

Smanjenje vibracija u klipnim motorima s unutarnjim izgaranjem

Faber, Vilim

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:981472>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-25**

Repository / Repozitorij:

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



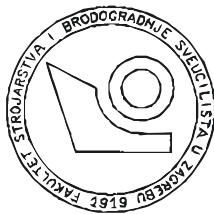


SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vilim Faber

Zagreb, 2024.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Smanjenje vibracija u klipnim motorima s unutarnjim izgaranjem

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Tomičević,
mag.ing.mech.

Dr. sc. Damjan Čakmak, mag.ing.mech.

Student:

Vilim Faber

Zagreb, 2024.

~Izjava~

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

Vilim Faber,
Zagreb, 29. kolovoz 2024.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 01	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Vilim Faber**

JMBAG: **0035214429**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Smanjenje vibracija u klipnim motorima s unutarnjim izgaranjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Reduction of the vibration effects in the internal combustion engines**

Opis zadatka:

Na zreom tržištu automobila najčešće se nude četverotaktni trocilindrični i četverocilindrični redni turbo motori koji se međusobno natječu u niskoj potrošnji, snazi i životnom vijeku. Poznato je da se u klipnim motorima mogu pojaviti vibracije zbog pretvorbe translatornog u rotacijsko gibanje. Uravnoteženost rednih klipnih motora najviše ovisi o broju cilindara i razmještaju elemenata na koljenastom vratilu.

U ovom radu potrebno je definirati kinematiku klipnih motora, razmotriti vibracijske fenomene te predložiti rješenje za smanjenje vibracija. Nadalje, potrebno je odabrati bolju izvedbu od dva prethodno navedena motora te poboljšati odabranu izvedbu.

Tijekom rada potrebno je:

1. Opisati rad četverotaktnih klipnih motora s unutrašnjim izgaranjem.
2. Razraditi kinematiku mehanizma klipa, klipnjače i koljenastog vratila.
3. Odabrati vrstu koljenastog vratila za trocilindrični i četverocilindrični motor.
4. Odrediti 1. i 2. red vibracija te usporediti rezultate za trocilindrični i četverocilindrični motor.
5. Prikazati prednosti i nedostatke oba motora te dati rješenje za smanjenje vibracija u odabranom motoru.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2023.

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Tomičević

dr.sc. Damjan Čakmak

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Sadržaj

Popis slika.....	II
Popis tablica.....	III
Popis oznaka.....	IV
Popis skraćenica.....	V
Sažetak.....	VI
Summary	VII
1. Uvod.....	1
2. Klipni motori s unutarnjim izgaranjem.....	3
2.1. Princip rada četverotaktnog klipnog motora s unutarnjim izgaranjem.....	4
3. Karakteristični nedostaci klipnih motora.....	9
4. Kinematika klipnog mehanizma	10
4.1. Usporedba približnog i egzaktnog rješenja za ubrzanje klipa.....	14
5. Odabir motora za usporedbu i određivanje oblika koljenastog vratila	16
6. Vektorska analiza vibracija	17
6.1. Četverotaktni redni 4 motor.....	17
6.2. Četverotaktni redni 3 motor.....	19
6.3. Kratka usporedba vibracija rednog četiri i rednog tri motora.....	21
6.4. Smanjenje vibracija u četverotaktnom rednom četiri motoru.....	22
7. Zaključak.....	24
8. Literatura.....	25

Popis slika

Slika 1. Shema 4T motora: skica i stvarna izvedba [3]	3
Slika 2. Prikaz prvog takta (USIS) četverotaktnog motora [5]	5
Slika 3. Prikaz drugog takta (KOMPRESIJA) četverotaktnog motora [5]	5
Slika 4. Prikaz trećeg takta (EKSPANZIJA) četverotaktnog motora [5]	6
Slika 5. Prikaz četvrtog takta (ISPUH) četverotaktnog motora [5]	6
Slika 6. Shema klipnog mehanizma [8]	11
Slika 7. Ubrzanje klipa kao funkcija kuta zakreta koljenastog vratila za $l/r = 4$	13
Slika 8. Usporedba egzaktnog i približnog rješenja ubrzanja klipa	15
Slika 9. Motor R4: a) koljenasto vratilo b) kutovi između koljena vratila	18
Slika 10. Motor R4: a) primarne sile; b) sekundarne sile; c) primarni momenti; d) sekundarni momenti	18
Slika 11. Motor R3: a) koljenasto vratilo b) kutovi između koljena vratila	20
Slika 12. Za R3: a) primarne sile; b) sekundarne sile; c) primarni momenti; d) sekundarni momenti	20

Popis tablica

Tablica 1. Usporedba vibracija R4 i R3 motora 21

Popis oznaka

Latinične oznake

Oznaka	Jedinica	Opis oznake
l	m	duljina klipnjače
l_n	m	udaljenost između n -tog i prvog koljena
r	m	polumjer koljenstog vratila
t	s	vrijeme
x_p	m	pomak klipa prema dolje od GMT

Grčke oznake

Oznaka	Jedinica	Opis oznake
α_n	rad	kut n -tog koljena
δ	-	pomoćna veličina
λ	-	omjer klipnjače
π	rad	Ludolfov broj ($\pi \cong 3.14159$)
φ	rad	pomoćni kut za računanje
ω	rad/s	kutna brzina vrtnje koljenastog vratila
ωt	rad	kut koljenastog vratila u odnos na GMT

Popis skraćenica

Oznaka	Puno značenje
2T	dvotakni
4T	četverotaktni
DMT	donja mrtva točka
GMT	gornja mrtva točka
R3	redni motor s tri cilindra
R4	redni motor s četiri cilindra

Sažetak

U ovom radu izložena je temeljna konfiguracija klipnih motora s unutarnjim izgaranjem vodeći se načelima zakonitosti mehanike i kinematike klipnog mehanizma. Kako bi se omogućila adekvatna usporedba rezultata, svi motori imaju isti cilindarski sklop. Do razlika dolazi kod broja cilindara i njihovoj konfiguraciji, te izvedbi koljenastog vratila. Završni rad pored opisa rada četverotaktnih klipnih motora s unutarnjim izgaranjem razrađuje i kinematiku mehanizma klipa, klipnjače i koljenastog vratila. Izvršena je usporedba rezultata 1. i 2. reda vibracija trocilindričnog i četverocilindričnog motora te je za njih provedena i analiza prednosti i nedostataka kojim je zaključno dano rješenje za smanjenje vibracija. Zaključno, navode se konfiguracije s najboljim karakteristikama te koliko su te karakteristike u skladu s današnjim tijekovima razvoja motornih vozila.

Ključne riječi: motori s unutarnjim izgaranjem, klipni motor, R3, R4

Summary

This paper presents the basic configuration of internal combustion piston engines, guided by the principles of mechanics and kinematics of the piston mechanism. In order to enable an adequate comparison of the results, all engines have the same cylinder assembly. There are differences in the number of cylinders and their configuration, as well as the design of the crankshaft. In addition to describing the operation of four-stroke piston engines with internal combustion, the final paper elaborates the kinematics of the piston mechanism, connecting rod and crankshaft. A comparison of the results of the 1st and 2nd order of vibrations of three-cylinder and four-cylinder engines was carried out, and an analysis of advantages and disadvantages was carried out for them, which ultimately provided a solution for reducing vibrations. In conclusion, the configurations with the best characteristics are listed and how these characteristics are in line with today's trends in the development of motor vehicles.

Keywords: internal combustion engines, piston engines, R3, R4

1. Uvod

U ovom završnom radu obrađena je tema općeg rada klipnih motora s unutarnjim izgaranjem, predstavljajući neke njihove mane i teškoće. U središte rasprave stavljaju se vibracije koje prate sve klipne motore s unutarnjim izgaranjem, a posebna pažnja se pridaje najčešće korištenim motorima danas, a to su redni tri i redni četiri motori. Oba motora moraju pružiti pouzdan izvor snage uz udobnost vožnje koju kupac očekuje u drugom desetljeću 21. stoljeća. Pomoću analize vibracija, može se zaključiti koji od dva prethodno navedena motora može pružiti udobniju vožnju uz stroge regulacije i nikad jaču konkurenciju kod proizvođača automobila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem.

