

Analiza rada šesterotaktnog motora

Knežević, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:044756>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje



ZAVRŠNI RAD

Luka Knežević

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje



ZAVRŠNI RAD

Analiza rada šesterotaktnog motora

Mentori:

Izv.prof.dr.sc. Momir Sjerić, mag.ing.

Izradio:

Luka Knežević

0035233251

Zagreb, 2025.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru izv.prof.dr.sc Momiru Sjeriću na pomoći i savjetima tokom izrade ovog rada.

Zahvalio bih se i svojoj obitelji i djevojci na podršci i razumijevanju te svojim kolegama na pomoći tokom studija.

Luka Knežević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum 27-02-2025	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 - 95	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Knežević**

JMBAG: **0035233251**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza rada šesterotaktnog motora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of six-stroke engine operation**

Opis zadatka:

Porastom frekvencije odvijanja procesa kod motora s unutarnjim izgaranjem linearno raste snaga uz isti radni volumen motora. U cilju ostvarivanja veće frekvencije odvijanja procesa, a uz zadržavanje iste brzine vrtnje koljenastog vratila, razvijen je i patentiran koncept motora baziranog na primjeni šesterotaktnoga procesa. Radni ciklus takvoga motora traje 3 okreta koljenastog vratila i kombinira značajke četverotaktnog i dvotaktnog motora. Tri krajnje pozicije klipa (mrtve točke) nisu potpuno podudarne kako bi se osigurao usis svježe radne tvari pomoću bočnih kanala na cilindru potreban za dvotaktni dio procesa. U teoretskom razmatranju šesterotaktni motor nudi 33% veću snagu za isti radni volumen i brzinu vrtnje.

U radu je potrebno:

- detaljno opisati princip rada šesterotaktnog procesa uz pripadajuće skice te navesti prednosti i nedostatke,
- definirati analitičko rješenje za pomak klipa za 1 radni ciklus motora za odabrane osnovne geometrijske veličine klipnog mehanizma,
- izraditi 3D CAD model klipnog mehanizma iz kojega je za proizvoljni kut zakreta koljenastog vratila moguće odrediti pomak klipa u odnosu na minimalnu gornju mrtvu točku,
- usporediti analitičko rješenje za pomak klipa s očitanim pomacima iz CAD modela,
- za proizvoljno definiranu krivulju tlaka za vrijeme visokotlačnog dijela procesa izračunati krivulju indiciranog momenta,
- usporediti ostvarene rezultate s konvencionalnim klipnim mehanizmom i četverotaktnim procesom.
- izvesti zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

M. Sjerić
Izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić

Predsjednik Povjerenstva:

V. Soldo
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ŠESTEROTAKTNI MOTOR	3
2.1. Razumijevanje četverotaktnog motora	3
2.2. Modifikacije klipnog mehanizma	4
2.2.1. Koljenasto vratilo, klipnjača i planetarni zupčanik	4
2.2.2. Pužni prijenosnik.....	8
2.2.3. Bočni kanali na cilindru	9
2.2.4. Preinake na bregastoj osovini.....	10
2.3. Puni radni proces šesterotaktnog motora.....	11
2.4. Prednosti šesterotaktnog motora.....	19
2.4.1. Više snage.....	19
2.4.2. Konvencionalna tehnologija.....	20
2.4.3. Bolja efikasnost	21
2.5. Nedostatci šesterotaktnog motora.....	22
2.5.1. Zupčanici.....	22
2.5.2. Prekrivanje bočnih kanala cilindra	23
2.5.3. Ravnoteža motora.....	24
3. ANALITIČKO RJEŠENJE ZA POMAK KLIPA.....	26
3.1. Kinematika planetarnog zupčanika	27
3.2. Kinematika rukavca za prihvat klipnjače	28
3.3. Kinematika klipa.....	30
3.4. Konačno rješenje pomaka klipa.....	31
4. USPOREDBA CAD MODELA I ANALITIČKOG RJEŠENJA	33
5. INDICIRANI MOMENT.....	36
5.1. Krivulja tlaka	36
5.1.1. p,V dijagram.....	37
5.2. Dijagram indiciranog momenta	39
6. USPOREDBA S KONVENCIONALNIM KLIPNIM MEHANIZMOM.....	42
7. ZAKLJUČAK	45

POPIS SLIKA

Slika 1. Crower-ov šesterotaktni motor [2].....	1
Slika 2. Beare-ov šesterotaktni motor [2].....	1
Slika 3. Proces kod četverotaktnog motora.....	3
Slika 4. Planetarni zupčanik [1]	4
Slika 5. Ekscentričnost rukavca klipnjače i planetarnog zupčanika [1].....	5
Slika 6. Putanja gibanja planetarnog zupčanika.....	5
Slika 7. Putanja gibanja ekscentričnog elementa	6
Slika 8. 1. gornja mrtva točka (1. GMT) [3]	6
Slika 9. 2. gornja mrtva točka (2.GMT) [3]	7
Slika 10. 1. donja mrtva točka (1. DMT) [3].....	7
Slika 11. 2. donja mrtva točka (2. DMT) [3].....	7
Slika 12. Pužni prijenosnik [1].....	8
Slika 13. Bočni kanali na cilindru [1]	9
Slika 14. Preinake na bregastoj osovine [1].....	10
Slika 15. Puni radni proces šesterotaktnog motora [3].....	11
Slika 16. Usisni takt u tijeku [3].....	12
Slika 17. Usisni takt na kraju [3].....	12
Slika 18. Kompresijski takt u tijeku [3]	13
Slika 19. Kompresijski takt na kraju [3]	13
Slika 20. Radni takt u tijeku [3]	14
Slika 21. Radni takt na kraju [3]	14
Slika 22. Ispiranje cilindra [3].....	15
Slika 23. Drugi kompresijski takt u tijeku [3].....	16
Slika 24. Drugi kompresijski takt na kraju [3].....	16
Slika 25. Drugi radni takt u tijeku [3]	17
Slika 26. Drugi radni takt na kraju [3].....	17
Slika 27. Ispušni takt u tijeku [3]	18
Slika 28. Ispušni takt na kraju [3]	18
Slika 29. Razvodni dijagram šesterotaktnog motora [3].....	19
Slika 30. Klipni mehanizam četverotaktnog motora.....	20
Slika 31. Porsche 911 GT3 RS (992.1)	21
Slika 32. Zupčanici.....	22
Slika 33. Primjer visine klipa [1]	23
Slika 34. Preklopljene putanje 2 klipa [3].....	24

Slika 35. Prikaz pozicije protuutega i klipnjače [1]	25
Slika 36. Model klipnog mehanizma.....	26
Slika 37. Kinematika planetarnog zupčanika	27
Slika 38. Kinematika rukavca za prihvat klipnjače.....	28
Slika 39. Kinematika klipa	30
Slika 40. Analitičko rješenje pomaka klipa.....	31
Slika 41. Pomak klipa na CAD modelu	33
Slika 42. Razlika pomaka.....	35
Slika 43. p,V dijagram idealiziranog šesterotaktnog procesa	38
Slika 44. Krivulja indiciranog momenta	40
Slika 45. Usporedba kraka djelovanja sile na koljenasto vratilo kod 1. radnog takta (lijevo) te 2. radnog takta (desno).....	41
Slika 46. p, V dijagram idealiziranog četverotaktnog procesa.....	42
Slika 47. Krivulje usporedbe indiciranih momenata	43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razlika pomaka	34
---------------------------------	----

POPIS OZNAKA

r_v	mm	- Diobeni radijus vanjskog zupčanika
r_p	mm	- Diobeni radijus planetarnog zupčanika
φ	°	- Kut zakreta koljenastog vratila
L	mm	- Duljina klipnjače
s	mm	- Pomak klipa
V	mm ³	- Radni volumen
p	bar	- Tlak
T	K	- Temperatura
Q	J	- Dovedena toplina
ΔT	K	- Promjena temperature
$r(\varphi)$	mm	- Krak djelovanja sile
M_g	kg	- Masa ubrizganog goriva
m_z	kg	- Masa zraka u cilindru
E	MJ/kg	- Energetski sadržaj benzina
c_v	J/kgK	- Specifični toplinski kapacitet
A	m ²	- Čeona površina klipa
M	Nm	- Moment na koljenastom vratilu

SAŽETAK

Ideja konstruiranja i razvoja šesterotaktnih motora iako nije nova, tek je sada došla do izražaja zbog raznih restrikcija koje se postavljaju na motore s unutaršnjim izgaranjem u cilju smanjenja emisija štetnih plinova. Iako su današnji četverotaktni motori u odnosu na prošlost znatno efikasniji i emitiraju manje štetnih plinova, još uvijek nisu zadovoljavajući za budućnost te se teži potpunoj elektrifikaciji. Porsche je u suradnji sa Tehničkim fakultetom Cluj-Napoca konstruirao ovaj motor kao jedan od mnogih pokušaja autoindustrije i njezinih inovatora da prolongira život i korištenje motora s unutaršnjim izgaranjem. Iako se na prvu čini da se radi o kompliciranoj i novoj tehnologiji koja zahtijeva puno istraživanja, situacija nije takva, naime šesterotaktni motor funkcionira i zasniva se na 100 % konvencionalnoj tehnologiji koja je dostupna i koristi se već desetljećima te je samim time i pouzdana. Šesterotaktni motor kombinira karakteristike četverotaktnog i dvotaktnog motora na jedinstven način kako bi poboljšao učinkovitost, smanjio emisije i optimizirao performanse. To ostvaruje dodavanjem još jednog radnog takta što omogućava ponovnu iskorištenost energije iz prethodnog ciklusa, samim time podsjeća na učinkovitost dvotaktnog principa, ovim dodatnim procesima smanjuje se količina neizgorjelog goriva i povećava ukupnu iskoristivost energije, čime se postiže veća učinkovitost nego kod dvotaktnih ili četverotaktnih motora samostalno. Ono zanimljivo kod ovog procesa je što u teoretskom razmatranju šesterotaktni motor nudi 33% veću snagu za isti radni volumen i brzinu vrtnje.

Ovaj rad fokusirati će se na upravo taj patent Porsche-a u suradnji sa Technical university Cluj-Napoca, gdje će se detaljno opisati rad ovakvog motora, njegove prednosti i nedostaci. Izrađen je 3D CAD model klipnog mehanizma iz kojega je za proizvoljni kut zakreta koljenastog vratila moguće odrediti pomak klipa u odnosu na minimalnu gornju mrtvu točku, taj CAD model uspoređen je sa analitičkim rješenjem za pomak klipa. Izvedena je krivulja indiciranog momenta te je uspoređena sa istom za četverotaktni proces.

Ključne riječi: Šesterotaktni proces, hipotrohida, snaga, indicirani moment, klip

SUMMARY

The idea of designing and developing six-stroke engines, though not new, has only recently gained prominence due to the various restrictions imposed on internal combustion engines to reduce harmful emissions. While modern four-stroke engines are significantly more efficient and emit fewer harmful gases compared to those in the past, they still do not meet future requirements, pushing the industry toward full electrification. Porsche, in collaboration with the Technical University of Cluj-Napoca, has designed this engine as one of the many attempts by the automotive industry and its innovators to extend the lifespan and utility of internal combustion engines. Although at first glance this may seem like a complex and novel technology requiring extensive research, the situation is quite different. The six-stroke engine operates and is based entirely on conventional technology that has been available and in use for decades, making it inherently reliable. This engine uniquely combines the characteristics of four-stroke and two-stroke engines to improve efficiency, reduce emissions, and optimize performance. This is achieved by adding an additional power stroke, allowing energy from the previous cycle to be reused. In this way, it mimics the efficiency of the two-stroke principle. These additional processes reduce the amount of unburned fuel and increase overall energy utilization, resulting in greater efficiency compared to standalone two-stroke or four-stroke engines. What is particularly interesting about this process is that, in theoretical analysis, the six-stroke engine offers 33% more power for the same displacement and rotational speed.

This paper focuses on the Porsche patent developed in collaboration with the Technical University of Cluj-Napoca, providing a detailed description of the operation of such an engine, its advantages, and its drawbacks. A 3D CAD model of the piston mechanism has been created, enabling the determination of piston displacement relative to the top dead center for any given crankshaft angle. This CAD model has been compared to the analytical solution for piston displacement. A curve of the indicated torque has been derived and compared with that of the four-stroke process.

Key words: Six-stroke process, hypothyroid, engine power, torque, piston

1. UVOD

Razvoj motora s unutarnjim izgaranjem neupitno je bitna stavka današnjeg tehnološkog razvoja, a kroz povijest su inženjeri i inovatori nastojali unaprijediti ove sustave kako bi povećali njihovu učinkovitost, smanjili emisije štetnih plinova i smanjili potrošnju goriva. Jedna od manje poznatih, ali izuzetno zanimljivih inovacija u ovom polju je koncept šesterotaktnog motora (eng. Six-Stroke Engine). Iako je ovaj koncept prvi put predložen više od stotinu godina unatrag, tek u posljednjim desetljećima privukao je veću pozornost zahvaljujući sve većim zahtjevima za ekološki prihvatljivijim rješenjima.

Povijest razvoja šesterotaktnog motora započinje krajem 19. stoljeća. Prvi patenti povezani s ovom tehnologijom datiraju još iz ranih 1880-ih godina, kada su inovatori poput Alphonse Beau de Rochasa, koji posjeduje jedan od prvih patenata za četverotaktni motor, pokušavali razviti sustave koji bi nadmašili učinkovitost tadašnjih četverotaktnih motora. Samuel Griffin je 1883.g konstruirao prvi šesterotaktni motor na paru i gorivo koji se koristio kao generator električne energije. Međutim, prva značajna primjena i razvoj šesterotaktnog koncepta dogodila se tek u drugoj polovici 20. stoljeća, kada su inženjeri kao što su Bruce Crower i Malcolm Beare razvili vlastite inačice ove tehnologije. Crowerov dizajn iz 1970-ih, poznat kao Crower Six-Stroke, koristio je dodatne cikluse koristeći paru za bolje iskorištavanje toplinske energije.



Slika 1. Crower-ov šesterotaktni motor [2]

S druge strane je Beareov šesterotaktni motor uključivao radikalno drugačiji protuklipni sustav s rotirajućim ventilima.



Slika 2. Beare-ov šesterotaktni motor [2]

Unatoč brojnim pokušajima tijekom povijesti, šesterotaktni motori nisu doživjeli komercijalni uspjeh zbog tehničkih izazova, visokih troškova proizvodnje i nedovoljne podrške automobilske industrije. No, u posljednjim godinama, tehnologija je doživjela renesansu zahvaljujući modernim materijalima, sofisticiranim alatima za projektiranje i sve većem pritisku za smanjenjem emisija gdje mnoge države uvode radikalne zakone, poput Njemačke koja tvrdi da će 2035. zabraniti proizvodnju vozila sa motorima sa unutarnjim izgaranjem. Posebno zanimljiva vijest dolazi iz 2024. godine, kada je tvrtka Porsche u suradnji sa Tehničkim fakultetom Cluj-Napoca, poznata po svojim inovacijama u automobilskoj industriji, prijavila patent za novi dizajn šesterotaktnog motora. Ovaj patent predstavlja potencijalni preokret u razvoju motora, jer se fokusira na optimizaciju iskorištavanja goriva i smanjenje emisija CO₂, što je ključan cilj moderne automobilske industrije. Prema dostupnim informacijama, Porscheov šesterotaktni motor koristi dva dodatna ciklusa za rekuperaciju toplinske energije, što ne samo da povećava ukupnu učinkovitost, nego i smanjuje opterećenje na ključne komponente motora. Porscheova inovacija dolazi u pravo vrijeme kada industrija prelazi na elektrifikaciju, ali pokazuje da motori s unutarnjim izgaranjem još uvijek imaju potencijal za poboljšanjem i potencijalnim produljenjem njihova postojanja. Ova tehnologija mogla bi pronaći primjenu ne samo u automobilima, već i u specijaliziranim industrijama, poput pomorske i poljoprivredne mehanizacije gdje je potrebna visoka pouzdanost i učinkovitost.

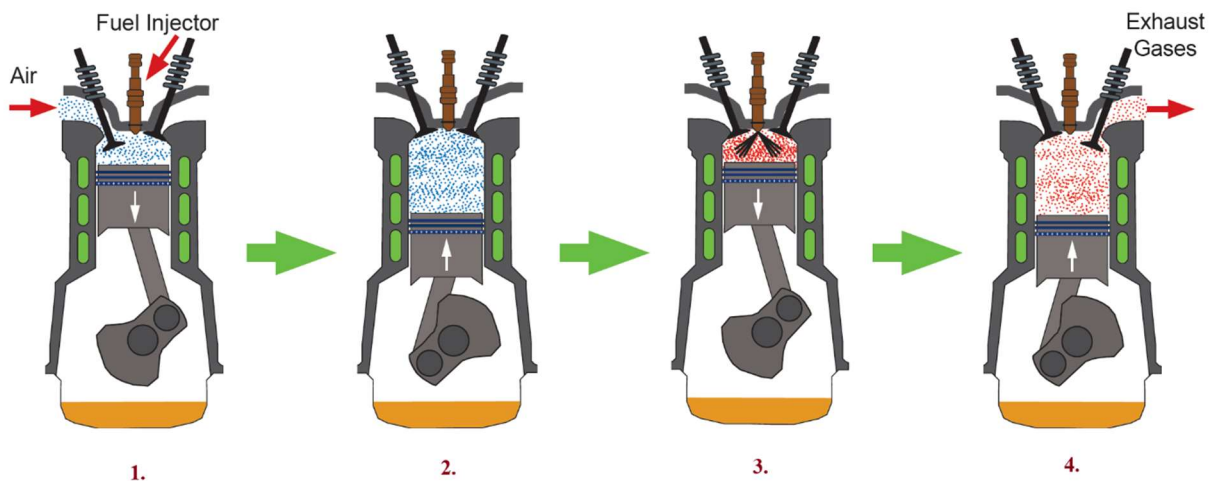
2. ŠESTEROTAKTNI MOTOR

2.1. Razumijevanje četverotaktnog motora

Kako bi razumjeli rad šesterotaktnog motora najprije moramo razumjeti kako radi četverotaktni motor, obzirom da ta dva procesa imaju mnogo sličnosti.

