

# Modifikacija Stirling motora

---

**Burić, Mario**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:700586>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**MODIFIKACIJA STIRLINGOVOG MOTORA**

Mentor: izv. Prof. dr. sc. Tomislav Senčić

Mario Burić

Rijeka, rujan 2022.

0035215020

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
**POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE**

Rijeka, 16. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**  
Predmet: **Toplinski strojevi i uređaji**  
Grana: **2.11.02 procesno energetska strojarstvo**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Mario Burić (0035215020)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Modifikacija Stirling motora/ Modification of a Stirling engine**

### Opis zadatka:

U uvodnom dijelu općenito opisati karakteristike Stirling motora kao što su: koncepcija (alfa, beta, gama, linearni), radni medij, tlak, sustav podmazivanja. Izraditi termodinamički proračun i dijagnosticirati postojeći Stirling motor. Potrebno je ispraviti nedostatke postojećeg Stirling motora. Izraditi proračun zamašnjaka. Izraditi sklopni nacrt i radioničke nacрте unaprijeđenih dijelova. Izraditi novi zamašnjak.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Burić*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

*T. Senčić*

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Senčić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

*K. Lenić*

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## **IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA**

Izjavljujem da je ovaj završni rad rezultat mojeg samostalnog rada pri čemu su sva korištena literatura i izvori navedeni u popisu literature.

Mario Burić

Rijeka, rujan 2022.

---

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Tomislavu Senčiću na povjerenju, vodstvu i korisnim savjetima prilikom izrade ovog rada. Isto tako se zahvaljujem i gospodinu Ivici Jagiću iz tvrtke IG ALATI d.o.o. na donaciji materijala i izradi potrebnih dijelova. Na kraju, zahvaljujem se još svojoj cijeloj obitelji, a posebno roditeljima koji su bili strpljivi i pružali mi podršku te razumijevanje tokom studija.

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. POVIJEST .....	2
2.1. Povijest motora na vrući zrak .....	2
2.2. Razvoj Stirlingova motora .....	3
2.3. Dizajn Stirlingovog motora .....	5
3. GLAVNI DIJELOVI STIRLING MOTORA .....	6
4. NAČIN RADA .....	8
5. PREDNOSTI I NEDOSTACI .....	10
5.1. Prednosti .....	10
5.2. Nedostaci .....	11
6. PODJELA STIRLINGOVOG MOTORA .....	12
6.1. Alfa .....	12
6.2. Beta .....	15
6.3. Gama .....	18
6.4. Ostale izvedbe .....	21
7. DIJAGNOSTIKA POSTOJEĆEG MOTORA .....	22
7.1. Zamašnjak .....	25
7.2. Kinetička energija pohranjena u zamašnjaku .....	30
8. IZRADA NOVIH DIJELOVA I MONTAŽA .....	37
9. ZAKLJUČAK .....	38
10. LITERATURA .....	40
11. SAŽETAK .....	43
12. SUMMARY .....	44
13. PRILOZI .....	45

## 1. UVOD

Još od davne povijesti ljudi su koristili razne strojeve koji su pomagali izvršavati svakodnevne poslove pretvaranjem jednog oblika energije u drugi. U vrijeme antike upotrebljava se energija vode a od 9. st. i energija vjetra. Velik napredak javlja se pod kraj 18. st. kad nastaje prva inačica parnog stroja. To je bila velika prekretnica jer više bili ovisni o prirodnim izvorima energije.

1816. braća Stirling patentiraju motor koji ima nekoliko prednosti i razlika u odnosu na tad često korišten parni stroj. Koristi zatvoreni kružni proces i vanjsko dovođenje topline. Za radni medij se obično radi jednostavnosti upotrebljava zrak. Dovođenje topline je kontinuirano a omogućuje korištenje širokog raspona energenata. Mogu poslužiti razna goriva u svim agregatnim stanjima, toplina oslobođena kemijskim reakcijama, toplinska energija dobivena obnovljivim izvorima i slično.

Iako ima neke prednosti u odnosu na ostale toplinske strojeve i velik potencijal, ova vrsta motora od pojave motora na unutrašnje izgaranje pa do danas nije imala značajniju primjenu. Slika 1.1 prikazuje najraniji poznati model Stirling motora koji se čuva u nacionalnom muzeju Škotske. To je jedan od samo dva primjerka koja funkcioniraju a da ih je izradio Robert Stirling. [1]



*Slika 1.1 Najstariji model Stirlingova motora [2]*

## 2. POVIJEST

### 2.1. Povijest motora na vrući zrak

Nakon uspješnog korištenja vode i vjetra za dobivanje korisnog rada, došao je red i na vatru. Ideja korištenje zagrijanog zraka za dobivanje pokretačke snage je vrlo stara. Takvi pokušaji doveli su do nekoliko različitih pristupa.

Jedan od ranijih pokušaja bio je korištenje komprimiranog zraka u spremnicima. Problem tog pristupa, danas očit ali u prošlosti nepoznat, bio je u činjenici da će maksimalan dobiveni rad biti jednak, tj. u realnom slučaju zbog trenja i ostalih gubitaka manji od uloženog. Drugi pristup temeljio se na ideji sa dva spremnika. Spremnici su bili povezani cilindrima u kojim su klipovi naizmjeničnim gibanjem davali rad.

Konstrukcijom uređaja, čiji je radni medij zrak koji se zbog promjene temperature širi i skuplja, nastaje motor na zrak. Povijest strojeva koji rade na tom principu datira davne 1699. godine. To je godina kad francuski fizičar i izumitelj Guillaume Amontons predstavlja svijetu svoj izum kojeg naziva fire mill. [1]

Korištenjem znanja o ponašanju zraka koji se zagrijava, uspješno prevodi teoriju u praksu izradom rotacijskog toplinskog stroja. Ovaj stroj pokrenuo je revoluciju i postavio temelj razvoja svim uređajima koji pretvaranjem toplinske energije u mehanički daju koristan rad. Unatoč velikom izumu, Amontons se ne smatra izumiteljem motora na vrući zrak, zbog toga što njegov motor nije imao klip. Ta čast pripada Robertu Stirlingu koji 1816. patentira prvi klipni motor na vrući zrak.[1]



## 2.2. Razvoj Stirlingova motora

Nakon patenta 1818. godine pod brojem 4081 počinje brz rast u potražnji. Do kraja stoljeća izgrađeno je mnoštvo modela u svakakvim oblicima i veličinama. U doba parnog stroja postaju popularni zbog mnoštva dobri strana.

Bili su sigurni, lako se njima upravljalo, gotovo nečujni a radili na sve vrste goriva. U usporedbi sa parnim strojem su bili čišći i efikasniji. Izumom motora na unutrašnje izgaranje dolazi do naglog pada u korištenju.

Ponovni interes za ove motore javlja se 1917. godine kad tvrtka u Nizozemskoj nastavlja razvoj u svrhu korištenja kao generator za radio i slične uređaje. Ključ ponovnog uzrasta su bili novi materijali i bolje znanje o termodinamičkom procesu. Taj napredak omogućuje izradu motora koji postižu specifičnu snagu od čak do 30 puta veću od one starijih modela. Polagani razvoj nastavlja se do danas. [3]

Neke od primjena u današnje vrijeme su:

- pogon podmornica
- pumpe za razne fluide
- proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora
- kogeneracijska postrojenja

Mogućnosti su široke, od upotrebe sunčevih zraka koje se koncentriraju pomoću zrcala i usmjeruju u grijač (slika 2.2.1) pa do korištenja topline termalnih izvora.



*Slika 2.2.1 Korištenje sunčeve energije kao izvor topline [4]*

Dobar primjer ove nevjerojatne fleksibilnosti su manji primjerci Stirlingovih motora, prikazano na slici 2.2.2, koji mogu raditi s izvorom topline kao što je topla voda ali i pomoću zaleđene vode.

U ovom slučaju gdje se koristi led, okolina preuzima ulogu izvora topline, a led ulogu hladnog spremnika. Pošto postoji razlika u temperaturi između spremnika, postoji i potencijal za kružni proces kojim se dobiva rad. Takvom zamjenom spremnika topline dolazi do promjene smjera vrtnje. [5]



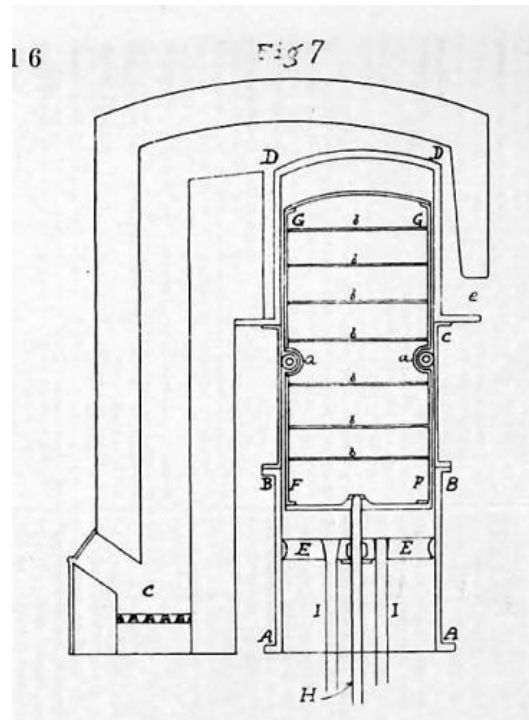
**LED**



**TOPLA VODA**

*Slika 2.2.2 Okretanje Stirlingovog motora u različitim smjerovima [5]*

### 2.3. Dizajn Stirlingovog motora

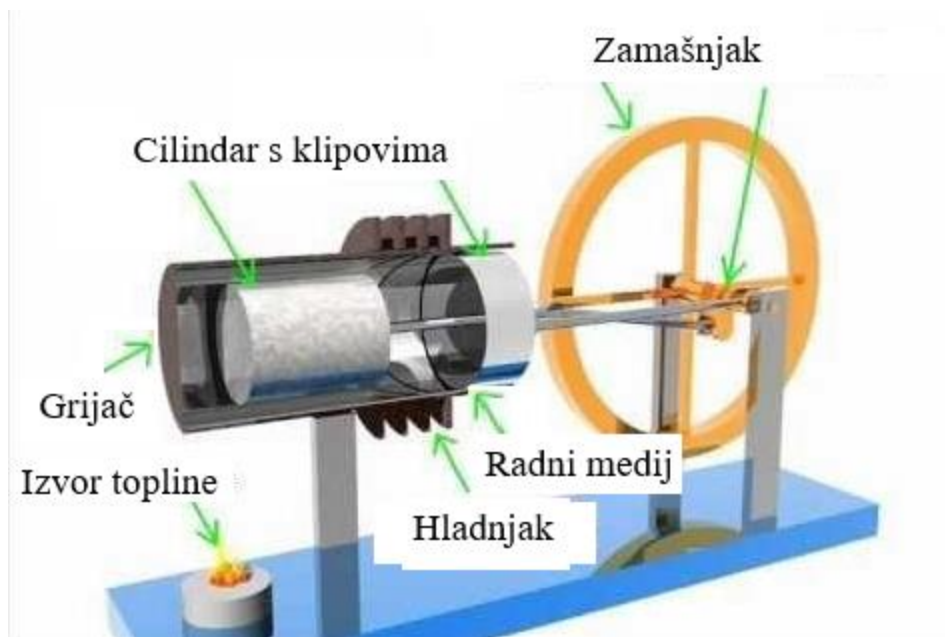


Slika 2.3.1 Skica cilindra [6]

Slika 2.3.1 prikazuje dizajn cilindra i njegovih popratnih dijelova koje je Robert Stirling smatrao najoptimalnijim. Cilindar se sastoji od tri dijela precizno spojenih zakovicama ili vijcima tako da ostvaruju hermetički spoj ostvaren čekićem ili lemljenjem. Dio sa slike označen AB napravljen je od lijevanog željeza koje je precizno bušeno. BC se radi od lima ili lijevanog željeza čim manje moguće debljine stijenke. Treći dio, na slici označen CD, se također može napraviti od lima ili lijevanog željeza koje ovaj puta ne mora biti tanko. [6]

U cilindar je ugrađen klip EE čiji spoj mora biti zabrtvljen. Oznaka FFGG odnosi se na šuplji cilindar kojeg zovemo potiskivač a izrađuje se od željeznog lima presvučenog srebrom ili mjedi čime se smanjuju gubitci zračenja. Zbog istog razloga cilindar je podijeljen na više manjih odjeljaka odvojenih pločama označenim slovom b. Potiskivač je napravljen nešto manjih dimenzija nego vanjski cilindar od kojeg je odvojen pomoću kotačića označenih slovom a na slici. I i H su oznake za spojnice kojima su klip i šuplji cilindar povezani na zamašnjak. [6]

### 3. GLAVNI DIJELOVI STIRLING MOTORA



Slika 3.1 Dijelovi Stirling motora [7]

1. Izvor topline
2. Hladnjak
3. Grijlač
4. Regenerator
5. Radni medij
6. Zamašnjak
7. Cilindar s klipovima
8. Podmazivanje

1) Izvor topline - Vanjsko izgaranje omogućuje upotrebu širokog spektra različitih vrsta goriva. Od krutih kao što su drvo i ugljen, svih derivata nafte i plina pa do mogućnosti korištenja otpadne topline i topline iz obnovljivih izvora. Danas se istražuje mogućnost upotrebe Stirlingovih motora koji pretvaranjem energije obnovljivih izvora dobivaju rad.

