se využívá pro spalovací motor. Mechanická energie ze Stirlingova motoru pohání elektrický generátor, který pohání elektromotor a přebytky ukládá do akumulátorů. Popsanou technologii využívají Švédské ponorky třídy Gotland (Xuanzun, 2021; Míka, 2012; Ferell, 2021).

2.3 Solární elektrárny

Před výstavbou solární elektrárny je potřeba vzít v úvahu vhodnost lokality. Mapa vhodných lokalit je na Obr. 11, kde tmavě oranžová barva značí nejvhodnější lokality, žlutá dobré lokality, světle žlutá vhodné lokality a světle modrá nevhodné lokality.



Zdroj: (Hromádko, 2012)

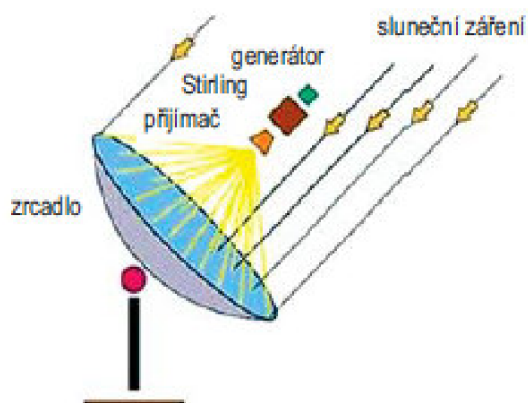
Obr. 11 Mapa vhodných lokalit pro vybudování solární elektrárny

V Americkém státě Arizona poblíž města Pheonix leží solární elektrárna s 60 Stirlingovými motory o celkovém výkonu 1,5 MW s účinností dosahující 31 %. Ve srovnání s konvenčními solárními panely, které dosahují účinností v rozmezí 14 – 18 % je tedy skoro 2x efektivnější. Vývoj trval 14 let. Dílo se skládá z kruhu zahnutých zrcadel připomínající satelitní vysílače. Tvar zrcadel je na Obr. 12. Zrcadla soustředí sluneční paprsky na jednotku přeměny energie, kde dochází k ohřevu pracovního média, konkrétně vodíku. Princip využití solární energie je na Obr. 13 (Cris, 2013).



Zdroj: (Ferrell, 2021)

Obr. 12 Zrcadlo sluneční elektrárny



Zdroj: (Hromádko, 2012)

Obr. 13 Princip využití Stirlingova motoru v rámci solární energie

2.4 Jaderné elektrárny

Využití Stirlingova motoru se nabízí i v odvětví jaderné energetiky. Stirlingův motor by mohl nahradit turbíny poháněné vodní párou a zjednodušit tak konstrukci, zvýšit účinnost a omezit množství radioaktivního odpadu. V dnešních elektrárnách se využívá jako chladící médium tekutý sodík. Nevýhodou tohoto řešení je, že sodík při kontaktu s vodou prudce reaguje. Jaderná elektrárna vybavená Stirlingovým motorem nevyžaduje pro svou funkci vodu. Tento fakt by mohl umožnit výstavbu jaderné elektrárny i v regionech trpícím nedostatkem vodních zdrojů (Planas, 2018).

2.5 Automobilový průmysl

Jak již bylo zmíněno výše, zatím nebyl žádný Stirlingův motor navržen tak, aby jeho aplikace byla v této oblasti vhodná. Mezi hlavní důvody patří nízký poměr výkonu k váze a dlouhý rozběhový čas (Planas, 2018).

2.6 Kogenerační jednotka

Kogenerační jednotka je taková jednotka, která kombinovaně vyrábí tepelnou a elektrickou energii. Tohoto efektu lze dosáhnout pomocí generátoru poháněným zemním plynem a Stirlingova motoru, který využívá vzniklé odpadní teplo a vyrábí energii mechanickou (Sunfin, 2021).

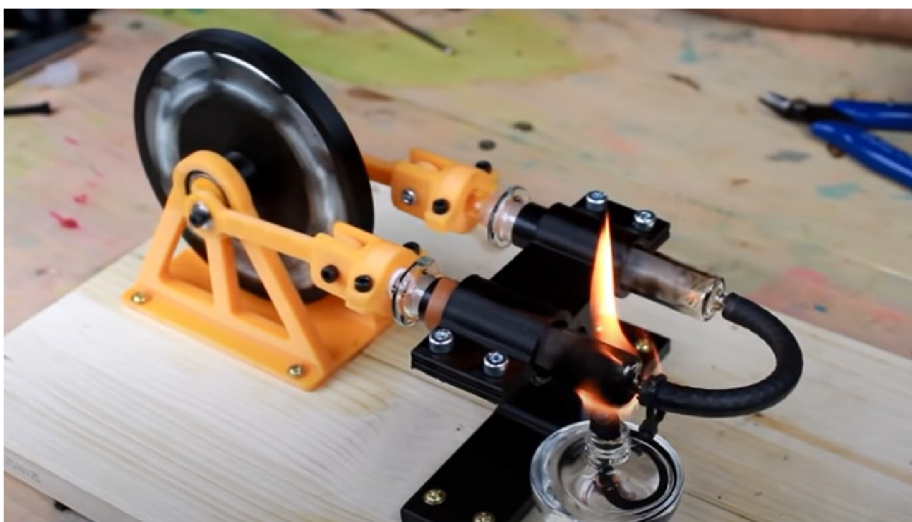
3 Analýza existujících modelů dostupných na internetu

Před samotným návrhem vlastního modelu, byla provedena analýza existujících řešení dostupných na internetu. Při analýze řešení byly identifikovány prvky motorů, které napomáhají ke správné funkci motoru, nebo jí naopak škodí. Ze získaných poznatků se vycházelo při návrhu vlastního modelu.

3.1 Hot Air Engine Car (Stirling Engine 3D Printed)

Jedná se zřejmě o nejrelevantnější video pro tuto práci, protože autor využil 3D tisku pro výrobu základních dílů motoru. V první části je popsán Stirlingův motor a jeho historie. Jeho základní funkce je demonstrována na skleněné injekční stříkačce, pod kterou byla umístěna svíčka. Nahřátý plyn expandoval, a tím posunul píst.

Dále byl sestaven model auta se Stirlingovým motorem konfigurace beta, který byl schopný se pohybovat. Jelikož se jedná o konfiguraci beta, nebyla tato část videa považována za relevantní. Nejvíce času autor věnuje konstrukci motoru konfigurace alfa, která je na Obr. 14. V průběhu videa jsou zjišťovány a odstraňovány nedostatky do té doby, dokud se motor nepodaří rozběhnout.