Konvencionalni četverotaktni motori rade na principu četiri takta po određenom redoslijedu. Na ovaj način motor pretvara kemijsku energiju sadržanu u gorivu u mehaničku energiju. Redoslijed taktova je sljedeći:

1. **Usisni takt** – klip se pomiče prema dolje od gornje mrtve točke (GMT), u isto vrijeme otvara se usisni ventil kroz koji zrak ili mješavina goriva i zraka ulazi u cilindar.
2. **Kompresijski takt** – klip se pomiče iz donje mrtve točke (DMT) prema gore čime tlači mješavinu goriva i zraka (odnosno samo zraka kod dizelskih motora) skroz do GMT, za to vrijeme u cilindru se ekstremno povećavaju tlak i temperatura.
3. **Radni takt (ekspanzija)** – kada klip dosegne GMT, smjesa se zapaljuje preskakanjem iskre na svjećici kod benzinskih motora ili dolazi do samozapaljenja uslijed visoke temperature i tlaka kod dizelskih motora. U svakom slučaju dolazi do eksplozije koja potiskuje klip prema DMT čime se generira korisna mehanička energija i rad.
4. **Ispušni takt** – klip se iz DMT kreće prema gore odnosno prema GMT, pri čemu se otvara ispušni ventil kroz koji izlaze ispušni plinovi.



Slika 3. Proces kod četverotaktnog motora

Bitno je uočiti kako jedan ciklus ovakvog četverotaktnog motora traje dvije pune rotacije koljenastog vratila odnosno 720° . Ovaj ciklus ponavlja se za svaki od cilindara sa svojevrsnim redoslijedom paljenja.

2.2. Modifikacije klipnog mehanizma

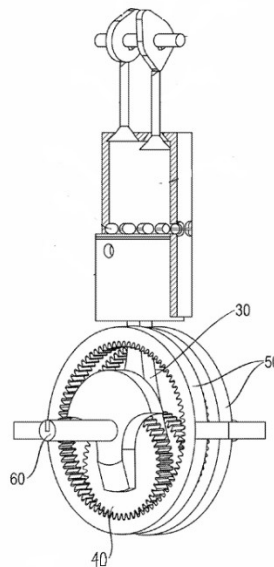
Šesterotaktni motor zasniva se na četverotaktnom, a razlika je očito u tome što ima dva dodatna takta, odnosno proces se odvija za razliku od četverotaktnog motora slijedećim redoslijedom :

1. Uisni takt
2. Kompresijski takt
3. Radni takt (ekspanzija)
4. Kompresijski takt
5. Radni takt (ekspanzija)
6. Ispušni takt

Poznavajući četverotaktni motor i njegov način rada može se zaključiti da je ovakav proces nemoguć bez značajnih modifikacija klipnog mehanizma. Proučavajući službeni patent [1] očito je, kako bi se ovakav proces ostvario, bilo potrebno modificirati koljenasto vratilo, cilindar, bregastu osovinu te potencijalno i nadodati još jedan sustav regulacije usisa i ispuha odnosno ventila. Također pomoću pužnog prijenosa ostvarene su neke zanimljive mogućnosti poput varijabilnog kompresijskog omjera, ali više o tome u daljnjem tekstu.

2.2.1. Koljenasto vratilo, klipnjača i planetarni zupčanik

Jedna od najbitnijih i najkompleksnijih promjena u odnosu na konvencionalni klipni mehanizam je planetarni zupčanik na koji je spojeno koljenasto vratilo. Kao što vidimo na slici 4. iz patenta, označen brojem 40 je planetarni zupčanik te brojem 50 označeni su zupčanci sa unutarnjim ozubljenjem.



Slika 4. Planetarni zupčanik [1]

Kako bi se ostvarilo hipotrohidno gibanje potrebno je rukavac klipnjače na planetarnom zupčaniku označen brojem 42 izmaknuti (Slika 5.) kako bi se ostvarila ekscentričnost označena slovom e.

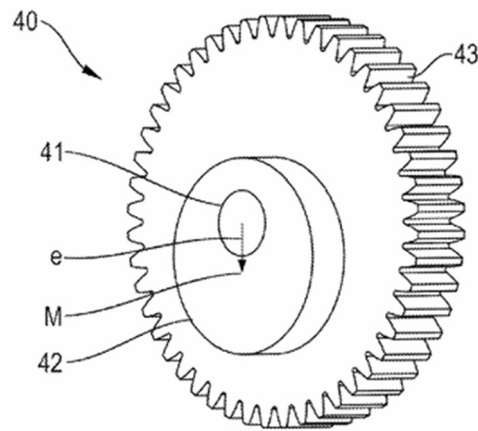
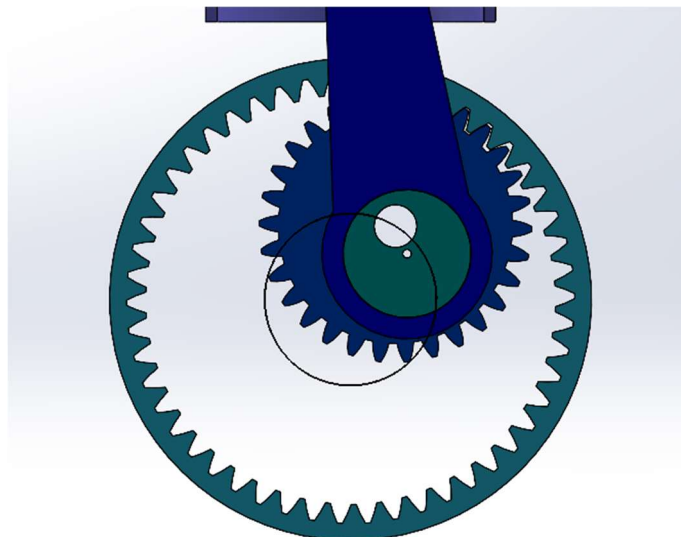


Fig. 2

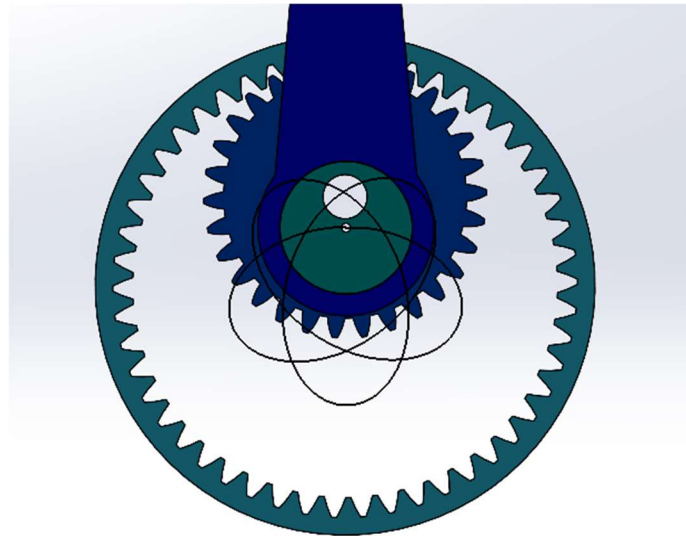
Slika 5. Ekscentričnost rukavca klipnjače i planetarnog zupčanika [1]

Bitno je primijetiti kako je koljenasto vratilo spojeno koncentrično s planetarnim zupčanikom, označeno brojem 41 (Slika 5.), odnosno da koljenasto vratilo ima u potpunosti pravilno kružno gibanje.

Sada kada uzmemo ove opisane elemente i spojimo ih te simuliramo gibanje, određujemo opisane putanje gibanja ovih elemenata. Vidimo kako se spoj koljenastog vratila uistinu giba po kružnici (Slika 6.), dok je vidljivo kako se rukavac giba po hipotrohidnoj putanji (Slika 7.).



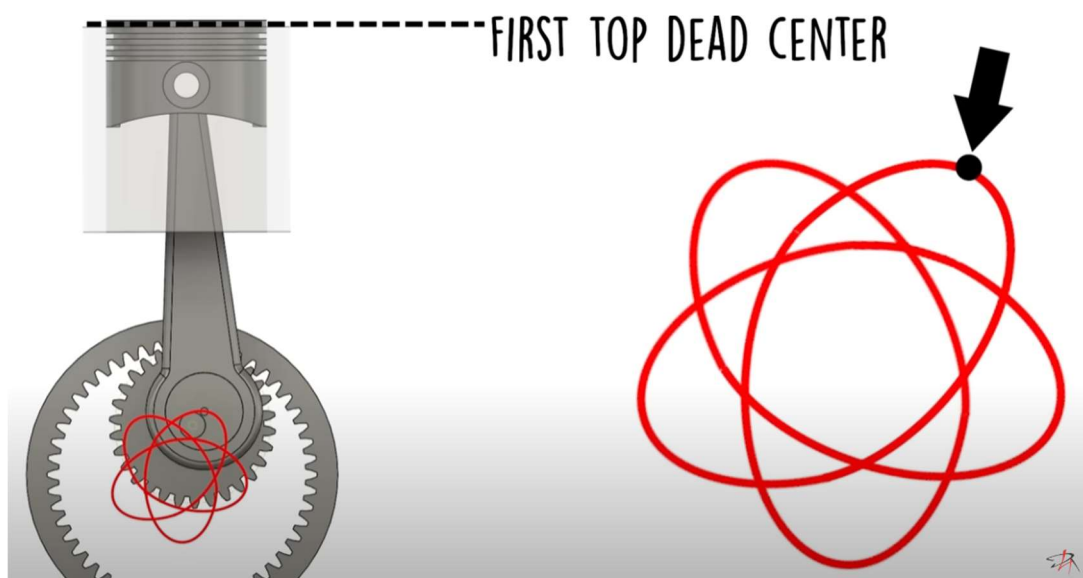
Slika 6. Putanja gibanja planetarnog zupčanika



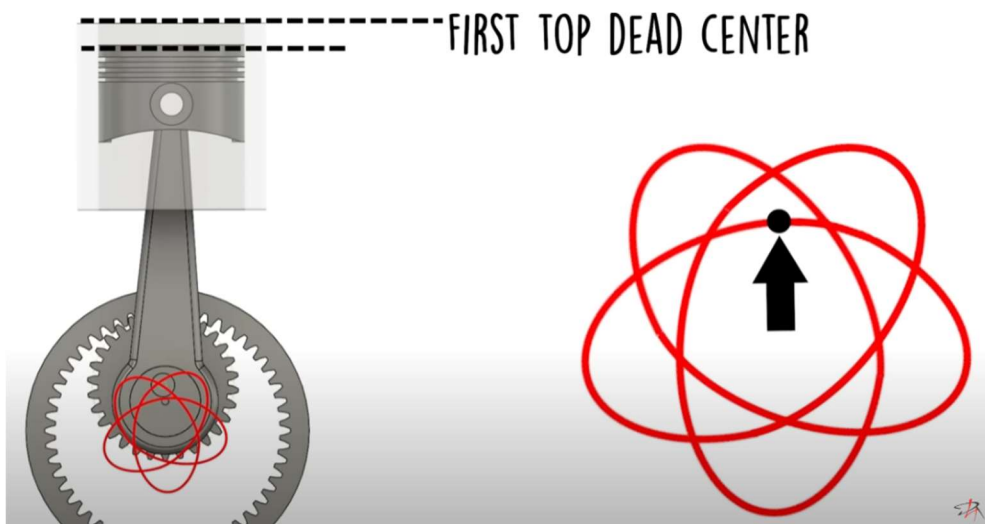
Slika 7. Putanja gibanja ekscentričnog elementa

Dodavanjem klipnjače na rukavac planetarnog zupčanika i simuliranjem gibanja dolazimo do ključnih zaključaka i razumijevanja načina funkcioniranja ovakvog motora.

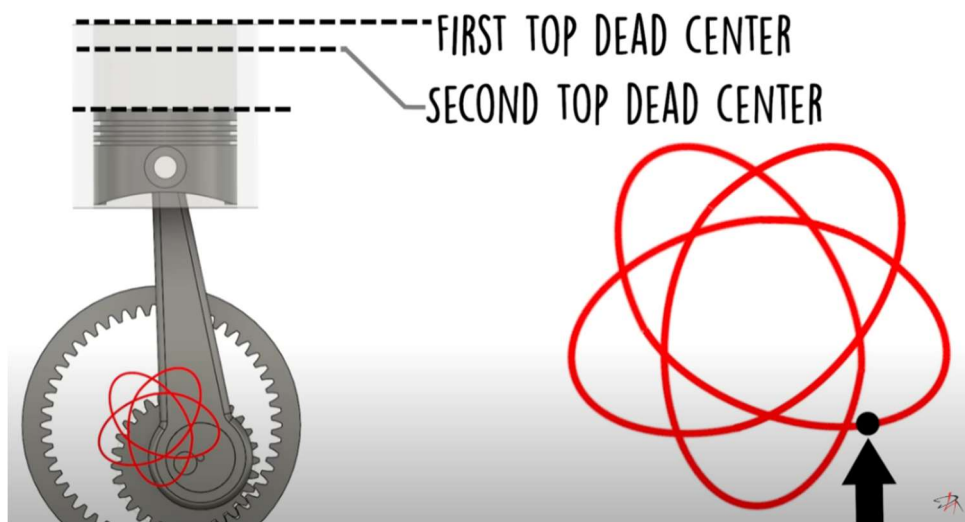
Na slikama 8., 9., 10., 11. označene su ključne točke procesa šesterotaktnog procesa. Zahvaljujući hipotrohidnom gibanju, koje opisuje putanja gibanja rukavca klipnjače, određujemo dvije gornje mrtve točke (GMT) te isto tako dvije donje mrtve točke (DMT). Naime, upravo pomoću ovog planetarnog zupčanika ostvarena je mogućnost za dva dodatna takta bez prevelikih i kompliciranih preinaka na klipnom mehanizmu.



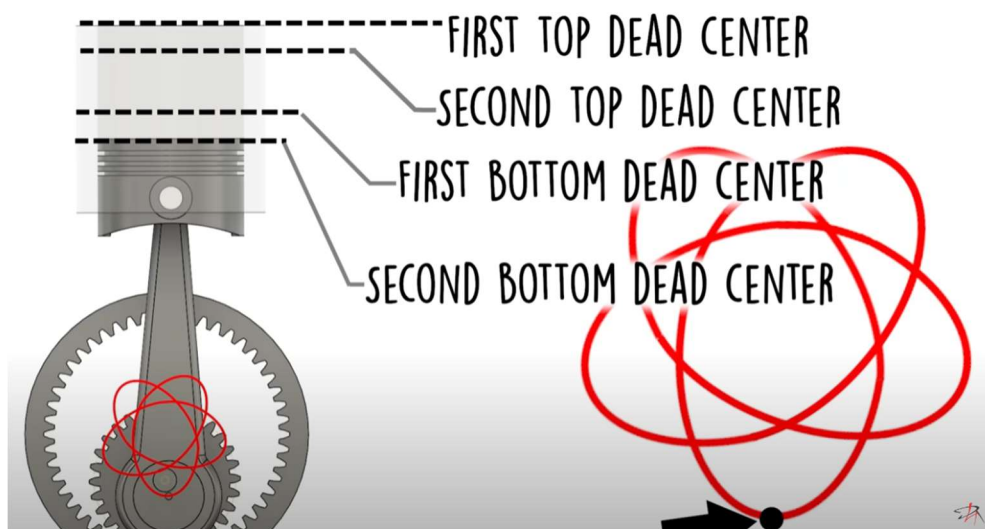
Slika 8. 1. gornja mrtva točka (1. GMT) [3]



Slika 9. 2. gornja mrtva točka (2.GMT) [3]



Slika 10. 1. donja mrtva točka (1. DMT) [3]



Slika 11. 2. donja mrtva točka (2. DMT) [3]

2.2.2. Pužni prijenosnik

Još jedna zanimljiva, makar na prvu beznačajna modifikacija konvencionalnog klipnog mehanizma u svrhu šesterotaktnog motora je upravo pužni prijenosnik koji omogućava pomicanje vanjskog zupčanika za vrijeme rada motora. Uz pomoć pužnog prijenosnika, koji je (Slika 12.) označen brojem 80, moguće je imati potpunu kontrolu nad varijabilnim kompresijskim omjerom, te također omogućava mijenjanje hipotrohidne putanje koja je ranije prikazana što otvara razne mogućnosti korištenja ovakvog motora.

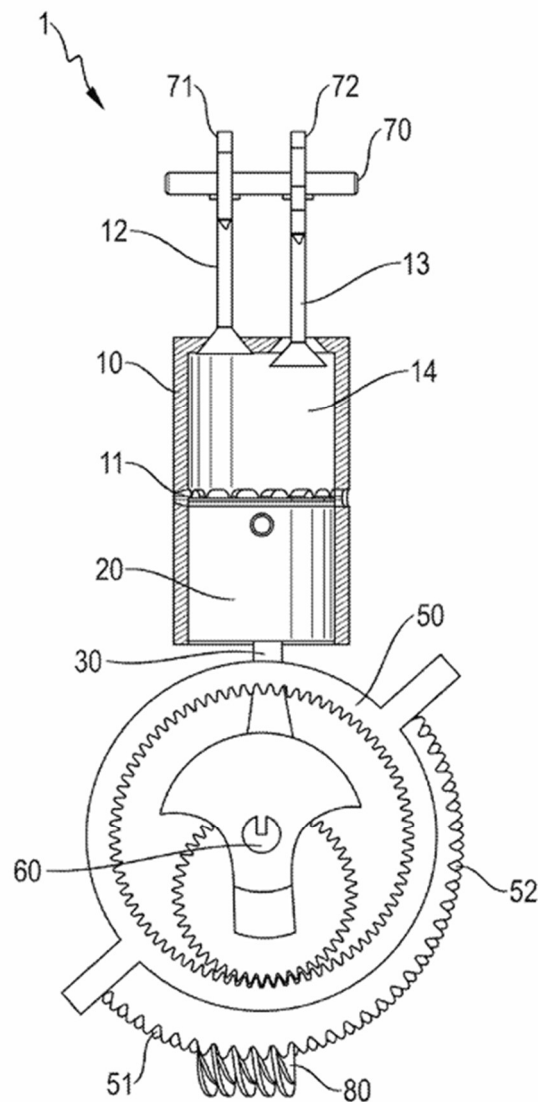


Fig. 7

Slika 12. Pužni prijenosnik [1]

2.2.3. Bočni kanali na cilindru

Bočni kanali označeni brojem 11 na cilindru također su od krucijalne važnosti. Oni se nalaze točno između 1. DMT i 2. DMT i njihova visina jednaka je upravo udaljenosti između donjih mrtvih točaka (Slika 13.). Također, visina bočnih kanala, odnosno udaljenosti između donjih mrtvih točaka, jednaka je iznosu ekscentričnosti rukavca klipnjače. Uloga bočnih kanala je omogućiti ulaz svježeg zraka u cilindar kada ih klip otvori, što je idealno, jer po hipotrohidnoj putanji oni će se otvoriti samo kada vrh klipa ide do 2. DMT. Osim njih, za svježi zrak, odnosno mješavinu svježeg zraka i goriva, zaduženi su i konvencionalni ventili označeni brojevima 12 i 13 koji rade po principu iz četverotaktnog motora.