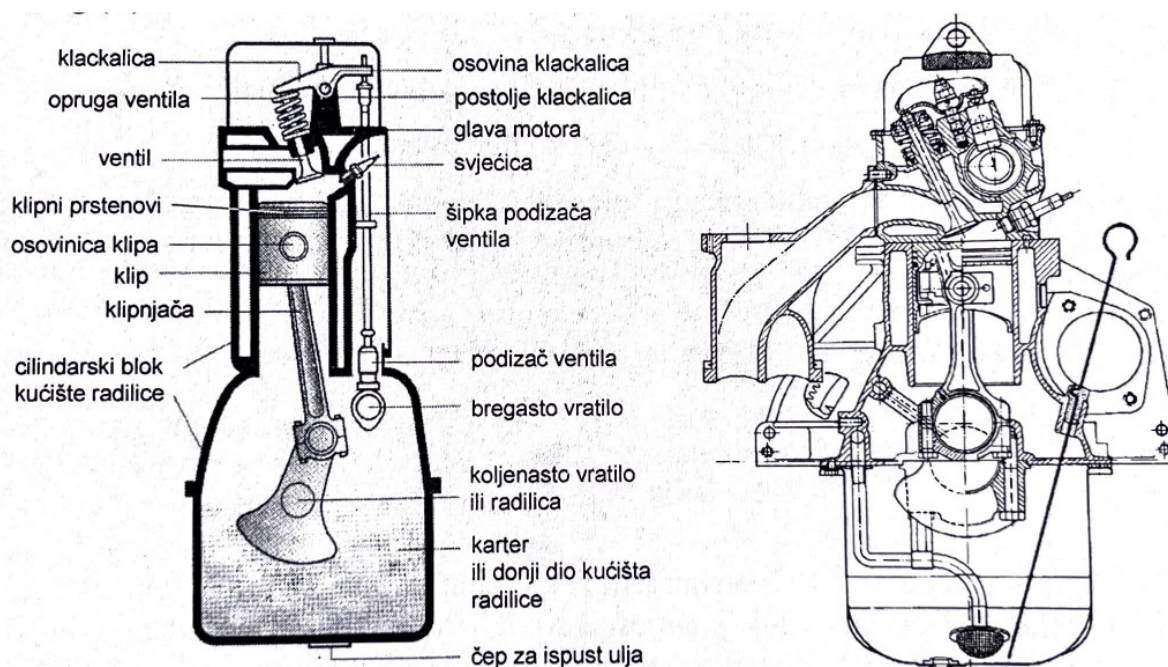
U ovom radu prvenstveno je obrađena tematika motora s unutarnjim izgaranjem gdje je zanimljivo za istaknuti sami razvoj klipnih motori s unutarnjim izgaranjem. Oni su s razvojem krenuli već u 19. stoljeću, te su brzo zauzeli svoje mjesto u industriji i prijevozu kao pouzdan izvor snage. Motor s unutarnjim izgaranjem jedan je od najutjecajnijih izuma čovječanstva, s velikim utjecajem na industriju, društvo i ekonomiju. Ključni razvoj na ovom polju ostvarili su Nicolaus Otto 1876. godine, koji je izumio motor s paljenjem iskrom, i Rudolf Diesel 1892. godine, koji je razvio motor s kompresijskim paljenjem [1]. Njihov rad globalno je priznat i desetljećima je igrao ključnu ulogu u automobilskoj industriji, ostajući široko korišten do danas. Motori s unutarnjim izgaranjem su od svog nastanka u konstantnom razvoju i proizvođači se međusobno natječu u razvoju najnaprednijih i najučinkovitijih motora. Trenutno se nameće potreba za razvojem naprednih motora s unutarnjim izgaranjem koji maksimiziraju učinkovitost i smanjuju emisiju ispušnih plinova. Na tom polju prednjači Toyota, koja je uspjela razviti i proizvesti 2.5 litreni redni četiri klipni motor s unutarnjim izgaranjem. On ima termalni učinak od 40% te 150 kW snage [2]. Uz to, trend koji se javlja kroz gotovo cijelu povijest razvoja motora je *downsizing*¹. Ovaj termin predstavlja smanjenje zapremine motora i broja cilindara uz zadržavanje, ili povećanje snage u odnosu na prošlu iteraciju ili model motora. Zbog regulacija koja pravna tijela nameću, proizvođači su došli gotovo do kraja *downsizinga* i stali su na motorima s malom zapreminom i brojem cilindara koji rijetko prelazi četiri cilindra [1]. Stoga se može zaključiti da je tržište zasićeno rednim tri i rednim četiri motorima, malih zapremina, a relativno velikih snaga. U utrci s regulacijama, često je zanemarena udobnost i pouzdanost vozila s takvim motorima.

¹ Downsizing ili smanjenje je glagol koji znači smanjiti veličinu, opseg, često uklanjanjem suvišnih ili nepotrebnih elemenata. <https://hr.opentran.net/engleski-hrvatski-prijevod/downsize.html> (2. rujna 2024.)

Često se u utrci za što manjim emisijama i što većom snagom zanemaruje pouzdanost motora i udobnost vožnje. U nastavku će se izložiti teškoće klipnih motora i usporedba dviju različitih izvedbi motora kojima se mogu ublažiti neke od problema tih motora. Naglasak će biti na održivosti motora kao proizvoda koji treba imati dug životni vijek uz što manje troškove održavanja.

2. Klipni motori s unutarnjim izgaranjem

Klipni motori dio su skupine motora s unutarnjim izgaranjem. Vertikalni klipni motor s jednim cilindrom sastoji se od bloka motora, glave motora i klipnog mehanizma. Za ovo razmatranje potrebno je poznavati sastavne dijelove klipnog mehanizma, koji se sastoji kao što možemo vidjeti na slici 1., od: klipa, osovince, klipnjače (ojnice) i koljenastog vratila. Mehanizam je smješten u bloku motora koji klipu ograničava gibanje na isključivo vertikalnu translaciju, koljenastom vratilu isključivo rotaciju, a klipnjači složeno elipsasto gibanje. Klipnjača služi kao veza između pravocrnog gibanja klipa i rotacijskog gibanja koljenastog vratila [3].



Slika 1. Shema 4T motora: skica i stvarna izvedba [3]

Ovisno o rasporedu i broju cilindara razlikujemo nekoliko osnovnih tipova motora:

1. Redni motor ima cilindre smještene u jednom redu, u istoj osi kao i referentni cilindar,
2. V motor ima cilindre smještene u dvije ravnine, međusobno pod kutem u obliku slova V
3. Radijalni (zvjezdasti) motor ima smještene cilindre u jednoj ili više ravnina koji su raspoređeni oko osi koljenastog vratila, pri čemu je kut između svakog para cilindara jednak.

4. Boxer motori cilindre ima smještene nasuprot jedan drugome, raspoređene oko osi koljenastog vratila pod kutom od 180° . Svaka konfiguracija motora klipnjača posjeduje svoj leteći rukavac. Ako dvije klipnjače u paru cilindara, koje su nasuprotne, koriste isti leteći rukavac, tada se radi o V-motoru s V-kutom od 180° između osi cilindara [3].

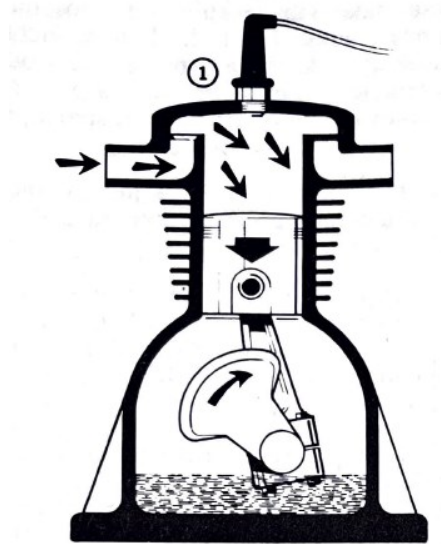
2.1. Princip rada četverotaktnog klipnog motora s unutarnjim izgaranjem

Razvoj četverotaktnog motora najviše se pripisuje njemačkom inženjeru Nicolausu Ottu. On je nastojao poboljšati prvotni Lenoirov dizajn, ističući nekoliko razloga za njegovu neučinkovitost. Jedan od tih razloga je bio plin korišten u dvotaktnom motoru koji nije komprimiran, što smanjuje produktivnost procesa. Osim toga, Lenoir je za svoj motor ovisio o javnoj opskrbi plinom iz ugljena, zbog čega su bili dostupni samo za stacionarne strojeve. Otto ciklus se godinama dodatno usavršavao i konačno je patentiran 1877. godine. Ova inovacija otvorila je put razvoju motora, uvodeći doba razvoja automobila. Zanimljivo za istaknuti je kako je prvi dokumentirani morski brod koji je koristio četverotaktne dizel motore bio *Selandia*. Taj brod je plovio oceanom s četverotaktnim osam cilindričnim motorima, smještenim u izrazito velike kontejnere, više nego dvostruko više od prosječnog mornara [4].

Današnji radni proces četverotaktnog klipnog motora sastoji se od četiri ista dijela koji slijede jedan iza drugoga jednakim redosljedom: usis, kompresija, ekspanzija (radni takt) i ispuh. Tijek radnog procesa izražen je zakretom koljenastog vratila od početne pozicije klipa, gornje mrtve točke, u smjeru vrtnje motora. Jedan takt T, definiran je kao jedno kretanje klipa od gornje mrtve točke (GMT) do donje mrtve točke (DMT), ili obrnuto. Taj put odgovara kutu zakreta koljenastog vratila od 180° [4].