Zdroj: (Integza, 2020)

Obr. 14 3D model konfigurace alfa

Přestože se model nakonec rozběhnout podařilo, trpěl určitými nedostatky:

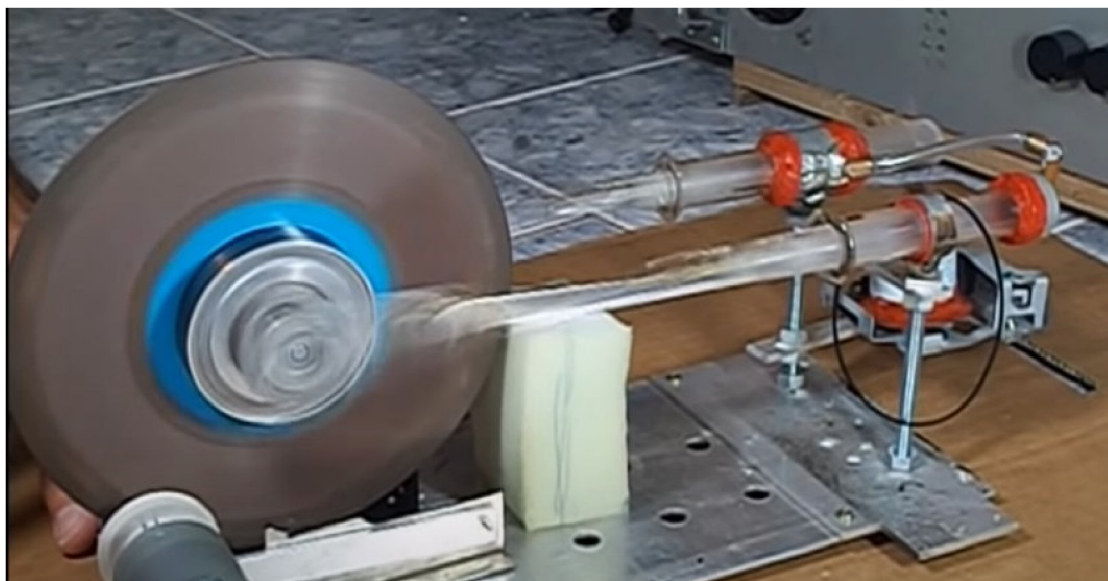
- gumová hadice, která převádí vzduch mezi teplou a studenou komorou shořela,
- masivní uchycení pístu zvyšovalo setrvačné hmoty.

Naopak z videa bylo čerpáno v případě:

- využití šestihranných matic v setrvačnicku,
- uchycení válců (injekčních stříkaček), tvaru konzole pro setrvačnick.

3.2 Alpha Stirling engine DIY

Autor zde popisuje sestavení motoru konfigurace Alfa, který je zobrazen na Obr. 15. Většina dílů pro tuto konstrukci pochází ze starého video přehrávače. To znamená, že součásti motoru bylo zapotřebí obrobít. Dále se jako nevýhoda jeví pevné spojení pístu se setrvačnickem, které je v tomto případě zajištěno dvousložkovým lepidlem. Nejprůnosnější inspirací z videa byla povrchová úprava pístů. Autor využil broušení jemným brusným papírem pod vodou. Dále byly písty leštěny pastou, která se využívá na čelní skla automobilu. Následoval oplach v horké vodě, důkladný otěr pro odstranění nečistot a aplikace silikonového maziva. Další zajímavostí je zapojení generátoru, pomocí kterého byla rozsvícena LED světla.



Zdroj: (Wagner, 2013)

Obr. 15 Provedení konfigurace alfa ze starého přehrávače

4 Součásti motoru

Stirlingův motor se skládá z několika klíčových součástí, které společně zajišťují jeho fungování. Před návrhem jednotlivých součástí bylo potřeba zvolit vhodnou konfiguraci.

4.1 Volba konfigurace

Konfigurace alfa je pro výukové potřeby vhodná, jelikož na ní lze názorně ilustrovat základní termodynamické procesy, jako jsou například expanze a komprese plynu. Jako další kritérium při volbě konfigurace sehrála roli náročnost konstrukce, která je v případě konfigurace alfa menší než u jiných konfigurací. Snadná konstrukce umožnila vylepšovat jednotlivé konstrukční uzly nezávisle na sobě. Právě pro efektivní úpravy jednotlivých dílů byl plně využit potenciál aditivní výroby, která umožnila vyrábět hned několik variant jednotlivých součástí najednou v krátkém časovém horizontu. Průša a Bach (2019, str. 6) uvádí, že „možnost rychlého iterování mezi verzemi je obrovskou výhodou 3D tisku“.

4.2 Součásti motoru

Mezi základní součásti motoru a jejich požadavky patří:

- Setrvačnick slouží k uchování kinetické energie a zároveň stabilizaci otáček. Mezi základní parametry při návrhu setrvačnicku patří prostorové omezení a moment setrvačnosti.
- Válce a písty jsou u konfigurace alfa dva. Pro aplikaci byly kladeny požadavky na teplotní odolnost a vzájemnou těsnost.
- Ojnice musela být navržena tak, aby zvládala zatížení a zároveň byla co nejlehčí pro minimalizaci setrvačných hmot. Dalším parametrem byla délka ojnice.
- Spojka slouží ke spojení ojnice s pístem. I zde byl kladen důraz na minimalizaci hmotnosti z důvodu setrvačných hmot.
- Ložiska umožňují rotační pohyb mezi nábojem a hřídelí. Zvolena byla kuličková ložiska. Kritérii při jejich výběru byly cena a rozměry.
- Konzola setrvačnicku slouží k uchycení ložisek a hlavní osy. Měla by disponovat určitou tuhostí, aby se zamezilo deformaci.

- Zdroj tepla musí být tak výkonný, aby pomocí něj bylo možné dosáhnout teplotního rozdílu alespoň 200°C. Jako ideální řešení se jeví svíčka, kterou však nebylo možné využít, jelikož prostory, kde byl motor zkoušen a sestavován disponují protipožárními senzory. Proto byla použita horkovzdušná pistole.
- Přechod mezi teplou a studenou komorou musel splňovat následující požadavky. Teplotní odolnost, jelikož je v přímém kontaktu s teplým válcem, těsnost, tvarovou poddajnost a snadnou montáž.
- Stojina pro válce musí podobně jako konzola setrvačnicku disponovat určitou tuhostí. Dále musí udržet válce v nehybné poloze a mít vyšší teplotní odolnost, jelikož je v přímém kontaktu s teplým válcem.

