

Termodinamički proračun radnog procesa zrakoplovnog klipnog motora

Pazman, Tony

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:835130>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-04**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Tony Pazman

TERMODINAMIČKI PRORAČUN RADNOG PROCESA
ZRAKOPLOVNOG KLIPNOG MOTORA

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 9. travnja 2019.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovni pogonski sustavi I**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5383

Pristupnik: **Tony Pazman (9996001402)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Termodinamički proračun radnog procesa zrakoplovnog klipnog motora**

Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati tehničko eksploatacijske značajke zrakoplovnog klipnog motora. Za promatrani zrakoplovni klipni motor potrebno je izraditi proračun idealnog radnog ciklusa te proračun realnog ciklusa. Nadalje, potrebno je dati usporedbu idealnog i realnog ciklusa. Na temelju termodinamičkog proračuna, potrebno je odrediti eksploatacijske značajke motora.

Mentor:



izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

TERMODINAMIČKI PRORAČUN RADNOG PROCESA ZRAKOPLOVNOG KLIPNOG MOTORA AIRCRAFT PISTON ENGINE THERMODYNAMICS MODEL OF WORKING CYCLE

Mentor: izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Student: Tony Pazman

JMBAG: 9996001402

Zagreb, kolovoz 2019.

Sažetak

U ovome završnom radu opisan je rad zrakoplovnog klipnog motora. Definiraju se idealni i realni Ottov ciklus. Prikazan je termodinamički proračun Ottovog ciklusa izabranog zrakoplovnog klipnog motora Lycoming O-320. Također su izračunate ostale vrijednosti pokazatelja procesa kao i stupnjevi iskoristivosti izabranog motora. Izrađeni su dijagrami koji prikazuju ovisnost toplinskog stupnja iskoristivosti o stupnju kompresije za klipne motore i aproksimirani indikatorski dijagram realnog procesa u uvjetima standardne atmosfere na razini mora.

Ključne riječi: klipni motor, idealni Ottov ciklus, realni Ottov ciklus, termodinamički proračun, Lycoming O-320, toplinski stupanj iskoristivosti, stupanj kompresije

Summary

The operation of an aircraft piston engine is described in this thesis. The ideal and actual Otto cycle are defined. The thermodynamic calculation of the Otto cycle of the selected Lycoming O-320 aircraft piston engine has been presented. Other process indicator values as well as the utilization rates of the selected engine were also calculated. Diagrams were developed showing the thermal efficiency as a function of compression ratio for piston engines and an approximate indicator diagram of the actual process under conditions of a standard atmosphere at sea level.

Key words: piston engine, ideal Otto cycle, actual Otto cycle, thermodynamic calculation, Lycoming O-320, thermal efficiency, compression ratio

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Općenito o zrakoplovnim klipnim motorima	3
2.1. Osnovna podjela klipnih motora	3
2.2. Načelo rada Ottovog motora	4
2.3. Proizvedena snaga klipnog motora	5
2.4. Glavni dijelovi motornog mehanizma	6
2.5. Izbor predstavnika zrakoplovnog klipnog motora.....	7
3. Idealni ciklus zrakoplovnog motora Lycoming O-320	9
3.1. Toplinski stupanj iskoristivosti	10
3.2. Prosječni tlak idealnog ciklusa.....	13
3.3. Proračun idealnog ciklusa izabranog zrakoplovnog klipnog motora	14
4. Realni ciklus zrakoplovnog motora Lycoming O-320	18
4.1. Pretpostavljene vrijednosti za toplinski proračun realnog ciklusa.....	19
4.2. Izračunavanje bitnih parametara za proračun	20
4.3. Proračun karakterističnih točaka realnog kružnog procesa	23
4.4. Proračun pokazatelja procesa i stupnjeva iskoristivosti	27
5. Usporedba idealnog i realnog ciklusa.....	31
6. Zaključak.....	32
Literatura.....	33

1. Uvod

Klipni motor pripada u skupinu motora s unutarnjim izgaranjem. To su toplinski strojevi koji pretvaraju toplinsku energiju goriva u mehanički rad. Ti motori odlikuju se velikom snagom po jedinici radne zapremnine i mase. Daljnje njihove prednosti kao što su stalna pripravnost za rad, lako puštanje u pogon, zadovoljavajuća izdržljivost te relativna jednostavnost i prilagodljivost za ugradnju u sve vrste motornih vozila na zemlji, vodi i u zraku čine ih još uvijek nezamjenjivim u područjima suvremene tehnike bez obzira na sve veću primjenu električnog pogona u navedenim područjima. Zbog spomenutih osobina vrlo je široka primjena ovih motora u svim granama privrede i industrije poput šumarstva, poljoprivrede, graditeljstva, rudarstva kao i u vojnoj tehnici. Samo u cestovnom prometu broj ugrađenih klipnih motora u automobile, motocikle, teretna vozila i traktore povećava se za nekoliko milijuna svake godine.

Odmah nakon prvog leta braće Wright, klipni motori se sve češće primjenjuju za pogon zrakoplova. U razdoblju između i za vrijeme dva svjetska rata uspješno se razvijaju i primjenjuju razne vrste i izvedbe Ottovog motora na zrakoplovima. Fokus na razvoju tih motora je što povoljniji odnos mase i snage te minimalna specifična potrošnja goriva. Razvojem i pojavom mlaznih i elisno-mlaznih motora na tržištu, klipni motori se koriste samo kao pogonski sustav manjih zrakoplova, tako da se danas ugrađuju na lake zrakoplove generalne avijacije i na zrakoplove za školovanje pilota.

U ovom će se radu obrađivati termodinamički proračun idealnog i realnog Ottovog ciklusa zrakoplovnog klipnog motora Lycoming O-320 koji je ugrađen u brojne školske zrakoplove i zrakoplove generalne avijacije. Rad je podijeljen u 6 poglavlja.

Prvo poglavlje je uvod u kojem je objašnjena tema i cilj rada.

U drugom poglavlju objašnjenje su osnovne informacije o zrakoplovnim klipnim motorima kao što je osnovna podjela, načelo rada, proizvedena snaga i dan je opis nekih osnovnih dijelova motora. Također je opisan zrakoplovni klipni motor koji je izabran za termodinamički proračun.

U trećem poglavlju definira se idealni termodinamički ciklus Ottovog motora i glavni pokazatelji tog ciklusa poput toplinskog stupnja iskoristivosti i prosječnog tlaka idealnog ciklusa te se obrađuje i termodinamički proračun istog.

U četvrtom poglavlju definira se realni termodinamički ciklus i njegove razlike u odnosu na idealni ciklus te je daljnja razrada realnog procesa podijeljena u nekoliko potpoglavlja. U prvom potpoglavlju opisane su pretpostavljene vrijednosti potrebne za proračun. Drugo potpoglavlje sadrži proračun parametara bitnih za proračun. U trećem potpoglavlju obrađen je proračun vrijednosti tlaka i temperature u karakterističnim točkama realnog

termodinamičkog procesa. U zadnjem, četvrtom potpoglavlju proračunati su indikatorski i efektivni pokazatelji procesa, primjerice toplinski i mehanički stupanj iskoristivosti.

U petom poglavlju uspoređene su vrijednosti dobivene proračunom idealnog i realnog ciklusa te su navedeni faktori koji doprinose njihovim razlikama.

U zadnjem poglavlju, zaključku, predstavljena su završna razmatranja ovog rada obzirom na rezultate dobivene proračunom.

2. Općenito o zrakoplovnim klipnim motorima

2.1. Osnovna podjela klipnih motora

Klipni motori mogu biti raznih izvedbi i konstrukcija. Odabir motora ovisi o namjeni i uvjetima eksploatacije samog zrakoplova u koji se motor ugrađuje.

Klipni motori mogu se podijeliti prema nekoliko kriterija u sljedeće skupine [1]:

- Prema načinu paljenja smjese,
- Prema taktnosti,
- Prema načinu punjenja cilindra svježom smjesom,
- Prema načinu hlađenja,
- Prema vrsti sustava za napajanje gorivom kod Otto motora,
- Prema broju, položaju i rasporedu cilindara.

Obzirom na način paljenja smjese razlikuju se:

- a) Otto motori i
- b) Diesel motori.

Zrakoplovni motori su najčešće Ottovi motori kod kojih se smjesa goriva i zraka priprema u rasplinjaču ili u usisnoj grani neposredno prije usisnog ventila cilindra, a smjesa se pali svjećicom u taktu kompresije.

Klipni motori obzirom na broj taktova mogu biti:

- a) četverotaktni i
- b) dvotaktni.