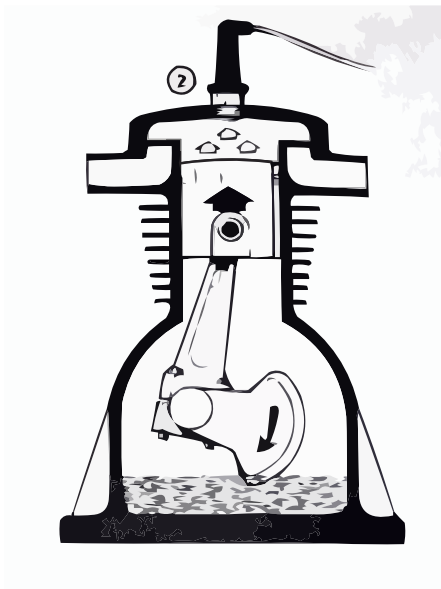
Tijek četverotaktnog (4T) ciklusa detaljnije se može prikazati kroz sva četiri takta koja su prikazana i na slikama od 2. - 5. niže.

Na slici 2. prikazan je prvi takt ili usis, gdje se klip giba od gornje mrtve točke (GMT) prema donjoj mrtvoj točki (DMT), a usisni ventil je otvoren dok je ispušni ventil zatvoren. Kako se volumen u cilindru povećava, zrak ili smjesa zraka i goriva ulazi u cilindar [3].



Slika 2. Prikaz prvog takta (USIS) četverotaktnog motora [5]

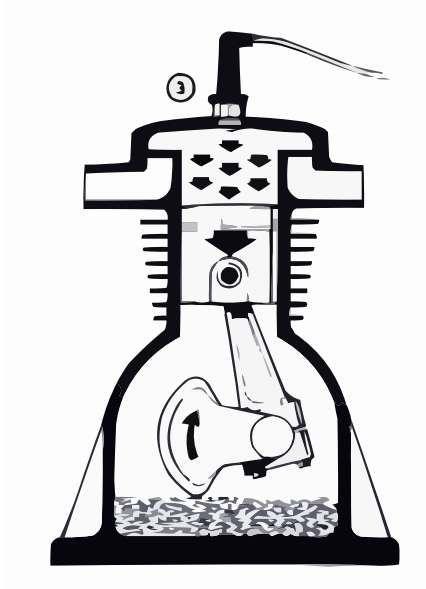
U drugom taktu ili kompresiji kao što možemo vidjeti na slici 3., klip se s donje mrtve točke (DMT) giba do gornje mrtve točke (GMT), pri čemu su usisni i ispušni ventili zatvoreni [3].



Slika 3. Prikaz drugog takta (KOMPRESIJA) četverotaktnog motora [5]

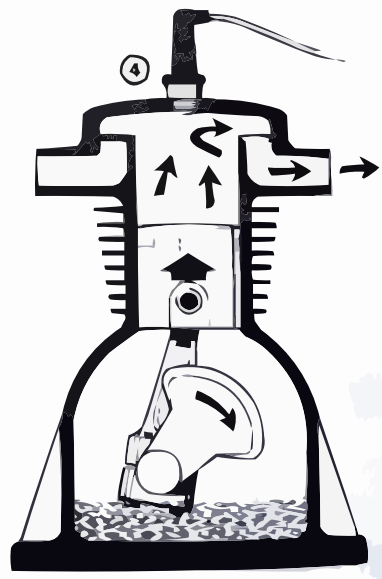
Klip se u trećem taktu (radnom taktu) giba od gornje mrtve točke (GMT) prema donjoj mrtvoj točki (DMT) sa zatvorenim usisnim i ispušnim ventilima. Zbog izgaranja, temperatura i tlak rastu, što uzrokuje širenje plinova koji pomiču klip. Ovaj pomak klipa putem klipnog

mehanizma prenosi se na koljenasto vratilo (radilicu), čime se kemijska energija goriva pretvara u mehanički rad. Mehanički rad se ostvaruje samo tijekom trećeg takta, odnosno ekspanzije [3].



Slika 4. Prikaz trećeg takta (EKSPANZIJA) četverotaktnog motora [5]

U završnom, četvrtom taktu ili ispuhu, klip se giba od donje mrtve točke (DMT) do gornje mrtve točke (GMT) dok je usisni ventil zatvoren, a ispušni ventil otvoren [3].



Slika 5. Prikaz četvrtog takta (ISPUH) četverotaktnog motora [5]

Za obavljanje jednog radnog procesa prema broju taktova razlikuju se dvotaktni (2T) i četverotaktni (4T) motori. Drugim riječima, kod četverotaktnog motora svaki od četiri dijela radnog procesa traje 180° , ili jedan takt [3].

Povijesni razvoj dvotaktnih motora odvijao se kroz nekoliko desetljeća. Počelo je sa škotskim inženjerom Dugaldom Clerkom, koji je predstavio prvi komercijalni dvotaktni motor. Njegov rad poboljšao je dizajn četverotaktnog motora, koji je imao samo jedan hod snage. To je uzrokovalo gubitak u učinkovitosti cjelokupnog procesa. Clerkov dizajn bio je dvostruki cilindar s cilindrom koji se naziva istiskivač i drugim cilindrom koji se naziva snaga. Cilindar istiskivača uvlači plin i zrak, lagano ih komprimira, a zatim prenosi komprimiranu smjesu u pogonski cilindar. Ovu dvocilindričnu konfiguraciju Clerk je izbacio 1880. godine. Proizvod su proizveli Thomson, Sterne & Co iz Glasgowa, a patentiran je 1881. Englez Joseph Day je dodatno poboljšao motor, korištenjem prostora ispod klipa motora kao pumpe za punjenje, pretvarajući motor u motor bez ventila. Zrak napunjen ispod klipa pomaže u čišćenju preostalih ispušnih plinova unutar cilindra i također regulira temperaturu stroja. Ovaj dizajn se ponekad naziva motor s pročišćenim kućištem radilice. Međutim, prvi praktični dvotaktni motor predstavio je jorkširski izumitelj i inženjer Alfred Angas Scott. Koristio je dvocilindrični vodeno hlađeni dizajn u motociklima koji su Scottovim motociklističkim utrkama dali veliku prednost od 1908. do 1912 [4].

Današnji dvotaktni motori imaju nešto drugačiju tehničku izvedbu od iznad opisanog četverotaktnog motora koji za razliku od dvotaktnih motora imaju usisne i ispušne ventile. Kod dvotaktnih motora, usis i ispuh, te ekspanzija i kompresija vrše se za vrijeme trajanja jednog takta. Dakle, ukupan broj stupnjeva potrebnih za odvijanje jednog radnog ciklusa kod 4T motora iznosi 720° [3].

Slijedom navedenog, može se reći da četverotaktni motori imaju jedan radni takt za svaka dva okreta koljenastog vratila, što znači da je ciklus motora završen u četiri takta klipa. Četverotaktni motori koriste ventile i mehanizme ventila, što ih čini težima i složenijima, pa su troškovi razvoja, proizvodnje i održavanja veći. Ovi motori se koriste tamo gdje je visoka učinkovitost važna, poput automobila, proizvodnje energije i zrakoplova. Obično se hlade vodom, što smanjuje trošenje, te troše manje maziva koje se nalazi u kućištu radilice i nije pomiješano s gorivom, kao kod 2T motora [6].

Zaključno, četverotaktni motori su preferirani u mnogim područjima industrije zbog svoje visoke učinkovitosti, pouzdanosti i sposobnosti rada pod različitim uvjetima. Oni su teži

i složeniji od dvotaktnih motora, što može povećati početne troškove. Prednosti kao što su manja potrošnja goriva, bolja kontrola emisija i dugovječnost čine ih idealnim izborom za vozila, zrakoplove i postrojenja za proizvodnju energije. Njihova sposobnost pružanja stabilne snage i ujednačenog rada čini ih ključnim komponentama u modernoj tehnologiji pogona [6].

3. Karakteristični nedostaci klipnih motora

Vibracije motora mogu se podijeliti u dvije kategorije:

- unutarnje vibracije - vibracije dijelova motora u odnosu jedan na drugi
- vanjske vibracije - kretanje motora u cjelini

Kod unutarnjih vibracija, unutar same konstrukcije motora, sile koje nastaju zbog inercije pokretnih dijelova i promjenjivog tlaka plinova u cilindrima moraju rezultirati otklonima strukturalnih dijelova motora, budući da su ti dijelovi elastični. Tako se stvaraju vibracije različitih frekvencija i amplituda kroz cijelu konstrukciju motora. U svakom stroju u kojem primijenjene sile variraju s vremenom, uvijek postoji vibracijski odziv. U praksi, vibracijski odziv mora se kontrolirati kako bi se izbjegli kvarovi, mehanička oštećenja ili pretjerana buka. Iskustvo pokazuje da problemi u ovoj kategoriji najčešće uključuju vibracije radilice, kako torzijske tako i savojne, te vibracije u mehanizmu ventila. [7]

Kod klipnih motora postoje dvije grupe vibracijskih pojava na koje treba obratiti pozornost. To su vibracije koje motor prenosi na nosače motora, odnosno cijelo motorno vozilo i torzijske vibracije na koljenasto vratilo (radilicu) i ostale rotirajuće dijelove motora [8].

Svaka od ovih pojava nastaje uslijed periodičnih ubrzanja pokretnih dijelova (klipova, klipnjača, osovina, prstenova) i periodičnih oscilacija u tlaku prilikom izgaranja goriva u cilindru [8].