4.3 Návrh vlastního modelu

Jak již bylo zmíněno v úvodu, do jisté míry vycházel návrh z již existujících řešení dostupných na internetu. Vývoj motoru byl rozdělen do 3 základních verzí, tu první se však rozběhnout nepodařilo a pro jeho správnou funkci muselo být vyřešeno několik konstrukčních problémů, viz níže. Při návrhu verze 1 byly implementovány jisté vylepšení, které měly motor zbavit konstrukčních nedostatků zmíněných v rešerši výše a zvýšit jeho účinnost.

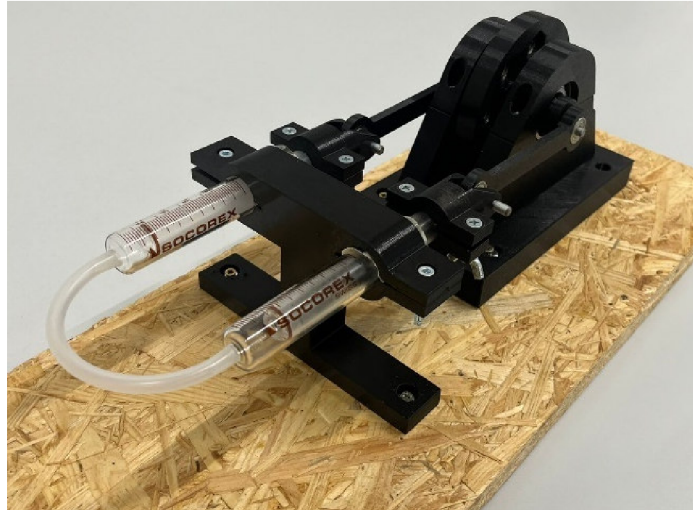
4.3.1 Verze 1

V případě verze 1 ztráty převyšovaly příkon a motor nebyl schopen fungovat. K největším ztrátám docházelo v ložiskách a při tření mezi písty a válci. Jednotlivé konstrukční uzly jsou popsány a vyhodnoceny v seznamu níže:

- Základna, byla vybrána z dřevotřísky proto, aby do ní bylo snadné upevnit desku a stojinu válců pomocí vrtů. Problematické zde bylo dodržení souososti mezi ojnicí a písty. Zároveň také nastavení požadované vzdálenosti mezi stojinou válců a deskou na které stojí konzola.
- Konzola byla navržena tak, aby byla rozebíratelná. Rozebíratelnost neměla pro motor žádný pozitivní vliv ani negativní přínos.

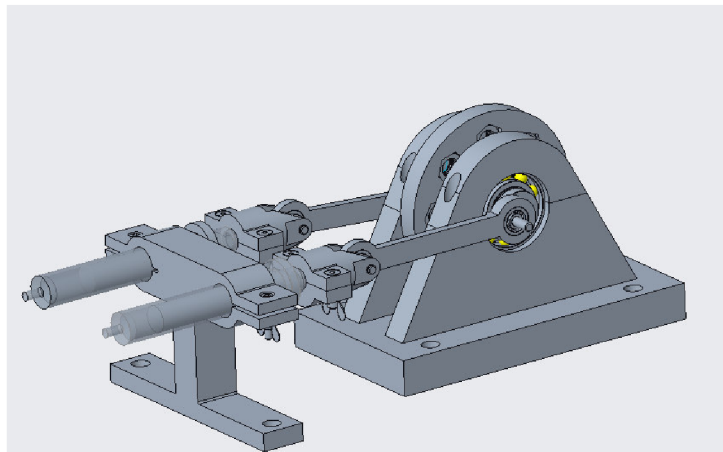
- Hlavní osa disponovala drážkou pro pero. Excentricita byla zvolena 7 mm. Jako proměnná zde byl úhlový rozdíl, tedy rozdíl polohy pístu mezi teplým a studeným válcem. Jelikož se motor nepodařilo roztočit vůbec, nebylo možné určit vhodnou hodnotu.
- Ložisko bylo zvoleno do hlavní osy 6005 a do ojníc 625. I přes důkladné promazání silikonovým mazivem se zdálo, že zde dochází k příliš velkým ztrátám.
- Setrvačnick vychází rozměrově z Obr. 14. Navíc byla přidána drážka pro pero k zajištění přenosu kroutícího momentu.
- Spojka slouží ke spojení pístu a ojnice. Tvarově vycházela z Obr. 14. Nevýhodou zde byla robustnost, a tím velikost setrvačné hmoty. Nepředpokládá se, že by to mělo zásadní vliv na funkci.
- Válce a písty jsou ze skleněné stříkačky o objemu 10 ml a v této verzi nebyly nijak upravovány. To byla pravděpodobně jedna z hlavních příčin, proč motor nefungoval,
- Stojina pro válce byla vytištěna z materiálu PETG, který má omezené mechanické a tepelné vlastnosti. Ohřátím skleněného válce docházelo k přestupu tepla do stojiny, a tím k jejímu zrychlenému vymačkání. Stojina poté nedržela správně osu válce a taktéž ho nepodepírala v celé délce uložení.
- Přechod vzduchu mezi teplou a studenou komorou byl zajištěn silikonovou hadičkou pro její dobrou teplotní odolnost.
- Jako zdroj tepla posloužila horkovzdušná pistole. Většina DIY sestavených motorů využívá otevřeného plamene, to však v tomto případě nebylo možné, jelikož motor byl testován v laboratořích, kde se nachází požární snímače.

Ze seznamu vychází, že do další verze bylo potřeba zapracovat zejména na ztrátách vzniklých v ložiskách a válcích s písty. Zároveň se také pokusit o minimalizaci setrvačných hmot. Foto a model verze 1 jsou na Obr. 16 a Obr. 17. Technický výkres je v příloze 1.



Zdroj: (Vlastní tvorba)

Obr. 16 Foto verze 1



Zdroj: (Vlastní tvorba)

Obr. 17 Model verze 1

4.3.2 Verze 2

Před vyřešením nedostatků verze 1 bylo potřeba zvážit jejich dopad na celou sestavu. Jednotlivé uzly nebylo možné řešit izolovaně. Technický výkres je v příloze 2. Foto a model se nachází na Obr. 18 a Obr. 19 a liší se od verze 1 v následujících součástech:

- Ložiska, u kterých byly pozorovány velké ztráty byly nahrazeny menšími. Konkrétně ložisko 6005, které se nachází na hlavní ose a konzoli bylo nahrazeno za ložisko 625. Pro snížení valivého odporu a tření o klec kuliček bylo použito silikonové mazivo. Prokázalo se, že vliv na účinnost ložisek má průměr valivých elementů, provedení klece a způsob utěsnění.