Zrakoplovni motori su pretežito četverotaktni.

Cilindar motora se može puniti smjesom goriva i zraka prirodnim putem usisavanjem svježe smjese i takvi motori zovu se motori s prirodnim punjenjem ili usisni motori.

Da bi se povećala količina svježeg smjese u cilindru, ona se može kompresorom ubacivati s povećanim tlakom te se takvi motori nazivaju motori s prednabijanjem.

Dijelovi motora koji se zagrijavaju odnosno koji su u kontaktu s produktima izgaranja potrebno je hladiti te se prema načinu odvođenja topline razlikuju:

- a) motori hlađeni zrakom i
- b) motori hlađeni tekućinom.

Zrakoplovni motori su najčešće hlađeni zrakom.

Kod Otto motora svježeg smjesa goriva i zraka priprema se:

- a) u rasplinjaču i
- b) ubrizgavanjem goriva u usisnu granu neposredno ispred usisnog ventila.

Po broju cilindara zrakoplovni klipni motori najčešće imaju od četiri do osam cilindara.

Najčešće izvedbe tih motora obzirom na raspored cilindara su:

- a) redni,
- b) V-izvedba,
- c) bokser i
- d) zvjezdasti ili radijalni.

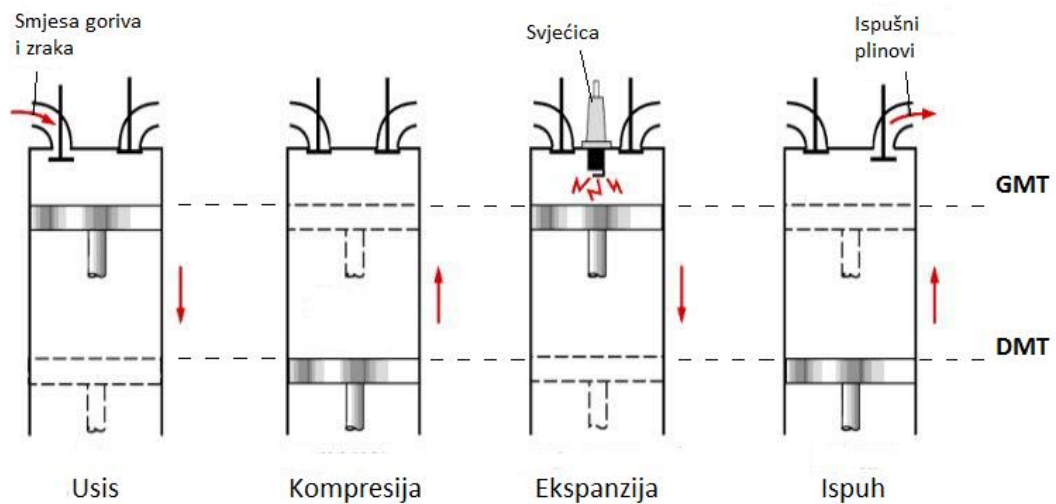
2.2. Načelo rada Ottovog motora

Njemački inženjer Nicholas Otto je 1876. godine konstruirao motor čiji se jedan radni ciklus obavi tijekom četiri takta, tj. tijekom dva okretaja koljenastog vratila [2]. Četiri takta koja tvore jedan ciklus su: usis, kompresija, ekspanzija i ispuh (Slika 1).

Tijekom usisa klip se giba od gornje mrtve točke do donje mrtve točke. Za vrijeme usisa usisni ventil je otvoren i tada započinje punjenje cilindra smjesom goriva i zraka. Kada klip dođe do DMT zatvara se usisni ventil, nakon čega klip mijenja smjer gibanja i tada počinje komprimiranje smjese goriva i zraka do GMT. Za vrijeme kompresije usisni i ispušni ventili su zatvoreni. Neposredno prije nego što klip dođe do GMT u točno određenom trenutku pali se iskra na svjećici i počinje proces izgaranja smjese pri čemu dolazi do naglog povećanja tlaka i temperature. Nakon toga klip ponovno mijenja smjer gibanja i nastupa ekspanzija produkata

izgaranja koji potiskuju klip prema DMT i time proizvode rad koji se preko klipnjače predaje koljenastom vratilu na kojemu se stvara okretni moment koji se kod zrakoplovnih klipnih motora koristi za pogon elise. Pri kraju ekspanzije otvara se ispušni ventil. Kada klip dođe do DMT i ponovno promijeni smjer gibanja prema GMT nastupa posljedni takt, ispuh. Za vrijeme ispuha produkti izgaranja se istiskuju iz cilindra u okoliš i time završava jedan radni ciklus četverotaktnoga klipnog motora [1], [2], [3].

Jedan okretaj koljenastog vratila pri brzini vrtnje od npr. 1500 o/min traje 0,04 sekunde što znači da jedan takt traje 0,02 sekunde [1]. Maksimalni tlakovi kod Otto motora mogu doseći vrijednosti od 25 do 50 bara, a temperature ispušnih plinova mogu biti i preko 2000 °C [1]. Obzirom na vrijednosti tih veličina može se uočiti da u vrlo kratkom vremenskom periodu postoje velike promjene u tlakovima i temperaturi unutar cilindra jednog takvog motora što stvara posebne zahtjeve kod izbora materijala prilikom njihove konstrukcije i razvoja.



Slika 1: Četverotaktni ciklus klipnog motora

Izvor: [4]

2.3. Proizvedena snaga klipnog motora

U praksi se najčešće koristi snaga motora kao njegov glavni eksploatacijski pokazatelj. Jednadžba za snagu klipnog motora govori da je snaga jednaka umnošku prosječnog tlaka u cilindru, radnom volumenu cilindra, broju cilindara i broju okretaja. Taj umnožak se kod četverotaktnih klipnih motora dijeli s dva zato što su za jedan radni proces potrebna dva okretaja koljenastog vratila [1].

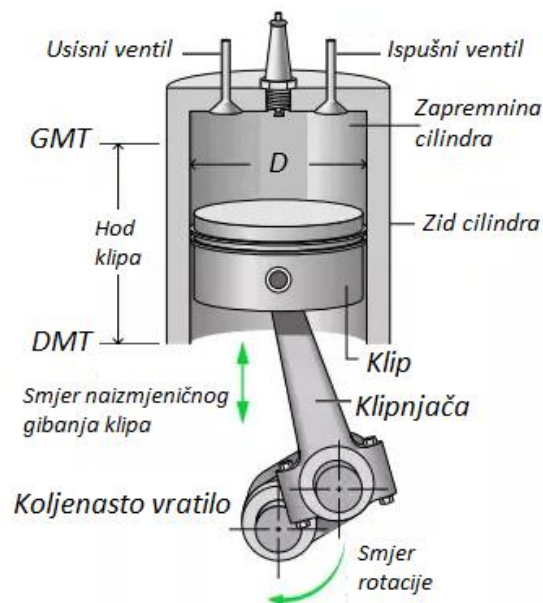
$$P_t = \frac{\bar{p}_t \cdot V_{h1} \cdot n}{2} \cdot i \quad (2.3.1)$$

Gdje je:

- P_t – snaga klipnog motora
- \bar{p}_t – prosječni tlak radnog ciklusa
- V_{h1} – radni volumen jednog cilindra
- n – broj okretaja
- i – broj cilindara

2.4. Glavni dijelovi motornog mehanizma

Glavni dijelovi motornog mehanizma klipnog motora su klip, klipnjača i koljenasto vratilo (Slika 2).



Slika 2: Glavni dijelovi motornog mehanizma

Izvor: [5]

Klip preuzima silu nastalu djelovanjem tlaka produkata izgaranja te preko klipnjače prenosi tu silu na koljenasto vratilo. Na klipu se nalaze utori za smještaj 3 do 6 klipnih karika koje služe za brtvljenje između klipa i cilindra. Klip je opterećen različitim promjenjivim silama kao

što su sile tlaka plinova u cilindru, inercijske sile i promjenjivim toplinskim opterećenjem. Oblik klipa u hladnom stanju je odabran na taj način da nakon zagrijavanja poprimi sferni oblik i unaprijed određenu zračnost. Kako bi se smanjile vibracije koje opterećuju klipnjaču te naposljetku i koljenasto vratilo masa klipa kod današnjih klipnih motora nije veća od oko 0,007 kg. Za vrijeme rada motora klip se troši te prilikom generalnog remonta motora nekih proizvođača obavezna je promjena klipova kod svakog takvog pregleda bez obzira jesu li uočene deformacije na klipu.