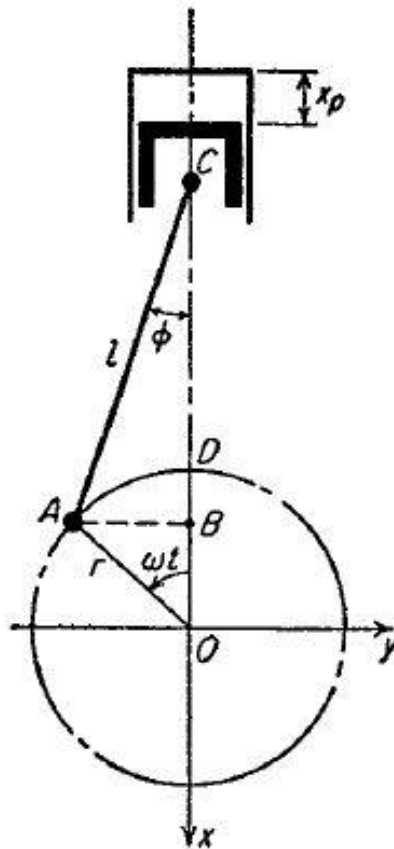
U nastavku je obrađen vertikalni motor s jednim cilindrom. Klip se vertikalno, harmonijskim gibanjem, pa ima vertikalna ubrzanja. Kada se klip ubrzava prema dolje, na njega djeluje sila usmjerena prema dolje, a ta sila ima svoju protusilu koja djeluje na nepomične dijelove motora. Stoga je harmonijsko ubrzanje klipa povezano s harmonijskom silom na blok motora, što uzrokuje da se vibracije osjete na motoru i cijelom vozilu. Osim klipa, ubrzavaju se i klipnjača i koljenasto vratilo (kao i različiti drugi pokretni dijelovi motora). Sile koje uzrokuju ta ubrzanja moraju izazvati jednake i suprotne reakcije, što dovodi do horizontalne neuravnoteženosti motora [8].

4. Kinematika klipnog mehanizma

Klipni mehanizam kreće se u ravnini. Klip se giba pravocrtno od gornje mrtve točke do donje mrtve točke i natrag. Takvo pravocrtno gibanje ovisi o kružnom gibanju koljenastog vratila pri čemu svaki kut zakreta koljenastog vratila odgovara određenom položaju klipa. Budući da se ovdje radi o pretvorbi jednog tipa gibanja u drugi, klip ne putuje stalnom brzinom. Stoga, klip usporava kada se približava krajnjim točkama gornje mrtve točke (GMT) i donje mrtve točke (DMT), dok ubrzava dok se udaljava od tih točaka. Za opisivanje položaja klipa kao krutog tijela u *Kartezijevom* koordinatnom sustavu, prikazano na slici 6., potrebno je poznavati dvije koordinate za translaciju te kao pomoćnu veličinu jednu za kutno gibanje. U kinematičkoj analizi fokus je na proučavanju gibanja bez obzira na sile koje ga uzrokuju. Za razliku od dinamičke analize, koja određuje gibanje sustava na temelju sila koje na njega djeluju, kinematika se bavi analizom i određivanjem položaja, brzine i ubrzanja na temelju unaprijed definiranog gibanja nekog od elemenata sustava. Primjerice, u kinematici klipnog mehanizma analizirani su položaji, brzine i ubrzanja svih elemenata sustava ovisno o kretanju koljenastog vratila, čije je gibanje unaprijed definirano. Ako su poznate nezavisne koordinate sustava, tada se položaj, brzina i ubrzanje drugih dijelova sustava mogu izraziti kao funkcija tih nezavisnih koordinata. U slučaju motornog mehanizma, to znači da ako znamo kut položaja koljenastog vratila, možemo odrediti položaj, brzinu i ubrzanje klipa kao funkciju nezavisne koordinate i njenih izvoda [9].

U nastavku na slici 1. prikazano je pojednostavljenje jednocilindričnog motora, gdje su nepoznanice:

- o x_p = pomak klipa prema dolje od GMT
- o ω = kutna brzina vrtnje koljenastog vratila
- o t = vrijeme
- o ωt = kut koljenastog vratila u odnos na GMT
- o φ = pomoćni kut za računanje
- o r = polumjer koljenastog vratila
- o l = duljina klipnjače



Slika 6. Shema klipnog mehanizma [8]

Budući da je cilj klipnog mehanizma pretvorba linearnog translacijskog gibanja u rotacijsko gibanje, potrebno je odrediti pomak klipa (točke C) u odnosu na kut koljenastog vratila ωt . Pretpostavimo da se koljenasto vratilo okreće konstantnom brzinom ω . Pomak x_p možemo aproksimirati izrazom $r(1 - \cos(\omega t))$, koji je jednak dužini \overline{DB} . Uz tu aproksimaciju, potrebno je odrediti i razliku dužina \overline{AC} i \overline{BC} , koja glasi $l(1 - \cos(\varphi))$. Dužinu \overline{AB} može se izraziti preko pomoćnog kuta φ te glasi $l(\sin(\varphi))$, odnosno $r(\sin(\omega t))$. Iz ovih izraza dolazi se do prve jednadžbe koja glasi [8]:

$$\sin(\varphi) = \frac{r}{l} \sin(\omega t), \quad (4.1)$$

stoga je:

$$\cos(\varphi) = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \sin(\omega t)\right)^2}. \quad (4.2)$$

Iz ovih jednadžbi dobivamo točan izraz za pomak klipa x_p , koji ovisi o ωt , kutu koljenastog vratila u odnosu na GMT:

$$x_p = r[1 - \cos(\omega t)] + l \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \sin(\omega t) \right)^2} \right]. \quad (4.3)$$

Kod uobičajenih motora s unutarnjim izgaranjem na današnjem tržištu, omjer klipnjače $\lambda = r/l$ malo se razlikuje od $1/4$. Iz tog razloga može se pojednostaviti izraz (4.3) pomoću korištenja približnih izraza koji omogućuju lakše daljnje računanje. [8]

Dakle, zbog kompleksnosti drugog člana jednadžbe (4.3), jednadžba (4.3) nije pogodna za daljnje računanje. Ako je $r^2/l^2 = 1/16$, zbog industrijskog standarda, znači da je drugi član pod korijenom malen u odnosu na jedinicu i možemo izračunati da iznosi $\sqrt{1 - \delta}$ gdje je $\delta < 1$. Razvijanjem korijena u red, može se dobiti pomoćna jednadžba [8]:

$$\sqrt{1 - \delta} \approx 1 - \frac{\delta}{2}. \quad (4.4)$$

Uvrštavanjem (4.4) u (4.3) dobivamo:

$$x_p \approx r[1 - \cos(\omega t)] + \frac{r^2}{2l} \sin^2(\omega t) \quad (4.5)$$

Dalje pojednostavljenje može se dobiti korištenjem pretvorbe kvadrata sinusa u kosinus dvostrukog kuta koristeći sljedeće geometrijske identitete:

$$\cos(2\omega t) = 1 - 2\sin^2(\omega t), \quad \sin^2(\omega t) = \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2}. \quad (4.6)$$

Pomak klipa tada glasi:

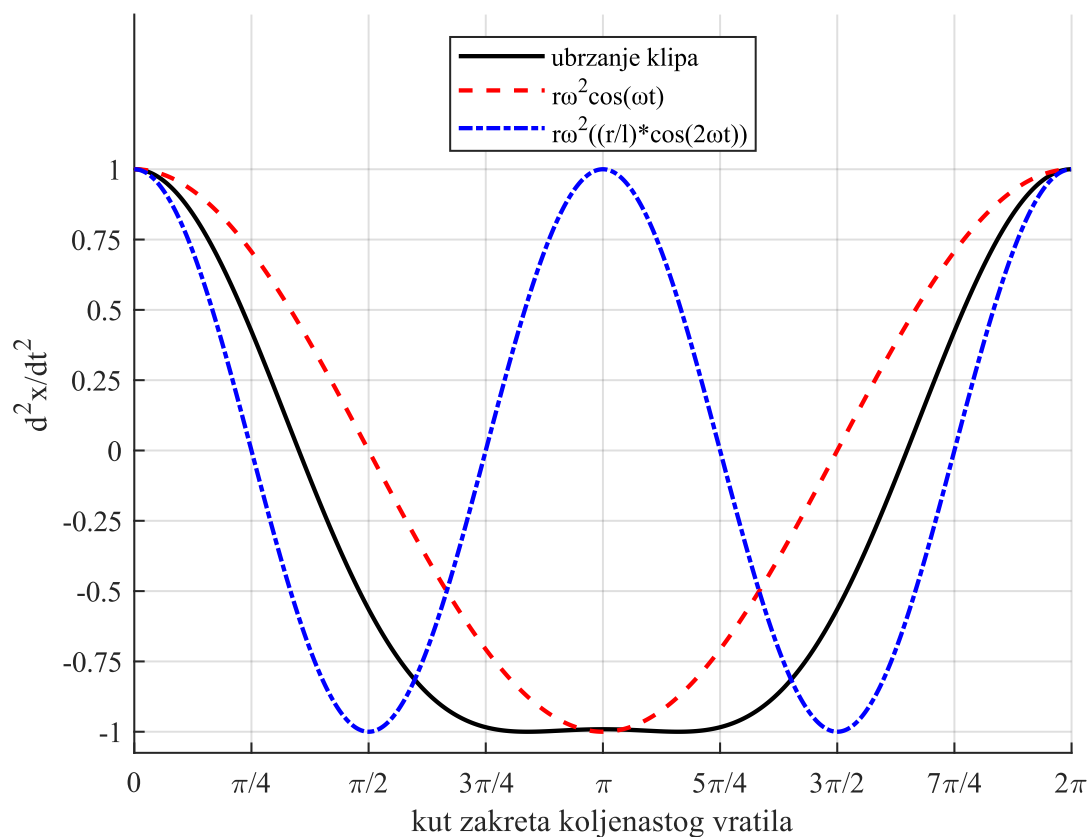
$$x_p = \left(r + \frac{r^2}{4l} \right) - r \left[\cos(\omega t) + \frac{r}{4l} \cos(2\omega t) \right]. \quad (4.7)$$