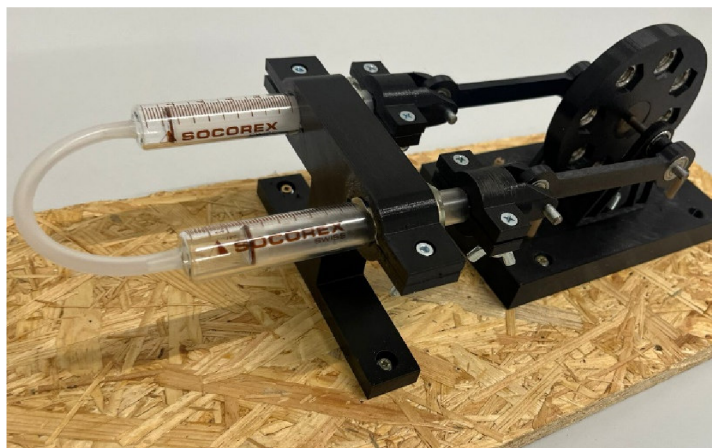
- Konzola musela být upravena pro nový rozměr ložiska 625. Při té příležitosti byla nahrazena novou, nerozebíratelnou konstrukcí. Vzhledem k tomu, že nebylo potřeba vmístit šrouby, šlo využít minimalistického designu. Došlo tím ke zkrácení délky tisku a úspoře materiálu.
- Hlavní osa a její průměr musel být kvůli změně ložisek zredukován. Nastala otázka, jaký materiál použít s ohledem na pevnost a jak zajistit excentricitu. V tomto případě nebylo vhodné využít 3D tisk, kvůli jeho špatným mechanickým vlastnostem. Proto byla vybrána ocelová tyč tažená za studena, která splňovala požadavky na pevnost, přesnost i relativně nízkou cenu. Excentricita byla vyřešena adaptérem, který byl na ocelovou tyč taženou za studena nalisován.
- Setrvačnický byl v předchozí verzi vybaven drážkou pro pero, které zajišťovalo přenos kroutícího momentu. Použitím tyče tažené za studena byla tato varianta vyloučena. Převod kroutícího momentu byl zajištěn vložením redukce do setrvačnicku a silovým stykem – nalisováním.
- Spojka a její objem byl snížen přibližně na 1/6 oproti verzi 1. Navíc byl odebrán spojovací materiál – 2 šrouby a 2 křídlové matic. Šroubový spoj byl nahrazen zacvakávacím mechanismem. Došlo tím k významnému snížení setrvačných hmot.
- Ojnice musely být rovněž upraveny pro nové ložisko řady 625. Při této příležitosti byl jejich objem zredukován na polovinu.
- Písty prošly důkladnou povrchovou úpravou. Na pístech bylo provedeno mokré broušení brusným papírem P2500, leštění hadrem se zubní pastou a leštění jemnou tkaninou na sucho. Poté bylo na písty aplikováno silikonové mazivo pro zachování kluzných vlastností za zvýšených teplot. Kvůli obtížnému přístupu nebyly válce nijak upravovány. Bohužel v době sestavování motoru nebyl k dispozici siloměr, kterým by bylo možné přínos povrchové úpravy kvantifikovat.

Ani verze 2 přes provedené úpravy nebyla schopna udržet konstantní otáčky. Ke zlepšení došlo a byla znát tendence motoru otáčet se. V této verzi již bylo možné vnímat proměnlivost síly motoru při různých objemech vzduchu. Kvůli absenci silového čidla musely být experimenty vyhodnocovány pocitově.

Nejlépe však působil minimální objem vzduchu ve válcích při nasazení silikonové hadičky a rozdílná velikost mrtvého prostoru mezi studenou a teplou komorou.

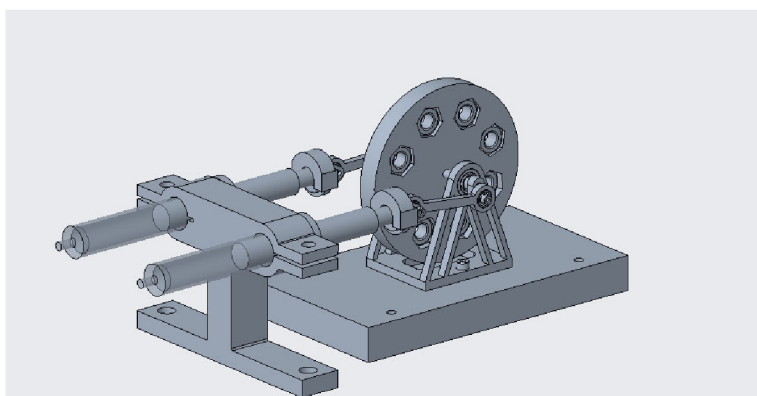
Jako největší nedostatky verze 2 byly identifikovány:

- stojina válců a její ohýbání, ke kterému docházelo při roztočení setrvačnicku,
- obtížně nastavitelná vzdálenost mezi stojinou válců a setrvačnickem, dále také zachování souososti mezi ojnicí a válci.



Zdroj: (Vlastní tvorba)

Obr. 18 Foto verze 2



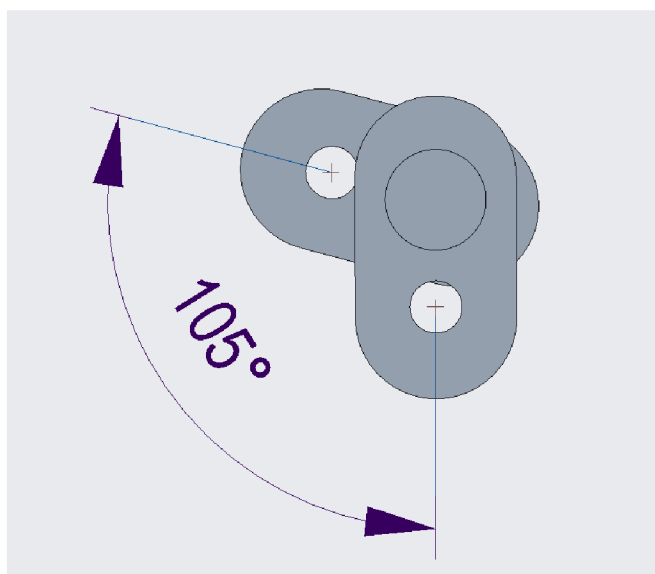
Zdroj: (Vlastní tvorba)