2) Hladnjak - izmjenjivač topline koji služi za brzu i efikasnu razmjenu topline sa okolinom. Često dizajniran sa velikom površinom i mnoštvom rebara koja osiguravaju brz prolaz topline. Slika 3.1 prikazuje primjer više-rebrenog hladnjaka u poprečnom presjeku.

3) Grijač - ima zadaću suprotnu od one hladnjaka. Preuzetu toplinu iz nekog vanjskog izvora predaje radnom mediju.

4) Regenerator - nije nužan no povećava efikasnost. Nalazi između grijača i hladnjaka. Uloga mu je oduzeti radnom mediju višak topline kad prolazi iz toplog prema hladnom dijelu cilindra i vraćati tu uskladištenu energiju radnom mediju kad se vraća u drugom smjeru.

5) Radni medij - činjenica da nema izmjene radnog medija sa okolinom daje inženjerima širok spektar mogućnosti u izboru. U manjim modelima korištenim samo za pokazivanje principa rada Stirlingovog motora obično se koristi običan zrak. Za strojeve koji obavljaju rad poželjno je koristiti plin niskog toplinskog kapaciteta koji će za jednako primljenu toplinu ostvariti veću promjenu tlaka. Iz tog razloga, helij sa svojim niskim toplinskim kapacitetom je je logičan izbor. Vodik je povoljan zbog niske viskoznosti i visoke toplinske provodljivosti. Kisik se može navesti kao loš izbor jer pri povišenom tlaku u kontaktu sa uljem za podmazivanje može izazvati eksploziju.

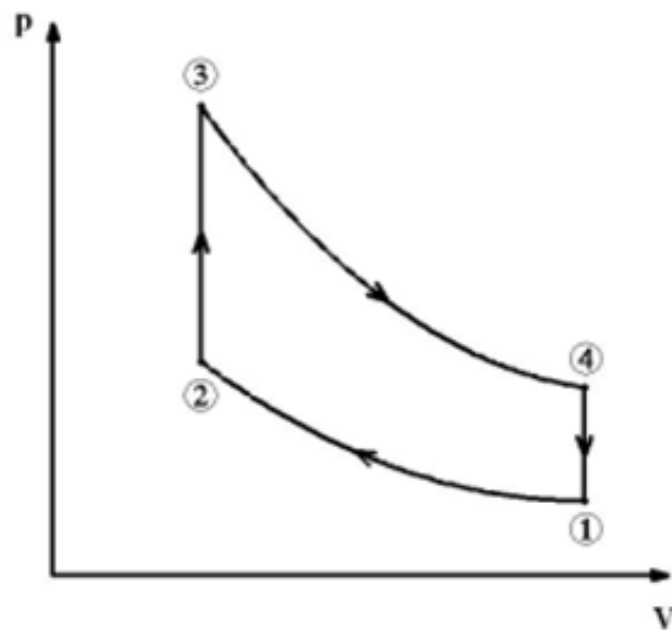
6) Zamašnjak - kotač koji svojom inercijom skladišti energiju prilikom ekspanzije i vraća dio prilikom kompresije. Objašnjenje načina funkcioniranja, izbora i proračun mogu se vidjeti u poglavlju 7.2

7) Cilindri s klipovima - osnovni dio svakom motora. Radni klip preuzima energiju ekspanzirajućeg medija koju predaje zamašnjaku a potiskivač služi za pomicanje toplog radnog medija na hladnu stranu cilindra. Cilindar je komora koja omogućava zatvaranje radnog medija sprečavajući izmjenu sa okolinom.

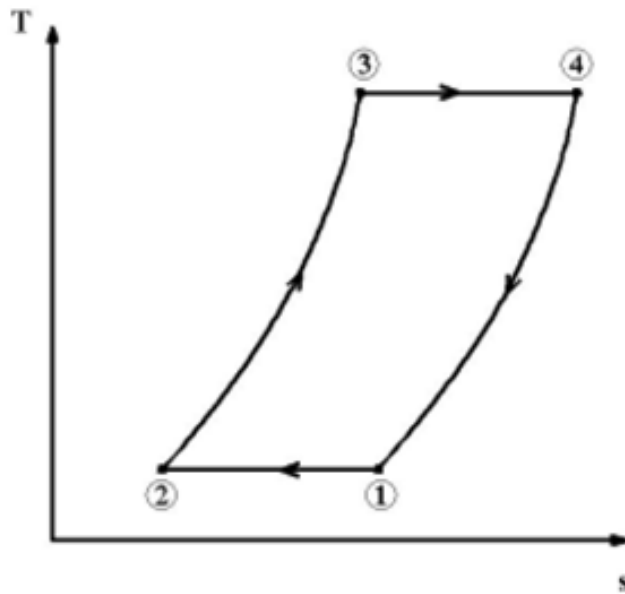
8) Podmazivanje – Kod motora koji postižu visoke kompresijske omjere i rade pri visokim temperaturama treba biti oprezan pri odabiru podmazivanja. Zbog mogućnosti prodiranja ulja u unutrašnjost motora koja će imati radni fluid pri visokoj temperaturi dolazi do opasnosti od samozapaljenja i eksplozije. Zbog toga se za podmazivanje često koriste spojevi bazirani na silikonu ili se koriste dijelovi sa karakteristikama samopodmazivanja kao što je grafit.

## 4. NAČIN RADA

Rad Stirlingovog motora opisuje se idealnim Stirlingovim termodinamičkim kružnim procesom. Karakteriziraju ga izotermna kompresija i ekspanzija i izmjena topline pri konstantnom volumenu. Radni medij je zatvoren u motor čime se sprečava izmjena sa okolinom. Proces je reverzibilan što znači da se rad može dobivati uz dovođenje topline ili se može trošiti za grijanje, tj. hlađenje. Slikama 4.1 i 4.2 pokazan je Stirlingov kružni proces u  $p$ - $V$  i  $T$ - $s$  dijagramu. Ukratko, da bi Stirlingov proces mogao funkcionirati, potrebno je zadovoljiti drugi zakon termodinamike koji govori da bez dva spremnika topline različitih temperatura pretvorba toplinske energije u rad nije moguća.



Slika 4.1 P-V dijagram Stirlingovog procesa [8]



Slika 4.2 T - s dijagram Stirlingovog procesa [8]

Iz dijagrama na slikama vidljivo je da se kružni proces može podijeliti na 4 dijela: [9]

- 1-2 Izotermna kompresija – Na početku procesa sav radni medij se nalazi u hladnom dijelu motora. Predajom topline hladnom spremniku radnom sredstvu se smanjuje volumen
- 2-3 Izohorno grijanje - U proces se dovodi toplina čime se radnom mediju povećava temperatura uz konstantan tlak
- 3-4 Izotermna ekspanzija - Toplina se i dalje predaje radnom mediju pri čemu on ekspanrira uz konstantnu temperaturu
- 4-1 Izohorno hlađenje – Radni medij toplinu predaje hladnom spremniku uz konstantan volumen čime se ponovno dolazi u stanje 1. pa se kružni ciklus može nastaviti.

## 5. PREDNOSTI I NEDOSTACI

### 5.1. Prednosti [10] [11]

- Tihi rad
- Izvor topline: Vanjsko izgaranje omogućuje širok raspon upotrebljivog goriva. Može raditi na gotovo svaki izvor energije. Izgaranju drva, ugljena i naftnih derivata, može koristiti obnovljive izvore topline kao što je sunce, geotermalnu energiju i ostale oblike otpadne energije.
- Može koristiti više različiti izvora topline istovremeno
- Kontinuirano dovođenje topline
- Jednostavnost dizajna – nema izmjene radnog medija što smanjuje broj potrebnih dijelova. Jednostavna ali pouzdana tehnologija bez kompliciranih mehanizama omogućuje rad uz minimalna održavanja.
- Duži vijek trajanja od klasičnih motora sa unutrašnjim izgaranjem.
- Mogu biti vrlo efikasni (do 50%)
- Ekološki prihvatljiv zbog velikog raspona izvora topline.
- Fleksibilnost uporabe zbog svoje reverzibilnosti koja omogućuje korištenje istog stroja za hlađenje i grijanje.
- Veliki izbor radnog medija
- Mogućnost rada pri mali temperaturnim razlikama
- Manja opasnost od eksplozije



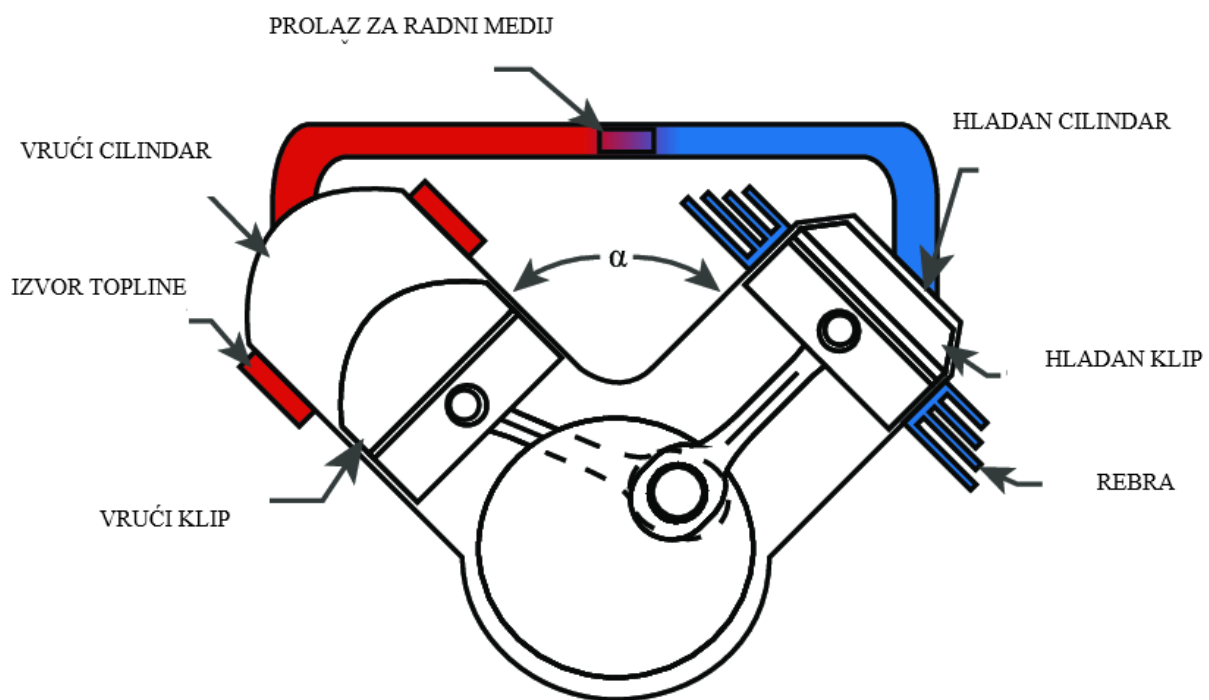
## 5.2. Nedostaci [10] [11]

- Visoka početna cijena u usporedbi sa drugim motorima
- Mali omjer snage i mase što za potrebe jačih izvedbi znači masivnu konstrukciju
- Mala snaga limitira upotrebu
- Nefleksibilnost pri promjeni snage koja je spora i teško ostvariva što kod primjene u vozilima predstavlja velik problem.
- Sporo hladno pokretanje, potreba prethodnog zagrijavanja
- Problemi brtvljenja kod korištenja radnog medija pod povišenim tlakom
- Izbor materijala koji neće utjecati na efikasnost pri povišenim temperaturama
- Problem korozije dijelova izloženih visokim temperaturama
- Ne radi dobro na većim nadmorskim visinama
- Zahtijeva preciznu izradu
- Čest problem manjih izvedbi je savladavanje trenja

## 6. PODJELA STIRLINGOVOG MOTORA

### 6.1. Alfa

Ova izvedba motora sastoji se od dva odvojena cilindra koji su povezani uskim prolazom u kojem se nalazi regenerator. Radni klipovi su zajedno spojeni na zamašnjak kao što je prikazano na slici 6.1.1. [12]



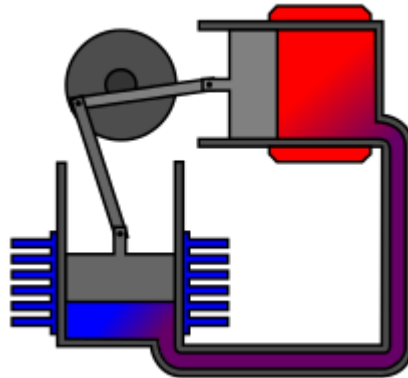
Slika 6.1.1 Alfa tip Stirlingovog motora [13]

Krasi ga jednostavnost i visok omjer snage i mase dok je glavni nedostatak problem brtvljenja oba cilindra.