Klipnjača prenosi sile s klipa na koljenasto vratilo i njezino je tijelo opterećeno promjenjivim silama plinova i inercijskim silama koje uzrokuju vlačno i tlačno naprezanje kao i naprezanje na izvijanje. Njena masa mora biti što manja jer ona doprinosi povećanju inercijskih sila u motoru, ali usprkos tome mora biti dovoljno kruta.

Oblik koljenastog vratila ovisi o tome da li je motor četverotaktan ili dvotaktan, broju i rasporedu cilindara motora, broju i rasporedu ležajeva te redosljedu paljenja cilindara. Opterećeno je istovremeno na savijanje i na torziju, silama plinova i inercijskim silama, takva naprezanja zahtjevaju određenu žilavost jezgre uz odgovarajuću tvrdoću. U slučaju uočavanja mikropukotine prilikom provjere na generalnom popravku, koljenasto vratilo se baca [1], [6]. Koljenastom se vratilu pri proizvodnji i remontu posvećuje posebna pažnja jer bi njegovo eventualno oštećenje rezultiralo i otkazivanjem rada motora u potpunosti.

2.5. Izbor predstavnika zrakoplovnog klipnog motora

Izbor zrakoplovnog klipnog motora za ovaj rad temelji se na njegovoj raširenoj dugogodišnjoj primjeni u eksploataciji koja se pripisuje pouzdanosti tog motora kao i njegovom relativno jednostavnom održavanju koje igra znatnu ulogu kod odabira pogonskog sustava svakog zrakoplova.

Prema popisu registriranih zrakoplova na dan 1.6.2019. u Republici Hrvatskoj [7], velik je broj lakih zrakoplova pogonjen motorom Lycoming O-320 uključujući i dva zrakoplova koje Hrvatsko zrakoplovno nastavno središte na Fakultetu prometnih znanosti koristi kod školovanja civilnih pilota.

Lycoming O-320 je četverotaktni zrakoplovni klipni motor hlađen zrakom sa 4 cilindra u horizontalnoj bokser konfiguraciji. Priprema smjese goriva i zraka je u karburatoru. Proizvođač je *Lycoming Engines* i proizvodi se od 1953. godine te je od tada ugrađen u desetke tisuća lakih školskih zrakoplova i zrakoplova generalne avijacije od kojih su najpoznatiji Cessna 172N, Piper PA-28 Cherokee, Beechcraft Musketeer i mnogi drugi [8], [9], [10]. U tablici 1. navedene su poznate tehničke i eksploatacijske karakteristike motora Lycoming O-320.

Karakteristike navedenog motora korištene su za proračun termodinamičkog modela radnog procesa zrakoplovnog klipnog motora u ovom radu.

Tablica 1: Tehničke i eksploatacijske karakteristike motora Lycoming O-320

Vrsta procesa	Otto
Taktnost motora	$T=4$
Broj cilindara	$i = 4$
Stupanj kompresije	$\varepsilon = 8,5$
Promjer cilindra	$D = 130,2 \text{ mm (5,125 in)}$
Hod klipa	$H = 98,43 \text{ mm (3,875 in)}$
Radna zapremnina	$V = 5242 \text{ cm}^3 \text{ (319,8 in}^3\text{)}$
Max. snaga motora	$P = 119\text{kW (160 hp)}$
Brzina vrtnje motora pri maksimalnoj snazi	$N = 2700 \text{ o/min (45 o/s)}$
Prosječna efektivna potrošnja goriva	$G_h = 8,4 \text{ Gal/h (22,93 kg/h)}$

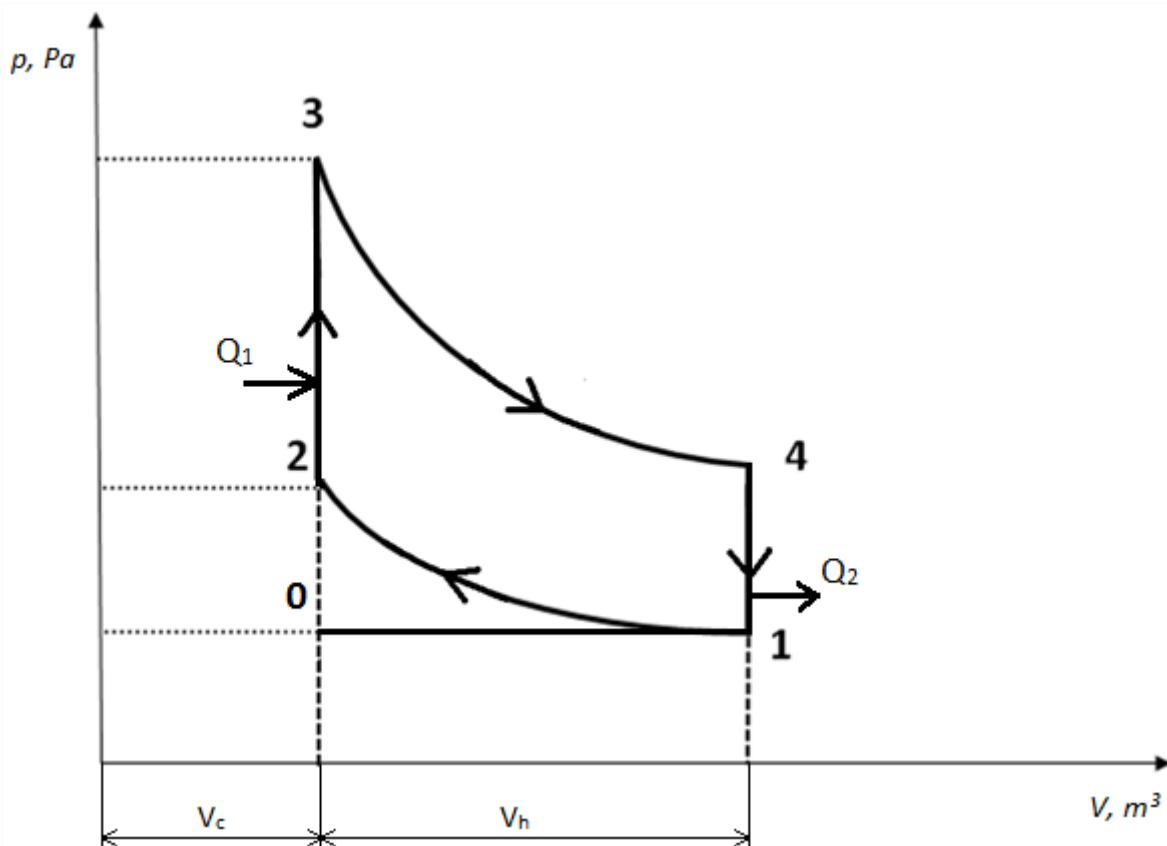
Izvor: [4], [11], [12], [13]

3. Idealni ciklus zrakoplovnog motora Lycoming O-320

Termodinamički proračun koji se upotrebljava za opisivanje idealnog ciklusa četverotaktnoga Otto motora zove se idealni Ottov ciklus koji je prikazan u p - V dijagramu (Slika 3). Pokazatelji čije se vrijednosti uzimaju u obzir za ocjenu idealnih kružnih ciklusa su toplinski stupanj iskoristivosti i prosječni tlak idealnog ciklusa.

U svrhu analize idealnog ciklusa klipnog motora prepostavlja se [1]:

- Radna tvar je idealni plin čiji se sastav ne mijenja, nema gubitka mase.
- Sva toplinska energija sadržana u gorivu se predaje radnoj tvari čime se zamjenjuje proces izgaranja.
- Izmjena radne tvari zamijenjena je s odvođenjem topline na kraju ciklusa radi dovođenja radne tvari na početno stanje.
- Ukupna energetska bilanca u procesu izmjene tvari je nula, tako da se procesi usisa i ispuha pri kojima se zanemaruju gubici izmjene radne tvari u idealnim ciklusima ne razmatraju jer ne utječu na energetske bilance.
- Procesni kompresije i ekspanzije odvijaju se bez izmjene topline s okolinom odnosno procesi su izentropski.



Slika 3: Idealni Ottov ciklus prikazan u p - V dijagramu

Izvor: [2]

Opis procesa je sljedeći:

- 1 – 2: Izenropska kompresija
- 2 – 3: Dovođenje topline pri konstantnom volumenu
- 3 – 4: Izenropska ekspanzija
- 4 – 1: Odvođenje topline pri konstantnom volumenu

Izenropski proces koji se također naziva i adijabatski je proces kod kojeg nema izmjene topline s okolinom, a odvija se u izoliranom sustavu.