Deriviranjem pomaka mogu se dobiti izrazi za brzinu i ubrzanje klipa:

$$\dot{x} = r\omega \left[\sin(\omega t) + \frac{r}{2l} \sin(2\omega t) \right] \quad (4.8)$$

$$\ddot{x} = r\omega^2 \left[\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t) \right]. \quad (4.9)$$

Nakon množenja izraza (4.8) i (4.9) s masom klipa, može se dobiti vertikalna količina gibanja i vertikalnu inercijsku silu. Pomoću raščlanjenog izraza (4.9), pokazana na slici 2. razlika u amplitudi ubrzanja 1. i 2. reda. Na slici 6. kao primjer dano je ubrzanje klipa za motor gdje je $l/r = 4$. U izrazu (4.9) prikazano je da postoje članovi s jednostrukim kutom i s dvostrukim kutom. Što ukazuje na to da se neke sile javljaju jednom ili dva puta po jednom okretu koljenastog vratila, odnosno 1. i 2. red vibracija koji se javljaju u klipnom motoru s unutarnjim izgaranjem. Prvi član zagrade u izrazu (4.9) mijenja se istom frekvencijom kao i okretanje motora i naziva se primarni član, a drugi član zagrade, koji se mijenja dvostrukom frekvencijom, naziva se sekundarni član. Ako je klipnjača beskonačno duga, drugi član nestaje, pa klip izvodi harmonijsko kretanje. Ako je ova poluga kratka, razlikuje se kretanje, a naročito ubrzanje znatno od sinusoide. [8]



Slika 7. Ubrzanje klipa kao funkcija kuta zakreta koljenastog vratila za $l/r = 4$

4.1. Usporedba približnog i egzaktnog rješenja za ubrzanje klipa

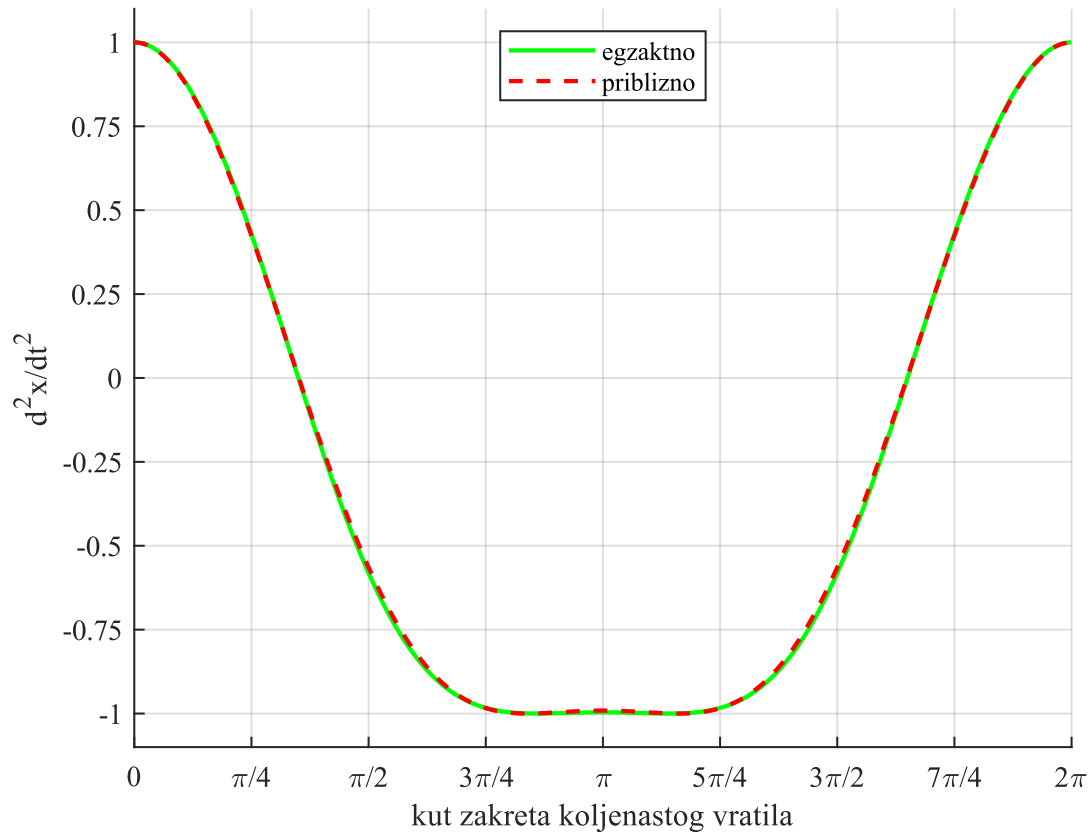
Iako je izraz (4.3) egzaktni izraz za pomak klipa, on nije pogodan za računanje pri daljnjoj analizi vibracija, ali koristeći odabrane matematičke metode dolazi se do izraza (4.7) koji odgovara za daljnje korištenje. Taj izraz daje približna rješenja, a literature izraz daju kao gotov i dovoljno točan za proračun. No, potrebno je ipak usporediti dvostruke derivacije izraza (4.3) i (4.7) kako bi se dokazala pouzdanost rješenja. Dakle, potrebno je pokazati da približan izraz (4.7) daje zadovoljavajuće rezultate.

Kako bi se mogli usporediti rezultati približnog i egzaktnog rješenja, potrebno je prvo dva puta derivirati egzaktni izraz pomaka klipa (4.3) da bi se dobilo ubrzanje klipa. Dakle, derivacijom i dvostrukom derivacijom egzaktnog pomaka (4.3) dobivamo egzaktno izraze za brzinu i ubrzanje klipa:

$$\dot{x} = \frac{r^2 \sin(2\omega t)}{2l \sqrt{1 - \frac{r^2 [1 - \cos(2\omega t)]}{2l^2}}} + r \sin(\omega t), \quad (4.10)$$

$$\ddot{x} = r \cos(\omega t) - l \left\{ -\frac{r^2 \cos(2\omega t)}{l^2 \sqrt{1 - \frac{r^2 [1 - \cos(2\omega t)]}{2l^2}}} - \frac{r^4 \sin^2(2\omega t)}{4l^4 \sqrt[3]{1 - \frac{r^2 [1 - \cos(2\omega t)]}{2l^2}}} \right\}. \quad (4.11)$$

Usporedba egzaktnog i približnog rješenja za ubrzanje klipa prikazano je na slici 8.



Slika 8. Usporedba egzaktnog i približnog rješenja ubrzanja klipa

Slika 8. jasno prikazuje usporedbu egzaktnog i približnog rješenja za ubrzanje klipa. Približno rješenje označeno je isprekidanom linijom i zaista daje zadovoljavajuće rješenje u odnosu na egzaktno rješenje. Potrebno je naglasiti da usporedba vrijedi isključivo zbog uvjeta zadane vrijednosti omjera klipnjače, odnosno njene vrijednosti $l/r = 4$ [8].

5. Odabir motora za usporedbu i određivanje oblika koljenastog vratila

Trenutno se na tržištu primjećuje trend smanjivanja zapremine motora s unutarnjim izgaranjem. Proizvođači su radi toga počeli koristiti motore s manjim brojem cilindara. Znatno je broj faktora koji omogućuju proizvodnju i prodaju takvih motora. Proizvođači se prvenstveno drže jedne od najpopularnijih konfiguracija malih motora: redni 3, ili redni 4. Oba nude slične performanse, kompaktnu izvedbu, malu potrošnju, ali uz nešto drugačije vibracijske karakteristike [10].

Koljenasto vratilo pretvara pravocrtno gibanje klipova u rotacijsko gibanje i jedan je od najsloženijih dijelova u strojarstvu. Koljenasta vratila mogu se klasificirati prema vrsti oslonaca (s prevjesom i s osloncem u sredini) te prema broju koljenastih zavoja (s jednim ili više zavoja). Proces dizajna uključuje izračunavanje čvrstoće i naprezanja koljenastog vratila, uzimajući u obzir čimbenike koji utječu na čvrstoću zamora te analiziranje debljine uljnog filma za razumijevanje uzoraka trošenja. Redni motori s jednim do četiri cilindra inherentno imaju neuravnotežene inercijske sile, što može uzrokovati vibracije; ove se vibracije mogu ublažiti parom balansnih vratila, ako trošak to dopušta [10].