Način rada: [12]

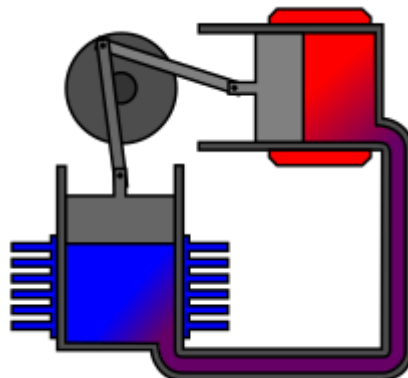
1) Slika 6.1.2 prikazuje topli i hladni klip u početnom položaju. Većina volumena radnog medija nalazi se u toplom cilindru. To znači veliku površinu dodira što rezultira zagrijavanjem i povećanjem tlaka. Povećanjem tlaka dolazi do širenja volumena. Topli cilindar je u gornjem

položaju što znači da nema više prostora za pomak a hladni je u položaju gdje mu je volumen minimalan. Zbog toga radni medij ekspandira i gura hladni klip.



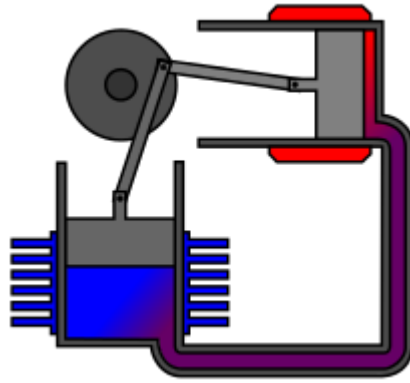
Slika 6.1.2 Zagrijavanje alfa Stirling motora [12]

2) Volumen motora je maksimalan, a radni medij velikom površinom u kontaktu sa hladnom stranom motora. To dovodi do smanjenja tlaka i hlađenja. Zamašnjak svojom inercijom gura topli klip prema donjoj mrtvoj točki prikazano slikom 6.1.3.



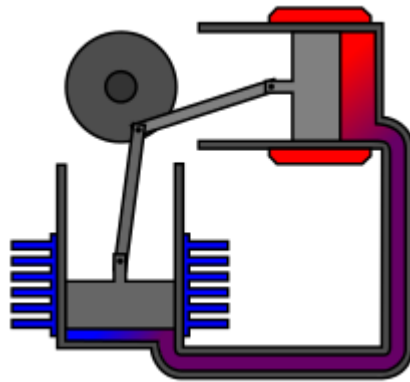
Slika 6.1.3 Ekspanzija alfa Stirling motora [12]

3) U ovom položaju volumen toplog klipa je minimalan a hladni klip nastavlja hlađenje radnog medija. Daljnjim padom temperature pada i tlak što dovodi do smanjenja volumena hladnog cilindra kojeg zamašnjak potiskuje. Prikazano na slici 6.1.4.



Slika 6.1.4 Hlađenje alfa Stirling motora [12]

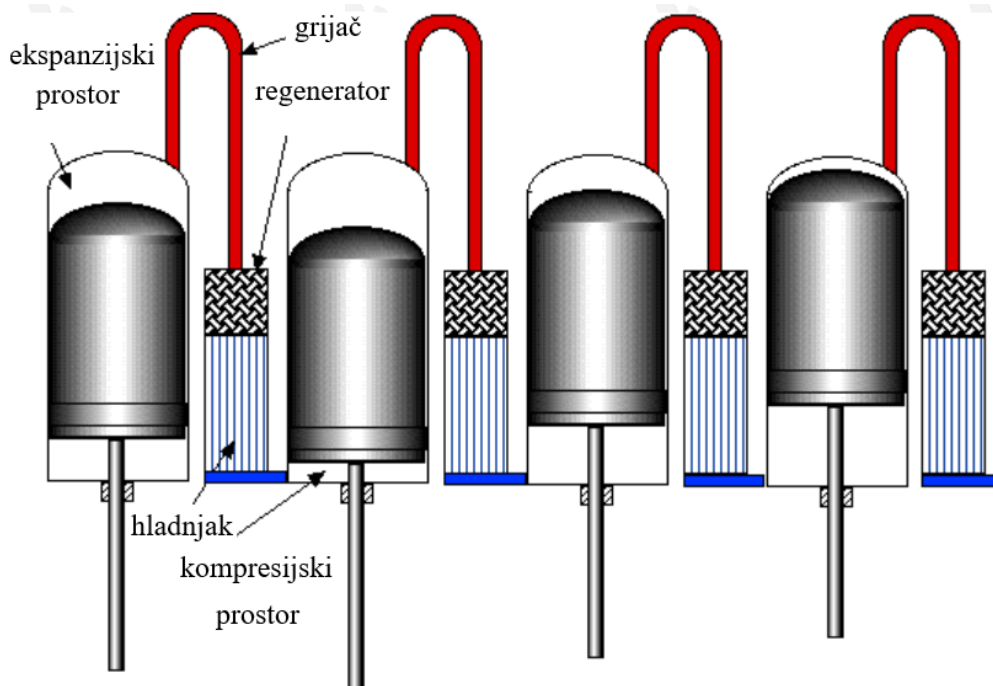
4) Slika 6.1.5. prikazuje stanje gdje je volumen motora minimalan a većina radnog medija nalazi se u toplom cilindru. To dovodi do zagrijavanja i ekspanzije



Slika 6.1.5 Kompresija alfa Stirling motora [12]

Time je dovršen jedan ciklus. U slučaju da je potrebno dobiti rotaciju u suprotnom smjeru potrebno je samo zamijeniti mjesto dovođenja i odvođenja topline.

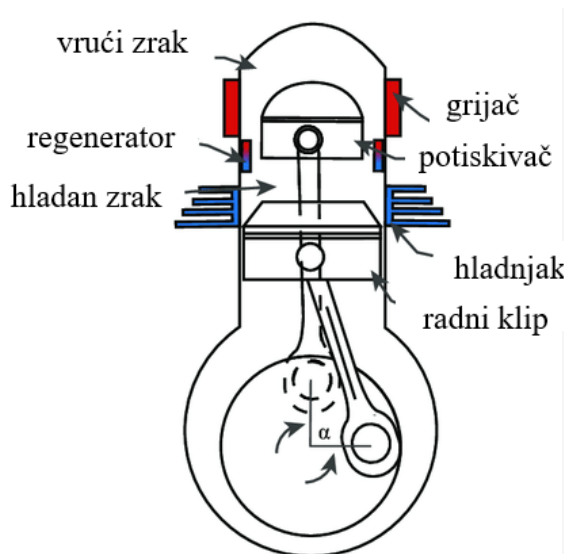
Ova vrsta konfiguracije omogućuje upotrebu više od jednog kompleta cilindra u jednom spoju kao što je prikazano na slici 6.1.6. čime se postiže visoka specifična snaga.



Slika 6.1.6 Serijski spoj alfa Stirling motora [12]

## 6.2. Beta

Za razliku od alfa tipa, ova izvedba koristi samo jedan cilindar sa toplim i hladnim krajem prikazano na slici 6.2.1. Zrak se pomoću potiskivača prenosi između toplog i hladnog dijela cilindra. [14]

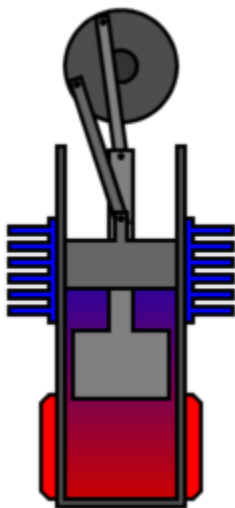


Slika 6.2.1 Prikaz beta Stirling motora [15]

Karakteristike su mu duži vijek trajanja i ograničen hod radnog klipa zbog veličine potiskivača.

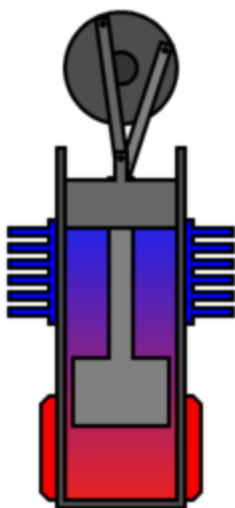
Način rada: [15]

1) U početnom položaju pokazanom slikom 6.2.2 radni klip je komprimirao radni medij a potiskivač je u položaju koji omogućuje zagrijavanje maksimalnog volumena na vrućem kraju cilindra.



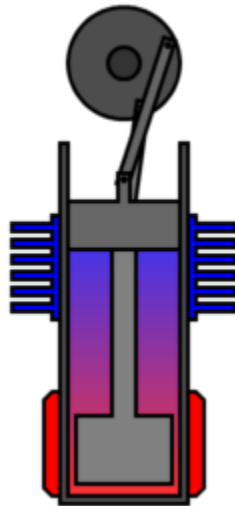
Slika 6.2.2 Zagrijavanje beta Stirling motora [14]

2) Povišeni tlak uzrokovan zagrijavanjem gura radni klip u najviši položaj. Potiskivač se giba prema toplom kraju prikazano slikom 6.2.3.



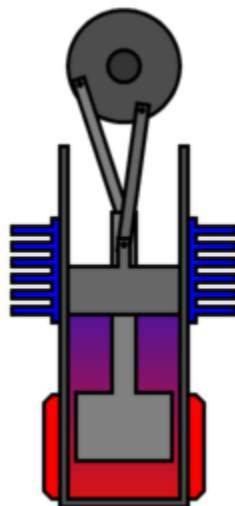
Slika 6.2.3 Ekspanzija beta Stirling motora [14]

3) Slika 6.2.4. prikazuje potiskivač koji tjera zrak sa vrućeg kraja cilindra prema hladnom.



Slika 6.2.4 Hlađenje beta Stirling motora [14]

4) Hlađenjem pada tlak radnog medija koji je velikom površinom u dodiru sa hladnim dijelom motora. Usljed pada tlaka dolazi do smanjenja volumena prikazano slikom 6.2.5. Istovremeno zamašnjak koristi dio energije koju je pohranio za kompresiju radnog medija.

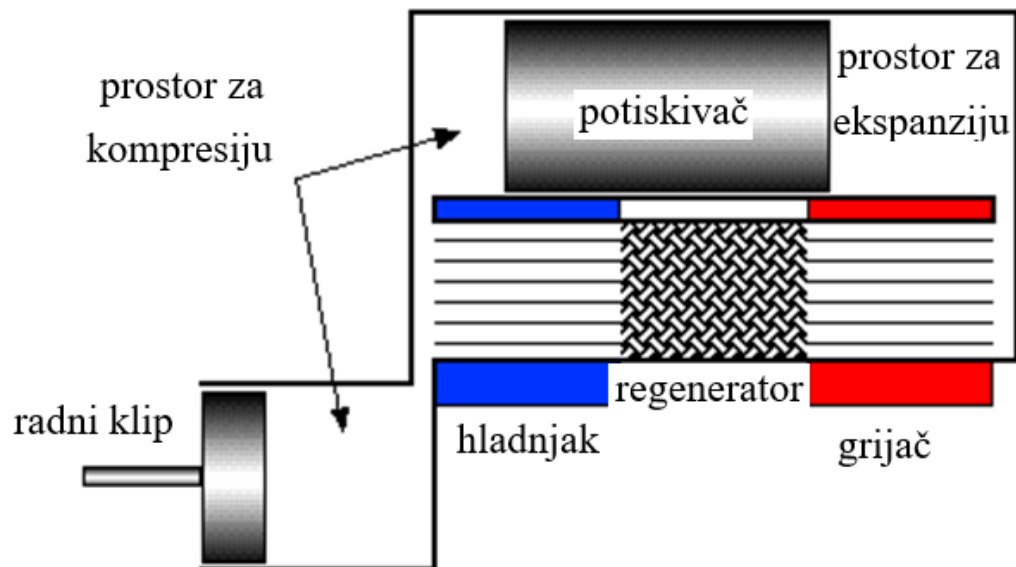


Slika 6.2.5 Kompresija beta Stirling motora [14]

Ovim je završen jedna ciklus u kojem vrući radni medij ekspandira i predaje energiju zamašnjaku. Kasnije taj zamašnjak koristi dio energije za kompresiju . Razlika u uloženoj i predanoj energije daje višak koji se u zamašnjaku pohranjuje i daje mogućnost za pretvorbu u koristan rad.