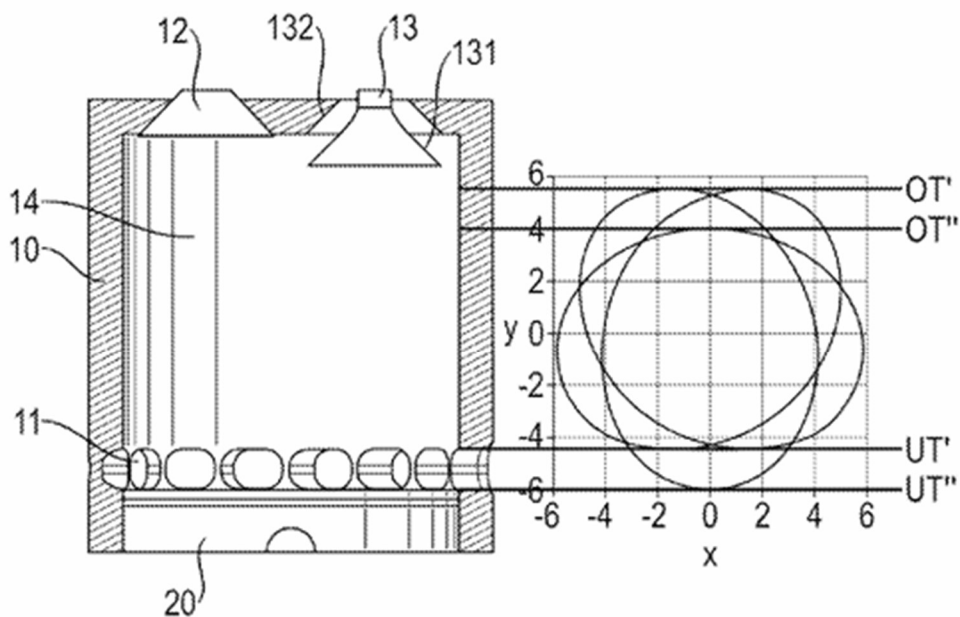


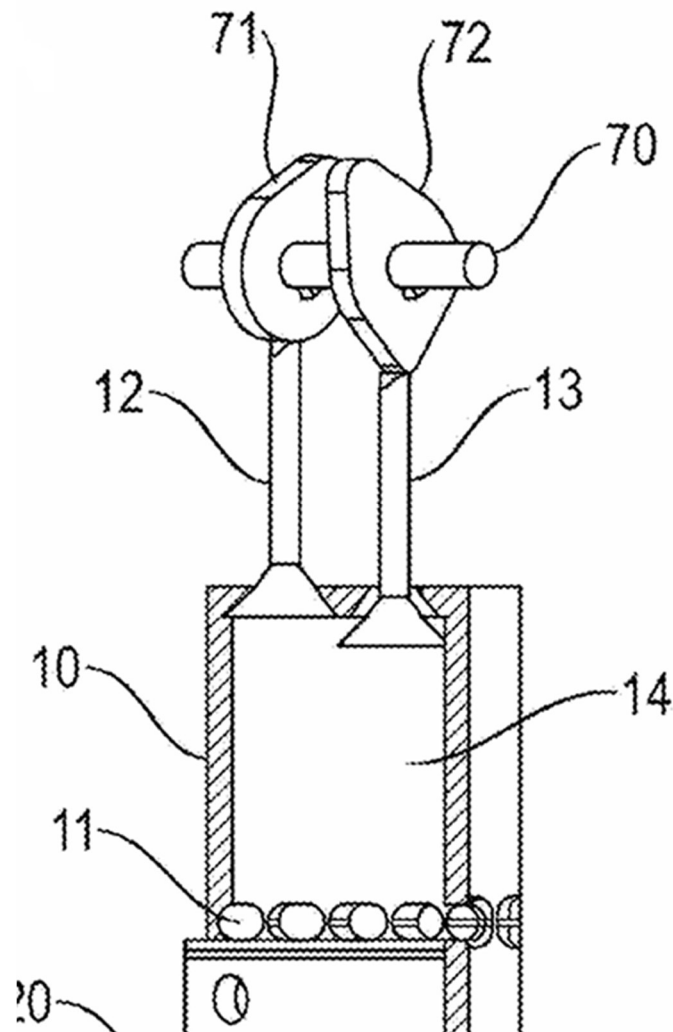
Fig. 3

Slika 13. Bočni kanali na cilindru [1]

Potencijalno, bočni kanali na cilindru mogu i nabijati zrak u cilindru ako je to potrebno, te se mogu izvesti i kao ventili iako bi to bila kompleksnija konstrukcija.

2.2.4. Preinake na bregastoj osovini

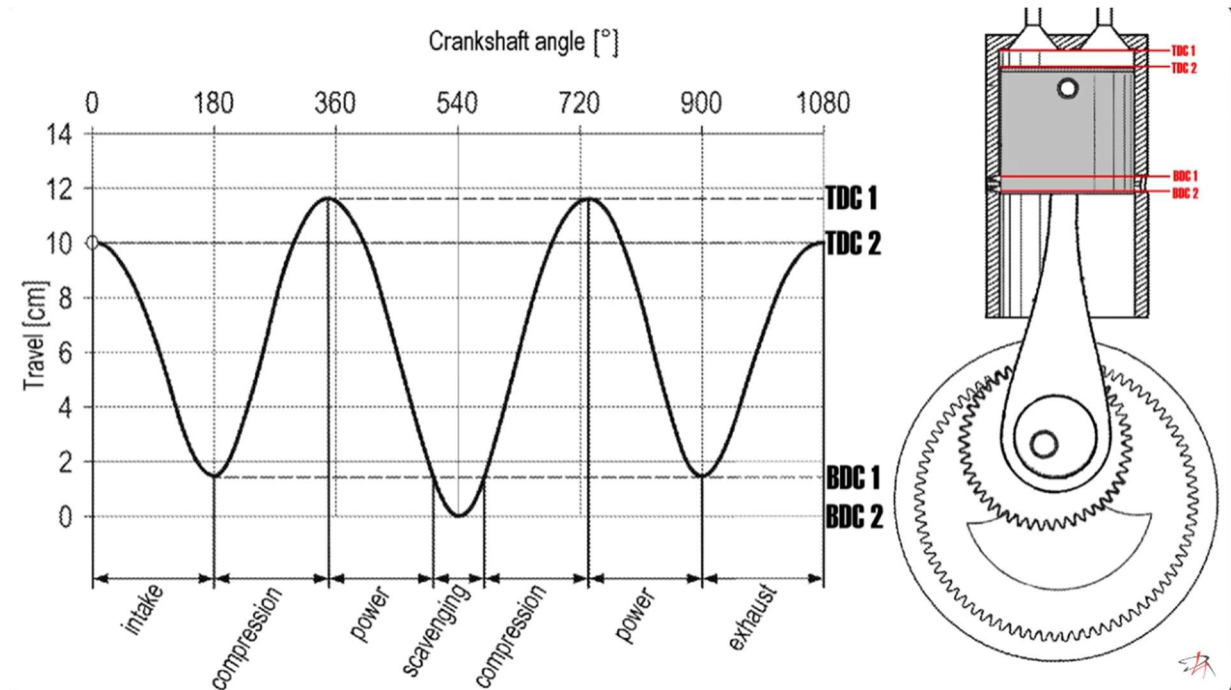
Obzirom na proces potreban za ostvarenje šest taktova, bregasta osovina se neće okretati kao kod četiri takta na pola brzine koljenastog vratila, već na trećini brzine. Zbog toga trebat će nešto veći zupčanik bregaste osovine kako bi se ostvario takav prijenosni omjer. Osim toga, potrebno je napraviti i dodatan brijeg na ispušnom dijelu jer do otvaranja ispušnog ventila dolazi dva puta tokom procesa.



Slika 14. Preinake na bregastoj osovini [1]

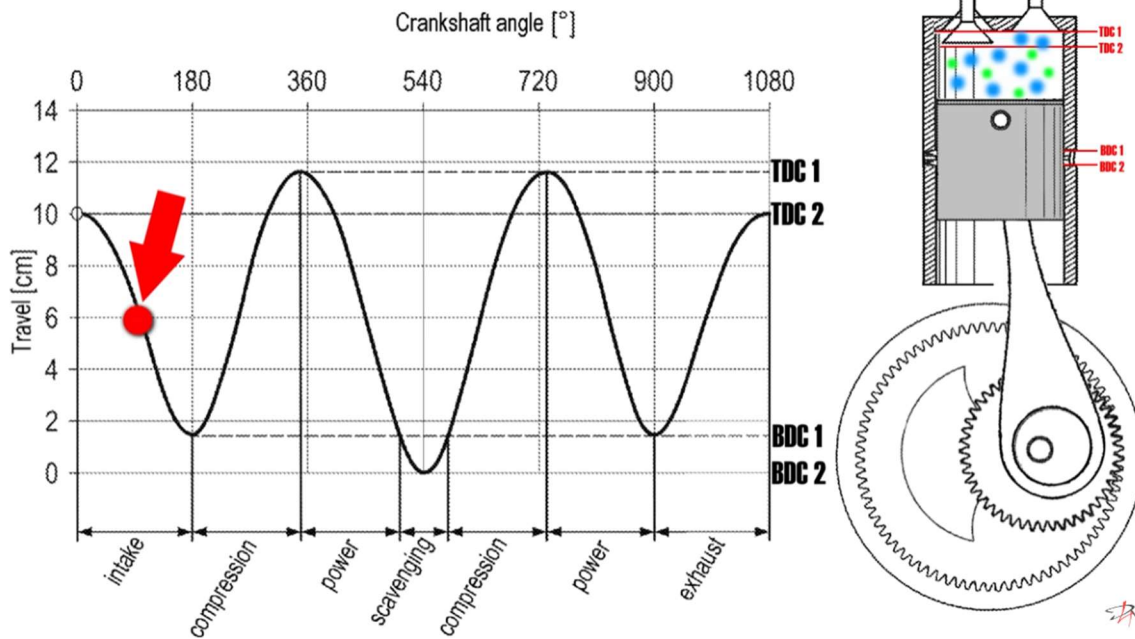
2.3. Puni radni proces šesterotaktnog motora

Pomoću svih modifikacija napravljenih na klipnom mehanizmu sada možemo izvesti puni radni proces šesterotaktnog motora. Cijeli radni proces šesterotaktnog motora pratit ćemo kroz pozicije klipa i stupnja okretanja koljenastog vratila (Slika 15.). Treba uzeti u obzir da će proces biti opisan za Ottov motor, međutim isto bi vrijedilo i za Dizelov kada se ne bi uzimala smjesa zraka i goriva već zrak i kada bi se gorivo ubrizgavalo u trenucima neposredno prije dostizanja klipa u gornje mrtve točke. Naravno u tom slučaju ne bi dolazilo do preskakanja iskre na svjećici jer je ne bi niti bilo.

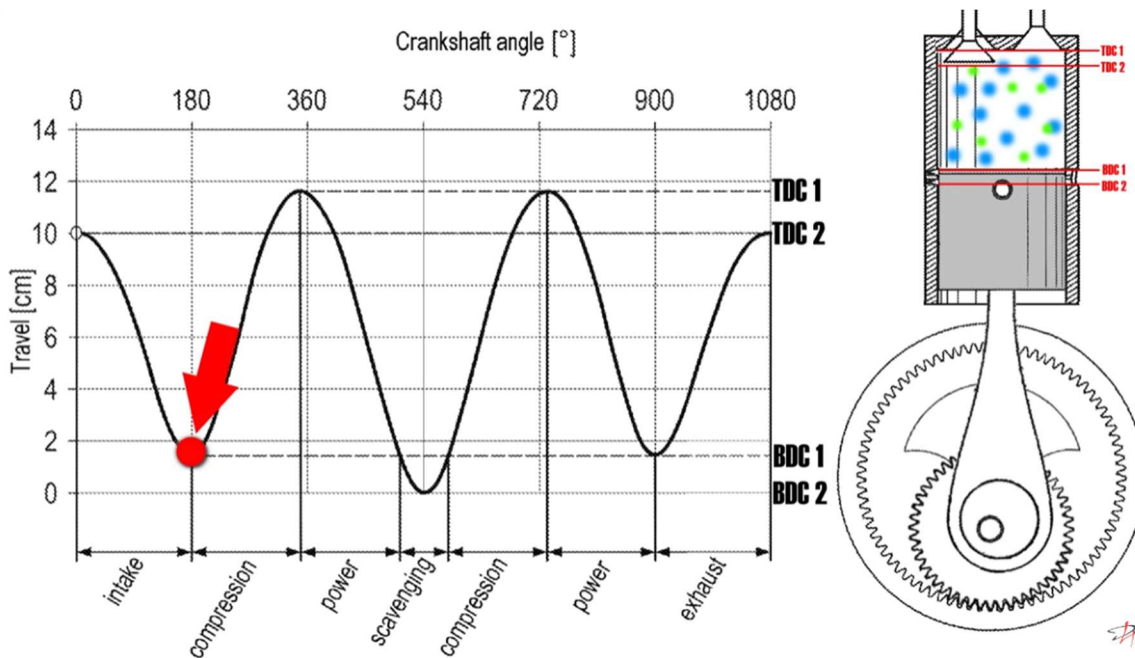


Slika 15. Puni radni proces šesterotaktnog motora [3]

1. **Usisni takt (Slika 16. i Slika 17.)** –gledajući po kutu zakreta koljenastog vratila, proces traje od 0~180°, približno zbog karakterističnog gibanja hipotrohide koje je kasnije detaljno pojašnjeno, a započinje u 2. gornjoj mrtvoj točki. Tokom ovog takta usisni ventil, kroz koji ulazi svježja smjesa goriva i zraka, otvara se dok se klip kreće prema dolje. Usisni takt završava u 1. DMT čime ne otvara bočne kanale na cilindru zahvaljujući ekscentričnosti rukavca klipnjače koji sprječava klip da se spusti ispod 1. DMT.

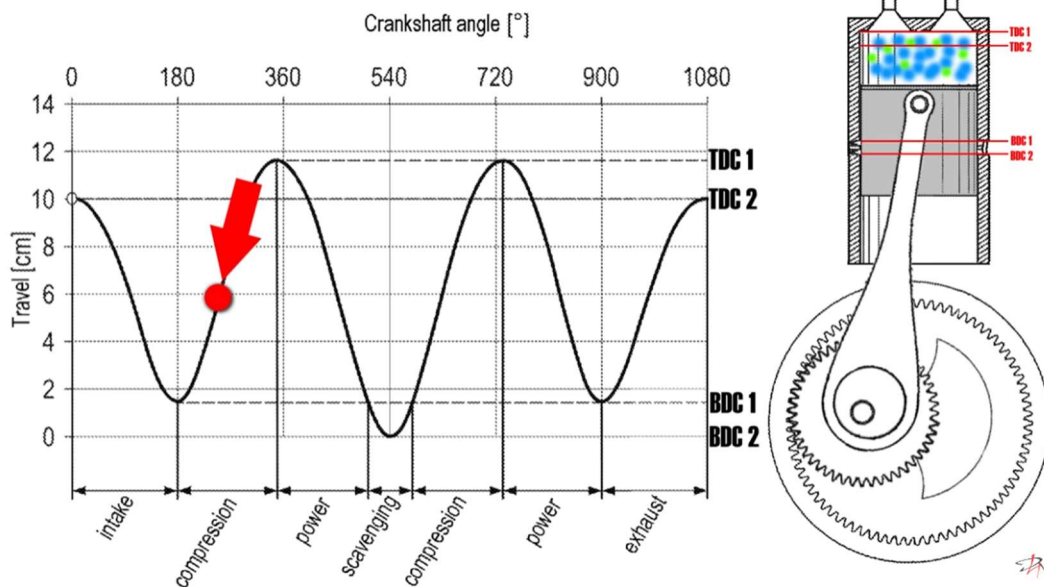


Slika 16. Usisni takt u tijeku [3]

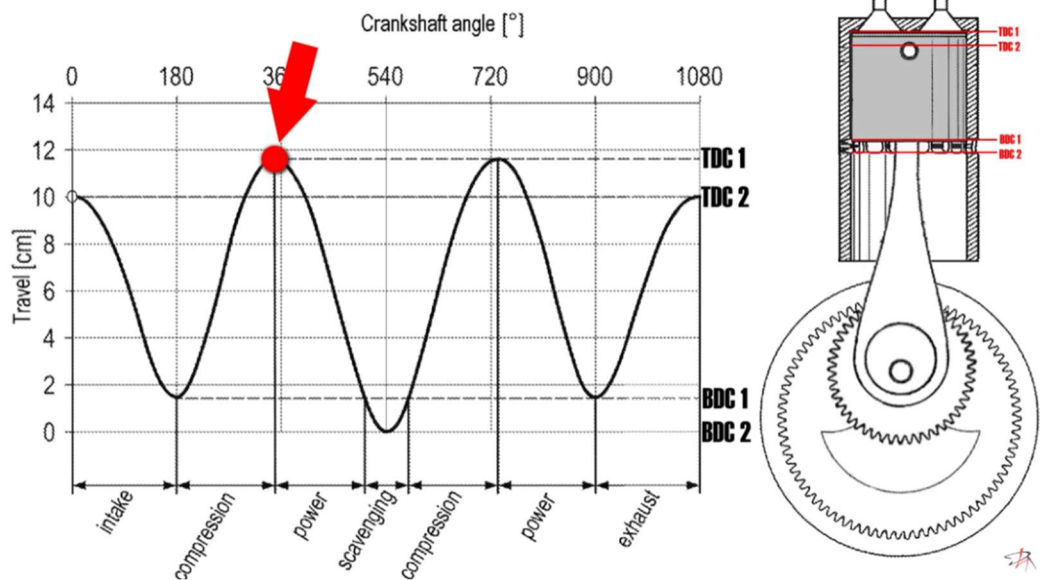


Slika 17. Usisni takt na kraju [3]

2. **Kompresijski takt (Slika 18. i Slika 19.)** – gledajući po kutu zakreta koljenastog vratila, proces traje od $180^\circ \sim 360^\circ$, a započinje kada klip dosegne 1. DMT. Od tog trenutka, klip se kreće kretati prema gore čime stlačuje smjesu zraka i goriva. Klip se zahvaljujući ekscentričnom elementu sada kreće skroz do 1. GMT i u potpunosti stlačuje smjesu zraka i goriva. Neposredno prije dostizanja klipa do 1. GMT preskače iskra na svjećici i dolazi do zapaljenja smjese goriva i zraka,.