Obr. 19 Model verze 2

4.3.3 Verze 3

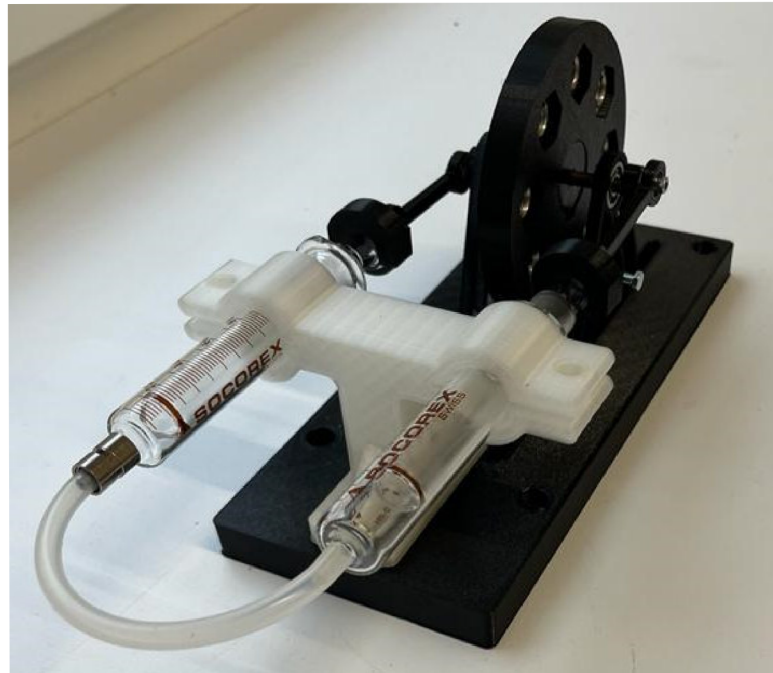
Při řešení problematiky tuhosti stojiny válců se nabízelo využít materiál ABS, který má podstatně lepší mechanické vlastnosti a zároveň i vyšší teplotní odolnost než PETG. Pouhá změna materiálu by však nemusela stačit, a proto byla přidána žebra. Zároveň byl snížen objem stojiny pro úsporu času tisku a materiálu. Pro odstranění problémů s nastavením vzdáleností mezi osou setrvačníku a stojiny válců při zachování souososti válců byla vymodelována základní deska s drážkami pro šroub. Tím byl umožněn přímočarý posuv a se setrvačником bylo možné snadno pohybovat při zachování souososti. Jelikož deska má poměrně velkou plochu, došlo při tisku k jejímu zkroucení. Zároveň by samotná deska byla moc lehká a za chodu nestabilní. Proto i vytištěná deska musela být přivrtána do desky z dřevotřísky.

Úhlové zpoždění, kterým je v případě Stirlingova motoru myšlen úhlový rozdíl mezi teplým a studeným válcem byl nastaven na 105° . Situace je zobrazena na Obr. 20. Mrtvý prostor byl ve studeném válci snížen posunem válce směrem blíže k setrvačнику a objem vzduchu v soustavě byl snížen na minimum. Kombinace těchto faktorů funkci motoru prospívala nejvíce a stal se funkčním. Fotka a model verze 3 je na Obr. 21 a Obr. 22. Technický výkres je v příloze 3.



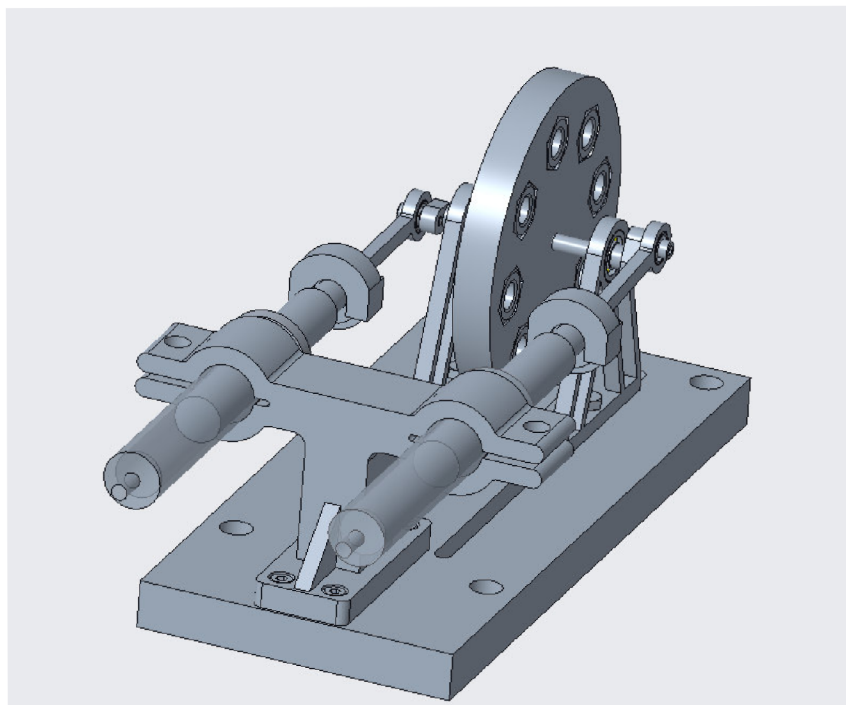
Zdroj: (Vlastní tvorba)

Obr. 20 Úhlové zpoždění



Zdroj: (Vlastní tvorba)

Obr. 21 Foto verze 3



Zdroj: (Vlastní tvorba)

Obr. 22 Model verze 3

Ekonomické zhodnocení verze 3

Většina dílů pro model byla získána technologií 3D tisku. Čistá délka tisku všech dílů činila přibližně 19 hodin. Jako nejvyužívanější materiál byl PETG a bylo ho spotřebováno zhruba 174 g, kdežto ABS bylo spotřebováno pouze 35 g. Celkové náklady na materiál pro 3D tisk byly přibližně 170 Kč. Kromě tiskových materiálů bylo za nakupované díly jako jsou ložisko a injekční stříkačky utraceno 580 Kč.