### 6.3. Gama

Gama konfiguracija koristi dva odvojena cilindra kao i alfa tip, no razlikuje se po tome što od dva klipa, jedan nije zabrtvljen u cilindru a zove se potiskivač. To je karakteristika kao i u beta vrsti motora. Ono što se razlikuje od bete je to što se u ovom slučaju potiskivač i radni klip nalaze u odvojenim cilindrima prikazano na slici 6.3.1.



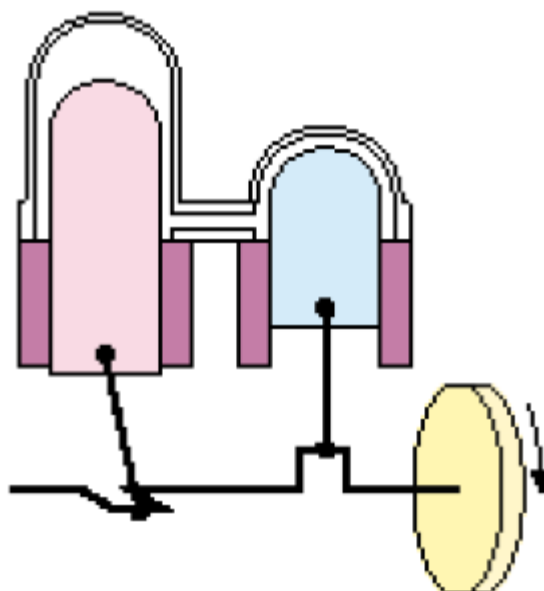
Slika 6.3.1 Prikaz gama Stirling motora [16]

Zbog radnog klipa i potiskivača koji se nalaze u odvojenim cilindrima radni hod mu nije ograničen kao u beta konfiguraciji.

Način rada: [16]

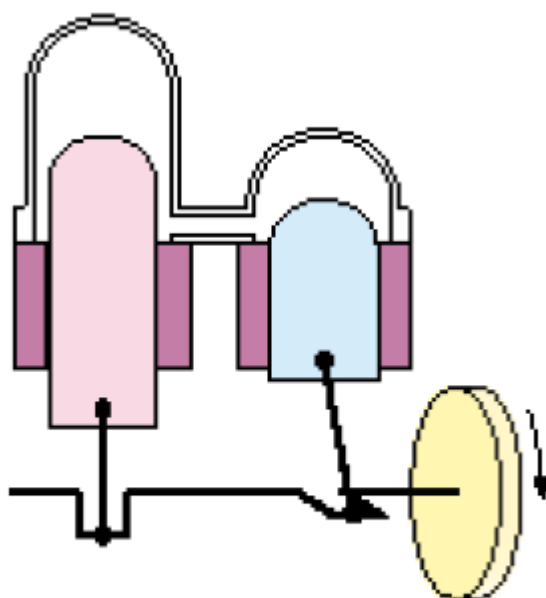
1) Zagrijavanje – Tijekom prvih 90° rotacije potiskivač se giba prema vrhu vrućeg dijela cilindra dok se radni klip giba prema donjoj točki hladnog cilindra. Radni medij se prebacuje sa hladnog u vrući prostor. Tlak se poveća. Prva faza rada prikazana je slikom 6.3.2





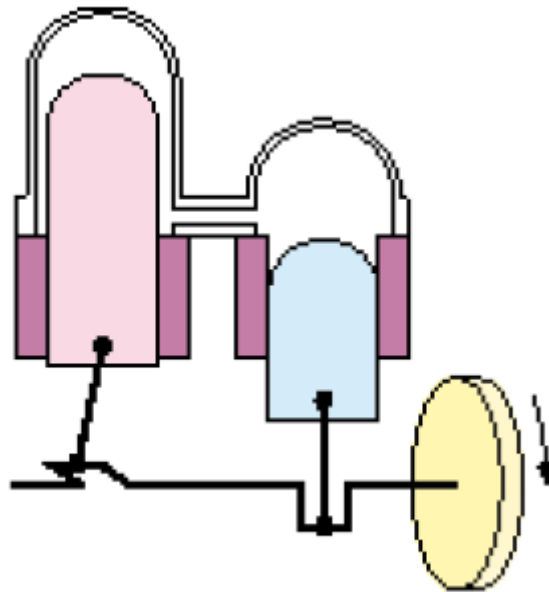
Slika 6.3.2 Zagrijavanje gama Stirling motora [17]

2) Ekspanzija - Tijekom sljedećih  $90^\circ$  rotacije zbog povećanja tlaka radni klip i potiskivač se gibaju prema donjoj mrtvoj točki. Ovo je dio ciklusa u kojem motor predaje rad zamašnjaku. Prikazano slikom 6.3.3.



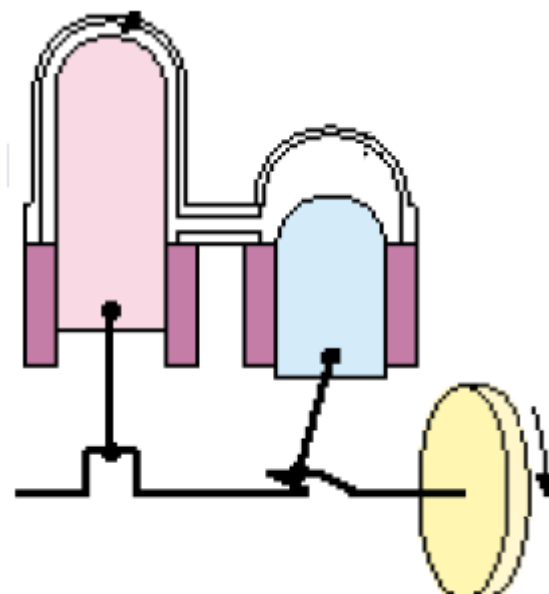
Slika 6.3.3 Ekspanzija gama Stirling motora [17]

3) Hlađenje – Tlak radnog medija pada dok se premješta sa toplog u hladni prostor. Slika 6.3.4. prikazuje položaj potiskivača i radnog klipa. Zamašnjak predaje dio energije koji je prethodno pohranio kod ekspanzije.



Slika 6.3.4 Hlađenje gama Stirling motora [17]

4) Kompresija – Radni klip pomoću energije u zamašnjaku komprimira radni medij. Položaj potiskivača i klipa prikazani slikom 6.3.5.

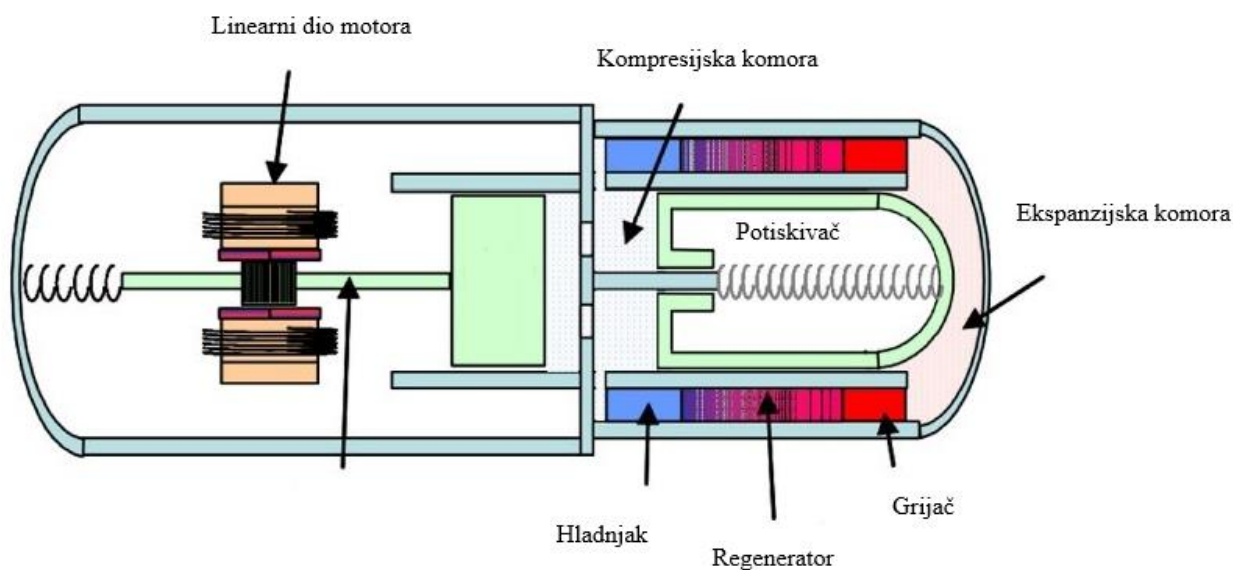


Slika 6.3.5 Kompresija gama Stirling motora [17]

Odvojenost potiskivača i klipa stvara veći volumen mrtvog prostora što rezultira manjom specifičnom snagom i učinkovitošću. Ova vrsta Stirlingovog motora najčešće je korištena za izradu modela kojima je važnija jednostavnost izrade od potencijalne snage.

#### 6.4. Ostale izvedbe

Postoji još mnoštvo različitih koncepcija a neke od zanimljivijih su: linearna, rotacijska i ravna izvedba u obliku ploče.



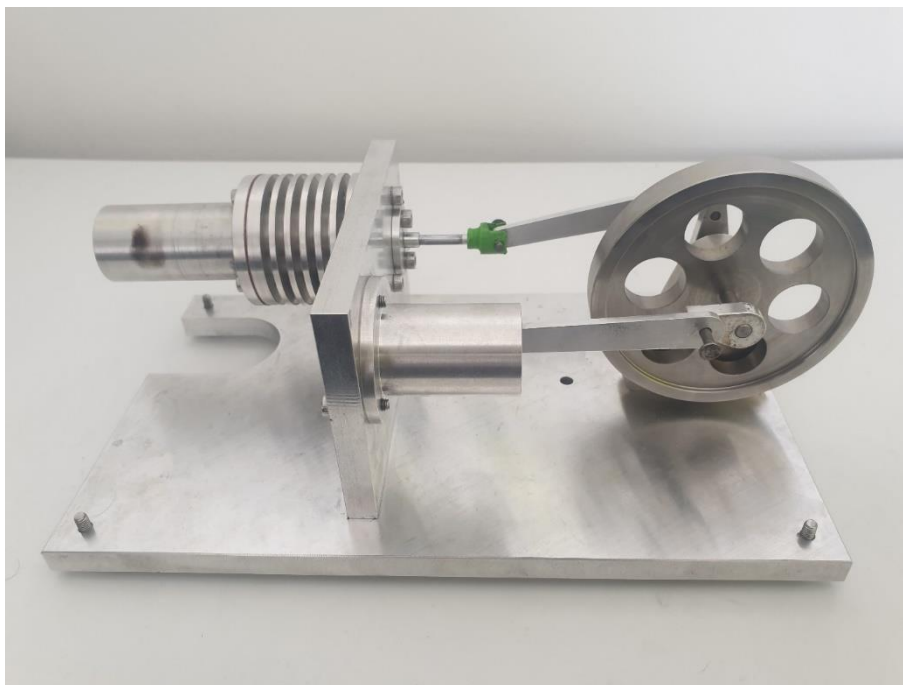
Slika 6.4.1 Linearni Stirling motor [18]

Linearni motor nastao je kao pokušaj povećanja snage u odnosu na klasične modele. Jedan od načina na koji se to može učiniti jest pokušati uvjetovati gibanje klipa i potiskivača na taj način koji bolje predstavlja idealni Stirlingov ciklus. Idealni ciklus se sastoji od izotermne kompresije i ekspanzije te izmjene toplote pri konstantnom tlaku. Ostvarivanje takvog ciklusa bi zahtijevalo nagle promjene smjera kretanja i zadržavanje klipa u jednom dijelu ciklusa. Takva izvedba je u praksi nemoguća pa se zbog toga idealno kretanje zamjenjuje onim realno izvedivim, najčešće sinusoidalnog oblika. [19]

## 7. DIJAGNOSTIKA POSTOJEĆEG MOTORA

Zadatak ovog završnog rada sastojao se od teorijskog i praktičnog dijela. U teorijskom dijelu objašnjene su općenite karakteristike Stirlingovog motora. U drugom dijelu bit će obrađen proračun stroja koji ne radi te pretpostavka kvara i način pokušaja popravka.