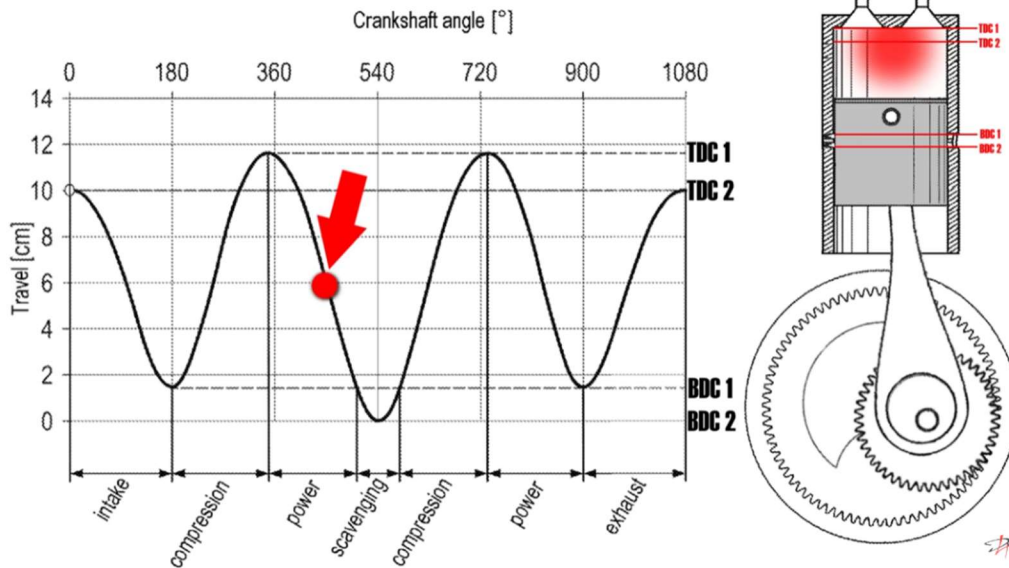


Slika 18. Kompresijski takt u tijeku [3]

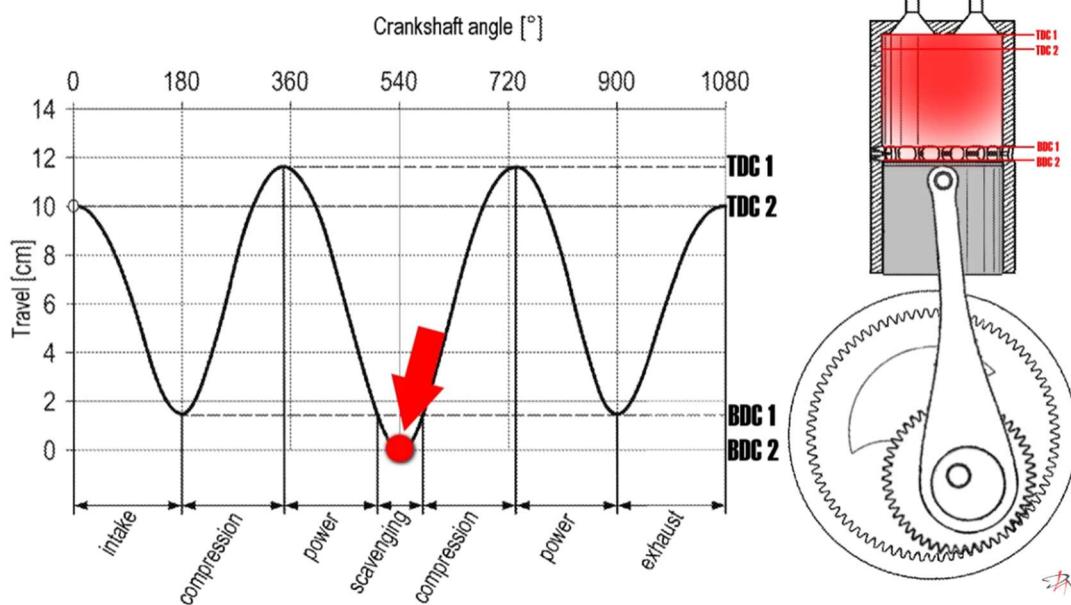


Slika 19. Kompresijski takt na kraju [3]

3. **Radni takt (Slika 20. i Slika 21.)** - gledajući po kutu zakreta koljenastog vratila, proces traje od 360° ~ 540° , a započinje zapaljenjem smjese goriva i zraka čime se oslobađa kemijska energija u gorivu i dolazi do guranja klipa prema dolje, odnosno stvaranja korisnog momenta na koljenastom vratilu. Sada, zahvaljujući ekscentričnosti, klip ide do 2. DMT gdje dolazi do otvaranja bočnih kanala i time završava radni takt.



Slika 20. Radni takt u tijeku [3]

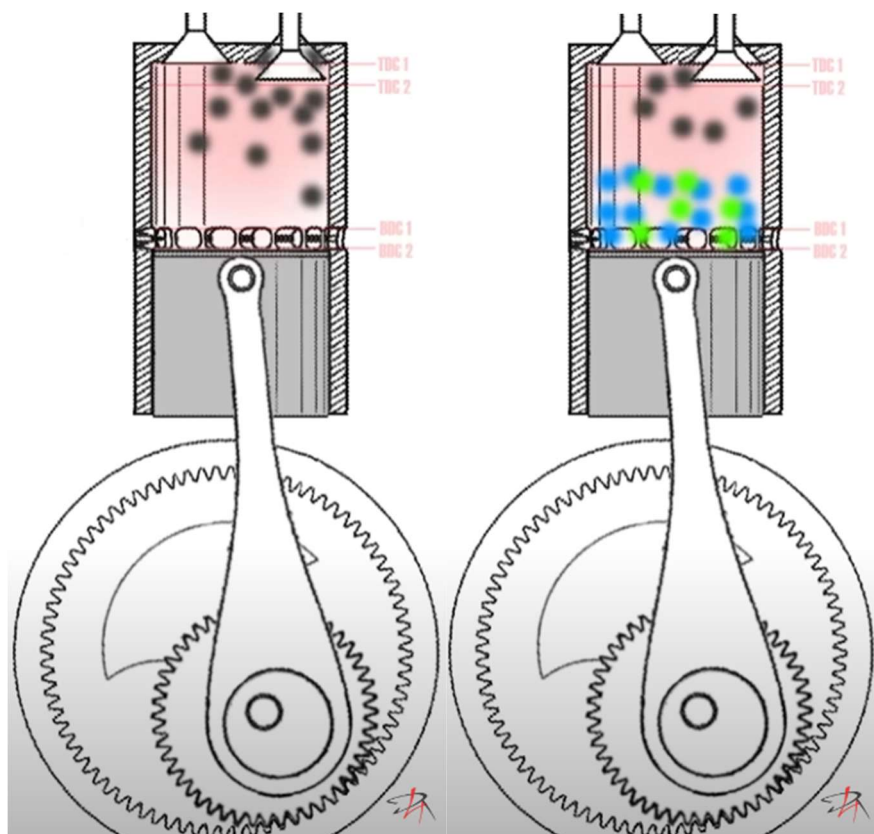


Slika 21. Radni takt na kraju [3]

Ispiranje cilindra

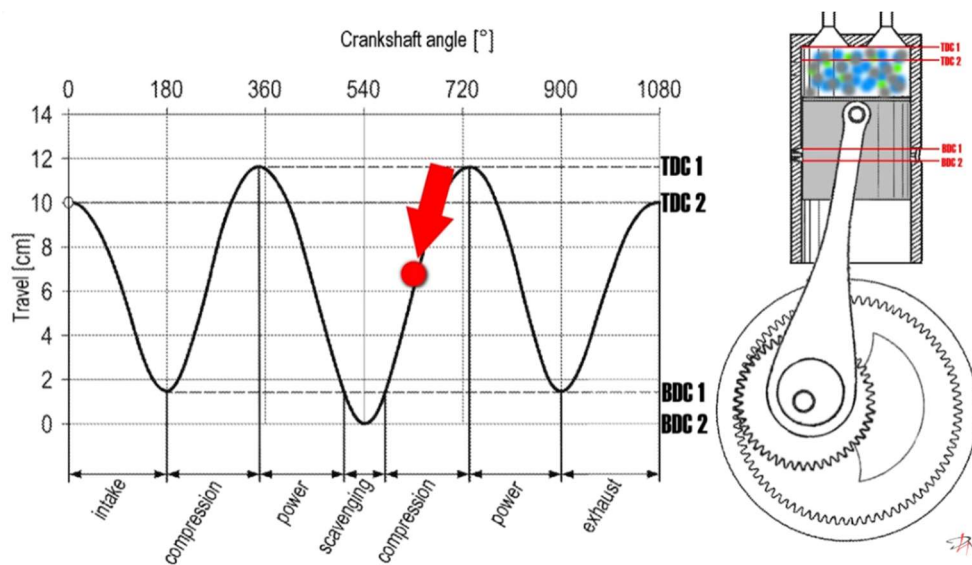
Iako se ne smatra posebnim taktom kod šesterotaktnog motora, izuzetno je bitno ispiranje cilindra koje podsjeća na ono ispiranje cilindra koje se događa kod dvotaktnih motora, a odvija se između prvog radnog takta i drugog kompresijskog takta. Točnije, započinje kada klip dosegne 1. DMT čime krene otvarati bočne kanale. Idući bitan trenutak je kada klip dosegne 2. DMT i u potpunosti otvori bočne kanale. Tada se otvara ispušni ventil na vrhu cilindra kroz koji izlaze nadtlačeni ispušni plinovi.

Kako nadtlačeni ispušni plinovi izlaze kroz ventil, iza sebe u cilindru ostavljaju vakuum koji povlači smjesu zraka i goriva iz bočnih kanala. Tu nailazimo na problem nadtlačnosti ispušnih plinova, odnosno oni pri niskim okretajima motora najčešće nisu dovoljno nadtlačeni da bi se stvorila dovoljna razlika tlakova u cilindru i u ispušnom ventilu kako bi se cilindar u potpunosti „isprao“ ili kako bi ispušni plinovi u potpunosti izašli i kako bi došlo do izmjene radne tvari. Ovaj problem može se riješiti nabijanjem zraka u bočne kanale npr. Turbokompresorom. Također jedno od zanimljivih rješenja koje se spominje je izbjegavanje odlaska klipa do 2. DMT pužnim prijenosnikom na obodu vanjskog zupčanika.

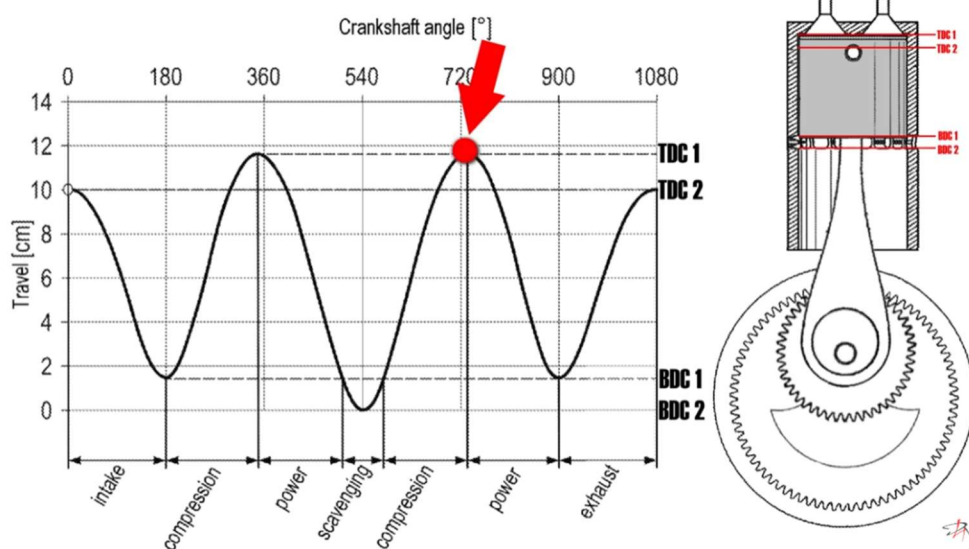


Slika 22. Ispiranje cilindra [3]

4. **Drugi kompresijski takt (Slika 23. i Slika 24.)** - gledajući po kutu zakreta koljenastog vratila, proces traje od 540° ~ 720° , a započinje kretanjem klipa iz 2. DMT prema gore, odnosno prekrivanjem bočnih kanala te zatvaranjem ispušnog ventila. Obzirom da su u odnosu na visinu cilindra bočni kanali jako niski te da su zbog toga otvoreni na jako kratko vrijeme, možemo pretpostaviti da svježa smjesa goriva i zraka neće u potpunosti nadomjestiti ispušne plinove te da će i oni ostati u cilindru, stoga ćemo imati smjesu goriva zraka i ispušnih plinova koja se komprimira, zahvaljujući ekscentričnosti klipnjače, do 1. GMT gdje neposredno prije njezinog dostizanja dolazi do preskakanje iskre na svjećici.

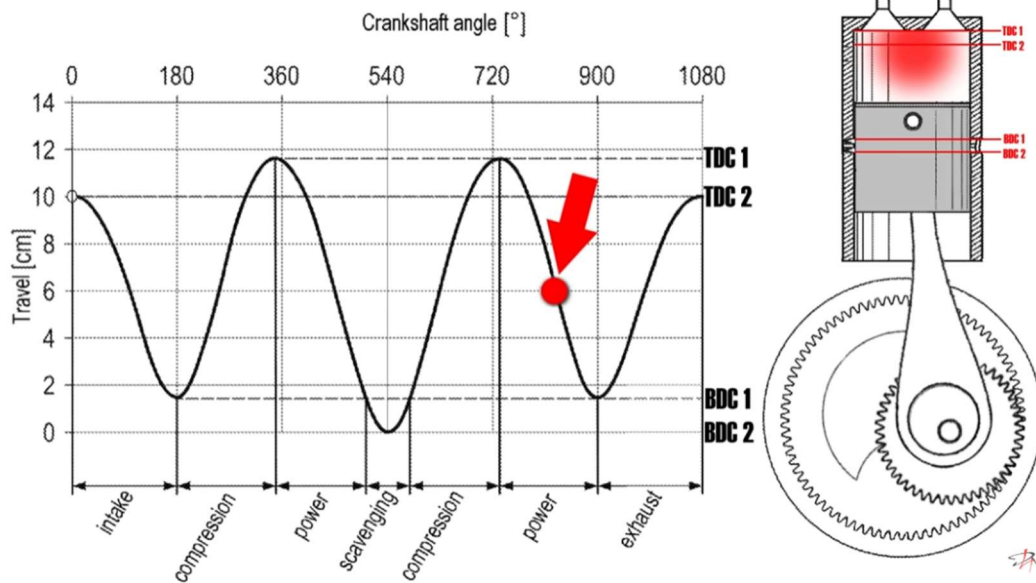


Slika 23. Drugi kompresijski takt u tijeku [3]

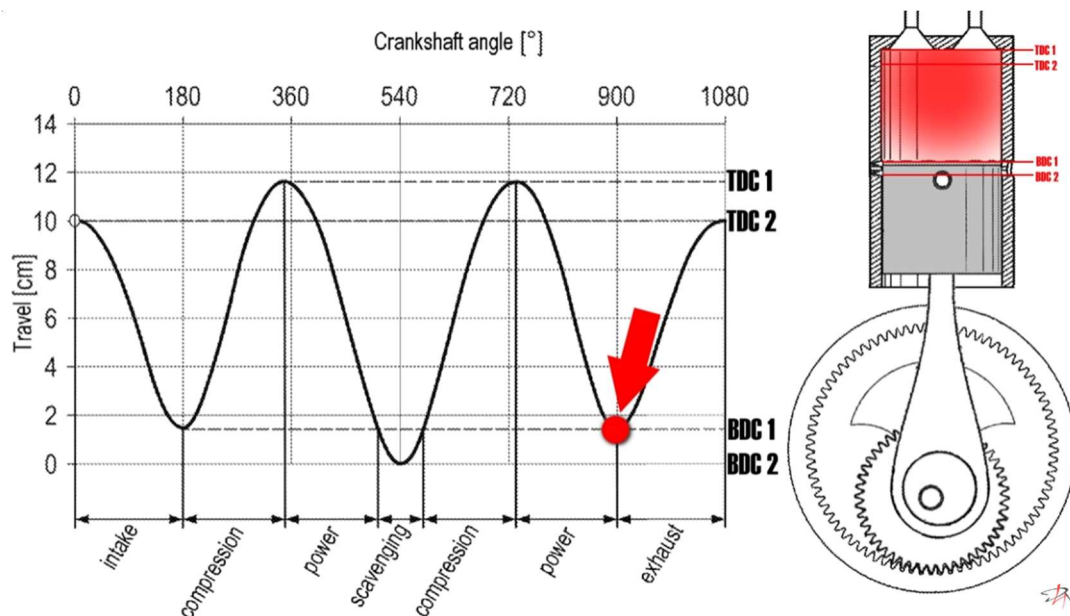


Slika 24. Drugi kompresijski takt na kraju [3]

5. **Drugi radni takt (Slika 25. i Slika 26.)** - gledajući po kutu zakreta koljenastog vratila, proces traje od 720° ~ 900° , a započinje zapaljenjem smjese goriva i zraka čime se oslobađa kemijska energija u gorivu i dolazi do guranja klipa prema dolje, odnosno stvaranja korisnog momenta na koljenastom vratilu. Obzirom da u ovom radnom taktu ne radimo sa čistom smjesom goriva i zraka, već sa smjesom goriva, zraka i ispušnih plinova ovaj radni takt dati će nešto manje korisnog momenta. Ovaj radni takt traje, zahvaljujući ekscentričnosti, do 1. DMT odnosno ne dolazi do otvaranja bočnih kanala.