3.1. Toplinski stupanj iskoristivosti

Korisnost η_t svakog toplinskog stroja pa tako i Otto motora definirana je kao omjer korisnog rada W_t dobivenog termodinamičkim procesom u odnosu na ukupnu uloženu energiju Q_1 .

$$\eta_t = \frac{W_t}{Q_1} \quad (4.2.1)$$

Prema [3], za idealni plin termodinamička analiza za toplinski stupanj iskoristivosti idealnog Ottovog ciklusa može se opisati sljedećim jednadžbama.

Dovođenje dopline odvija se izohorno pa je:

$$Q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2) \quad (4.2.2)$$

Izohorni odvod topline:

$$Q_2 = c_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (4.2.3)$$

gdje je:

c_v – specifična toplotina pri konstantnom volumenu.

Razlika dovedene i odvedene topline je rad:

$$W_t = Q_1 - Q_2 = c_v [(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)] \quad (4.2.4)$$

Stupanj kompresije:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_h + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c} \\ \varepsilon &= \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} \end{aligned} \quad (4.2.5)$$

gdje je:

V_h – radni volumen

V_c – kompresijski volumen.

Omjer tlakova p_3 i p_2 , tj. stupanj povećanja tlaka:

$$\alpha = \frac{p_3}{p_2} \quad (4.2.6)$$

gdje je:

α – stupanj povećanja tlaka.

Jednadžbom stanja idealnog plina dobiva se međusobna ovisnost osnovnih termodinamičkih veličina u krajnjim točkama procesa kod izohorne promjene stanja:

$$p_1 \cdot V_1 = R \cdot T_1 \quad (4.2.7)$$

$$p_2 \cdot V_2 = R \cdot T_2 \quad (4.2.8)$$

gdje je:

R – plinska konstanta za zrak, $R=287$ J/kgK.

Dijeljenjem tih izraza uz $V = \text{konst.}$, omjeri tlakova i temperature proporcionalni:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (4.2.9)$$

Uzimajući u obzir da je prilikom izentropske promjene stanja $p \cdot V^k = \text{konstanta}$, za promjenu stanja od točke 1 do točke 2 može se pisati:

$$p_1 \cdot V_1^k = p_2 \cdot V_2^k \quad (4.2.10)$$

odnosno

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^k \quad (4.2.11)$$

gdje je:

k – eksponent izentropske promjene stanja, omjer specifične topline pri konstantnom tlaku i specifične topline pri konstantnom volumenu, $k=c_p/c_v$, za zrak $k=1,4$.

Uvrštavanjem omjera volumena i tlakova iz i (4.2.9) i (4.2.11) dobiva se:

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \frac{T_1}{T_2} \quad (4.2.12)$$

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{1}} = \frac{T_1}{T_2} \quad (4.2.13)$$

Tlak p_2 i temperatura T_2 nakon adijabatske kompresije dobiveni iz izraza (4.2.11) i (4.2.12):

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = p_1 \cdot \varepsilon^k \quad (4.2.14)$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \quad (4.2.15)$$

Maksimalni tlak p_3 i maksimalna temperatura T_3 u procesu nakon izohornog dovođenja topline dobiveni iz (4.2.9):

$$p_3 = p_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} = p_1 \cdot \varepsilon^k \cdot \frac{T_3}{T_2} \quad (4.2.16)$$

$$T_3 = T_2 \cdot \frac{p_3}{p_2} = T_2 \cdot \alpha \quad (4.2.17)$$

Tlak p_4 prema (4.2.11) i temperatura T_4 nakon adijabatske ekspanzije:

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^k = p_3 \cdot \frac{1}{\varepsilon^k} \quad (4.2.18)$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = T_3 \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (4.2.19)$$

Tada se uvrštavanjem izraza (4.2.15) i (4.2.17) dovedena toplina dobiva kao:

$$Q_1 = c_v \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot (\alpha - 1) \quad (4.2.20)$$

Sređeni izraz za odvedenu toplinu uvrštavanjem izraza (4.2.19) u izraz (4.2.3):

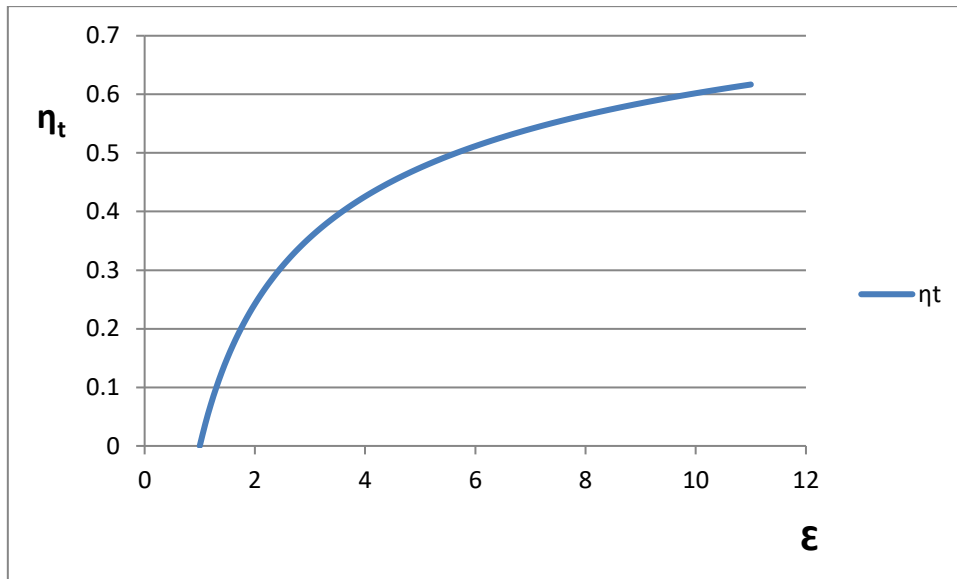
$$Q_2 = c_v \cdot T_1 \cdot (\alpha - 1) \quad (4.2.21)$$

Konačna jednadžba za toplinski stupanj iskoristivosti su uvrštenjem izraza (4.2.20) i (4.2.21) je:

$$\eta_t = \frac{W_t}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{c_v \cdot T_1 \cdot (\alpha - 1)}{c_v \cdot T_1 \cdot (\alpha - 1) \cdot \varepsilon^{k-1}}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (4.2.22)$$

Iz izraza očigledno je da termodinamički stupanj iskoristivosti η_t najviše ovisi o konstrukcijskim značajkama motora odnosno o stupnju kompresije ε , kako je prikazano na grafikonu 1, koji općenito vrijedi za sve Otto motore. Toplinski stupanj iskoristivosti također ovisi i o termodinamičkoj promjeni stanja k čija je vrijednost konstantna.



Grafikon 1: Ovisnost toplinskog stupnja iskoristivosti o stupnju kompresije

Iz grafikona 1 je vidljivo da se s povećanjem stupnja kompresije povećava i termodinamičko iskorištenje, ali ta vrijednost je ograničena temperaturom samozapaljenja smjese, tj pojavom detonacijskog izgaranja. Kod detonacijskog izgaranja smanjuje se snaga motora, a povećava se potrošnja goriva kao i povećanje naprezanja u samom mehanizmu motora zbog nepravilnog izgaranja. Osim visokih stupnjeva kompresije na detonaciju utječe i kvaliteta goriva, koja se povisuje povećanjem oktanskog broja odnosno antidetonacijskim svojstvima goriva [3].

Vrijednost stupnja kompresije u današnjim zrakoplovnim klipnim motorima koji rade po Otto procesu iznosi od 7 do 9 [1].

3.2. Prosječni tlak idealnog ciklusa

Prosječni tlak idealnog ciklusa može se definirati kao zamišljeni tlak konstantnog iznosa. Djelovanjem tog tlaka na klip u taktu ekspanzije ostvario bi se jednaki rad W_t kao i djelovanjem promjenjivog tlaka tijekom jednog cijelog ciklusa [1].

Rad što ga prosječni tlak obavi u jednom hodu klipa H iznosi:

$$W_t = \bar{p}_t \cdot V_h \quad (4.2.23)$$

gdje je:

W_t – rad idealnog ciklusa

V_h – radni volumen motora

Konačni izraz za prosječni tlak idealnog ciklusa polazeći od prethodnog primjera i izraza za W_t , Q_1 , Q_2 , k , R i \mathcal{E} glasi:

$$\bar{p}_t = p_1 \cdot \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}-1} \cdot \frac{\alpha-1}{k-1} \cdot (\mathcal{E}^{k-1} - 1) \quad (4.2.24)$$

3.3. Proračun idealnog ciklusa izabranog zrakoplovnog klipnog motora

Poznate konstrukcijske značajke motora dane od strane proizvođača motora navedene su iz tablice 1. Izračunate vrijednosti ostalih parametara sa formulama iz prethodnog poglavlja prema [1], [3], prikazane su u tablici 2.