Nakon izgaranja u cilindru, energija koju oslobađa izgarajuća smjesa plinova je izuzetno visoka. Ova energija se prenosi na klip, a zatim kroz klipnjaču do koljenastog vratila. Koljenasto vratilo ima zadatak da prenese snagu proizvedenu izgaranjem na zamašnjak, a potom na mjenjač. Taj proces omogućava rad motora automobila. Tijekom rada, koljenasto vratilo suočava se sa silama inercije i silama generiranim izgaranjem, što uzrokuje torzijska i savojna naprezanja. Uobičajeno se izrađuje od kaljenog legiranog čelika kako bi bio otporan na trošenje. Neprikladan izbor materijala može dovesti do smanjenja performansi koljenastog vratila jer su naprezanja koja nastaju iznimno visoka [11]. Životni vijek i trajnost motora s unutarnjim izgaranjem ovise o čvrstoći radilice [12]. Stoga je vrlo bitno da se radilica optimalno optereti, imajući na umu dugovječnost motora i udobnost koja je narušena vibracijama motora.

Za pregled vibracija, o kojoj tematici će se obrađivati u poglavlju niže, uzet će se četverotaktni redni 4 motor s kutovima koljenastog vratila od 0° , 180° , 180° i 0° , te četverotaktni redni 3 motor s kutovima koljenastog vratila od 0° , 120° i 240° . Takve konfiguracije najčešće se mogu naći u automobilskoj industriji.

6. Vektorska analiza vibracija

Vektorska analiza, prema Hartogu iz knjige „Vibracije u mašinstvu“, metoda je određivanja uravnoteženosti motora s više cilindara zamišljajući različite sile koje se javljaju u motoru kao horizontalne projekcije rotirajućih vektora. Neka je kod nekog motora udaljenost između težišta motora i koljena na koljenastom vratilu obilježeno s l_n (težište se nalazi na pola duljine koljenastog vratila), te neka je kut između prvog i n -tog koljena vratila označen α_n (kut n -tog koljena). Uz pretpostavku da su svi klipovi jednake mase, jednakog razmaka među koljenima (l) i zadanog smjera vrtnje, mogu se prema konfiguraciji koljenastog vratila dobiti vektorski dijagrami primarnih sila, primarnih momenata te sekundarnih sila i sekundarnih momenata. Rezultati vektorskih dijagrama mogu se izraziti matematičkim izrazima. Uvjet ravnoteže primarnih sila zahtjeva da zbroj svih vektora bude jednak nuli. Prema tome, zbroj njihovih vertikalnih i horizontalnih komponenti mora biti jednak nuli, tj.:

$$\sum_n \sin(\alpha_n) = 0 \quad \text{i} \quad \sum_n \cos(\alpha_n) = 0. \quad (6.1)$$

Sličan uvjet ravnoteže traže i sekundarne sile:

$$\sum_n \sin(2\alpha_n) = 0 \quad \text{i} \quad \sum_n \cos(2\alpha_n) = 0. \quad (6.2)$$

Za primarne momente uvjeti ravnoteže glase:

$$\sum_n l_n \sin(\alpha_n) = 0 \quad \text{i} \quad \sum_n l_n \cos(\alpha_n) = 0, \quad (6.3)$$

a za sekundarne momente glase:

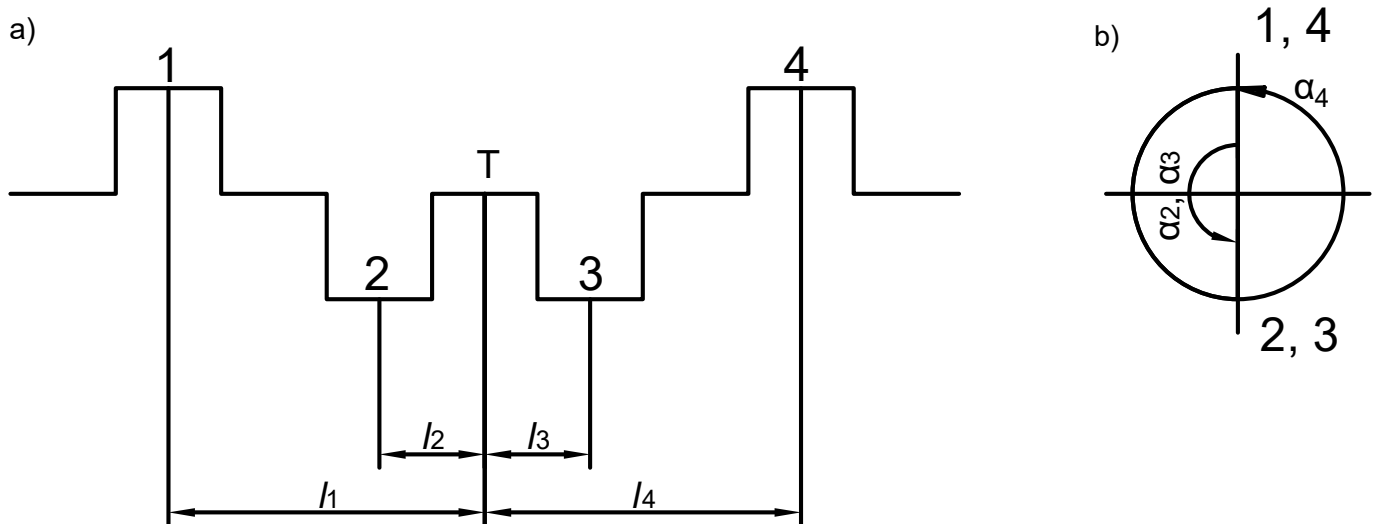
$$\sum_n l_n \sin(2\alpha_n) = 0 \quad \text{i} \quad \sum_n l_n \cos(2\alpha_n) = 0. \quad (6.4)$$

6.1. Četverotaktni redni 4 motor

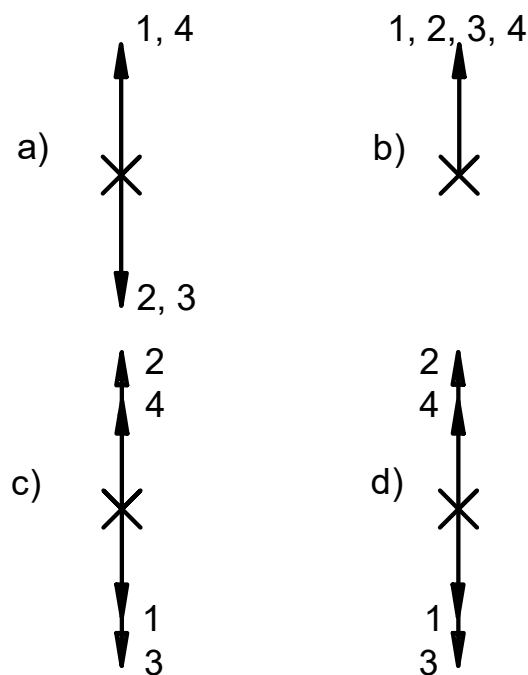
Četverotaktni redni 4 motori u cestovnoj se primjeni najčešće izvode s koljenastim vratilom gdje je raspored koljena određen kutovima od 0° , 180° , 180° i 0° . Stoga, potrebno je

napraviti vektorske dijagrame za primarne i sekundarne momente i sile kako bi se provjerili uvjete ravnoteže navedene u poglavlju.

Na slici 7. prikazana je skica koljenastog vratila navedene izvedbe te skica kutova između koljena vratila. Iz njih se mogu dobiti vektorski dijagrami prikazani na slici 8. Za motor na slici z je $\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 180^\circ$, $\alpha_3 = 180^\circ$ i $\alpha_4 = 0^\circ$, te $l_1 = 3l/2$, $l_2 = l/2$, $l_3 = l/2$ i $l_4 = 3l/2$.