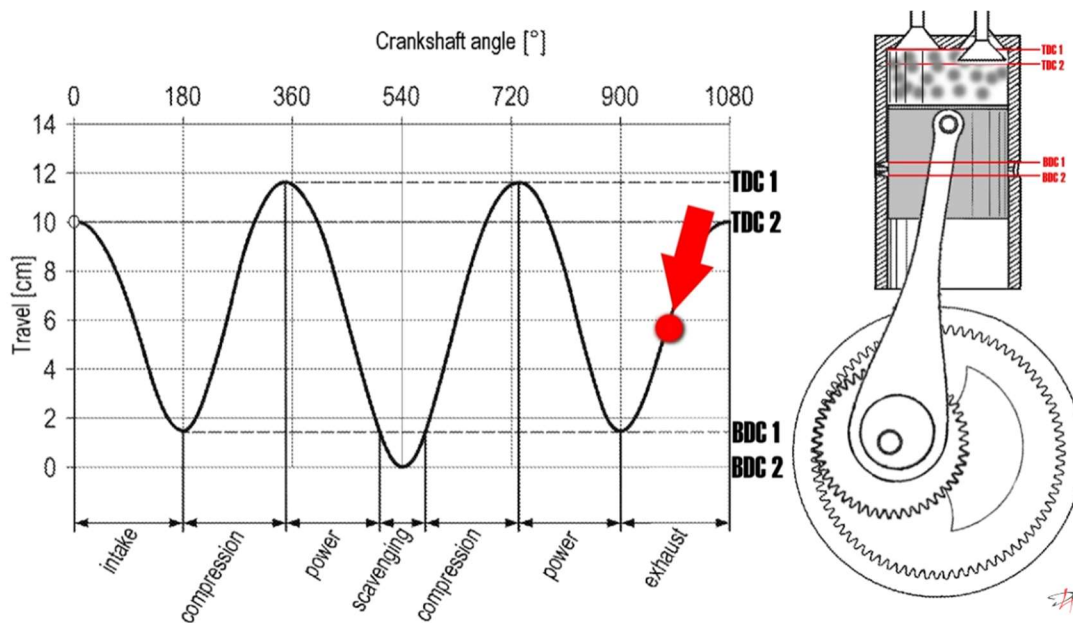


Slika 25. Drugi radni takt u tijeku [3]

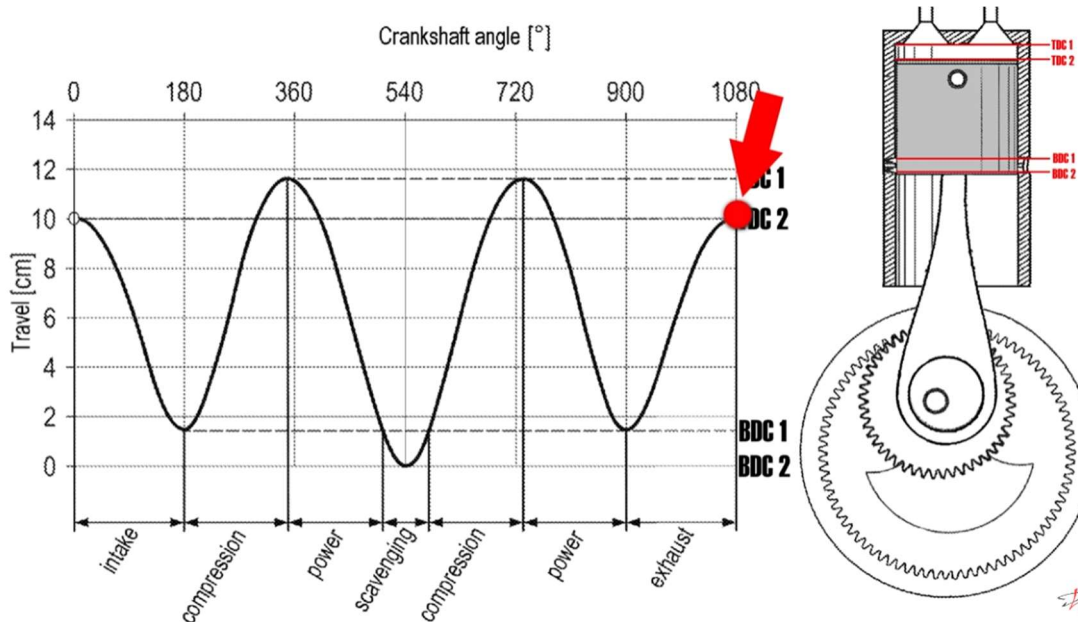


Slika 26. Drugi radni takt na kraju [3]

6. **Ispušni takt (Slika 27. i Slika 28.)** - gledajući po kutu zakreta koljenastog vratila, proces traje od 900° ~ 1080° , započinje u 1. DMT u kojem se trenutku i otvara ispušni ventil te se klip kreće prema gore, odnosno ide do 2. GMT, gdje proces završava i započinje novi proces, usisnim taktom i istim redoslijedom.



Slika 27. Ispušni takt u tijeku [3]



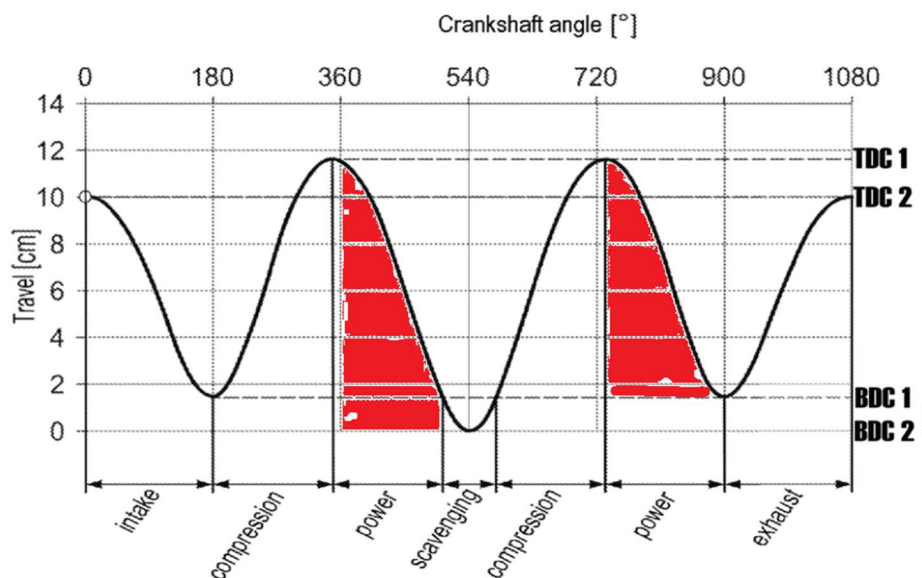
Slika 28. Ispušni takt na kraju [3]

2.4. Prednosti šesterotaktnog motora

2.4.1. Više snage

Jedna od najbitnijih prednosti ovakve izvedbe šesterotaktnog motora je ta što na ovaj način generiramo više snage nego kod konvencionalnog četverotaktnog motora za isti radni volumen i brzinu vrtnje. Ako pogledamo razvodni dijagram šesterotaktnog motora (Slika 29.), vidimo da u prvih 720° rotacije nema nikakve razlike korisne snage u odnosu na četverotaktnog motora. Ono što je ključno je da nakon tog trenutka šesterotaktni ide u novi radni takt, dok četverotaktni proces u tom trenutku pokreće novi ciklus i njegov idući radni takt je tek na 1080° .

Kada bi, radi lakšeg razumijevanja, uzeli 720° rotacije vidjeli bi da četverotaktni proces u tom periodu napravi 10 radnih taktova, a šesterotaktni 13.34 što je potencijalna razlika u snazi od 33.34 %. Obzirom da kod šesterotaktnog motora svaki drugi radni takt daje nešto manje snage zbog prisutnosti ispušnih plinova u cilindru ne možemo reći da se radi o 33.34 % većoj snazi, već nešto manje, ali i dalje jako impresivno i nikako zanemarivo.

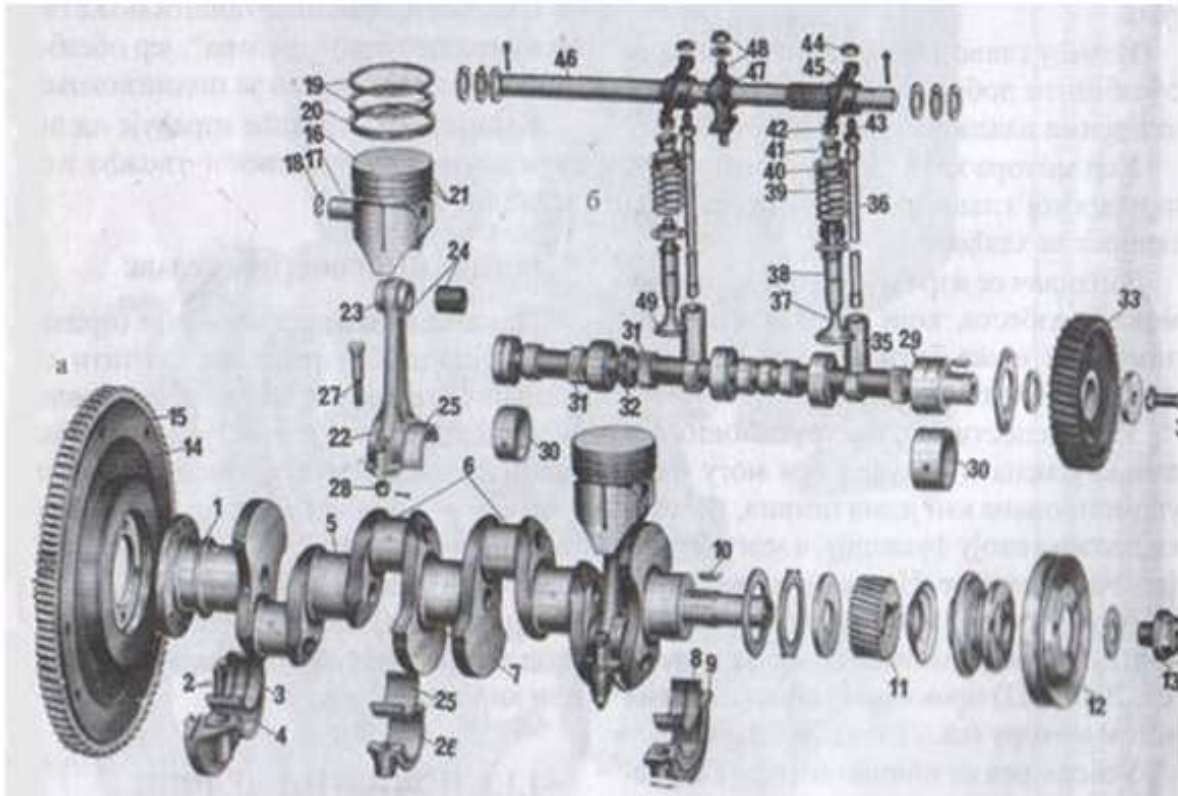


Slika 29. Razvodni dijagram šesterotaktnog motora [3]

Osim činjenice da teorijski ovaj motor daje više snage kao što je gore opisano, bitno je zamijetiti što nam njegov način rada omogućava u vidu nabijanja motora. Kod konvencionalnih motora, problem nabijanja motora visokim tlakovima je između ostalog u emisijama ispušnih plinova. Kako bi se spriječilo detonantno izgaranje do kojeg dolazi kod visoko nabijenih uvjeta motora, potrebno je imati bogatu smjesu goriva i zraka. Kada se takva bogata smjesa goriva zapali, iza sebe ostavlja značajnu količinu neizgorjelog goriva koje se onda izbacuje kroz ispušni sustav u okoliš. To je naravno nepoželjno, ali kod šesterotaktnog motora takvog problema nema. Kao što znamo, zbog kratkog vremena za koje je otvoren ispušni ventil, dobar dio ispušnih plinova, a u ovom slučaju i ostatka goriva, ostaje u cilindru i ponovno se komprimira i zapaljuje.

2.4.2. Konvencionalna tehnologija

Iduća prednost, odnosno korisna činjenica šesterotaktnog motora je što se za njegovo konstruiranje koristi u potpunosti, do zadnjeg detalja, postojeća, testirana i pouzdana tehnologija. Od zupčanika, koljenastog vratila, klipnjače, klipa, ventila, bregaste osovine, cilindra pa čak i bočnih kanala na cilindru koji se koriste kod dvotaktnih motora, sve su to dijelovi koji se koriste u današnjim motorima. To znači da nije potrebno vrijeme i novac kako bi se tehnologija istražila, provjerila i pokazala korisnom. Također, zahvaljujući konvencionalnoj tehnologiji, izvedba ovakvog motora je poprilično jednostavna i kompaktna što bi moglo biti jako korisno za veće količine proizvodnje.



Slika 30. Klipni mehanizam četverotaktnog motora

2.4.3. Bolja efikasnost

Obzirom da je potencijal poboljšanja iskoristivosti ovog tipa motora upravo u ponovnom iskorištenju neizgorenog goriva (kako je opisano u odjeljku 2.4.1.) šesterotaktni motor neće, pri normalnom načinu rada odnosno slabom opterećenju gdje koristimo stehiometrijsku smjesu goriva, biti značajno efikasniji od četverotaktnog motora. Njegova efikasnost i prednost nad četverotaktnim motorom dolazi pri visokim opterećenjima motora pri korištenju bogate smjese goriva, što naravno nije zanemarivo obzirom da postoje gospodarska vozila, radni strojevi pa čak i automobili visokih performansi koji bi svoj životni vijek provodili upravo pri visokom opterećenju.



Slika 31. Porsche 911 GT3 RS (992.1)

2.5. Nedostatci šesterotaktnog motora

2.5.1. Zupčanici

Prvi nedostatak jako je očit, a to su planetarni zupčanik i vanjski zupčanik s unutarnjim ozubljenjem koji se moraju dodati par po cilindru. Osim što povećavaju masu motora, zupčanici dovode i do gubitaka korisne snage koji su uvijek nepoželjni.

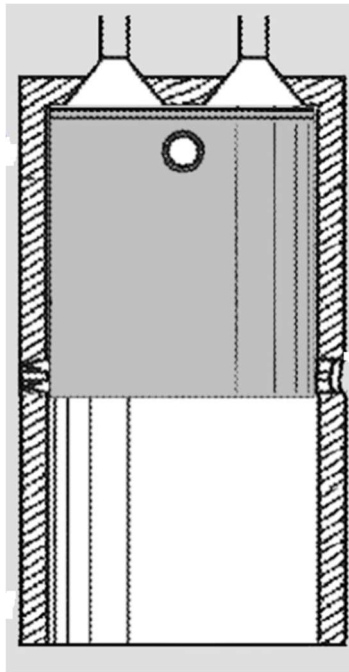


Slika 32. Zupčanici

2.5.2. Prekrivanje bočnih kanala cilindra

Problem prekrivanja bočnih kanala cilindra dok je klip u 1. i 2. GMT može se riješiti na više načina. Po nacrtima iz patenta [1] nema rješenja ovog pitanja. Neka od logičnih rješenja su dodavanje neke vrste ventila na bočne kanale koji bi regulirali usis svježe radne tvari u cilindar ili možda dovoljno dugačak klip.

Klip koji bi bio dovoljno dugačak da prekrije bočne kanale dok je njegov vrh u 1. GMT (Slika 33.) je otprilike veličine pol cilindra što je jako nepoželjno iz više razloga. Najveći problem je masa tog klipa koja bi bila značajna i time stvarala vibracije te limitirala maksimalan broj okretaja ovakvog motora.

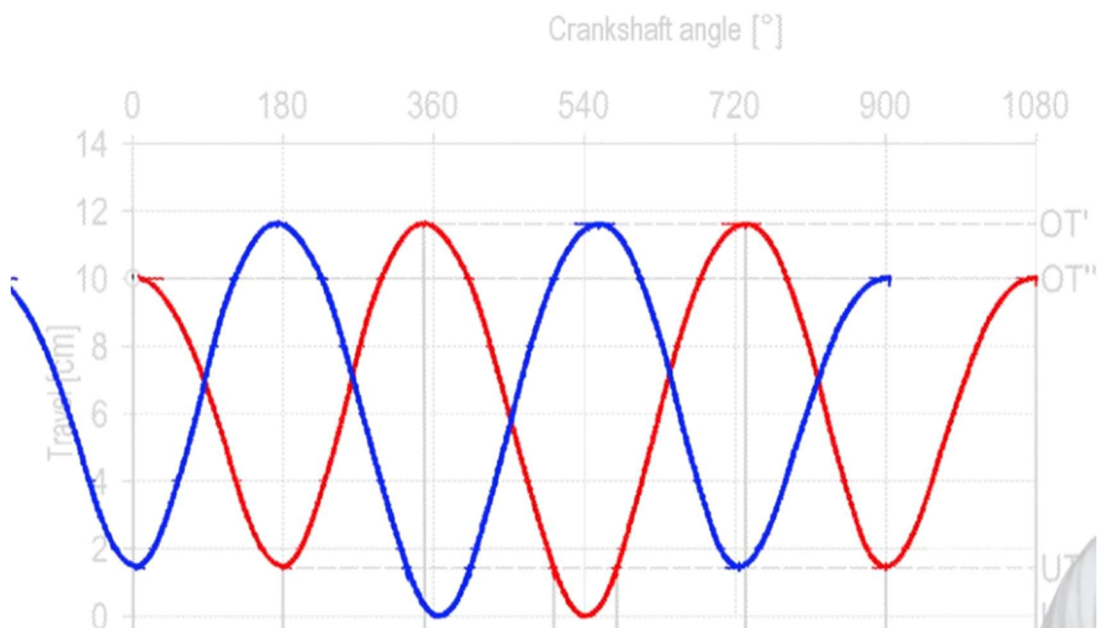


Slika 33. Primjer visine klipa [1]

Drugo rješenje ovog problema čini se razumnije i vjerojatnije u nekom finalnom proizvodu, a to je dodavanje neke vrste ventila na bočne kanale koji bi regulirali usis svježe radne tvari. Pitanje je na koji način bi se to moglo ostvariti i je li ostvarivo, ali na prvu izgleda puno bolje od visokog klipa.

2.5.3. Ravnoteža motora

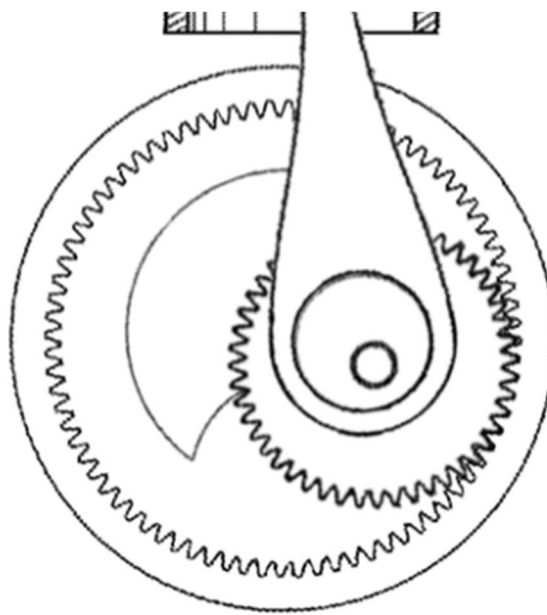
Ravnoteža motora, iako nije pretjerano loša, jedna je od najvećih problema ovakvog šesterotaktnog motora upravo zbog raznih dijelova i modifikacija koje se moraju napraviti u odnosu na četverotaktni motor. Ako uzmemo putanju jednog klipa i preklopimo je drugim koji je izmaknut za 180° (Slika 34.), vidimo kako se ne poništavaju savršeno kao kod četverotaktnog motora zbog nejednakosti dužine između taktova. To će dovesti do, iako malih, ali postojećih vibracija.