Stirlingov motor u pravilu ima nizak omjer snage i mase. Kod modela manjih dimenzija koji služe za prikaz načina rada to znači i vrlo malu snagu. Problemi kod takvih motora sa malom snagom su zbog toga izraženiji nego kod snažnijih modela. Čak i neka manja nesavršenost pri izradi mogu dovesti do problema koji onemogućuju rad. Da bi mogao pravilno funkcionirati pretvarajući toplinsku energiju u koristan rad, prije visokoprecizne izrade potrebnih dijelova bitno je napraviti dobar proračun.



*Slika 7.1 Prikaz stirlingovog motora*

Stirlingov motor sa slike 7.1 rezultat je zajedničke izrade proračuna i nacрта u svrhu završnog rada, tadašnjih studenata Tomislava Ploha i Michaele Novak, te njihovog mentora izv. prof. dr. sc. Tomislava Senčića i komentora izv. prof. dr. sc. Zorana Jurkovića. Motor izrađen u gama konfiguraciji napravljen je od aluminija u tvrtci Elcon Geraetebau d.o.o. Dimenzije postolja su 150mm · 250mm, dok je težina cijelog sklopa nešto manja od 2 kg. Hod radnog klipa unutar radnog cilindra je 31 mm, a konstruiran je s ciljem postizanja snage od otprilike 10 W. Maksimalni volumen mu je nešto veći od 40 cm<sup>3</sup>.

Tijek rada:

Proučavajući modele Stirlingovih motora moguće je doći do nekoliko čestih problema koji se javljaju u ovom tipu stroja a to su: [20] [21]

- Nedovoljna razlika u temperaturi
- Problemi zbog brtvljenja
- Previsoko trenje
- Greška kod proračuna ili strojne obrade

Prilikom dijagnostike kvara obično je najbolje krenuti od najlakšeg mogućeg popravka. U ovom slučaju to bi bio problem zbog razlike u temperaturi. Pošto je ovo manji model motora koji ne razvija veću snagu, za pokretanje i rad ne bi ni trebala postojati potreba za velikom razlikom temperatura između dijela cilindra gdje se dovodi toplina i hladnjaka. Unatoč spoznaji da kvar najvjerojatnije ne potječe iz ovog razloga, ova mogućnost je ipak ispitana. Modeli slične veličine obično ne zahtijevaju količinu topline veću od one koju daje jedna lučica svijeće. Stoga da bi bili sigurni, koriste se dvije lučice uz istovremeno hlađenje hladnog dijela cilindra pomoću manjeg ventilatora. Kao što je bilo i za očekivati, ova metoda nije pružila nikakvo poboljšanje pa se ova mogućnost isključuje.

Prilikom pokušaja ručnog okretanja zamašnjaka moglo se primijetiti da je sila potrebna za micanje poprilično velika. To bi moglo ukazati na jedan od dva problema. Predobro brtvljenje ili preveliko trenje. Kao i u prvom slučaju pri pokušaju popravka prvo se istražuje lakši način provjere. Stirlingov motor koristi radni medij koji je zatvoren unutar cilindra što znači da nema izmjene radnog medija s okolinom.

Problem s brtvljenjem se može pojaviti na oba kraja spektra. Nije dobro kad zbog lošeg brtvljenje radni medij „curi“ iz motora ali nije povoljna ni situacija do koji dolazi zbog nemogućnosti izjednačavanja tlakova u cilindru i izvan njega. Sitno curenje radnog medija je obično potrebno za normalan rad pri ovakvoj vrsti motora pa se zbog toga na modelima koji su napravljeni visokopreciznom obradom koja osigurava točnost i dobro brtvljenje obično zahtijeva izrada sitnih ventila, tj. otvora. U drugom slučaju kad se zbog loše obrade ili nepravilne montaže dogodi slučaj sa većim curenjem obično je potrebna zamjena neodgovarajućeg dijela.

U slučaju motora sa slike 7.1 koji je tema ovog rada, zaključeno je da problem nije u lošem brtvljenju koje bi dovelo do nepokretanja. Pošto se motor teško okreće, loše brtvljenje ne bi bio uzrok tog stanja. S druge strane, prejako brtvljenje bi moglo biti. U slučaju da ne postoji nikakva mogućnost manje izmjene radnog medija to bi moglo dovesti do prejake kompresije koja bi zbog ove izvedbe stroja male snage bila prevelika za nadvladati. Ovaj mogući kvar provjeren je na način da se je skinuo čep koji odvajao okolinu od kanala koji spaja dva cilindra. Nakon toga nije više postojao zatvoren volumen zraka koji bi mogao predstavljati problem pri radu. Ponovnim pokušajem okretanja zamašnjaka nije se primijetio nikakav napredak u smislu smanjenja potrebne sile za okretanje zamašnjaka. Stoga se došlo do zaključka da problem nije u brtvljenju dijelova motora.

Trenje kao najveći i najčešći neprijatelj stirlingovog motora nameće se kao sljedeće logično rješenje. Između svaka dva dijela koja se miču relativno jedan o drugom postoji sila trenja. Tu silu nije moguće eliminirati, a s obzirom na nisku snagu koja mora nadvladati trenje, treba ga pokušati svesti na minimum. To znači da ne bi smjelo dolaziti do struganja ili dodira između potiskivača i cilindra. Zbog toga bi potiskivač morao biti kraćih dimenzija nego cilindar u kojem se nalazi. Treba postojati slobodan prostor u odnosu na kraj cilindra da ne bi došlo do situacije u kojoj potiskivač dolazi do kraja cilindra i stvara vakuum prilikom odmicanja. Također treba postojati dovoljan prostora oko potiskivača tako da zrak može prolaziti okolo uz što manje trenje. Što se tiče dijelova koji moraju biti u međusobnom dodiru, tu se minimalno trenje pokušava postići preciznom izradom i podmazivanjem. Zbog toga su čep i osovina potiskivača, kao i radni klip sa pripadajućim cilindrom podmazani uljem za finu mehaniku. Nakon toga ponovno se pokušalo okretati zamašnjak. Došlo je do određenog poboljšanja koja ipak nisu bila dovoljna da bi se stirlingov motor, pri dovođenju topline, mogao samostalno okretati.

Pošto se podmazivanjem postigao napredak pretpostavljeno je da je problem ovog motora doista u prevelikom trenju. Iz razloga što, u smislu smanjenja trenja, bez zamjene svih dijelova u pokretu novim dijelovima koji su preciznije obrađeni ili napravljeni od materija sa niskim koeficijentom trenja kao što je grafit, ne može ništa puno više napraviti, može se pokušati povećati sila koja pomaže pogurati cilindar. Ta sila se motoru daje kružnim gibanjem zamašnjaka.

## 7.1. Zamašnjak

Zamašnjak se može opisati kao kotač koji se velikim momentom tromosti suprotstavlja zaustavljanju. Skladišti energiju koju kasnije koristi za ublažavanje nemirnog rada, pomaže savladavanje mrtve točke stroja ili se koristi za stabilizaciju gibanja. Kod stirlingovog motora zamašnjak se obično bira prema iskustvu koristeći metodu pokušaja i pogreške. U ovom radu pokušat će se proračunom pronaći optimalna vrijednost veličine zamašnjaka koja najbolje odgovara pripadajućem modelu stirlingovog motora. Treba dobiti vrijednost faktora sigurnosti  $s$  koja mora zadovoljavati:

$$s = \frac{E}{w} > 1 \quad (1)$$

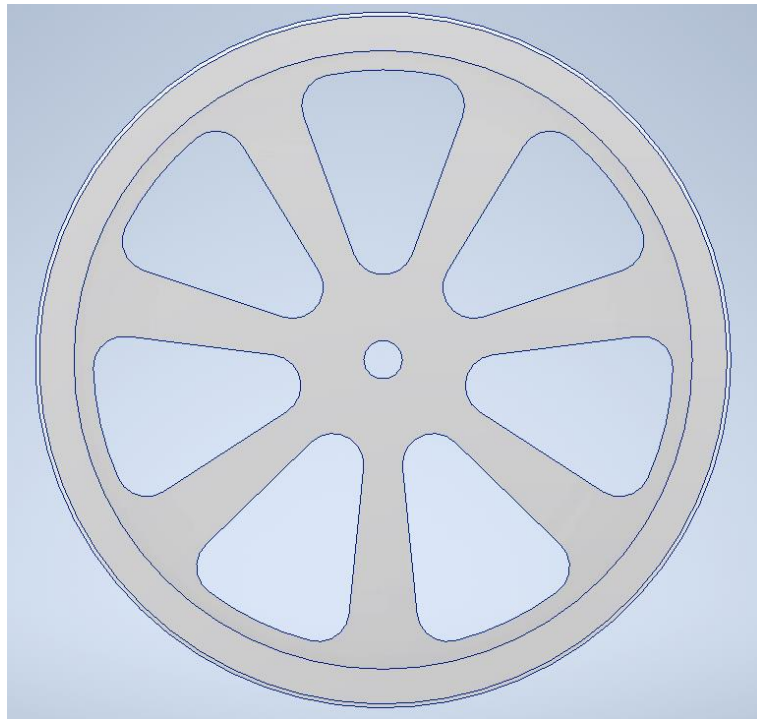
Pri čemu je :

$E$  – kinetička energija zamašnjaka

$w$  – rad potreban za kompresiju

Prvo treba odrediti koja je uopće vrijednost sile potrebne za savladavanje kompresije. Kao što je objašnjeno u prethodnim poglavljima, motoru se treba dovoditi rad u fazi kompresije. Iznos tog rada bit će jednak minimalnoj potrebnoj energiji koju zamašnjak treba predati. Iz tog ćemo se dobiti uvid stanja dosadašnjeg zamašnjaka. U slučaju procjene da postojeći zamašnjak nema dostatnu energiju potrebu za kompresiju pristupit će se proračunu i izradi novog.

Podaci potrebni za izračun dobiveni su mjerenjem modela stroja sa slike 7.1.1



Slika 7.1.1 3D mode originalnog zamašnjaka

Rad izotermne kompresije računa se kao:

$$w = m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2)[22]$$

Gdje je:

$w$  – Uloženi rad kompresije

$m$  – masa radnog medija

$R$  – plinska konstanta

$T_1$  – temperatura na početku kompresije

$V_1$  – volumen na početku kompresije

$V_2$  - volumen na kraju kompresije

Za računanje mase radnog medija koji je u ovom slučaju zrak, koristi se jednadžba stanja idealnog plina:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (3)$$



Gdje je:

$p$  – tlak zraka

$V$  – volumen zraka

$m$  – masa zraka

$R$  – opća plinska konstanta

$T$  – temperatura zraka

Tlak zraka se pretpostavlja da je :

$$p = 101325 \text{ Pa}$$

A temperatura :

$$T = 25 \text{ °C} = 298.15 \text{ K}$$

Opća plinska konstanta:

$$R = 287 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Volumen zraka dobije se zbrojem volumena radnog cilindra, cilindra potiskivača, i provrta koji povezuje te cilindre umanjeno za volumen potiskivača, volumen radnog klipa i volumen osovine potiskivača.

$$v = v_{max} = v_{rc} + v_{cp} + v_p - v_{po} - v_{rk} - v_{op} \quad (4)$$

Gdje su:

$v_{rc}$  – volumen radnog cilindra

$v_{cp}$  – volumen cilindra potiskivača

$v_p$  – volumen provrta

$v_{po}$  – volumen potiskivača

$v_{rk}$  – volumen radnog klipa

$v_{op}$  – volumen osovine potiskivača

Potrebi volumeni računaju se po formuli :

$$V_i = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_i \quad (5)$$

Gdje su

$v_i$  – volumen i-tog tijela

$d_i$  – pripadajući promjer

$l_i$  - pripadajuća duljina

Promjeri potrebni za proračun izmireni na modelu:

$$d_{rc} = 25 \text{ mm}$$

$$d_{cp} = 25 \text{ mm}$$

$$d_p = 6 \text{ mm}$$

$$d_{po} = 23 \text{ mm}$$

$$d_{rk} = 25 \text{ mm}$$

$$d_{op} = 4 \text{ mm}$$

I pripadajuće vrijednosti duljine:

$$l_{rc} = 46 \text{ mm}$$

$$l_{cp} = 101 \text{ mm}$$

$$l_p = 90 \text{ mm}$$

$$l_{po} = 63 \text{ mm}$$

$$l_{rk} = 15 \text{ mm}$$

$$l_{op} = 60 \text{ mm}$$

Pomoću formule (5) računamo tražene volumene:

$$V_{rc} = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_i = \frac{25^2 \cdot \pi}{4} \cdot 46 = 22580,2 \text{ mm}^3$$

$$V_{cp} = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_{cp} = \frac{25^2 \cdot \pi}{4} \cdot 101 = 49579,3 \text{ mm}^3$$

$$V_p = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_p = \frac{6^2 \cdot \pi}{4} \cdot 90 = 2544,7 \text{ mm}^3$$

$$V_{po} = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_{po} = \frac{23^2 \cdot \pi}{4} \cdot 63 = 26175 \text{ mm}^3$$

$$V_{rk} = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_{rk} = \frac{25^2 \cdot \pi}{4} \cdot 15 = 7363,1 \text{ mm}^3$$

$$V_{op} = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_{op} = \frac{4^2 \cdot \pi}{4} \cdot 60 = 754 \text{ mm}^3$$