Celkové náklady lze přibližně stanovit na 750 Kč. Důležité je zmínit, že do celkové částky se nepromítají náklady na energie, spojovací materiál, maziva a brusný materiál. To protože by je buď bylo obtížné kvantifikovat, nebo se jedná o zanedbatelné částky.

Závěr

V teoretické části práce byl popsán Stirlingův motor a jeho funkce. Dále byly vybrány konkrétní příklady jeho využití v průmyslových a energetických odvětvích.

Cílem praktické části bylo navrhnout a sestavit funkční model při maximálním využití možností 3D tisku a teoretických znalostí získaných při studiu. Prvním krokem bylo provedení rešerší dostupných na internetu. Z rešerší byla čerpána inspirace a zároveň sloužili k indikaci možných vylepšení, které měli zvýšit účinnost modelu. Ne vždy tomu tak bylo a některé změny měly opačný přínos. Proto byl vývoj rozdělen do tří základních verzí, kdy každá verze řešila nedostatky předchozí a odhalovala nové. Provozoschopná verze byla až poslední, tedy verze 3. Náklady na její výrobu činily přibližně 750 Kč.

Verzi 3 by bylo možné zdokonalit v oblastech tepelné a mechanické účinnosti. Tepelná účinnost by mohla být zvýšena nahrazením horkovzdušné pistole topným páskem. Pokud by topný pásek byl řízen pomocí regulátoru, bylo by možné regulovat počet otáček. Jako udržitelná alternativa se také nabízí využití obnovitelných zdrojů, jako je solární energie. Mechanickou účinnost by bylo možné zlepšit použitím kvalitnějších ložisek s menšími valivými odpory.

Seznam literatury

CRISTI. *31% Efficient Stirling Engines Used to Convert 1.5MW of Arizona Solar Power*. Online. 2013. Dostupné z: <https://www.greenoptimistic.com/31-efficient-stirling-engines-used-to-convert-1-5mw-of-arizona-solar-power-20100102/>.

[cit. 2023-11-03].

EBRAHIMI, Masood. *Power Generation Technologies: Foundations, Design and Advances*. 2023. ISBN 9780323953696.

FERELL, Matt. *Are Stirling Engines the Future of Renewable Energy Storage*. Online. 2021. Dostupné z: <https://undecidedmf.com/episodes/are-stirling-engines-the-future-of-renewable-energy-storage/>. [cit. 2023-11-03].

GOMEZ, Joel. *Hot Air Engine Car (Stirling Engine 3D Printed)*. Online. 2020. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=lmncBzb2Xbg&t=1043s&ab_channel=Integza. [cit. 2023-11-03].

GUPTA, Aman, Shubham SHARMA a Sunny NARAYAN. *Liquid Piston Engines*. Online. John Wiley & Sons, Incorporated, 2017 [cit. 2023-03-20]. ISBN 9781119323235. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/savscz/detail.action?docID=4926032>

HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony*. Praha: Grada Publishing, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.

KAMEŠ, Josef. *Speciální motorová vozidla: Spalovací motory*. Druhé. 2010. ISBN 80-213-0895-8.

MÍKA, Jiří. *Teplovzdušné motory - motory budoucnosti*. Ostrava, 2012. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

PLANAS, Oriol. *Stirling Engine Applications*. Online. 2018. Dostupné z: <https://en.demotor.net/stirling-engine/applications>. [cit. 2023-11-03].

PRŮŠA, Josef; BACH, Martin; STRÍTESKÝ, Ondřej. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research, 2019. 62 s.

SUNFIN. *Kogenerační jednotky*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.sunfin.cz/kogeneracni-jednotky>. [cit. 2023-11-03].

ŠKROPÍK, Jiří. *Stirlingův motor* [online]. 2013, 15 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor_332013.html#vyuzivani-stirlingova-motoru

WAGNER, Leandro. *Motor Stirling Alfa 1500 RPM Caseiro*. Online. 2013. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=8hkJO2314KA&ab_channel=ManualdoMotorStirling-LeandroWagner. [cit. 2023-11-03].

WOODFORD, Chris. *Stirling engines* [online]. 2021, 8 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/how-stirling-engines-work.html>

XUANZUN, Liu. *China develops world's most powerful Stirling engine*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.globaltimes.cn/page/202112/1243157.shtml>. [cit. 2023-11-03].