• Taktnost motora	$T = 4$
• Broj cilindara	$i = 4$
• Radni volumen	$V_h = 5242 \text{ cm}^3$
• Promjer cilindra	$D = 130,2 \text{ mm}$
• Hod klipa	$H = 98,43 \text{ mm}$
• Stupanj kompresije	$\mathcal{E} = 8,5$

Osim poznatih konstrukcijskih veličina, za termodinamički proračun potrebno je pretpostaviti još neke podatke koji nisu dostupni u literaturi od proizvođača.

Pretpostavljene vrijednosti za proračun su:

Stupanj povećanja tlaka α predstavlja omjer tlakova p_3 i p_2 odnosno iznos za koliko se puta poveća tlak u cilindru na kraju izgaranja u odnosu na početak izgaranja. On je potreban kako bi se izračunao maksimalni tlak procesa. Pretpostavljena vrijednosti stupnja povećanja tlaka prema [4] je: $\alpha = 3,9$.

Vrijednosti početnog tlaka p_1 i temperature T_1 potrebnih za proračun prema Međunarodnoj organizaciji za standardizaciju za međunarodnu standardnu atmosferu ISO 2533 pri razini mora za suhi i čisti zrak preuzete iz literature su [14]:

- $p_0 = p_1 = 1013,25 \text{ hPa}$
- $T_0 = T_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Izračunavanje bitnih parametara:

- kompresijski volumen V_c

$$V_c = V_2 = V_3 = \frac{V_h}{\varepsilon - 1} = \frac{5242 \times 10^{-6}}{8,5 - 1}$$

$$V_c = V_2 = V_3 = 0,6989 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- maksimalni volumen motora V_{uk}

$$V_{uk} = V_1 = V_4 = V_h + V_c = V_h + \frac{V_h}{\varepsilon - 1} = 5242 \times 10^{-6} + \frac{5242 \times 10^{-6}}{8,5 - 1}$$

$$V_{uk} = V_1 = V_4 = 5,9409 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Proračun karakterističnih točaka idealnog Ottovog procesa:

- Točka 1

$$p_1 = 1,01325 \text{ bar}$$

$$T_1 = 288,15 \text{ K}$$

- Točka 2

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = p_1 \cdot \varepsilon^k = 1,01325 \cdot 8,5^{1,4}$$

$$p_2 = 20,27 \text{ bar}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 288,15 \cdot 8,5^{1,4-1}$$

$$T_2 = 678,24 \text{ K}$$

- Točka 3

$$T_3 = T_2 \cdot \frac{p_3}{p_2} = T_2 \cdot \alpha = 678,24 \cdot 3,9$$

$$T_3 = 2645,14 \text{ K}$$

$$p_3 = p_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} = p_1 \cdot \varepsilon^k \cdot \frac{T_3}{T_2} = 20,27 \cdot \frac{2645,14}{678,24}$$

$$p_3 = 79,05 \text{ bar}$$

- Točka 4

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^k = p_3 \cdot \frac{1}{\varepsilon^k} = 79,05 \cdot \frac{1}{8,5^{1,4}}$$

$$p_4 = 3,95 \text{ bar}$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = T_3 \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 2645,14 \cdot \frac{1}{8,5^{1,4-1}}$$

$$T_4 = 1123,78 \text{ K}$$

Toplinski stupanj iskoristivosti

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{8,5^{1,4-1}}$$

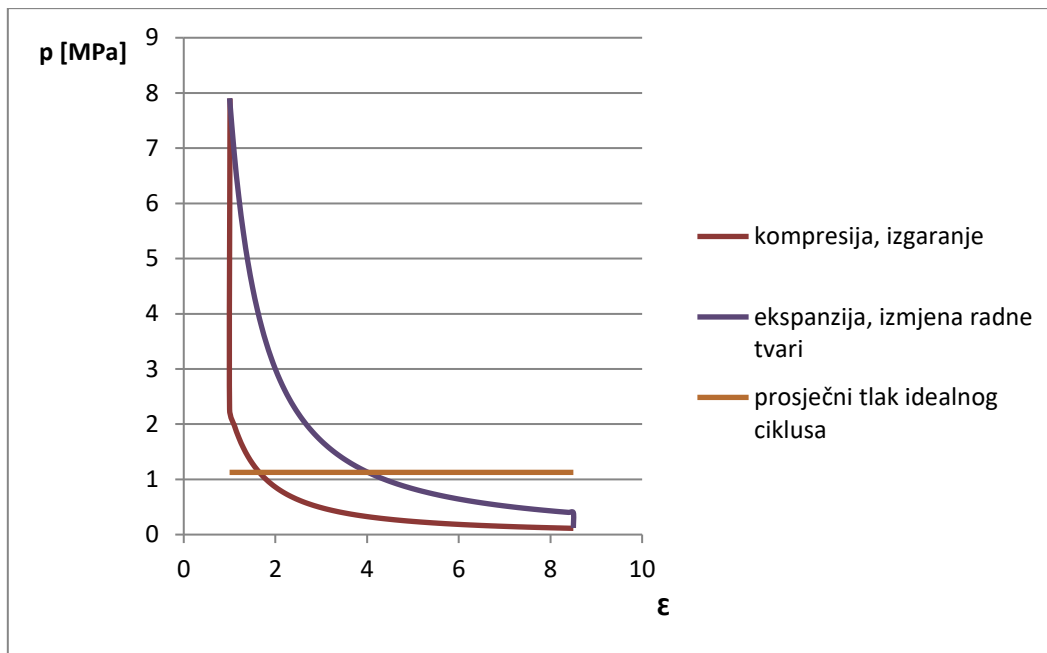
$$\eta_t = 0,5751$$

Izračunata vrijednost toplinskog stupnja iskoristivosti odgovara vrijednostima unutar intervala od 0,54 do 0,62, kao uobičajene vrijednosti η_t za Ottove motore kompresijskih omjera između 7 i 11.

Dobiveni rezultati (Tablica 2) kreću se u očekivanom rasponu vrijednosti za idealni ciklus.

Tablica 2: Vrijednosti tlaka i temperature za karakteristične točke idealnog ciklusa

Točke	1	2	3	4
p [bar]	1,01325	20,27	79,05	3,95
T [K]	288,15	678,24	2645,14	1123,78



Grafikon 2: Proračunati p - V dijagram idealnog ciklusa

Na grafikonu 2 prikazan je p - V dijagram temeljen na vrijednostima dobivenih proračunom. Taktovi usisa i ispuha nisu prikazani jer su gubici u njima zanemareni tako da ne utječu na energetska bilancu. Površina unutar zatvorene krivulje predstavlja teorijski rad što ga prosječni tlak obavi u jednom hodu klipa.

Prosječni tlak idealnog ciklusa

$$\bar{p}_t = p_1 \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon - 1} \cdot \frac{\alpha - 1}{k - 1} \cdot (\epsilon^{k-1} - 1) = 1,01325 \cdot \frac{8,5}{8,5 - 1} \cdot \frac{3,9 - 1}{1,4 - 1} \cdot (8,5^{1,4-1} - 1)$$

$$\bar{p}_t = 11,27 \text{ bar}$$

Snaga idealnog ciklusa pri $n=2700$ o/min

$$P_t = \frac{\bar{p}_t \cdot V_h \cdot n}{2} = \frac{11,27 \times 10^5 \cdot 5,242 \times 10^{-3} \cdot \frac{2700}{60}}{2}$$

$$P_t = 132,924 \text{ kW}$$

Teorijski rad W_t

$$W_t = \bar{p}_t \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot H = \bar{p}_t \cdot V_h = 11,27 \times 10^5 \cdot 5,242 \times 10^{-3}$$