Slika 34. Preklopljene putanje 2 klipa [3]

Još jedan izvor vibracija i pogoršavanja ravnoteže motora jest upravo planetarni zupčanik, kojeg kod četverotaktnih motora nema, a koji svojom rotacijom stvara moment inercije. Također, na planetarnom zupčaniku nalazi se i ekscentrični rukavac za prihvat klipnjače koji stvara svoj moment inercije i je izvor vibracija.

Uz to, problem je što su zbog ekscentričnog rukavca, povremeno iz ravnoteže izbačeni veliki dio klipnjače i protuuteg na koljenastom vratilu (Slika 35.). Stoga protuuteg ne može u potpunosti uravnotežiti sile nastale zbog rotacije klipnjače i to nam predstavlja još jedan izvor vibracija. Obzirom da se radi samo o malom izbacivanju iz ravnoteže koje nije konstantno, ne radi se o velikim vibracijama, ali opet postoje.



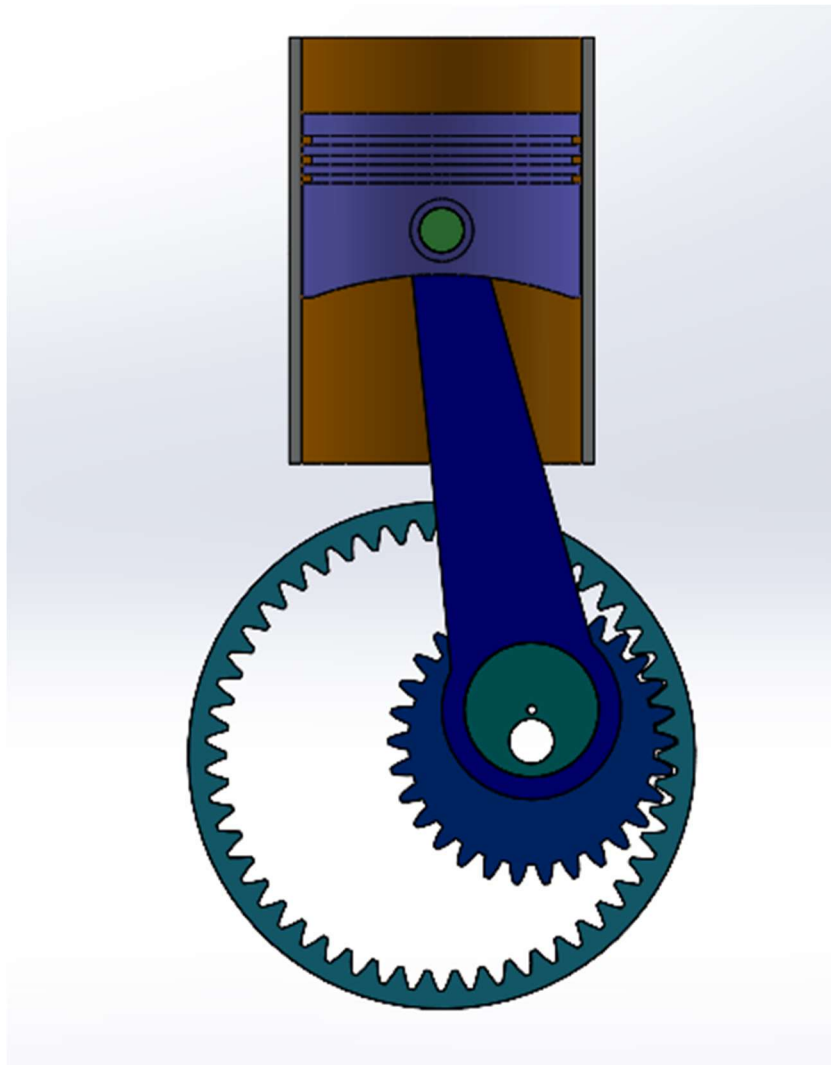
Slika 35. Prikaz pozicije protuutega i klipnjače [1]

Jedno od potencijalnih rješenja koje bi mogli neutralizirati sve ove izvore vibracija jest raspored i broj cilindara. Porsche je u patentu [1] to spomenuo i rekao kako je šesterotaktni motor predviđen za motore s brojem cilindara djeljivim s tri, kako bi se ove vibracije maksimalno neutralizirale.

3. ANALITIČKO RJEŠENJE ZA POMAK KLIPA

Kako bi ispravno analizirali analitičko rješenje pomaka klipa bitno je razumjeti složeno gibanje klipa za određeni stupanj zakreta koljenastog vratila. Ako razmotrimo gibanje od planetarnog zupčanika ka vrhu klipa možemo zaključiti o kojim se konkretno vrstama gibanja radi.

Najprije, imamo gibanje planetarnog zupčanika koje je kako je prije dokazano, kružno, zatim imamo gibanje ekscentričnog rukavca za spoj klipnjače i na kraju imamo gibanje klipa povezano klipnjačom na ekscentrični rukavac koje je pravocrtno (vertikalno zbog položaja u cilindru). Kako bi došli do konačnog analitičkog rješenja, potrebno je razmotriti svako od ovih gibanja zasebno, te ih povezati u ovisnosti od kuta zakreta koljenastog vratila.

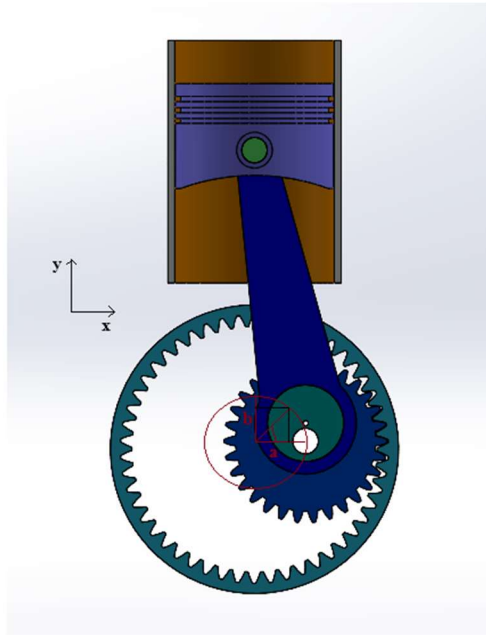


Slika 36. Model klipnog mehanizma

3.1. Kinematika planetarnog zupčanika

Središte planetarnog zupčanika opisuje kružnu putanju unutar vanjskog zupčanika s unutarnjim ozubljenjem. Ovo kružno gibanje određeno je fiksnim vanjskim zupčanicom. Parametri koji uvjetuju ovo gibanje su:

- Diobeni radijus vanjskog zupčanika, r_v
- Diobeni radijus planetarnog zupčanika, r_p
- Kut rotacije koljenastog vratila, φ



Slika 37. Kinematika planetarnog zupčanika

Obzirom da se radi o kružnom gibanju, jednostavnom trigonometrijom možemo doći do trenutnih koordinata planetarnog zupčanika u kartezijevom sustavu. Kako vidimo (Slika 37.), putanja je određena radijusom u iznosu $r_v - r_p$. Oznakama a i b označene su zapravo koordinate točke u x i y smjerovima. U obzir treba uzeti fazni pomak od 90° pomoću kojega za slučaj 0° koljenastog vratila smještamo središte zupčanika u najgornju točku gibanja pa tako određujemo:

$$x_p = (r_v - r_p) \cdot \sin \varphi \quad (3.0)$$

$$y_p = (r_v - r_p) \cdot \cos \varphi \quad (3.1)$$

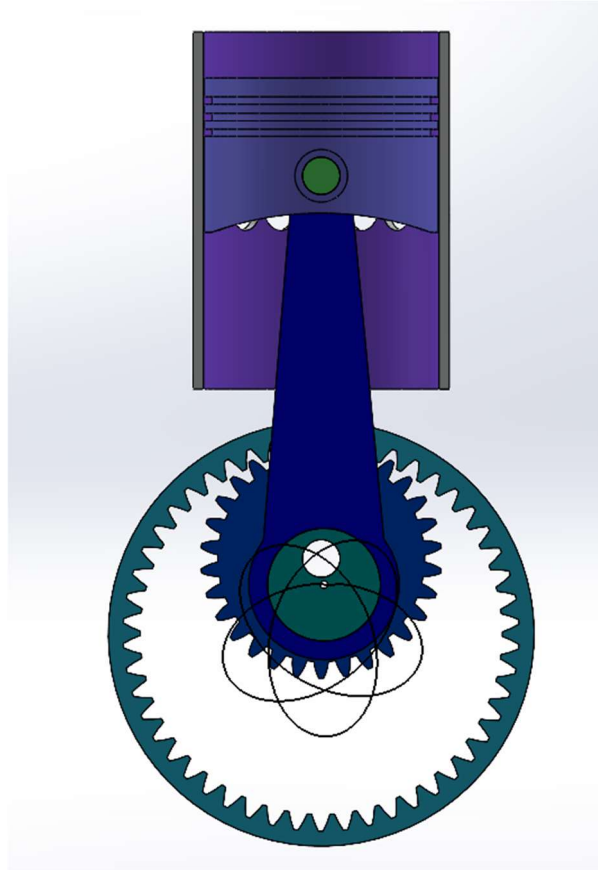
Diobeni promjeri dobivaju se preko modula i broja zubi:

$$r_v = \frac{D_v}{2} = \frac{m \cdot z_v}{2} = \frac{2 \cdot 50}{2} = 50 \text{ mm} \quad (3.2)$$

$$r_p = \frac{D_p}{2} = \frac{m \cdot z_p}{2} = \frac{2 \cdot 30}{2} = 30 \text{ mm} \quad (3.3)$$

3.2. Kinematika rukavca za prihvat klipnjače

Kako je rukavac postavljen ekscentrično obzirom na središte planetarnog zupčanika, imamo dodatno kružno gibanje rukavca oko središta planetarnog zupčanika. Ovakvo gibanje opisuje hipotrohidu.



Slika 38. Kinematika rukavca za prihvat klipnjače

Općenita formula za hipotrohidno gibanje je :

$$x = (r_v - r_p) \cdot \cos \varphi + d \cos \left(\frac{r_v - r_p}{r_p} \varphi \right) \quad (3.4)$$

$$y = (r_v - r_p) \cdot \sin \varphi + d \sin \left(\frac{r_v - r_p}{r_p} \varphi \right) \quad (3.5)$$

Sada moramo razmotriti koje su razlike u odnosu na naš slučaj. Najprije trebamo uzeti u obzir poziciju središta rukavca koji pri 0° treba biti na y osi, odnosno ispod središta planetarnog zupčanika. To osiguravamo faznim pomakom od 90° .

$$x_r(\varphi) = (r_v - r_p) \cdot \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) + d \cos \left(\frac{r_v - r_p}{r_p} \varphi + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.6)$$

$$y_r(\varphi) = (r_v - r_p) \cdot \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) - d \sin \left(\frac{r_v - r_p}{r_p} \varphi + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.7)$$

Također za smjer vrtnje u smjeru kazaljke na satu potrebno je za x koordinatu uzimati negativan kut kako bi odgovaralo našem modelu i proračunu.

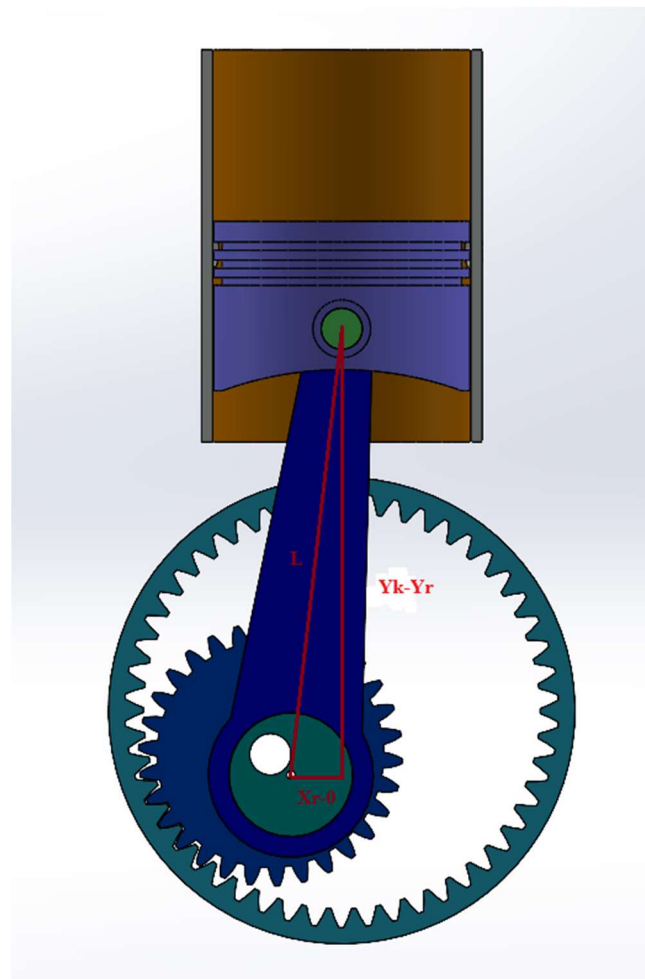
$$x_r(-\varphi) = (r_v - r_p) \cdot \cos\left(-\varphi + \frac{\pi}{2}\right) + d \cos\left(\frac{r_v - r_p}{r_p}(-\varphi) + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.8)$$

$$y_r(\varphi) = (r_v - r_p) \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) - d \sin\left(\frac{r_v - r_p}{r_p} \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.9)$$

Ove su nam koordinate dovoljne za definiranje pozicije u kojoj se nalazi rukavac za prihvat zupčanika za svaki kut zakreta koljenastog vratila φ .

3.3. Kinematika klipa

Obzirom da je klip sa rukavcem povezan klipnjačom upravo njena duljina L postavlja nam geometrijsko ograničenje jer je jasno kako ne smije doći do gubitaka svojstava klipnjače i njezine deformacije za pravilan rad motora. Uz geometrijsko ograničenje duljine klipa imamo i ograničenje uvjetovano cilindrom, odnosno kako je klip uglavljen u cilindar, on mu onemogućava bočno gibanje, već samo linearno po globalnoj y osi (vertikalno).



Slika 39. Kinematika klipa

Primjenom Pitagorina teorema određujemo (Slika 39.):

$$(x_r - 0)^2 + (y_k - y_r)^2 = L^2 \quad (3.10)$$

Sređivanjem ovog izraza izvodimo y_k kao vertikalnu koordinatu klipa.

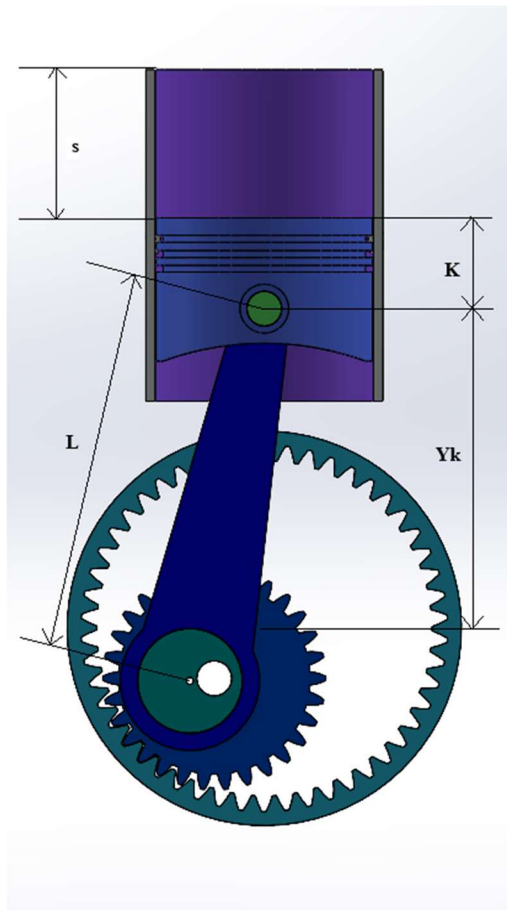
$$y_k = y_r + \sqrt{L^2 - x_r^2} \quad (3.11)$$

3.4. Konačno rješenje pomaka klipa

Uzimajući u obzir sve izvedene izraze i uvrštavajući ih u formulu za vertikalnu koordinatu klipa (3.9) određujemo:

$$y_k = (r_v - r_p) \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) - d \sin\left(\frac{r_v - r_p}{r_p} \varphi + \frac{\pi}{2}\right) + \sqrt{L^2 - \left((r_v - r_p) \cdot \cos\left(-\varphi + \frac{\pi}{2}\right) + d \cos\left(\frac{r_v - r_p}{r_p} (-\varphi) + \frac{\pi}{2}\right)\right)^2} \quad (3.12)$$

Sada kada imamo konačnu formulu za vertikalnu koordinatu klipa možemo napraviti neke preinake kako bi pomoću nje dobili točnu vrijednost pomaka klipa ako uzmemo u obzir da je pozitivan smjer pomaka klipa prema dolje i da kreće od vrha cilindra.