Seznam obrázků a tabulek

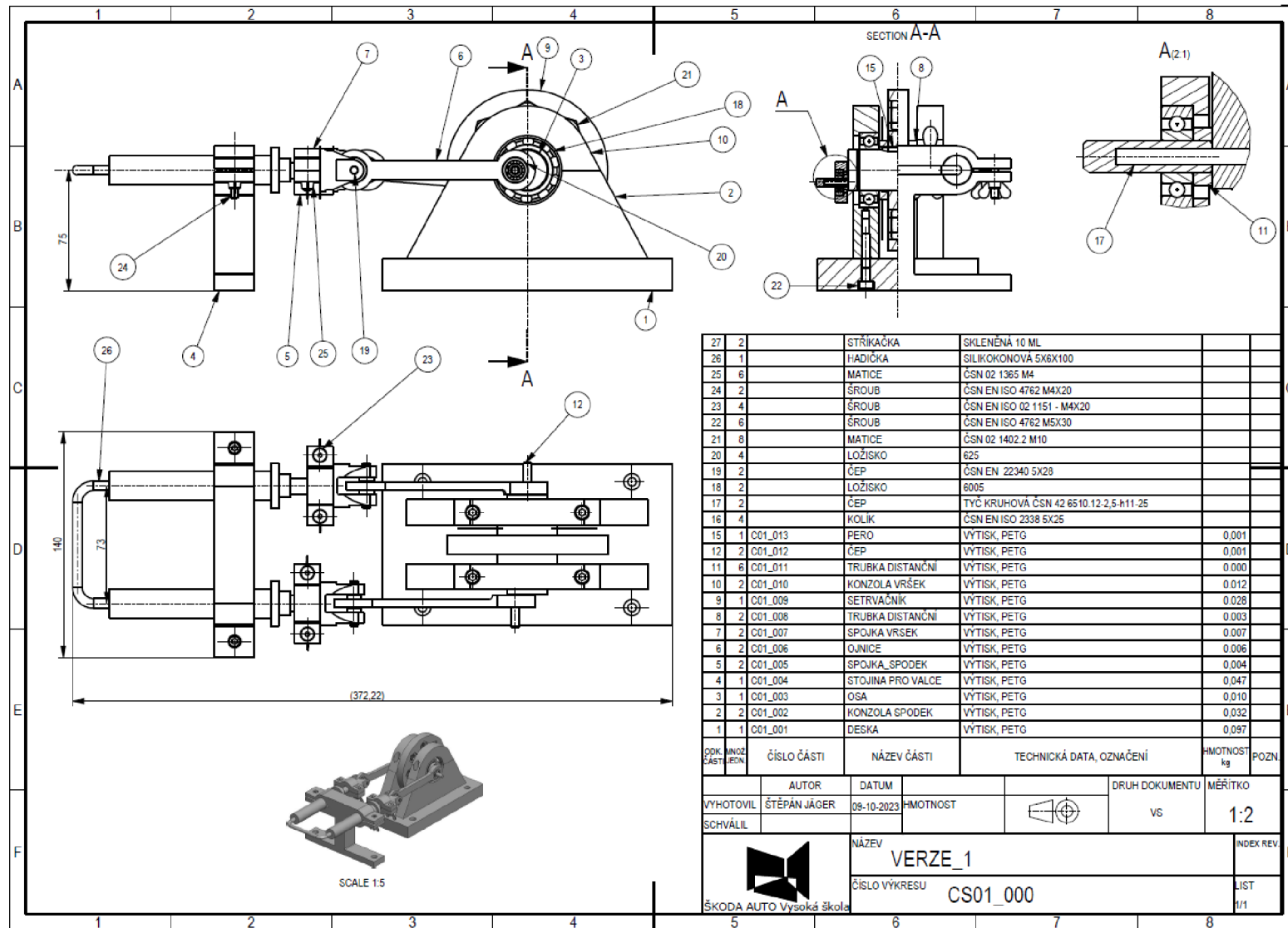
Seznam obrázků

Obr. 1 Klikový mechanismus	10
Obr. 2 Rombický mechanismus.....	11
Obr. 3 Mechanismus se skloněnou deskou.....	12
Obr. 4 Rossův mechanismus	12
Obr. 5 Ringbomův mechanismus	13
Obr. 6 Průběh pracovního procesu Stirlingova motoru.....	15
Obr. 8 Konfigurace alfa	17
Obr. 9 Konfigurace beta	17
Obr. 10 Konfigurace gamma	18
Obr. 11 Mapa vhodných lokalit pro vybudování solární elektrárny	20
Obr. 12 Zrcadlo sluneční elektrárny	21
Obr. 13 Princip využití Stirlingova motoru v rámci solární energie	21
Obr. 14 3D model konfigurace alfa.....	23
Obr. 15 Provedení konfigurace alfa ze starého přehrávače	24
Obr. 16 Foto verze 1	28
Obr. 17 Model verze 1	28
Obr. 18 Foto verze 2	30
Obr. 19 Model verze 2.....	30
Obr. 20 Úhlové zpoždění.....	31
Obr. 21 Foto verze 3	32
Obr. 22 Model verze 3.....	32

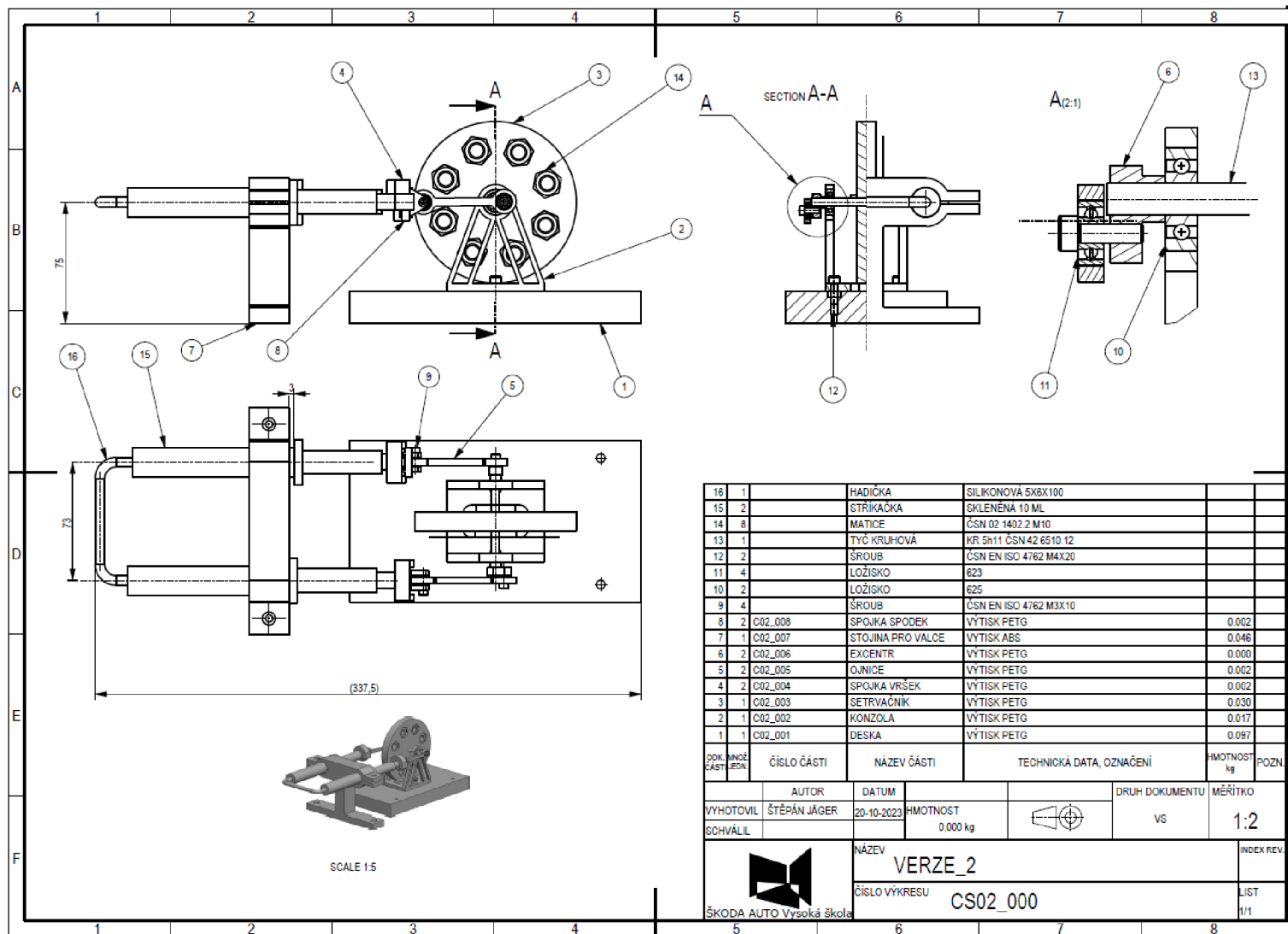
Seznam příloh

Příloha 1 Výkres verze 1	39
Příloha 2 Výkres verze 2	40
Příloha 3 Výkres verze 3	41