Slika 9. Motor R4: a) koljenasto vratilo b) kutovi između koljena vratila



Slika 10. Motor R4: a) primarne sile; b) sekundarne sile; c) primarni momenti; d) sekundarni momenti

Koristeći uvjete (6.1) mogu se dobiti rezultati za ravnotežu primarnih sila:

$$0+0+0+0=0 \quad \text{i} \quad 1-1+1-1=0, \quad (6.5)$$

a koristeći uvjete (6.3) mogu se dobiti rezultati za ravnotežu primarnih momenata:

$$-\frac{3}{2}*0+\frac{1}{2}*0-\frac{1}{2}*0+\frac{3}{2}*0=0 \quad \text{i} \quad -\frac{3}{2}*1+\frac{1}{2}*(-1)-\frac{1}{2}*(-1)+\frac{3}{2}*1=0. \quad (6.6)$$

Koristeći uvjete (6.2) i (6.4) mogu se dobiti rezultati za ravnotežu sekundarnih sila i momenata:

$$0+0+0+0=0 \quad \text{i} \quad 1+1+1+1=4 \neq 0$$

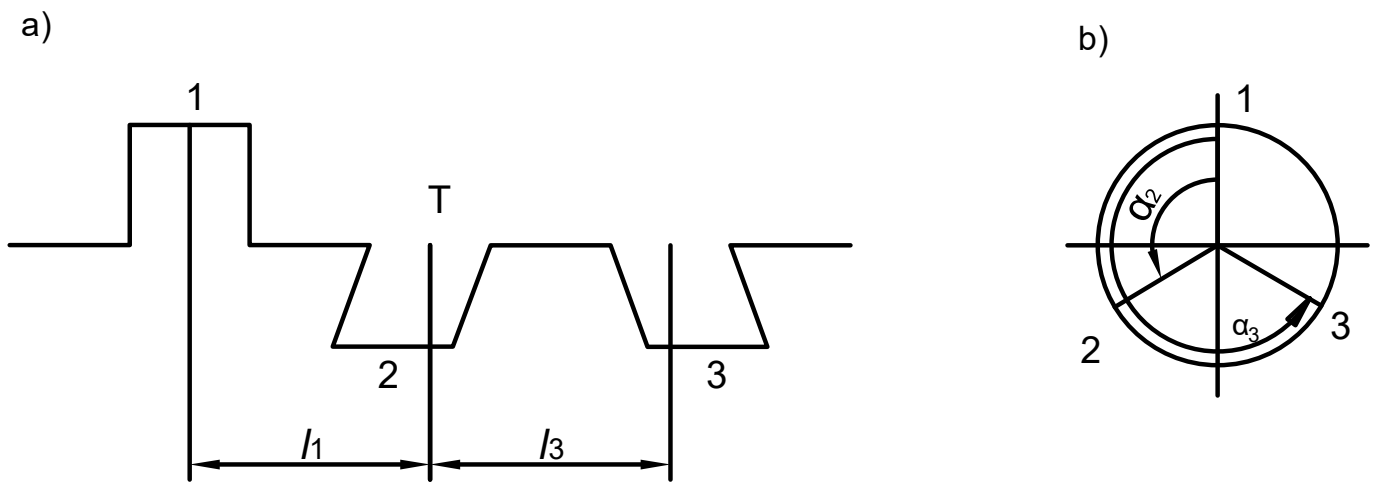
$$\frac{3}{2}*0+\frac{1}{2}*0-\frac{1}{2}*0-\frac{3}{2}*0=0 \quad \text{i} \quad \frac{3}{2}*1+\frac{1}{2}*1-\frac{1}{2}*1-\frac{3}{2}*1=0 \quad (6.7)$$

Iz rezultata jednadžbi (6.5), (6.6) i (6.7) može se zaključiti da je četverotaktni redni 4 motor u ravnoteži primarnih sila i momenata te sekundarnih momenata, ali je u neravnoteži sekundarnih sila.

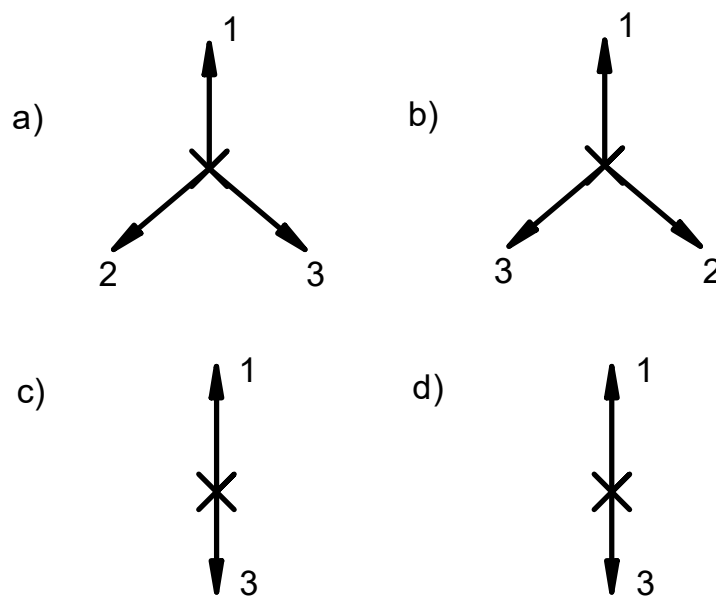
U ovoj konfiguraciji motora, klipovi se kreću u parovima koji se međusobno mimoilaze, čime se sile inercije prvog reda uravnotežavaju. No, zbog nejednolikog ubrzanja pri GMT i DMT, jedan par klipova ima veće ubrzanje nego drugi par koji se kreću u suprotnom smjeru, što rezultira u neravnoteži sila inercije drugog reda.

6.2. Četverotaktni redni 3 motor

Istom metodom može se odrediti ravnoteža četverotaktnog rednog 3 motora. Četverotaktni redni 3 motori u cestovnoj se primjeni najčešće izvode s koljenastim vratilom gdje je raspored koljena određen kutovima od 0° , 120° i 240° . Na slici 9. prikazana je skica koljenastog vratila navedene izvedbe te skica kutova između koljena vratila. Iz njih se mogu dobiti vektorski dijagrami prikazani na slici 10. Za motor na slici z je $\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 120^\circ$ i $\alpha_3 = 240^\circ$, te $l_1 = l$, $l_2 = 0$, $l_3 = l$.



Slika 11. Motor R3: a) koljeno vratilo b) kutovi između koljena vratila



Slika 12. Za R3: a) primarne sile; b) sekundarne sile; c) primarni momenti; d) sekundarni momenti

Koristeći uvjete (6.1) mogu se dobiti rezultati za ravnotežu primarnih sila:

$$0 + \frac{\sqrt{3}}{2} + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 0 \quad \text{i} \quad 1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0, \quad (6.8)$$

a koristeći uvjete (6.3) mogu se dobiti rezultati za ravnotežu primarnih momenata:

$$-1 \cdot 0 + 0 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - 1 \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \neq 0 \quad \text{i} \quad -1 \cdot 1 - 0 \cdot \frac{1}{2} - 1 \cdot \frac{1}{2} = -\frac{3}{2} \neq 0. \quad (6.9)$$

Koristeći uvjete (6.2) i (6.4) mogu se dobiti rezultati za ravnotežu sekundarnih sila i momenata:

$$\begin{aligned} 0 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2} = 0 \quad \text{i} \quad 1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0 \\ -1 \cdot 0 + 0 \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - 1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \neq 0 \quad \text{i} \quad -1 \cdot 1 - 0 \cdot \frac{1}{2} - 1 \cdot \frac{1}{2} = -\frac{3}{2} \neq 0. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Iz rezultata jednadžbi (6.8), (6.9) i (6.10) možemo zaključiti da je četverotaktni redni 3 motor u ravnoteži u primarnih i sekundarnih sila, ali je u neravnoteži u primarnih i sekundarnih momenata. Budući da je redni 3 motor u neravnoteži u primarnim i sekundarnim momentima oko težišta motora, izravno je manje stabilan od rednog četiri motora. Time je manje podoban za dugovječnu uporabu u cestovnim vozilima, koja zahtijevaju udobnost, malu razinu buke i dug vijek trajanja.

6.3. Kratka usporedba vibracija rednog četiri i rednog tri motora

Ravnoteža rednog četiri i rednog tri motora razlikuje se i u primarnom i sekundarnom redu. U tablici 1. prikazane su razlike dvaju motora.

Kao najbitnije svojstvo, redni četiri i redni tri motori su u ravnoteži u primarnim silama, no to je jedino svojstvo koje ti motori dijele. Redni četiri još je u ravnoteži u primarnim i sekundarnim momentima, no u neravnoteži u sekundarnim silama. Neravnoteža u sekundarnim silama je ujedno i jedino mjesto neravnoteže u rednom četiri motoru.

Što se tiče rednog tri motora, kao što je već navedeno, u ravnoteži je u primarnim silama, ali ujedno i u sekundarnim silama. Problem rednog tri motora radi neravnoteža u primarnim i sekundarnim momentima, što ga čini manje stabilnim motorom.

Tablica 1. Usporedba vibracija R4 i R3 motora

red	sile/momenti	R4	R3
primarni	sile	✓	✓
	momenti	✓	✗
sekundarni	sile	✗	✓
	momenti	✓	✗

6.4. Smanjenje vibracija u četverotaktnom rednom četiri motoru

Podoban izbor motora s unutarnjim izgaranjem za cestovno vozilo u masovnoj proizvodnji je i dalje četverotaktni redni četiri motor kao favorit. Kao jedno od bitnih svojstava, ovaj motor ima mirnoću rada zbog ravnoteže u primarnim silama i momentima, koja se u iznosu amplitude znatno razlikuju od sekundarnog reda. Problem kod rednog tri motora rade primarni momenti koji nisu u ravnoteži, što za rezultat daje nestabilnost oko težišta motora. Rezultat te vibracije je neudobnost, visoki zahtjevi kod projektiranja nosača motora, ali i kraći vijek trajanja motora [3].