Slika 40. Analitičko rješenje pomaka klipa

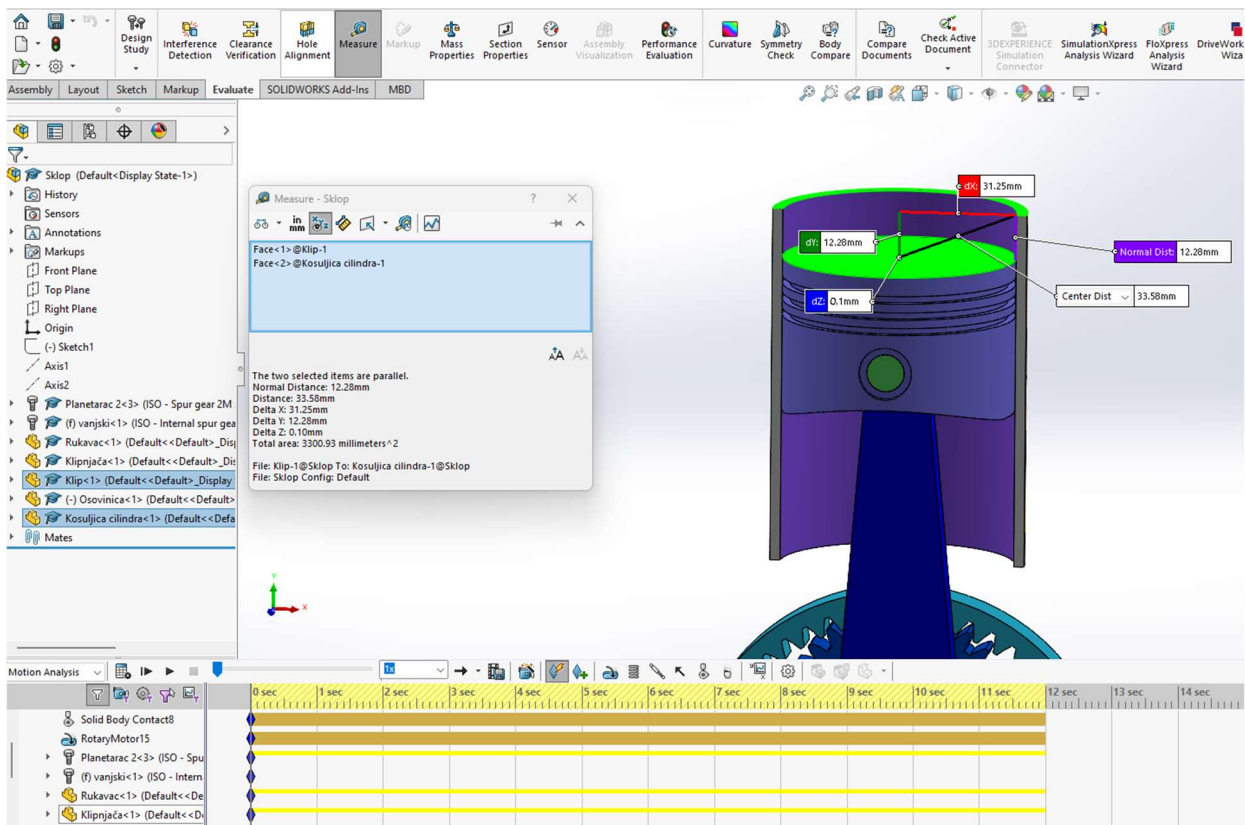
Do analitičkog rješenja možemo doći ako znamo udaljenost vrha cilindra od središta globalnog koordinatnog sustava koje je u središtu vanjskog zupčanika. Tu veličinu nazvati ćemo radi lakšeg računanja C i njezina se vrijednost ne mijenja pa je ona konstantna. Također L predstavlja dužinu klipnjače od središta prihvata na rukavcu do središta prihvata sa klipom, pa i za nju moramo korigirati jednadžbu faktorom K koji predstavlja udaljenost od vrha klipa do središta prihvata klipa i klipnjače zatikom. U našem modelu ona iznosi $C = 160$ mm, a $K = 26$ mm.

Konačno, naše analitičko rješenje za pomak klipa, kao funkcija kuta zakreta koljenastog vratila φ je $s(\varphi)$:

$$s(\varphi) = C - y_k - K = C - K - \left((r_v - r_p) \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) - d \sin\left(\frac{r_v - r_p}{r_p} \varphi + \frac{\pi}{2}\right) + \sqrt{L^2 - \left((r_v - r_p) \cdot \cos\left(-\varphi + \frac{\pi}{2}\right) + d \cos\left(\frac{r_v - r_p}{r_p} (-\varphi) + \frac{\pi}{2}\right) \right)^2} \right) \quad (3.13)$$

4. USPOREDBA CAD MODELA I ANALITIČKOG RJEŠENJA

Za usporedbu CAD modela i analitičkog rješenja, tablično ćemo prikazati pomak klipa. Analitička rješenja izračunati ćemo pomoću formule (3.13) koju smo u prethodnim točkama izveli. Pomoću *measure* funkcije u SolidWorks-u odrediti ćemo koliki je pomak klipa na našem modelu (Slika 41.).

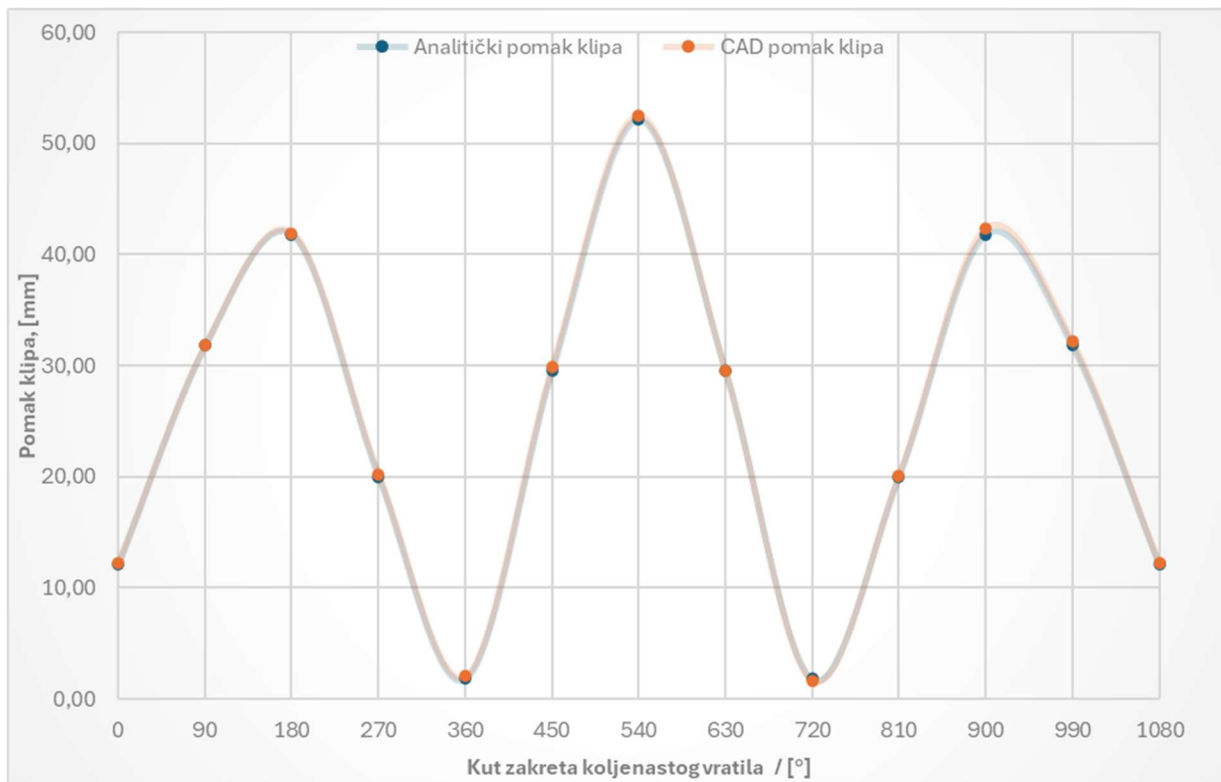


Slika 41. Pomak klipa na CAD modelu

Kut zakreta koljenastog vratila / [°]	Analitički pomak klipa / [mm]	CAD pomak / [mm]	Razlika / [mm]	Razlika / [%]
0	12.14	12.28	0.14	1.2%
90	31.81	31.85	0.04	0.1%
180	41.81	41.92	0.11	0.3%
270	19.99	20.24	0.25	1.2%
360	1.81	2.04	0.23	12.8%
450	29.54	29.93	0.39	1.3%
540	52.14	52.45	0.31	0.6%
630	29.54	29.52	-0.02	0.1%
720	1.81	1.64	-0.17	9.3%
810	19.99	20.13	0.14	0.7%
900	41.81	42.31	0.50	1.2%
990	31.81	32.17	0.36	1.1%
1080	12.14	12.18	0.04	0.3%
			0.18	2.33%

Tablica 1. Razlika pomaka

Nakon provedenog proračuna i izrađene tablice usporedbe pomaka (Tablica 1.) u CAD modelu s vrijednostima dobivenim analitičkim postupkom možemo iščitati rezultate. Iz podataka u tablici vidi se da postoje razlike i to u prosjeku od 2.33%, što se na prvu čini kao značajna razlika. Međutim, treba uzeti u obzir da su u CAD modelu uzeti zupčanici iz *toolbox-a* koji naravno dolaze sa svojom netočnošću. Uz to, korišten je i mehanički *mate* za zupčanike koji zahtijeva postavljanje zahvata zupčanika, a obzirom da u ovom radu nisu analizirani zupčanici, taj se zahvat zupčanika napravio procjenom.



Slika 42. Razlika pomaka

5. INDICIRANI MOMENT

Kako bi izradili krivulju indiciranog momenta potrebno je poznavati način rada šesterotaktnog motora, gibanje klipnog mehanizma, krivulju tlaka te naravno ulazne podatke o geometriji klipnog mehanizma.

5.1. Krivulja tlaka

Za izradu krivulje indiciranog momenta najprije moramo odrediti krivulju tlaka. Krivulja tlaka kao funkciju kuta zakreta na koljenastom vratilu mogla bi biti empirijski određena, izvedena iz eksperimentalnih podataka ili nekom od matematičkih metoda. Radi jednostavnosti koristiti ćemo teorijsku krivulju izvedenu iz osnovnih termodinamičkih principa i pretpostavki o procesu izgaranja.

Obzirom da se radi o procesu koji ima dvije gornje i dvije donje mrtve točke moramo napraviti 2 krivulje tlaka za oba slučaja te također paziti na kompresijske omjere obzirom da nisu u oba slučaja isti. Za teorijsku krivulju koristiti ćemo adijabatsku kompresiju i ekspanziju radi njihove jednostavnosti te izohorno izgaranje i izobarnu izmjenu radne tvari. Kako znamo da je to idealan proces i u stvarnosti nije primjenjiv, moramo primijeniti stupanj savršenosti kao parametar kojim ćemo donekle učiniti proces realnijim.

Prije svega valja napomenuti kako je ovo pojednostavljeni pristup i važno je uzeti u obzir da stvarni uvjeti u motoru, kao što su gubitci topline, trenje i dinamika plinova, mogu znatno utjecati na stvarne vrijednosti tlaka. Do točnijih podataka može se doći korištenjem Wiebe-ove funkcije te drugim numeričkim metodama u programima poput ANSYS Forte koje se u ovom radu neće koristiti radi jednostavnosti.

5.1.1. p,V dijagram

Kako bi mogli definirati, a time i izraditi p,V dijagram šesterotaktnog procesa, potrebno je odrediti početne uvjete te teorijske krivulje kao što je navedeno u prethodnoj točki.

Za uvjete na početku procesa odnosno na početku usisa uzeti ćemo tlak $p_2 = p_1 = 1$ bar i temperaturu od $T_1 = 313.15$ K. Promjenu volumena, odnosno volumen u pojedinoj točki procesa, izračunavamo pomoću prethodno izvedene formule za pomak klipa (3.13) uz promjenu volumena i pretpostavku da će temperatura na kraju usisa pasti na $T_2 = 313.5$ K, zbog ulaska svježih radne tvari, definiramo proces usisa.

$$V(\varphi) = r^2 \pi \cdot s(\varphi) \quad (5.0)$$

Nadalje, za definiranje kompresija koristiti ćemo se adijabatom i naravno za ulazne podatke uzeti ćemo izlazne podatke usisa. Za izračun tlakova i temperatura u pojedinoj točki procesa koristiti ćemo se formulama:

$$p_3 = p_2 \left(\frac{V_2}{V_3} \right)^{1,4} \quad (5.1)$$

$$T_3 = T_2 \left(\frac{V_2}{V_3} \right)^{1,4-1} \quad (5.2)$$

Nakon kompresije bitno je definirati količinu topline dovedene gorivom odnosno njegovim izgaranjem. To ćemo aproksimirati računajući dodanu toplinu dovedenu gorivom te promjenom temperature nastale uslijed toga:

$$Q = m_g \cdot E \quad (5.3)$$

$$\Delta T = T_4 - T_3 = \frac{Q}{m_z \cdot c_v} \quad (5.4)$$

Gdje je:

$m_g = 0,000015$ kg – masa ubrizganog goriva

$m_z = 0,0015476$ – masa zraka

$E = 44$ MJ/kg – energetska sadržaj benzina

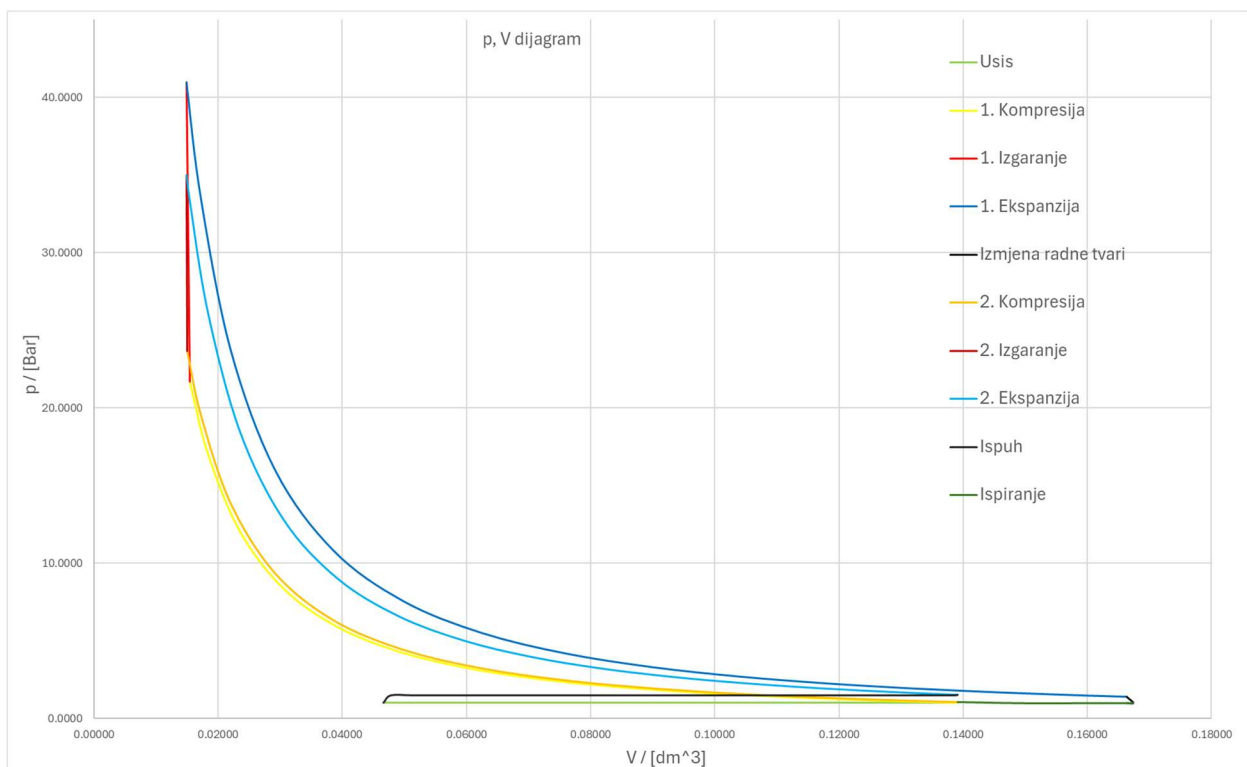
$c_v = 718$ J/kgK – specifični toplinski kapacitet.

Ekspanzije također tretiramo kao adijabatske procese te stoga računamo istim formulama kao i kod kompresije, nadovezujemo se na izgaranje pa krajnje vrijednosti izgaranja uzimamo kao početne kompresije.

$$p_5 = p_4 \left(\frac{V_4}{V_5} \right)^{1,4} \quad (5.4)$$

$$T_5 = T_4 \left(\frac{V_4}{V_5} \right)^{1,4-1} \quad (5.5)$$

Nakon ovoga ponavljamo kompresiju, izgaranje te ekspanziju samo kod izgaranje uzimamo manji m_g zbog toga što će usis trajati kraće i neće se moći ista količina goriva usisati, ali koristimo neizgoreno gorivo prethodnog procesa.



Slika 43. p,V dijagram idealiziranog šesterotaktnog procesa

Kao što vidimo više snage dobivamo iz 1. ekspanzije zbog veće količine goriva i činjenice što nemamo ispušnih plinova u cilindru.

5.2. Dijagram indiciranog momenta

Sada je uz pomoć krivulje tlaka odnosno p , V dijagrama moguće odrediti dijagram indiciranog momenta. Osim p , V dijagrama potrebno je odrediti silu koja djeluje okomito na klip uslijed tlaka te krak na kojem ta sila djeluje u odnosu na središte radilice odnosno koljenastog vratila.

Sila F određuje se pomoću površine klipa i tlaka koji djeluje na nju.

$$F(\varphi) = A \cdot p = r^2 \pi \cdot p(\varphi) \quad (5.5)$$

Gdje je:

A – m^2 , čeona površina klipa

$p(\varphi)$ – Pa , tlak na površinu klipa.