Dobiveni volumeni se zbroje pomoću formule i dobije se maksimalni volumen (4) :

$$V_1 := 22580,2 + 49579,3 + 2544,7 - 26175 - 7363,1 - 754 = 40412,1 \text{ mm}^3 = 40,4 \text{ cm}^3$$

Minimalni volumen  $V_2$  je volumen kada će radni cilindar biti u gornjoj mrtvoj točki:

$$V_2 = v_{cp} + v_p - v_{po} - v_{op} = 49579,3 + 2544,7 - 26175 - 754 = 25195 \text{ mm}^3 = 25,2 \text{ cm}^3$$

Iz toga slijedi da je masa zraka prema formuli (3):

$$m = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{101325 \cdot 40,4 \cdot 10^{-6}}{287 \cdot 289,15} = 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$$

Uz sve poznate vrijednosti možemo izračunati rad kompresije formulom (2):

$$w_{kom} = m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = 4,9 \cdot 10^{-5} \cdot 287 \cdot 289,15 \cdot \ln\left(\frac{25,2}{40,4}\right) = -1,92 \text{ J}$$

Predznak dobivene vrijednosti je negativan što znači da se rad ulaže. Sada treba izračunati energiju koju može pohraniti zamašnjak sa slike 7.1.1.

## 7.2. Kinetička energija pohranjena u zamašnjaku

Računa se po formuli:

$$E = \frac{I \cdot \omega^2}{2} \quad (6)[23]$$

Gdje je:

$E$  – kinetička energija

$I$  - moment inercije

$\omega$  – kutna brzina

Moment inercije je mjera protivljenju promjene smjera i brzine kružnog gibanja. Računa se po formuli :

$$I = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2 \quad (7)$$

Gdje je:

$m_i$  – masa dijela predmeta

$r_i$  - radijus na kojem se  $m_i$  nalazi

Za cilindrični predmet moment inercije jednak je:

$$I = \frac{m \cdot r^2}{2} \quad (8)$$

Za zamašnjak sa *slike 1* složenog oblika računanje momenta inercije je dugotrajno i komplicirano. Stoga umjesto da se računa moment inercije, dio je 3D modeliran u inventoru i očitana je vrijednost momenta inercije.

$$I_1 = 120,687 \text{ kg/mm}^2 = 1,206 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2$$

Kutna brzina zamašnjaka nije poznata. Stoga će se vrijednost broja okretaja pretpostaviti na osnovu sličnih strojeva. Na osnovu toga se računa kutna brzina i kinetička energija zamašnjaka.

Kutna brzina:

$$\omega = \frac{n \cdot \Pi}{30} \quad (9)$$

Gdje je:

$n$  – broj okretaja zamašnjaka u minuti

Pretpostavimo vrijednost okretaja od  $n = 1200$  okr/min

Uvrstimo  $n$  u jednadžbu (9):

$$\omega = \frac{1200 \cdot \pi}{30} = 125,66 \text{ s}^{-1}$$

Konačno uvrstimo poznate vrijednosti u formulu (6) i dobivamo:

$$E_1 = \frac{I_1 \cdot \omega^2}{2} = \frac{1,206 \cdot 10^{-4} \cdot 125,66^2}{2} = 0,95 \text{ J}$$

Iz izračunatih vrijednosti može se zaključiti kako ovaj zamašnjak ne može pohraniti dovoljno energije. Treba dakle pristupiti dizajniranju novog odgovarajućeg zamašnjaka. Pošto je veličina promjera ograničena konstrukcijom motora, dizajnirat će se zamašnjak istog polumjera ali veće mase. Treba procijeniti optimalnu veličinu pri kojoj će imati mogućnost pohrane dovoljno energije a u isto vrijeme ne pretjerati u dimenzioniranju jer će dodatna masa usporavati stroj. Stoga se određuju minimalna i maksimalna vrijednost energije koju će zamašnjak moći pohraniti pri već prije pretpostavljenih 1200 okretaja u minuti.

Minimalna vrijednost je vrijednost rada izotermne kompresije. Maksimalna vrijednost nije strogo ograničena te se je nije potrebno pridržavati, ali radi provjere uzet će se vrijednost rada koju ovaj stroj može dati. To znači da je potrebno izračunati dobiveni rad pri izotermnoj ekspanziji. Za to se koristi formula (2) uvrštavanjem odgovarajućih varijabli:

$$w_{eks} = m \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (10)$$

Gdje je:

$T_3$  – maksimalna temperatura u procesu, pretpostavljeno  $T_3 = 400\text{K}$

$V_3$  – minimalni volumen =  $V_2 = 25,2 \text{ cm}^3$

$V_4$  – maksimalni volumen =  $V_1 = 40,4 \text{ cm}^3$

$$w_{eks} = m \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = 4,9 \cdot 10^{-5} \cdot 287 \cdot 400 \cdot \ln\left(\frac{40,4}{25,2}\right) = 2,65 \text{ J}$$

Sada kad imamo rubne vrijednosti računamo  $E_2$  za koji vrijedi:

$$w_{kom} < E_2 < w_{eks} \quad (11)$$

Radi jednostavnijeg proračuna pretpostavit će se da je masa na traženom zamašnjaku ravnomjerno raspoređena po cijeloj površini kruga. Prema jednadžbi (6):

$$E_2 = \frac{I_2 \cdot \omega^2}{2}$$

Pošto vrijednost  $\omega$  pretpostavljamo, možemo napisati jednadžbu prema kojoj dobivamo traženi moment inercije:

$$I_2 = \frac{2 \cdot E_2}{\omega^2}$$

Ako ovu jednadžbu izjednačim sa (8) dobiva se:

$$\frac{2 \cdot E_2}{\omega^2} = \frac{m \cdot r^2}{2}$$

Uređivanjem ovog izraza dobiva se :

$$E_2 = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r^2}{4} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r^2}{4}$$

Pretpostavlja se da će se motor zbog veće mase zamašnjaka okretati nešto sporije, pa se nova vrijednost  $\omega$  računa prema jednadžbi (9) za slučaj kad će vrijednost okretaja biti  $n = 1100$  okr/min.

$$\omega = \frac{1100 \cdot \pi}{30} = 115,19 \text{ s}^{-1}$$

Što nakon uvrštavanja u (11) daje :

$$w_{kom} < \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r^2}{4} < w_{eks}$$

$$w_{kom} < \frac{m \cdot 115,19^2 \cdot 0,045^2}{4} < w_{eks}$$

$$1,92 \text{ J} < \frac{m \cdot 115,19^2 \cdot 0,045^2}{4} < 2,65 \text{ J}$$

$$7,68 \text{ J} < m \cdot 115,19^2 \cdot 0,045^2 < 10,6 \text{ J}$$

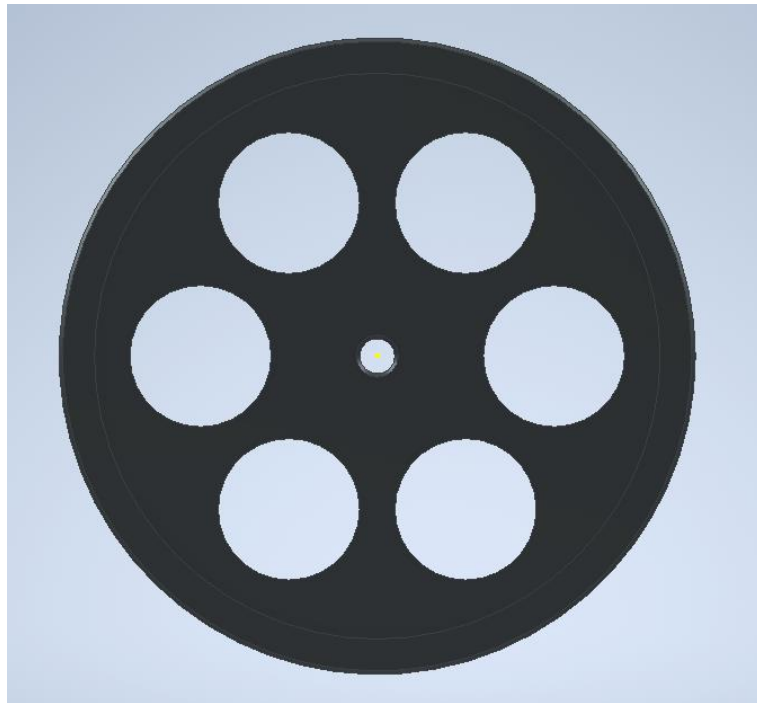
Rješavanjem ovih izraza dobiva se:

$$0,29 \text{ kg} < m < 0,39 \text{ kg}$$

Ova jednakost govori da bi zamašnjak napravljen u obliku punog cilindra trebao težiti između 0,29 i 0,39 kg. Zbog razloga ranije spomenutih prednosti, zamašnjak će biti dizajniran sa ciljem prebacivanja više mase bliže obodu čime u usporedbi sa zamašnjakom pune konstrukcije dobiva veći moment inercije za manju masu. Slučaj u kojem zamašnjak ima manju masu od optimalne predstavlja problem jer ne može pohraniti dovoljno energije potrebne za normalan rad. Kad bi zamašnjak prelazio maksimalnu vrijednost mase, to bi značilo da je u stanju prihvatiti više energije pri nižim okretajima nego onaj manje mase. Stoga se minimalna vrijednost smatra važnim pokazateljem, dok maksimalna nije od presudne važnosti.

Na 7.2.1 se može vidjeti idejno rješenje novog zamašnjaka.





Slika 7.2.1 3D model novog zamašnjaka

Sada treba provjeriti zadovoljava li ova izvedba uvjet pod izrazom (11). Zbog toga treba odrediti kinetičku energiju prema izrazu (6)

$$E_2 = \frac{I_2 \cdot \omega^2}{2}$$

Moment inercije očitao je iz 3D modela a iznosi  $I_2 = 401,13 \text{ kg/mm}^2 = 4,01 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2$  dok je vrijednost  $m = 0,327 \text{ kg}$ .

Iz čega slijedi:

$$E_2 = \frac{4,01 \cdot 10^{-4} \cdot 115,19^2}{2} = 2,66 \text{ J}$$

Dobivene vrijednosti pokazuju da novi zamašnjak zadovoljava zadane uvjete. Stoga se ovaj dizajn smatra dobrim i okreće se postupku izrade.

Da rezimiramo. Pregledom nekih najčešćih problema s kojima se susreće ova vrsta motora došlo se do zaključka da je problem u prevelikom trenju ili neadekvatnom zamašnjaku. Iz tog razloga se

pristupilo proračunu. Kod stirlingovog motora ne postoji neki definirani proračun preko kojeg bi se odredila veličina zamašnjaka. Stoga se u ovom radu pokušalo doći do toga.

Prvo je provjereno zadovoljava li postojeći zamašnjak minimalne uvjete. Proračunom se došlo do rješenja za energiju zamašnjaka od 0,95 J. Uvrštavanjem dobivene vrijednosti u izraz (1) dobiva se

$$s = \frac{E_1}{w} = \frac{0,95}{1,92} = 0,5$$

Što ne zadovoljava uvjet  $s > 1$

Za ovaj slučaj faktor sigurnosti je prenizak. U realnom slučaju sa trenjem to bi moglo predstavljati problem. Iz tog razloga proračunat će se i napraviti novi zamašnjak. Kao što je iz formule (5) vidljivo, povećanjem promjera i mase zamašnjaka može se pohraniti više energije. Pošto se polumjer u formuli kvadrira, to znači da povećanje polumjera ima veći utjecaj od nego kad bi povećali masu. Stoga bi idealni slučaj bio napraviti zamašnjak koji gotovu svu masu ima sadržanu na vanjskom rubu. S druge strane treba pripaziti pri povećanju mase. Veća masa znači i veće trenje u ležajevima i teži rad već i onako neispravnog stroja. S obzirom na iznesene činjenice, dizajnirat će se zamašnjak sa istim promjerom (mjesto na postolju ne dopušta povećanje) uz otvore u sredini koji će malo smanjiti masu. Materijal dosadašnjeg zamašnjaka je aluminij, a za novi je odabran nehrđajući čelik koji zbog višestruko veće gustoće za slične dimenzije daje veću masu što omogućava pohranu više kinetičke energije.