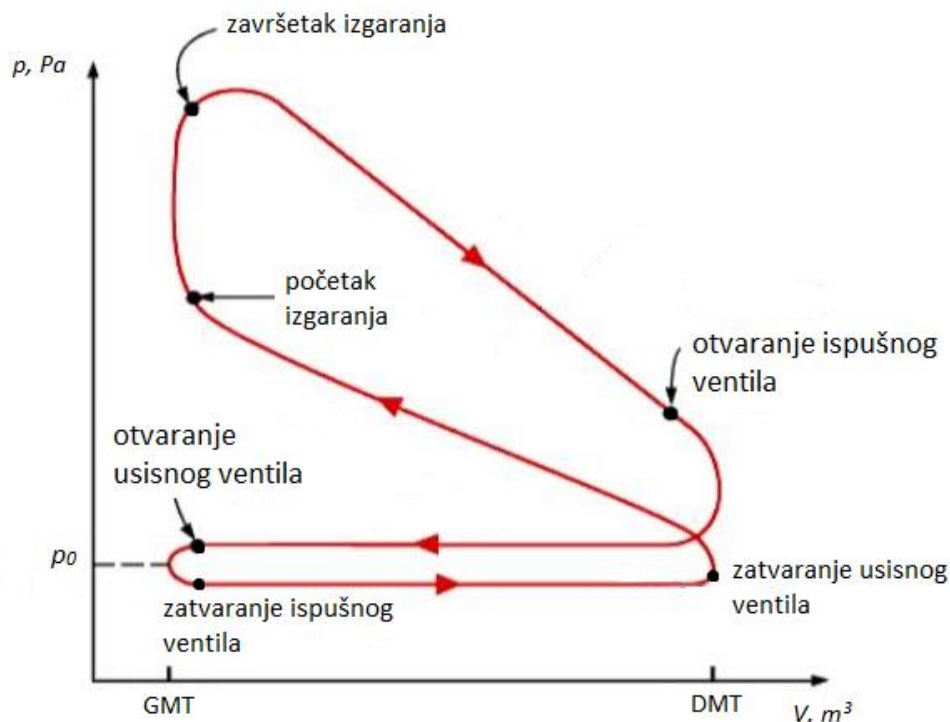
$$W_t = 2526,734 \text{ J}$$

4. Realni ciklus zrakoplovnog motora Lycoming O-320

Kod analiziranja realnog ciklusa (Slika 4) postoje bitne razlike u odnosu na idealni proces i one su [1]:

- Radna tvar se ne smatra idealnim plinom već je ona smjesa isparenog goriva i zraka kao i zaostalih produkata izgaranja i njezin se sastav mijenja za vrijeme radnog procesa.
- Tijekom radnog procesa jedan dio topline radne tvari prenosi se na stijenke cilindra i obratno, a dio toplinske energije nije moguće iskoristiti zbog nepotpunog izgaranja i disocijacije.
- Postoji trenje između tarnih površina pa se zbog toga procesi sabijanja i širenja ne odvijaju po izentropi.
- Izgaranje traje određeno vrijeme, ono počinje pred kraj takta kompresije i završava u početku takta ekspanzije.
- Pri izmjeni radne tvari nastaju gubitci te za punjenje i pražnjenje cilindra troši se rad.
- Zbog nesavršenog brtvljenja radnog prostora nastaju gubitci radne tvari.

Zbog navedenih razlika p - V dijagrami idealnog i realnog procesa se razlikuju.



Slika 4: Realni Ottov ciklus prikazan u p - V dijagramu

Izvor: [4]

4.1. Pretpostavljene vrijednosti za toplinski proračun realnog ciklusa

Neke od veličina pretpostavljene su u skladu s dostupnom literaturom radi pojednostavljenja proračuna. Njihove vrijednosti su u granicama realnih i očekivanih vrijednosti za proračun realnog ciklusa Ottovog motora.

- Stanje okoline [14].

$$p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$$

$$T_0 = 15 \text{ °C} = 288.15 \text{ K}$$

- Specifični toplinski kapacitet (c_v) pri konstantnom volumenu za uvjete izgaranja u Ottovu motoru za $T_0 = 288,15 \text{ K}$ [1].

$$c_v = 1,07 \text{ kJ/kgK}$$

- Koeficijent iskorištenja topline (ψ).

Dio topline se gubi preko stijenki komore izgaranja zbog disocijacije, vrijednosti ovog koeficijenta su u granicama od 0,85 do 0,95 [1].

Pretpostavljena vrijednost:

$$\psi = 0,9$$

- Eksponent politropske promjene stanja u taktu kompresije (n_k).

Vrijednost ovog eksponenta za Otto motore kreće se u granicama od 1,32 do 1,4 [1].

Pretpostavljena vrijednost:

$$n_k = 1,33$$

- Eksponent politropske promjene stanja u taktu ekspanzije (n_e).

Vrijednost ovog eksponenta za Otto motore kreće se u granicama od 1,22 do 1,8 [1].

Pretpostavljena vrijednost:

$$n_e = 1,25$$

- Porast temperature (ΔT).

Zbog zagrijavanja kod Otto motora porast temperature kreće se u granicama od 0 do 20 K [15].

Pretpostavljena vrijednost:

$$\Delta T_0 = 10 \text{ K}$$

- Temperatura (T_r) i tlak (p_r) zaostalih produkata izgaranja.
Vrijednosti zaostalih produkata izgaranja kreću se u granicama od 900 do 100 K za temperaturu i od 0,11 do 0,125 MPa za tlak [15].

Pretpostavljene vrijednosti:

$$T_r = 900 \text{ K}$$

$$p_r = 0,11 \text{ MPa}$$

- Mehanički koeficijent iskoristivosti η_m .
Vrijednost mehaničkog koeficijenta iskoristivosti ovisi o veličini mehaničkih gubitaka nastalih zbog trenja između klipa i cilindra, gubitaka u ležajevima, snage koja se troši za pogon pomoćnih uređaja, snage aerodinamičkih otpora elemenata.

Vrijednost koeficijenta se kreće u rasponu od 0,85 do 0,9 [1].

Pretpostavljena vrijednost:

$$\eta_m = 0,85$$

- Kao gorivo se služi AVGAS 100 LL, tj. avionski benzin koji relativno približno odgovara ugljikovodiku $C_{18}H_{18}$ [1], [15].

Gustoća goriva	$\rho = 720 \text{ kg/m}^3$
Ogrjevna moć goriva	$H_f = 43,1 \text{ MJ/kg}$
Faktor bogatstva smjese	$\lambda = 1$
Specifična efektivna potrošnja goriva	$g = 8,4 \text{ Gal/h}$
Udio ugljika u gorivu	$c = 85 \%$
Udio vodika u gorivu	$h = 15 \%$

4.2. Izračunavanje bitnih parametara za proračun

- Maksimalni volumen motora V_{uk}

$$V_{uk} = V_1 = V_4 = V_h + V_c = V_h + \frac{V_h}{\varepsilon - 1} \quad (7.2.1)$$

$$V_{uk} = 5242 \times 10^{-6} + \frac{5242 \times 10^{-6}}{8,5 - 1}$$

$$V_{uk} = V_1 = V_4 = 5,9409 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Radni volumen cilindra V_{h1}

$$V_{h1} = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot H \quad (7.2.2)$$

$$V_{h1} = \frac{0,1302^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,09843$$

$$V_{h1} = 1,3105 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Kompresijski volumen V_c

$$V_c = V_2 = V_3 = \frac{V_h}{\varepsilon - 1} \quad (7.2.3)$$

$$V_c = V_2 = V_3 = \frac{5242 \times 10^{-6}}{8,5 - 1}$$

$$V_c = V_2 = V_3 = 0,6989 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Kompresijski volumen cilindra V_{c1}

$$V_{c1} = \frac{V_{h1}}{\varepsilon - 1} \quad (7.2.4)$$

$$V_{c1} = \frac{1,3105 \times 10^{-3}}{8,5 - 1}$$

$$V_{c1} = 0,1747 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Maksimalni volumen cilindra V_{1uk}

$$V_{1uk} = V_{h1} + V_{c1} \quad (7.2.5)$$

$$V_{1uk} = 1,3105 \times 10^{-3} + 0,1747 \times 10^{-3}$$

$$V_{1uk} = 1,4852 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Minimalna količina potrebna za izgaranje O_{min} [15]

$$O_{min} = 8 \cdot h + \frac{32}{12} \cdot c \quad (7.2.6)$$

$$O_{min} = 8 \cdot 0,15 + \frac{32}{12} \cdot 0,85$$

$$O_{min} = 3,467 \text{ kg}_{O_2}/\text{kg}_G$$

- Stehiometrijska količina zraka Z_0 [15]

$$Z_0 = \frac{O_{min}}{0,23} \quad (7.2.7)$$

$$Z_0 = \frac{3,467}{0,23}$$

$$Z_0 = 15,07 \text{ kg}_z/h$$

- Potrošnja zraka u jednom satu Z_h [15]

$$Z_h = G_h \cdot \lambda \cdot Z_0 \quad (7.2.8)$$

$$Z_h = 22,93 \cdot 1 \cdot 15,07$$

$$Z_h = 345,56 \text{ kg}_z/h$$

- Potrošnja zraka po ciklusu [15]

$$Z_{ciklus} = \frac{Z_h}{i \cdot \frac{2n}{T} \cdot 3600} \quad (7.2.9)$$

$$Z_{ciklus} = \frac{345,56}{4 \cdot \frac{2 \cdot 45}{4} \cdot 3600}$$

$$Z_{ciklus} = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ kg}_z/\text{ciklus}$$