Međutim, nama na radilicu ne djeluje sila F već njezina tangencijalna komponenta:

$$Ft(\varphi) = F \cdot \sin(\beta) \quad (5.6)$$

Gdje je:

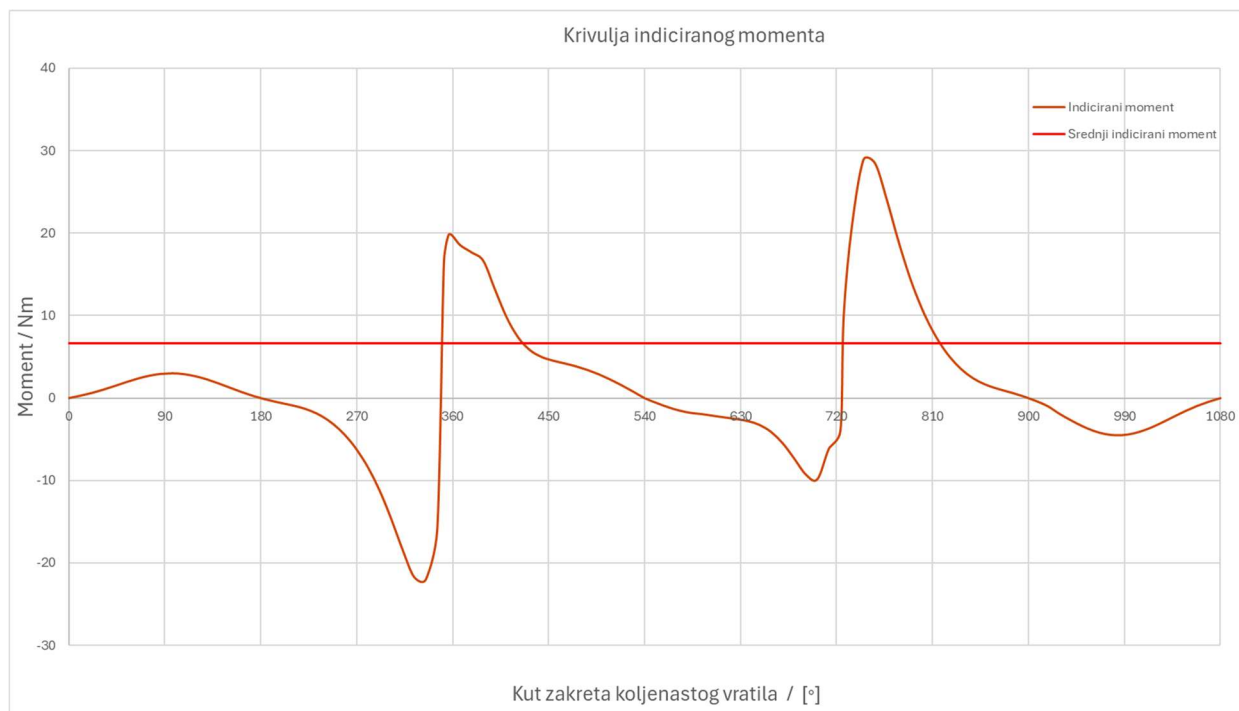
β – Kut između klipnjače i vertikale

Krak na kojem djeluje sila određuje se iz kinematike hipocikloide odnosno pozicije rukavca u odnosu na ishodište koordinatnog sustava koje je zapravo na osi vrtnje koljenastog vratila:

$$r(\varphi) = \sqrt{x_r^2 + y_r^2} = \sqrt{\left((r_v - r_p) \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) - d \sin\left(\frac{r_v - r_p}{r_p} \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right)^2 + \left((r_v - r_p) \cdot \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) - d \cos\left(\frac{r_v - r_p}{r_p} \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right)^2} \quad (5.7)$$

Konačno možemo dobiti moment u ovisnosti o kutu zakreta koljenastog vratila:

$$M(\varphi) = Ft(\varphi) \cdot r(\varphi) \quad (5.8)$$



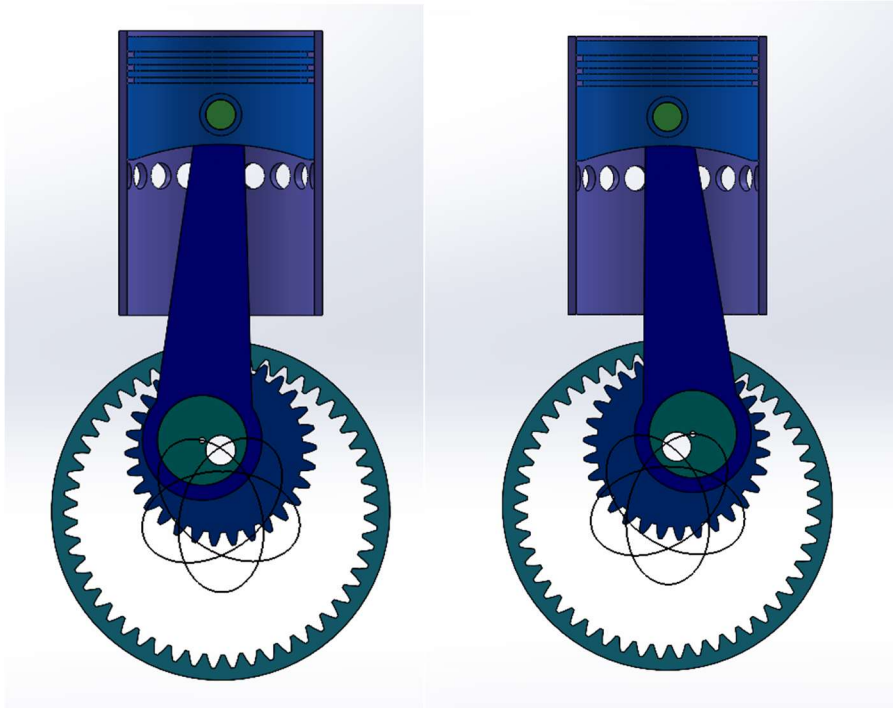
Slika 44. Krivulja indiciranog momenta

Osim krivulje indiciranog momenta na grafu možemo vidjeti i srednji indicirani moment koji će nam biti bitan za usporedbu sa četverotaktnim motorom. On se računa formulom:

$$M_{sr} = \frac{\int_0^{6\pi} M_i \cdot d\varphi}{6\pi} \quad (5.9)$$

Za jednocilindrični šesterotaktni motor čiji ciklus traje 1080 °.

Iako postoji prisutnost ispušnih plinova te je manja količina ubrizganog goriva, 2. radni takt prema (Slika 44.) daje nešto veći moment upravo zbog geometrije, odnosno većeg kraka djelovanja sile na radilicu tokom 2. ekspanzije što možemo vidjeti na (Slika 45.). Isto tako 1. kompresijski takt zahtijeva više momenta zbog geometrije nego li 2. kompresijski takt, iako se u njega ubraja i ispiranje cilindra. Ovo nam ukazuje kako je kod šesterotaktnog motora od ključne važnosti preciznost izrade zupčanika, pozicioniranje zubi u pojedinom taktu procesa te ispravno kalibriranje koljenastog vratila sa zupčanicima.



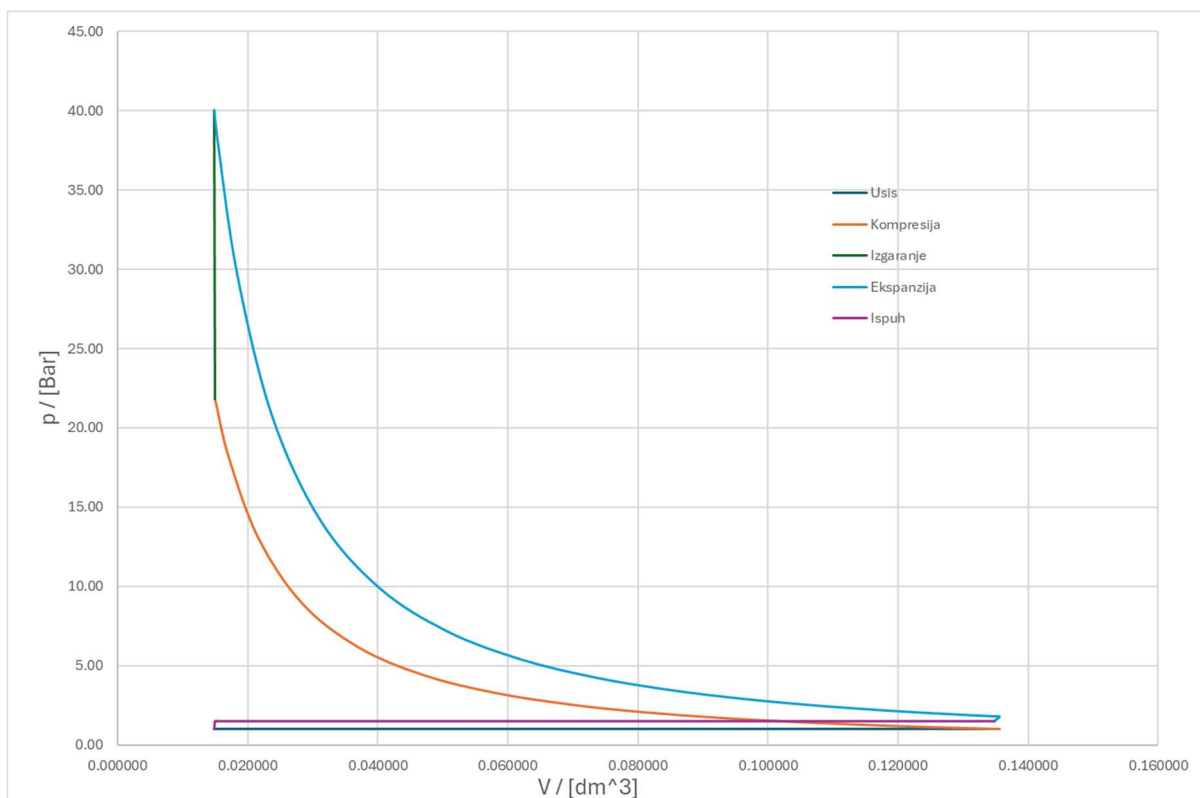
Slika 45. Usporedba kraka djelovanja sile na koljenasto vratilo kod 1. radnog takta (lijevo) te 2. radnog takta (desno)

6. USPOREDBA S KONVENCIONALNIM KLIPNIM MEHANIZMOM

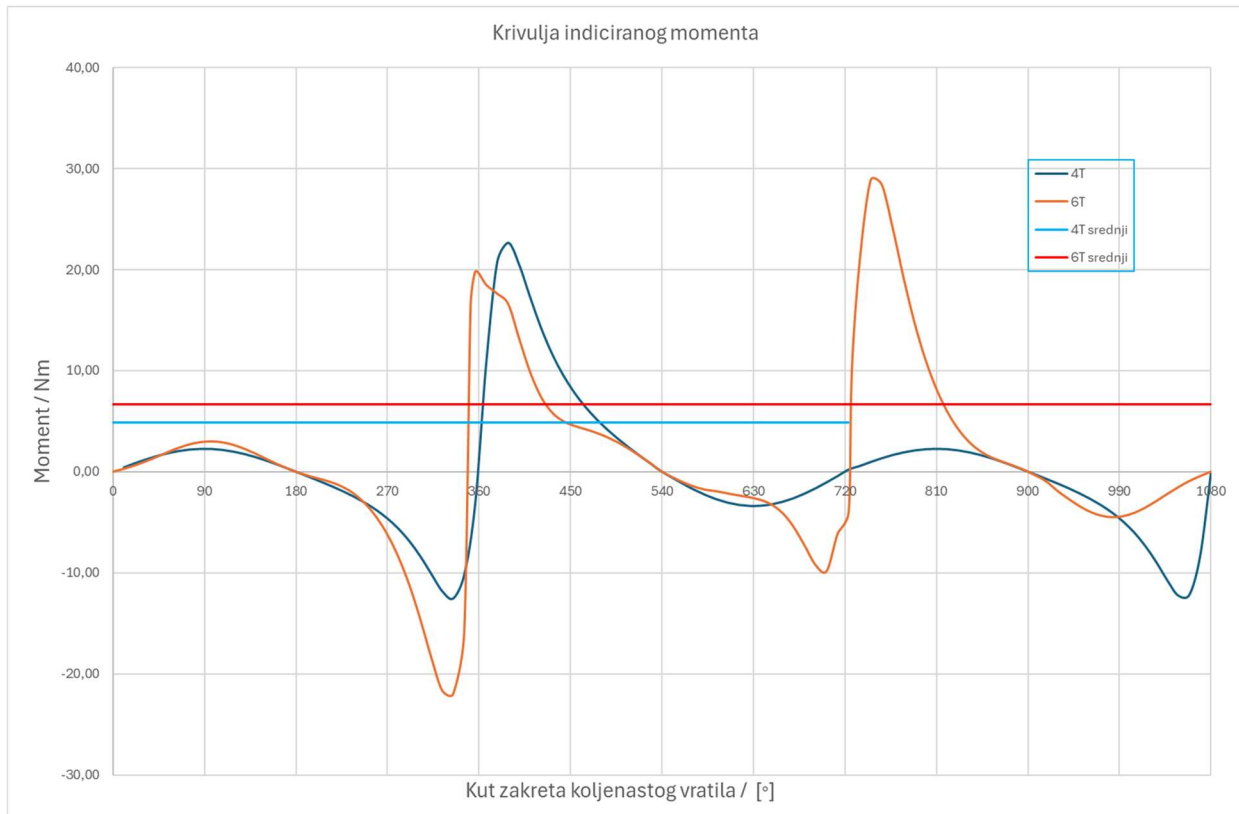
Usporediti ćemo konvencionalni klipni mehanizam odnosno četverotaktni proces i šesterotaktni proces s modificiranim klipnim mehanizmom. Usporedba će se fokusirati na razliku u dobivenoj snazi i momentu te na iskorištenje goriva odnosno potrošnju goriva.

Prva stvar koju treba uzeti u obzir jest jednakost parametara klipnog mehanizma kod oba sustava. Uzimamo jednaki krak na koljenastom vratilu, promjer cilindra, količinu radne tvari te početne uvjete. Nadalje, moramo malo smanjiti zapremninu motora kako bi postigli jednaki kompresijski omjer što će naravno utjecati na tlak te time nešto smanjiti indicirani moment na našem dijagramu usporedbe.

Za usporedbu (Slika 46.) prikazuje p, V dijagram idealnog četverotaktnog procesa gdje je važno napomenuti da se proces odvija u 720° dok on kod šesterotaktnog procesa traje 1080° .



Slika 46. p, V dijagram idealiziranog četverotaktnog procesa



Slika 47. Krivulje usporedbe indiciranih momenata

Kao što Slika 47. prikazuje, indicirani moment nešto je veći kod šesterotaktnog procesa zbog ranije navedenog smanjenja zapremnine motora, ali i zbog činjenice da pri generiranju najveće sile na klip kod četverotaktnog motora klipnjača nalazi pod jako malim kutom pa je krak na radilicu malen, a time i moment. Međutim, kao što je prije bilo spomenuto, a sada to možemo i grafički vidjeti, glavna i najveća prednost šesterotaktnih motora je, uz smanjenje potrošnje i emisije goriva, upravo činjenica što za tri radna ciklusa daje dva radna takta.

Ako radi lakšeg razumijevanja promatramo 7200° rotacije koljenastog vratila zaključujemo da će četverotaktni proces dati 10 radnih taktova dok će šesterotaktni dati 13.34 radnih taktova. Srednji indicirani moment za pojedini proces računa se formulama:

$$M_{i,sr,4T} = \frac{\int_0^{4\pi} Mi \cdot d\varphi}{4\pi} = 4,901 \text{ Nm} \quad (6.1)$$

$$M_{i,sr,6T} = \frac{\int_0^{6\pi} Mi \cdot d\varphi}{6\pi} = 6,642 \text{ Nm} \quad (6.2)$$

$$\Delta M = \frac{M_{i,sr,6T}}{M_{i,sr,4T}} \cdot 100 = 135,5\% \quad (6.3)$$

Prikazano je i dokazano krivuljama indiciranih momenata grafički i računski iz srednjeg indiciranog momenta da dobivamo čak 35,5% veći indicirani moment, a time i snagu.

Treba uzeti u obzir da bi u ne idealnom okruženju šesterotaktni proces imao nešto veće gubitke od četverotaktnog zbog više rotirajućih dijelova te općenito više dijelova. Također treba uzeti u obzir da je svaki drugi radni takt šesterotaktnog procesa nešto manje efikasan zbog količine ispušnih plinova u cilindru, ali on je svejedno kao što krivulja prikazuje itekako značajan.

7. ZAKLJUČAK

Razvoj šesterotaktnog motora predstavlja značajan iskorak u tehnologiji motora s unutarnjim izgaranjem, nudeći potencijal za povećanje učinkovitosti, smanjenje emisija štetnih plinova te optimizaciju performansi. Kroz ovaj rad analizirana je konstrukcija i način rada šesterotaktnog motora, s posebnim naglaskom na patent tvrtke Porsche razvijen u suradnji s Tehničkim sveučilištem Cluj-Napoca.

Kombiniranjem elemenata četverotaktnog i dvotaktnog motora, ovaj koncept omogućuje bolju iskoristivost energije, dodavanjem dodatnog radnog takta koji smanjuje količinu neizgorjelog goriva i povećava ukupnu učinkovitost motora. Uz konvencionalne modifikacije, poput planetarnog zupčanika, bočnih kanala na cilindru i izmjena na koljenastom vratilu te bregastoj osovini, ovaj motor nudi potencijalno rješenje za produženje životnog vijeka motora s unutarnjim izgaranjem unatoč sve strožim ekološkim regulativama.

Analitička i CAD analiza pomaka klipa pokazala je visoku razinu preciznosti modela, uz minimalna odstupanja koja su unutar prihvatljivih granica. Također, usporedba indiciranog momenta između šesterotaktnog i četverotaktnog motora potvrdila je teorijske prednosti ovog koncepta, ističući povećanje snage i poboljšano iskorištenje goriva za iste početne uvjete i ulazne parametre. I grafički i analitički prikazano je kako je srednji indicirani moment šesterotaktnog motora 35,5% veći od četverotaktnog. Iako se radi o konvencionalnoj tehnologiji za koju nisu potrebna ulaganja u istraživanje, postoje određeni izazovi, poput složenosti konstrukcije, potencijalnih vibracija te povećanih gubitaka zbog dodatnih zupčanika, prednosti ovog motora otvaraju mogućnosti za daljnje istraživanje i optimizaciju rada.

Primjena šesterotaktnog motora mogla bi biti posebno korisna u specijaliziranim industrijama, poput pomorske, poljoprivredne i transportne mehanizacije, gdje su pouzdanost i učinkovitost ključni faktori. Također, njegova potencijalna upotreba u vozilima visokih performansi mogla bi pružiti novu alternativu tradicionalnim motorima, nudeći bolji omjer snage i potrošnje goriva. Iako se šesterotaktni motor još uvijek nalazi u fazi razvoja i istraživanja, njegova inovativna rješenja ukazuju na mogućnost daljnjeg poboljšanja postojećih tehnologija motora s unutarnjim izgaranjem. Ovaj rad pruža temelj za daljnja istraživanja i eksperimentalne analize koje bi mogle pomoći u rješavanju preostalih izazova te omogućiti njegovu praktičnu primjenu u budućnosti.

LITERATURA

- [1] [Patent: PORS.323.01 US:METHOD FOR A COMBUSTION MACHINE WITH TWO TIMES THREE STROKES](#)
- [2] [International Journal of Scientific Engineering and Research \(IJSER\) Study of Six Stroke Internal Combustion Engine](#)
- [3] [Understanding Porsche's New Six Stroke Engine Patent](#) by: driving 4 answers
- [4] Mahalec, Lulić, Kozarac: Motori s unutarnjim izgaranjem
- [5] Antun Galović: Termodinamika I , Termodinamika II