Provjera faktora sigurnosti novog zamašnjaka:

$$s = \frac{E_2}{w} = \frac{2,66}{1,92} = 1,39 > 1$$

Početni uvjet je time zadovoljen.

## 8. IZRADA NOVIH DIJELOVA I MONTAŽA

Proračunom je odlučeno da je potrebno izraditi novi zamašnjak. Pri procesu dizajniranja trebalo je ispuniti neke uvjete kojima se garantirala laka izrada uz zadovoljavajuću preciznost, ekonomičnost pri korištenju materijala te ono najvažnije, zadovoljavanje tehničkih specifikacija koji odgovaraju zadanom modelu motora. Izrada se sastojala od procesa tokarenja, nakon čega se glodanjem skinuo dio materijala po obodu. Za kraj je izbušeno šest identičnih rupa koje osiguravaju manju masu. Da bi se pri radu motora osigurao čvrst dosjed napravljeno je i novo vratilo. Radionički crteži novih dijelova dani su u prilogu.

Nakon izrade dijelova pristupilo se ponovnom slaganju motora. Stari zamašnjak i vratilo su skinuti a na njihovo mjesto su ubačeni novi dijelovi. Prilikom prvog rastavljanja motora moglo primijetiti se nisu svi dijelovi u savršenom skladu. Određeni vijci bili su pričvršćeni mnogo lakše od drugih. Pri pokušaju da se svi osiguraju podjednako silom moglo se primijetiti teže micanje potiskivača. To bi moglo značiti da je zbog greške u proizvodnji ili pri montaži došlo manjih odstupanja od dizajniranih dijelova što pri motoru ovakve male snage i velike osjetljivosti mogu značiti nepremostivu prepreku.

Pri pokušaju okretanja zamašnjaka koji je prethodno spojen polugom na radni klip vidio se je napredak. Napredak u smislu zamašnjaka koji ima više energije i nakon početnog ručnog okretanja može duže gurati taj klip. Nakon što je na vratilo zamašnjaka spojen i drugi dio uočio se nagli pad u mogućnosti okretanja motora. Iz toga bi se dalo zaključiti da je problem negdje između potiskivača i cilindra koji su možda u dodiru čime nastaje trenje ili na mjestu dodira čepa i osovine koja prolazi kroz čep povezana na potiskivač. Podmazivanje tog mjesta dalo je manje poboljšanje u glatkoći pri izmjeničnom kretanju no to nije bilo dovoljno. Iz svega navedenog dalo bi se zaključiti da je trenje uistinu najveći problem ovog stirlingovog motora.

Nakon ponovnog rastavljanja te pažljivog sastavljanja koristeći nove vijke veće dužine koji osiguravaju spoj između toplog i hladnog dijela cilindra, podmazivanjem dijelova u dodiru i zamjenom dotrajale brtvene gumice novom, motor je bio spreman za ponovni pokušaj pokretanja. Nakon nekoliko minuta grijanja toplog cilindra pri prvom okretu zamašnjaka motor je proradio. Pri konstantnom dovođenju topline rad stroja je potrajao nekoliko minuta do trenutka kad se hladni cilindar previše zagrijao. Ovime je uspješno završen praktični dio završnog rada koji je imao za cilj dovesti motor u stanje u kojem će napokon proraditi.

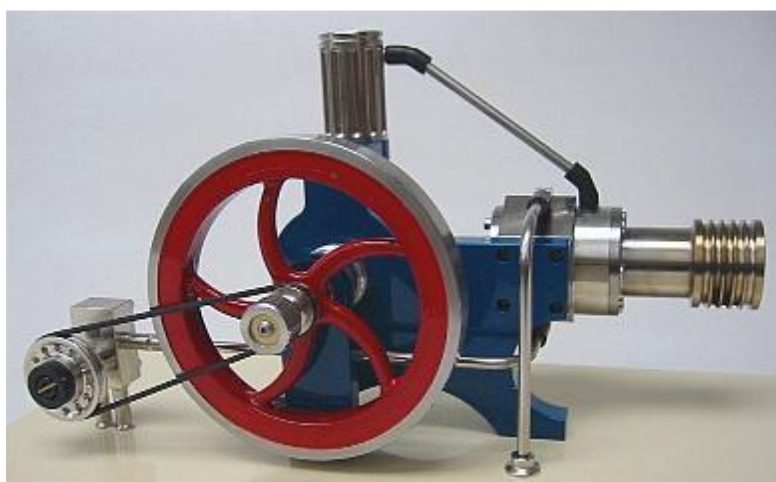
## 9. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada sastojao se od teorijskog i praktičnog dijela. U prvom dijelu su obrađeni povijest, razvoj i objašnjene glavne karakteristike. Pokazane su mnoge dobre strane uz neke nedostatke koji su u prošlosti presudili. Praktični dio se sastojao od pokušaja pronalaska egzaktnog rješenja za odabir veličine zamašnjaka. Nakon konstruiranja i izrade posvetila se pažnja u montaži i pokušaju pokretanja. Ovaj model dobar je primjer problema s kojim se susreće i zašto je gotovo potpuno prestao biti korišten.

Pri proračunu se koriste određene pretpostavljene vrijednosti koje, ako su bile pogrešne, mogu dovesti do krivog dizajna koji će zbog relativno male snage teško nadvladati realne uvjete rada. Zbog toga se ovaj motor i često radi na iskustvu i popravku prijašnjih grešaka dok se ne dođe do traženog cilja. Teško je „pogoditi“ iz prvog pokušaja dizajn koji će funkcionirati. Time rečeno, iz ovog modela moglo bi se izvući nekoliko pouka:

- Što se same konstrukcije nosača tiče, optimalnije rješenje bi bilo ono sa dva ležaja. Problem kod ovog primjera je taj što težina zamašnjaka djeluje samo na jednoj strani što dodatno opterećuje ležaj. Time se povećava trenje i dovodi do manje stabilnosti naspram konstrukcije koja bi koristila dva ležaja sa zamašnjakom postavljenim između njih.
- Pokušati povećati efikasnost dodavanjem regeneratora i smanjenjem trenja kod dijelova u dodiru koristeći materijale kao što je npr. grafit.
- Također u budućim konstrukcijama treba obratiti pozornost na dizajn koji će osigurati proizvodnju i montažu uz manju mogućnost greške koja bi dovela do zapinjanja dijelova u pokretu i problema sa previsokim trenjem.
- Motor je dizajniran prema proračunu koji se temelji na idealnom procesu. Bilo bi dobro pokušati približiti proračun realnom procesu čime bi se povećala vjerojatnost uspjeha.
- Radi omogućavanja kontinuiranog rada stroja potrebno je postizanje balansa između količine dovedene topline i hlađenja. U slučaju dovođenja premalo topline motor se neće pokrenuti, a previše topline dovodi do bržeg izjednačavanja temperatura toplog i

hladnog spremnika čime se smanjuje maksimalno vrijeme rada. Zbog toga bi bilo dobro smisliti i izraditi neki sustav bolje izolacije između cilindra ili aktivnog hlađenja vanjske strane hladnog cilindra npr. korištenjem vode. Slika 9.1 prikazuje model Stirlingova motora koji koristi dio proizvedene mehaničke energije za pogon pumpe koja osigurava hlađenje cilindra.



*Slika 9.1 Stirling motor hlađen pumpom [24]*

Čak i uz sve probleme i nedostatke budućnost ovog motora ipak izgleda svjetlija. U današnje vrijeme opet postaje zanimljiv zbog svoje fleksibilnosti u činjenici da može koristiti gotovo bilo koji izvor topline. U svijetu u kojem cijena fosilnih goriva raste a zalihe padaju iz dana uz dan, ovaj motor javlja se kao moguće rješenje energetskeg problema.

## 10. LITERATURA

- [1] „A hot air engine history“, Hot air engines, <http://hotairengines.org/history> (stranica posjećena 15. svibnja 2022.)
- [2] „Stirling Engine“, National Museum Scotland, <https://www.nms.ac.uk/explore-our-collections/stories/science-and-technology/stirling-engine/> (stranica posjećena 15. svibnja 2022.)
- [3] „Stirling Engine“, Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine) (stranica posjećena 15. svibnja 2022.)
- [4] „Stirling Engine“, Explain that stuff, <https://www.explainthatstuff.com/how-stirling-engines-work.html> (stranica posjećena 23. svibnja 2022.)
- [5] „Stirling engine and its working“, Lesics, <https://www.lesics.com/stirling-engine-and-its-working.html> (stranica posjećena 23. svibnja 2022.)
- [6] „The Stirling engine of 1816“, Hot air engines, <http://hotairengines.org/closed-cycle-engine/stirling-1816> (stranica posjećena 29. svibnja 2022.)
- [7] „Stirling Engine“, Mechanical boost, <https://mechanicalboost.com/stirling-engine/> (stranica posjećena 29. svibnja 2022.)
- [8] „P-V-and-T-S-diagrams-of-the-Ideal-Stirling-Cycle“, ResearchGate, [https://www.researchgate.net/figure/P-V-and-T-S-diagrams-of-the-Ideal-Stirling-Cycle\\_fig1\\_281590001](https://www.researchgate.net/figure/P-V-and-T-S-diagrams-of-the-Ideal-Stirling-Cycle_fig1_281590001) (stranica posjećena 17. lipnja 2022.)
- [9] „Stirling Cycle“, ScienceDirect, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/stirling-cycle> (stranica posjećena 17. lipnja 2022.)
- [10] „Advantages and disadvantages of the Stirling Engine“, Demotor, <https://en.demotor.net/stirling-engine/advantages-disadvantages> (stranica posjećena 17. lipnja 2022.)
- [11] „Stirlingov motor“, ObnovljiviZeleno, <https://www.renovablesverdes.com/bs/miješajući-motor/> (stranica posjećena 17. lipnja 2022.)
- [12] „Alpha Stirling Engines“, Ohio university, <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html> (stranica posjećena 2. srpnja 2022.)

- [13] „Schematics of an alpha type Stirling engine“, ResearchGate, [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-an-alpha-type-Stirling-engine\\_fig1\\_328510776](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-an-alpha-type-Stirling-engine_fig1_328510776) (stranica posjećena 2. srpnja 2022.)
- [14] „Beta type Stirling Engine“, Ohio university, <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/beta.html> (stranica posjećena 2. srpnja 2022.)
- [15] „Schematics of a beta type Stirling engine“, ResearchGate, [https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-a-beta-type-and-b-gamma-type-Stirling-engines\\_fig5\\_328510776](https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-a-beta-type-and-b-gamma-type-Stirling-engines_fig5_328510776) (stranica posjećena 2. srpnja 2022.)
- [16] „Gamma type Stirling Engine“, Ohio university, <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/gamma.html> (stranica posjećena 2. srpnja 2022.)
- [17] „How Stirling engine works?“, Westminstercollege, [http://cs.westminstercollege.edu/~ccline/courses/resources/wp/Stirling/how\\_do.html](http://cs.westminstercollege.edu/~ccline/courses/resources/wp/Stirling/how_do.html) (stranica posjećena 5. srpnja 2022.)
- [18] „Free piston Stirling engine“, ResearchGate, [https://www.researchgate.net/figure/Free-Piston-Stirling-Engine-with-linear-generator\\_fig3\\_269270659](https://www.researchgate.net/figure/Free-Piston-Stirling-Engine-with-linear-generator_fig3_269270659) (stranica posjećena 5. srpnja 2022.)
- [29] „Free piston Stirling engine generators“, IntechOpen, <https://www.intechopen.com/chapters/62541> (stranica posjećena 5. srpnja 2022.)
- [20] „Troubleshooting tips“, Stirlingbuilder <https://www.stirlingbuilder.com/troubleshooting-tips> (stranica posjećena 14. kolovoza 2022.)
- [21] „Model engineering tips“, Model engines plans <http://www.model-engine-plans.com/engineeringtips/stirlingengineerun.htm> (stranica posjećena 14. kolovoza 2022.)
- [22] „Isothermal expansion - isothermal compression“, Nuclear power, <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-processes/isothermal-process/isothermal-expansion-isothermal-compression/> (stranica posjećena 14. kolovoza 2022.)
- [23] „Flywheels – kinetic energy“, The engineering toolbox, [https://www.engineeringtoolbox.com/flywheel-energy-d\\_945.html](https://www.engineeringtoolbox.com/flywheel-energy-d_945.html) (stranica posjećena 14. kolovoza 2022.)