- Standardna potrošnja zraka po ciklusu [15]

$$Z_{stand} = \frac{p_0 \cdot V_{h1}}{T_0 \cdot R} \quad (7.2.10)$$

$$Z_{stand} = \frac{0,101325 \cdot 10^6 \cdot 1,3105 \times 10^{-3}}{288,15 \cdot 287}$$

$$Z_{stand} = 1,61 \cdot 10^{-3} \text{ kg}_z/\text{ciklus}$$

- Stupanj punjenja η_v [15]

$$\eta_v = \frac{Z_{ciklus}}{Z_{stand}} \quad (7.2.11)$$

$$\eta_v = \frac{1,07 \cdot 10^{-3}}{1,61 \cdot 10^{-3}}$$

$$\eta_v = 0,67$$

Za Ottove motore stupanj punjenja pri nominalnom opterećenju iznosi oko 0,7 ... 0,8 te je dobivena vrijednost prihvatljiva [1].

4.3. Proračun karakterističnih točaka realnog kružnog procesa

U ovom toplinskom proračunu definirane su karakteristične točke u procesu izgaranja u motoru. Dobivene vrijednosti (Tablica 3) su aproksimirane zbog određenih pretpostavljenih veličina koje nisu stvarne, ali su u okviru očekivanih iznosa prema dostupnoj literaturi [1], [2], [3], [15].

Točka 1

Na kraju takta usisa unutar cilindra nalazi se svježja smjesa goriva i zraka i zaostali produkti izgaranja.

- Faktor zaostalih produkata izgaranja γ :

$$\gamma = \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{\eta_v} \cdot \frac{p_r}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_r} \quad (7.3.1)$$

$$\gamma = \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{0,67} \cdot \frac{0,11}{0,101325} \cdot \frac{288,15}{900}$$

$$\gamma = 0,07$$

Faktor zaostalih produkata izgaranja za Ottove motore pri nominalnom opterećenju iznosi oko 0,06 ... 0,1 tako da je izračunata vrijednost prihvatljiva [1], [15].

- Temperatura smjese unutar cilindra na kraju takta usisa

$$T_1 = \frac{T_0 + \Delta T_0 + \gamma \cdot T_r}{1 + \gamma} \quad (7.3.2)$$

$$T_1 = \frac{288,15 + 10 + 0,07 \cdot 900}{1 + 0,07}$$

$$T_1 = 337,5 \text{ K}$$

Za usisne Ottove motore temperatura smjese na kraju takta usisa kreće se u granicama od 320 do 370 K. dobivena vrijednost smatra se realnom [1].

- Tlak u cilindru na kraju takta usisa

$$p_1 = \eta_v \cdot p_0 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \cdot \frac{T_0 + \Delta T_0 + \gamma \cdot T_r}{T_0} \quad (7.3.3)$$

$$p_1 = 0,67 \cdot 0,101325 \cdot \frac{8,5 - 1}{8,5} \cdot \frac{288,15 + 10 + 0,07 \cdot 900}{288,15}$$

$$p_1 = 0,075 \text{ MPa} = 0,75 \text{ bar}$$

Točka 2

Za vrijeme takta kompresije kod Ottovih motora obavlja se komprimiranje smjese goriva i zraka kao i zaostalih produkata izgaranja. Promjena stanja je politropska kompresija s konstantnim eksponentom kompresije n_k .

- Temperatura smjese na kraju takta kompresije

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{n_k - 1} \quad (7.3.4)$$

$$T_2 = 337,5 \cdot 8,5^{1,33 - 1}$$

$$T_2 = 683,9 \text{ K}$$

- Tlak u cilindru na kraju takta kompresije

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^{n_k} \quad (7.3.5)$$

$$p_2 = 0,075 \cdot 8,5^{1,33}$$

$$p_2 = 1,29 \text{ MPa} = 12,9 \text{ bar}$$

Točka 3

Proces izgaranja u kojemu se dovodi toplina događa se pri konstantom volumenu, prema tome promjena stanja u taktu prilikom izgaranja odvija se po izohori. Navedeni se izračun odnosi na stehiometrijsku smjesu $\lambda = 1$ [1], [15].

- Količina dovedene topline u cilindar po kilogramu smjese

$$q_1 = \frac{H_f}{(1 + \gamma) \cdot (\lambda \cdot Z_0 + 1)} \quad (7.3.6)$$

$$q_1 = \frac{43100}{(1 + 0,07) \cdot (1 \cdot 15,07 + 1)}$$

$$q_1 = 2506,6 \text{ kJ/kg}_{smjese}$$

- Maksimalna temperatura procesa

$$T_3 = \frac{\psi \cdot q_1}{c_v} + T_2 \quad (7.3.7)$$

$$T_3 = \frac{0,9 \cdot 2506,6}{1,07} + 683,9$$

$$T_3 = 2792,3 \text{ K}$$

- Maksimalni tlak procesa

$$p_3 = p_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} \quad (7.3.8)$$

$$p_3 = 1,29 \cdot \frac{2792,3}{683,9}$$

$$p_3 = 5,27 \text{ MPa} = 52,7 \text{ bar}$$

Vrijednosti ovih proračunskih parametara za Ottove motore na kraju izgaranja kreću se u granicama od 30 do 65 bara za tlak i od 2300 do 2800 K za temperaturu što govori da su dobivene vrijednosti unutar očekivanog raspona [1].

Točka 4

Tijekom ekspanzije plinovi unutar cilindra se šire i obavljaju koristan rad. Takt ekspanzije se vrši po politropi sa konstantnim eksponentom ekspanzije n_e .

- Tlak na kraju takta ekspanzije

$$p_4 = \frac{p_3}{\varepsilon^{n_e}} \quad (7.3.9)$$

$$p_4 = \frac{5,27}{8,5^{1,25}}$$

$$p_4 = 0,36 \text{ MPa} = 3,6 \text{ bar}$$

- Temperatura na kraju takta ekspanzije

$$T_4 = \frac{T_3}{\varepsilon^{n_e-1}} \quad (7.3.10)$$

$$T_4 = \frac{2792,3}{8,5^{1,25-1}}$$

$$T_4 = 1635,3 \text{ K}$$

Na kraju procesa kod Ottovih motora tlak i temperatura se kreću u granicama od 1500 do 1800 K za temperaturu i od 3 do 6 bara za tlak iz čega proizlazi da su izračunate vrijednosti unutar očekivanog raspona i samim time prihvatljive [1].

U tablici 3 prikazane su izračunate vrijednosti karakterističnih točka realnog procesa.

Tablica 3: Vrijednosti tlaka i temperature za karakteristične točke realnog ciklusa

točke	1	2	3	4	ispuh
p [bar]	0,75	12,9	52,7	3,6	1,1
T [K]	288,15	683,9	2792,3	1635,3	900
	$n_k = 1,33$		$n_e = 1,25$		

4.4. Proračun pokazatelja procesa i stupnjeva iskoristivosti

Dijagram ovisnosti indikatorske snage o broju okretaja motora prikazana je na grafikonu 3, a aproksimirani indikatorski p - V dijagram prikazan je na grafikonu 4.

Indikatorski pokazatelji procesa

Indikatorski ili unutarnji rad je rad koji proizvede radna tvar djelujući na klip unutar cilindra tijekom jednog radnog procesa.