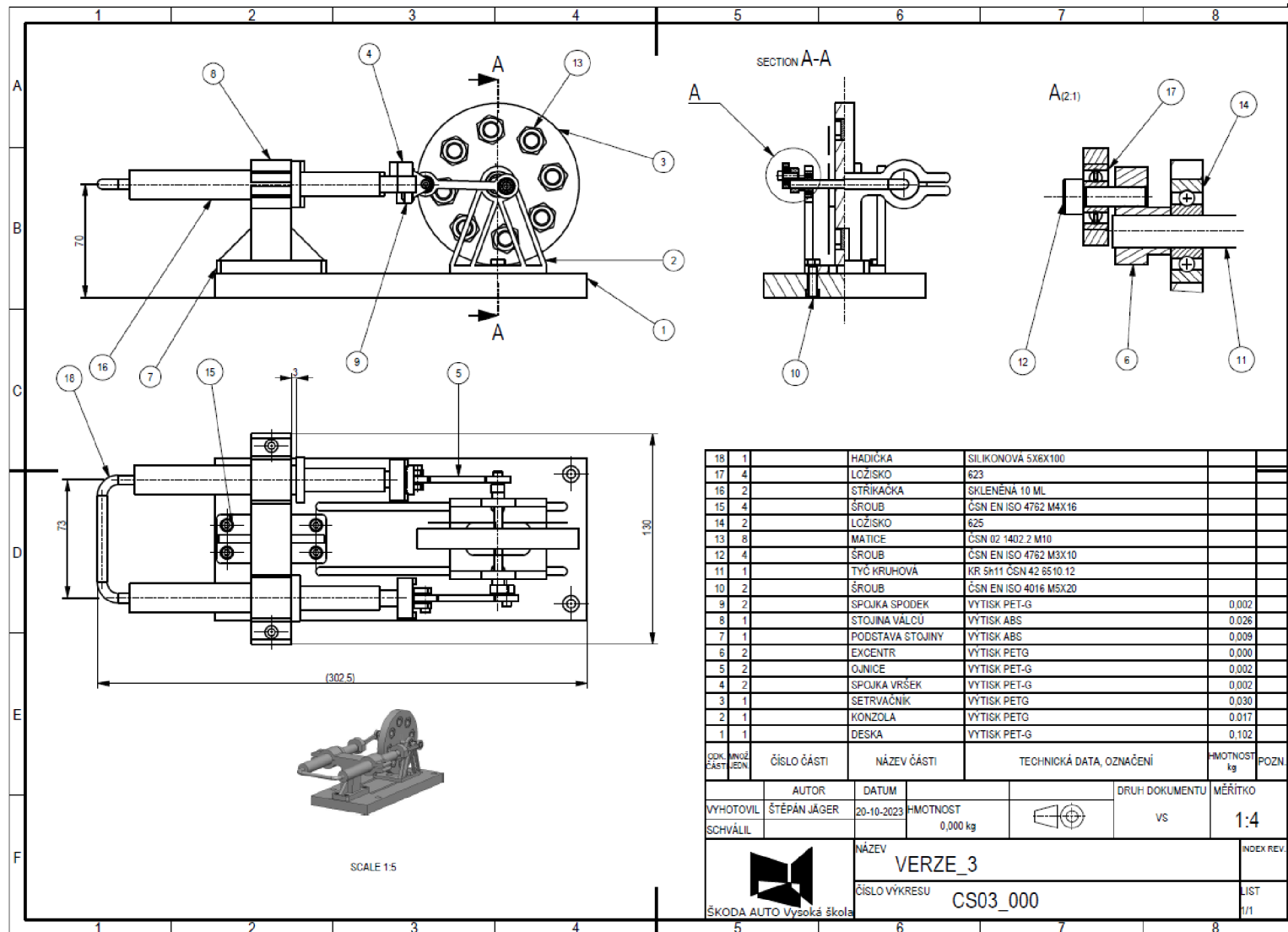
Příloha 1 Výkres verze 1



Příloha 2 Výkres verze 2



Příloha 3 Výkres verze 3



ANOTAČNÍ ZÁZNAM

AUTOR	Štěpán Jäger		
STUDIJNÍ PROGRAM/OBOR/SPECIALIZACE	Průmyslový management		
NÁZEV PRÁCE	Výukový model Stirlingova motoru		
VEDOUcí PRÁCE	Ing. František Starý		
KATEDRA	KSE - Katedra strojírenství a elektrotechniky	ROK ODEVZDÁNÍ	2023
POČET STRAN	43		
POČET OBRÁZKŮ	22		
POČET TABULEK	0		
POČET PŘÍLOH	3		
STRUČNÝ POPIS	<p>Práce se v teoretické části zabývá popisem funkce Stirlingova motoru a jeho současnými aplikacemi. V praktické části je provedena rešerše řešení dostupných na internetu a jejich vyhodnocení. Dále je navrhnout a vyroben model pomocí 3D tiskárny. V závěru práce je ekonomické zhodnocení verze 3 a návrhy k jejímu zlepšení.</p>		
KLÍČOVÁ SLOVA	Stirlingův motor, 3D tisk, konfigurace Stirlingova motoru.		

ANNOTATION

AUTHOR	Štěpán Jäger		
FIELD	Industrial management		
THESIS TITLE	Educational model of a Stirling engine		
SUPERVISOR	Ing. František Starý		
DEPARTMENT	KSE - Department of Mechanical and Electrical Engineering	YEAR	2023
NUMBER OF PAGES	43		
NUMBER OF PICTURES	22		
NUMBER OF TABLES	0		
NUMBER OF APPENDICES	3		
SUMMARY	<p>The theoretical part of the thesis deals with the description of the Stirling engine function and its current applications. In the practical part, research of solutions available on the Internet and their evaluation is carried out. Furthermore, a model is designed and fabricated using a 3D printer. In the conclusion is an economic evaluation of version 3 and suggestions for its further improvement.</p>		
KEY WORDS	Stirling engine, 3D printing, Stirling's engine configurations.		