[24] „Vintage Stirling cycle engine plans“, Model engines plans, <http://www.model-engine-plans.com/engineplans/stirling/vintage.htm> (stranica posjećena 17. rujna 2022.)



## 11. SAŽETAK

Stirlingov motor je tip motora na vanjsko izgaranje kojeg je 1816. godine izumio škotski inženjer Robert Stirling. Funkcionira zbog razlike temperature između toplog i hladnog kraja. Bitna razlika u odnosu na ostale toplinske strojeve jest u podatku da može raditi sa gotovo bilo kojom vrstom toplinske energije. Od širokog izbora fosilnih goriva, do mnogih vrsta obnovljivih izvora kao što je energija sunca. Pokazatelj dobre fleksibilnosti jest i činjenica da može raditi pri temperaturnoj razlici niskoj čak i do pola kelvina.

Stirlingov motor je bio prvi klipni motor na topli zrak korišten od 1818. godine kad se upotrijebio za pumpanje vode u kamenolom. S vremenom, izumom ottovog i dizelovog motora, Stirlingov motor sa svojom inferiornom snagom polako tone u zaborav. S obzirom na zalihe fosilnih goriva koje se smanjuju, u budućnosti se očekuje novi rast nekoć naprednog, a danas nepravedno zapostavljenog stroja.

Raznolikosti dizajna ovog motora ne manjka. S obzirom na mehaničku konfiguraciju obično se dijeli u tri veće grupe. Alfa, beta i tip pobliže objašnjen u ovom radu, gama. Osim 3 najčešće izvedbe, postoji još mnoštvo zanimljivih vrsta kao što je rotacijski Stirlingov motor, linearni i plosnati motor. Završni rad Modifikacija Stirlingovog motora je sačinjen od dva dijela. Teorijski, u kojem je ukratko objašnjena povijest, načelo rada, prednosti i nedostaci i drugi dio u koji se sastoji od proračuna zamašnjaka, njegove izrade i pokušaja popravka neispravnog primjerka motora.

Ključne riječi:

Stirlingov motor

Zamašnjak

Motor na topli zrak

Gama tip

## 12. SUMMARY

The Stirling engine is a type of external combustion engine invented by Scottish engineer Robert Stirling in 1816. It works because of the temperature difference between its hot and cold end. The major difference maker in its design over other heat engine is the fact that it can use almost any kind of heat energy. From a wide variety of fossil fuels to many types of reusable energy sources like solar power. Great flexibility is also visible in the fact that some smaller models can run on temperature differences as low as half a Kelvin.

Stirling engine was the first hot air piston engine used since 1818. when it was utilized for pumping water into a quarry. Over time with the invention of Otto and diesel engines, Stirling's engine being inferior in power, slowly becomes forgotten. In the future, given the fact that fossil fuel reserves are running low, it is expected to see a new rise in usage once advanced but now unrightfully neglected machine.

There is no lack of variety in the designs of this engine. Considering mechanical configuration, it is usually divided into three major groups. Alpha, beta, and a type closely described in this paper, gamma. Other than the three most common ones, many other interesting configurations exist such as rotary Stirling engine, free-piston engine, or flat engine. The final work named Modification of a Stirling engine is made in two parts. Theoretical, where it was shortly explained its history, the key principle of its work, biggest advantages, and disadvantages, and the second practical part consisted of a calculation of the flywheel, its production, and an attempt to fix the non-working model of the engine.

Key words:

Stirling engine

Flywheel

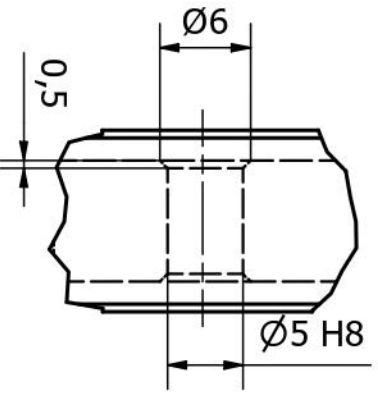
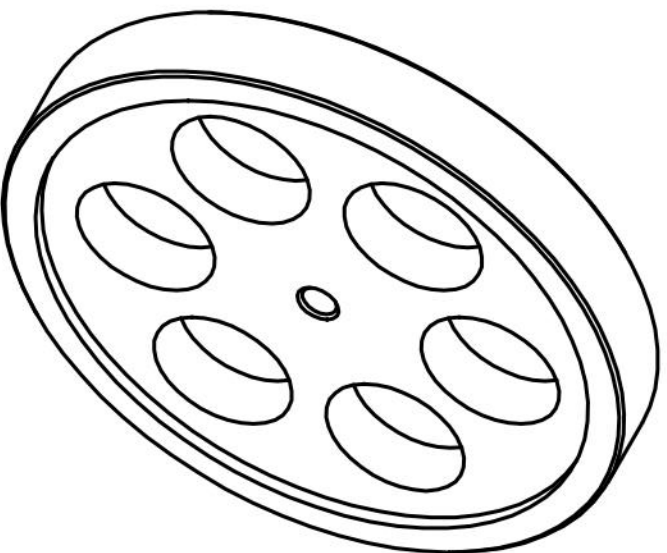
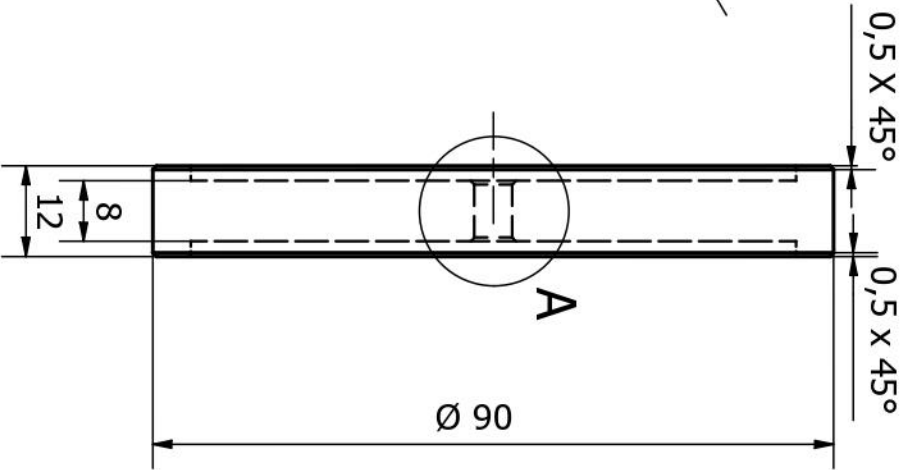
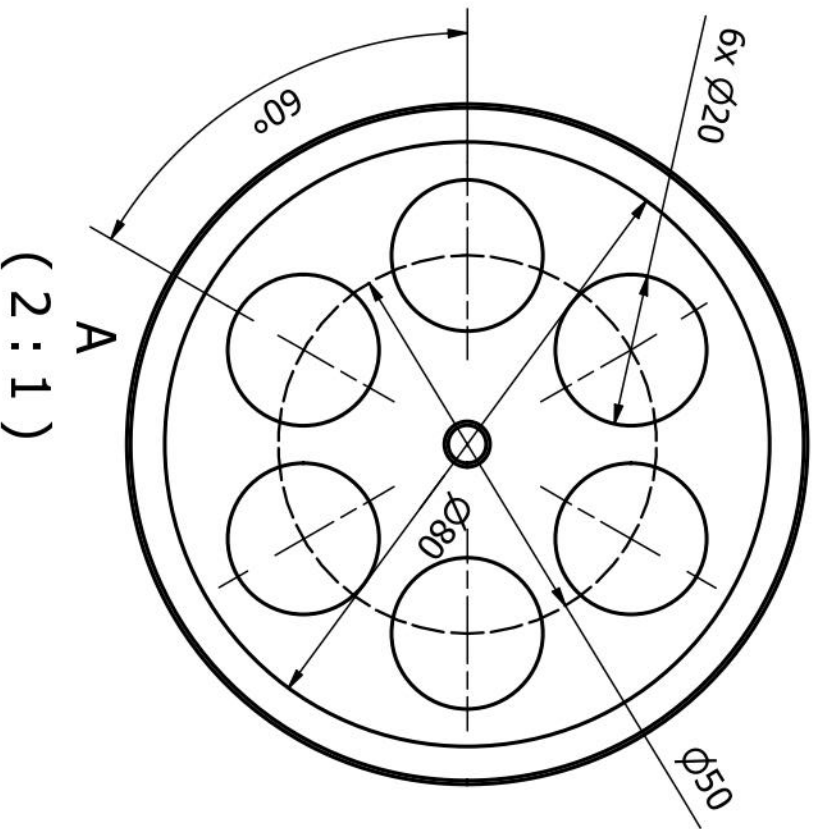
Hot air engine


Gamma type

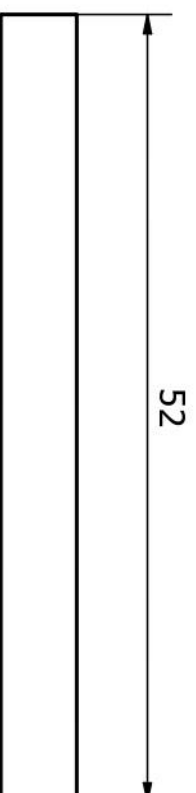
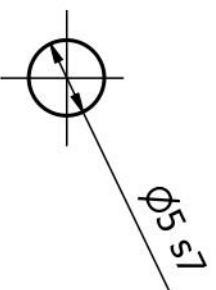
## 13. PRILOZI

### Popis slika

Slika 1.1 Najstariji model Stirlingova motora.....	1
Slika 2.2.1 Korištenje sunčeve energije kao izvor topline .....	4
Slika 2.2.2 Okretanje Stirlingovog motora u različitim smjerovima .....	4
Slika 2.3.1 Skica cilindra.....	5
Slika 3.1 Dijelovi Stirling motora .....	6
Slika 4.1 P-V dijagram Stirlingovog procesa.....	8
Slika 4.2 T - s dijagram Stirlingovog procesa.....	9
Slika 6.1.1 Alfa tip Stirlingovog motora .....	12
Slika 6.1.2 Zagrijavanje alfa Stirling motora .....	13
Slika 6.1.3 Ekspanzija alfa Stirling motora.....	13
Slika 6.1.4 Hlađenje alfa Stirling motora.....	14
Slika 6.1.5 Kompresija alfa Stirling motora.....	14
Slika 6.1.6 Serijski spoj alfa Stirling motora .....	15
Slika 6.2.1 Prikaz beta Stirling motora .....	15
Slika 6.2.2 Zagrijavanje beta Stirling motora .....	16
Slika 6.2.3 Ekspanzija beta Stirling motora .....	16
Slika 6.2.4 Hlađenje beta Stirling motora .....	17
Slika 6.2.5 Kompresija beta Stirling motora .....	17
Slika 6.3.1 Prikaz gama Stirling motora .....	18
Slika 6.3.2 Zagrijavanje gama Stirling motora.....	19
Slika 6.3.3 Ekspanzija gama Stirling motora .....	19
Slika 6.3.4 Hlađenje gama Stirling motora .....	20
Slika 6.3.5 Kompresija gama Stirling motora .....	20
Slika 6.4.1 Linearni Stirlingov motor.....	21
Slika 7.1 Prikaz stirlingovog motora.....	22
Slika 7.1.1 3D mode originalnog zamašnjaka.....	26
Slika 7.2.1 3D model novog zamašnjaka .....	35
Slika 9.1 Stirling motor hlađen pumpom .....	39



ISO - TOL		Ime i prezime:		 Sveučilište u Rijeci TEHNIČKI FAKULTET 51000 RIJEKA, VUKOVARSKA 35, HRMATICA	Datum:		Sklopni crtež (broj):		Mjerilo:
Ø5 H8	+0,018 0	Mario Burić			28. 06. 2022.			1:1	
		Pozicija:		Naziv dijela:					
				Radionički crtež zamašnjaka					
		Materijal:							
		Nehrdnjajući čelik							



ISO - TOL		Ime i prezime: Mario Burić		Datum: 25. 06. 2022.		Sklopni crtež (broj):		Mjerilo: 1:1	
$\phi 5 \pm 0.019$	+0,031	Sveučilište u Rijeci TEHNIČKI FAKULTET 51000 RIJEKA, VUKOVIĆEVA 58, HRVATSKA	Pozicija:	Materijal: Nehrđajući čelik	Naziv dijela: Radionički crtež vratila				
	+0,019								