Što se tiče vibracija rednog četiri motora, kad je klip 1. cilindra u GMT, sve sile inercije drugoga reda okrenute su prema GMT. Redni četiri motor je potpuno uravnotežen u pogledu sile inercije 1. reda i njihovih momenata. Sile inercije drugog reda pak nisu uravnotežene. Amplituda rezultirajuće sile inercije drugoga reda jednaka je jednoj četvrtini vrijednosti amplitude jednoga cilindra. Kako je kod automobilskih motora u općoj uporabi najmanji omjer klipnjače $r/l = 1/4$, proizlazi da će rezultirajuća amplituda biti vrijednost amplitude sile inercije prvoga reda jednoga cilindra. Zaključno, u četverotaktnom motoru s četiri cilindra (R4), neuravnotežene sile inercije drugoga reda imaju rezultantu koja je po veličini jednaka sili inercije prvoga reda jednog cilindra. [3]

Drugi red vibracija može se smanjiti i do 92.5%. [13], koristeći par balansirajućih vratila. Budući da je cilj smanjiti ili čak potpuno poništiti drugi red vibracija, može se koristiti balans vratila koja se vrte dvostrukom brzinom rada motora, jer je poznato da se drugi red vibracija javlja dva puta po jednom okretu radilice. Prilikom ugradnje javlja se više zahtjeva koje je potrebno ispuniti. Potrebno je paziti na mjesto ugradnje koje može biti, ili ispod radilice ili s lijeve i desne strane radilice (u slučaju ugradnje paralelno s radilicom). Ukoliko se radi o ugradnji ispod radilice, treba pripaziti na ograničenja prostora koja daje letva volana ili posuda za ulje. Isto tako, bitno je dobro odabrati sustav pokretanja balans vratila. Postoje mogućnosti pokretanja lancem, zupčanicima i zupčastim remenom. Optimum odabira pokretanja varira jedinstveno s ograničenjima koja ta primjena nameće: ograničenja prostora, brzina okretanja motora, pozicija balans vratila, geometrija radilice, raspored pomoćnih uređaja motora (klima uređaj, alternator, i sl.) i vrsta konstrukcije motora (redni, V, bokser itd.).

Opća pravila za dizajniranje pogona balans vratila su:

1. pokretanje lančanog pogona na dvostrukoj brzini radilice predstavlja problem zbog velikih lančanika koji uzrokuju velike obodne brzine ili malih lančanika koji uzrokuju poligonske efekte i nepravilno nasjedanje lanca i nepravilan prijenos snage

2. zupčanici bi idealno trebali biti smješteni unutar istog kućišta kako bi se osiguralo učinkovito goljanje, što je vidljivo iz sofisticirane upotrebe zahvaćanja zupčanika koju koristi Opel u svojim dizajnimima.

3. dinamika radilice ima značajniji utjecaj na sustav pokretanja od opterećenja balansnog vratila, što je osobito važno za kontrolu buke sustava pokretanja balansnog vratila [13].

Korištenje balansnih vratila nije savršeno i kao i svi uređaji i rješenja, ima svoje mane. Kao glavni problem, potrebno je izdvojiti snagu koja je potrebna za pokretanje sustava. U prosjeku, ona može trošiti i do 2 kW, što može rezultirati i do 5% izgubljenog okretnog momenta koji motor pruža. Zahtjeva se dodatan prostor u bloku motora, dodatne sustave podmazivanja uljem, ali i veće zahtjeve prilikom održavanja. Isto tako, instalacija balansnih vratila može kao negativnu nuspojavu imati povećanje temperature rada motora zbog većih zahtjeva dodatnih trošila [13].

Kao glavnu prednost rednog četiri motora s parom balans vratila, može se izdvojiti snižavanje buke koju proizvodi motor prilikom svojeg rada te povećanje udobnosti unutar vozila. Motor s ugrađenim balansnim vratilima može imati i više od 5 dB [13] manju buku unutar prostora vozila. Rezultat mirnijeg rada je znatno manji prijenos vibracija na šasiju vozila i smanjenje efekta zvučne kutije unutar vozila. Potrebno je naglasiti da sustav u prosjeku ne predstavlja kompleksan sustav velike mase, te da se uz relativno mali gubitak korisne snage motora znatno može povećati udobnost korištenja i ostvariti dulji životni vijek motora uz nešto skuplje održavanje [13].

7. Zaključak

Zaključno, u ovom radu je razmatran opći rad klipnih motora s unutarnjim izgaranjem, ističući njihove nedostatke i poteškoće, a posebno vibracije svojstvene takvim motorima. Posebna pozornost posvećena je danas najčešće korištenim motorima: rednom trocilindričnom i rednom četverocilindričnom motoru s unutarnjim izgaranjem. Ovi motori moraju pružiti pouzdan izvor snage, istovremeno zadovoljavajući očekivanja kupaca u vezi s udobnošću vožnje u drugom desetljeću 21. stoljeća. Analizom vibracija utvrđeno je koji od ova dva motora može ponuditi udobniju vožnju, unatoč strogim propisima i sve većoj konkurenciji među proizvođačima vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem.

Radi se o rednom četverocilindričnom motoru, koji je uravnotežen u pogledu primarnih sila, primarnih i sekundarnih momenata, ali pati od neravnoteže u pogledu sekundarnih sila. Trocilindrični motor pati od neravnoteže primarnih i sekundarnih momenata, što ga čini bučnijim motorom koji ne može ostvariti jednaku razinu udobnosti prilikom vožnje za razliku od rednog četverocilindričnog. Redni četverocilindrični motor je ujedno i najrasprostranjeniji u upotrebi. Zahvaljujući postupku smanjenja ugradbenog volumena uz istovremeni rast snage i momenta (*downsizing*), upravo ovaj tip motora predstavlja optimalno rješenje za pogon osobnih vozila kojima je cilj postići što veću udobnost, ekonomičnost i niske troškove razvoja, proizvodnje i održavanja.

S povećanjem broja cilindara smanjuje se neujednačenost rezultirajućeg okretnog momenta, a također se postiže bolja međusobna uravnoteženost inercijskih sila oscilirajućih masa klipnoga mehanizma [3], što ne znači da četverocilindrični motor nema svojih nedostataka. Miran rad motora očekuje se u korištenju vozila, a za to je potrebno uravnotežiti sekundarne sile koje daju neravnotežu datom motoru. Time je predloženo rješenje ugradnje para balansnih vratila, koja se okreću dvostrukom brzinom vrtnje koljenastog vratila. Uz relativno malen utrošak snage, par balansnih vratila rezultira visoki postotak uravnoteženih vibracija te doprinosi manjoj proizvedenoj buci motora i mirniji rad, a time i dugovječniji vijek trajanja motora. Rješenje nije idealno, ali uz veću cijenu razvoja i održavanja predstavlja adekvatno rješenje u otklonu drugog reda vibracija kod rednog četverocilindričnog klipnog motora s unutarnjim izgaranjem.

8. Literatura

- [1] *Alagumalai, A.*, **Internal combustion engines: Progress and prospects**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 38., 2014., str. 561. - 571.
- [2] *Hakariya, M., Toda, T., Sakai, M.*, **The New Toyota Inline 4-Cylinder 2.5L Gasoline Engine**, SAE Technical Paper, vol. 2017-01-1021, 2017., str. 1.-12.
- [3] *Mahalec, I., Lulić, Z., Kozara, D.*, **Motori s unutarnjim izgaranjem**, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2013.
- [4] *Alturki, W.*, **Four-Stroke and Two-Stroke Marine Engines Comparison and Application**, Int. Journal of Engineering Research and Application, Kuwait, Vol. 7, izdanje 4, 2017., str. 49.-56.
- [5] *Carley, L.*, **Popravi sam svoj auto**, Ljubljana, Mladinska knjiga, 1988.
- [6] *Gupta, H.N.*, **Fundamentals of Internal Combustion Engines**, PHI Learning, New Delhi, 2011.
- [7] *Fayette, Taylor, C.*, **Internal Combustion Engine in Theory and Practice**, Massachusetts Institute of Technology, MIT Press, Cambridge, 1985.
- [8] *Den Hartog, J.P.*, **Vibracije u mašinstvu**, Građevinska knjiga, Beograd, 1972.
- [9] *Milašinović A., Knežević, D., Milovanović, Z.*, **Kinematika i dinamika klipnog mehanizma**, Univerzitet u Banjoj Luci Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka, 2018.
- [10] *Lakshminarayanan, P.,A., Avinash, K., A.*, **Design and Development of Heavy Duty Diesel Engines: A Handbook (Energy, Environment, and Sustainability)**, Springer, Singapur, 2019.
- [11] *Efendi, S., Andoko*, **Design and Simulation of Cracks in A FourCylinder Engine Crankshaft Using Finite Element Method**, IOP Conf. Ser., Indonesia, 2019., str. 1.-5.
- [12] *Dindore, A., Badiger, G.*, **Optimization of Crankshaft by Modification in Design and Material**, International Research Journal of Engineering and Technology, vol. 7., izdanje 3., 2020., str. 3321.-3325.
- [13] *Meek, D. and Roberts, M.*, **Balance Shaft Conversion of a Four Cylinder Engine - The Challenges of Packaging and Mechanical Integration**, SAE Technical Paper, vol.107., 1998., str. 1706.-1715.