- Rad utrošen politropskom kompresijom

$$W_{12} = \frac{p_1 \cdot V_{1uk}}{n_k - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n_k - 1}{n_k}} \right] \quad (7.4.1)$$

$$W_{12} = \frac{0,075 \cdot 10^6 \cdot 1,4852 \times 10^{-3}}{1,33 - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{1,29}{0,075} \right)^{\frac{1,33 - 1}{1,33}} \right]$$

$$W_{12} = -346,2 \text{ J}$$

- Rad dobiven politropskom ekspanzijom

$$W_{34} = \frac{p_3 \cdot V_{c1}}{n_e - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{n_e - 1}{n_e}} \right] \quad (7.4.2)$$

$$W_{34} = \frac{5,27 \cdot 10^6 \cdot 0,1747 \times 10^{-3}}{1,25 - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{0,36}{5,27} \right)^{\frac{1,25 - 1}{1,25}} \right]$$

$$W_{34} = 1529,59 \text{ J}$$

- Rad utrošen kod taktova usisa i ispuha

$$W_{01} = p_r \cdot (V_{c1} - V_{1uk}) - p_1 \cdot (V_{c1} - V_{1uk}) \quad (7.4.3)$$

$$W_{01} = (p_r - p_1) \cdot (V_2 - V_1) = (0,11 - 0,075) \cdot (0,1747 - 1,4852)$$

$$W_{01} = -45,87 \text{ J}$$

- Indikatorski rad

$$W_i = W_{34} - W_{12} - W_{01} \quad (7.4.4)$$

$$W_i = 1529,59 - 346,2 - 45,87$$

$$W_i = 1137,52 J$$

- Prosječni indikatorski tlak u cilindru

$$\bar{p}_i = \frac{W_i}{V_{h1}} \quad (7.4.5)$$

$$\bar{p}_i = \frac{1137,52}{1310,5}$$

$$\bar{p}_i = 0,87 \text{ MPa} = 8,7 \text{ bar}$$

- Indikatorska snaga

$$P_i = \frac{\bar{p}_i \cdot V_h \cdot n}{2} \quad (7.4.6)$$

$$P_i = \frac{8,7 \cdot 10^5 \cdot 5,242 \times 10^{-3} \cdot \frac{2700}{60}}{2}$$

$$P_i = 102,61 \text{ kW}$$

- Indikatorski stupanj iskoristivosti

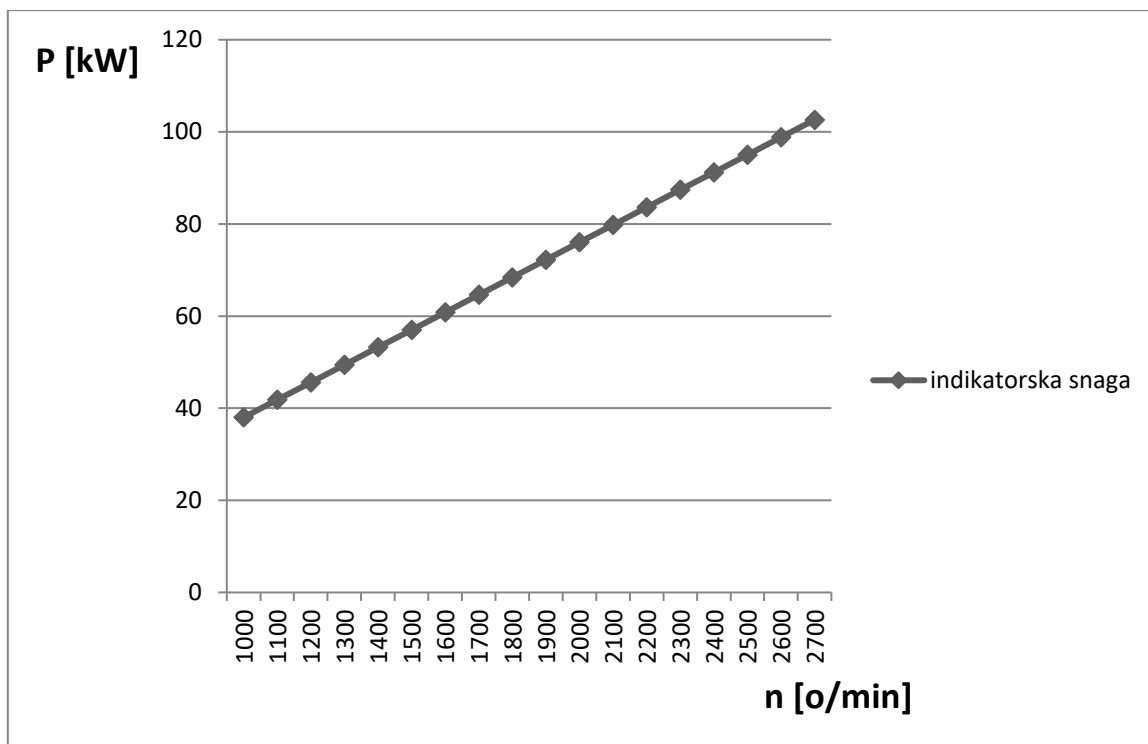
Vrijednost indikatorskog stupnja iskoristivosti koristi se kao pokazatelj ekonomičnosti rada motora.

$$\eta_i = \frac{W_i}{q_1} \quad (7.4.7)$$

$$\eta_i = \frac{1137,52}{2506,6}$$

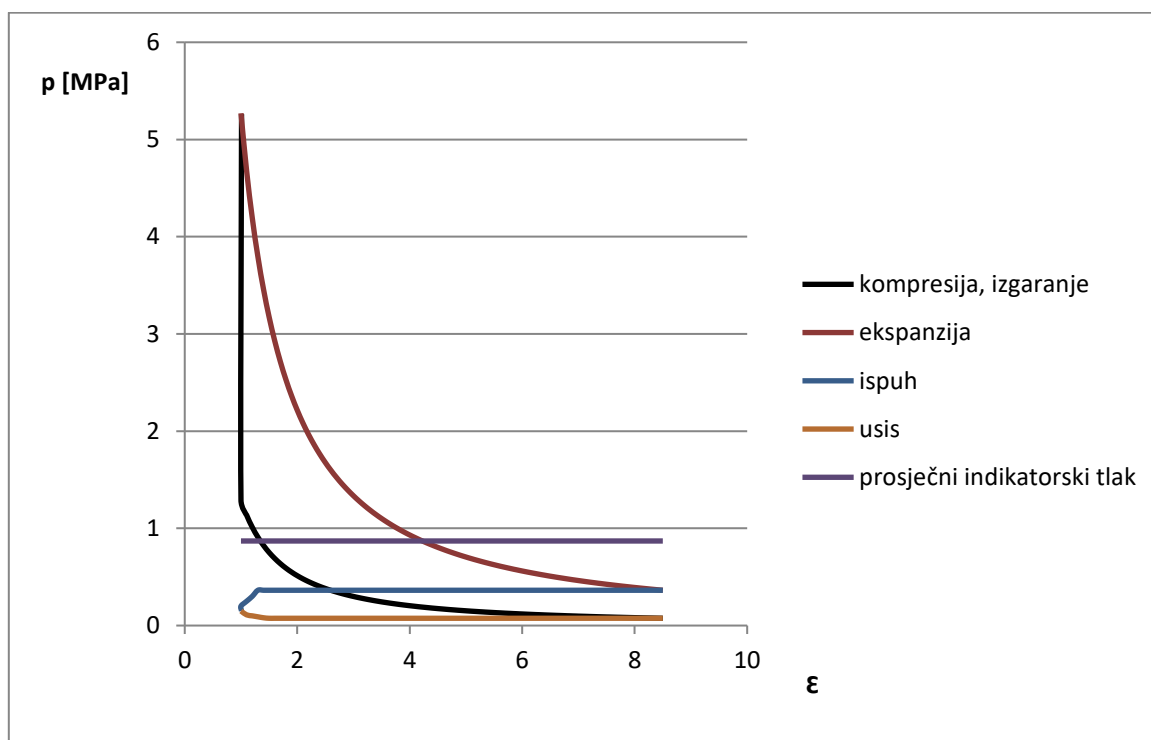
$$\eta_i = 0,45$$

Vrijednosti η_i kod Ottovih motora kreću se u rasponu od 0,25 do 0,4 te izračunata vrijednost približno odgovara zahtjevima [1].



Grafikon 3: Ovisnost indikatorske snage o broju okretaja motora

Na grafikonu 3. prikazana je ovisnost vrijednosti indikatorske snage o broju okretaja motora. Iz grafikona je vidljivo da indikatorska snaga linearno raste s povećanjem broja okretaja.



Grafikon 4: Aproximirani indikatorski p - V dijagram realnog ciklusa

Na grafikonu 4. prikazan p - V aproksimirani dijagram realnog ciklusa temeljen na rezultatima dobivenih proračunom. Oblik krivulje indikatorskog dijagrama odgovara stvarnom kretanju njegovih veličina osim dijela koji predstavlja izgaranje iz razloga što ono u stvarnosti započinje već pri kraju kompresije, tj. nešto prije nego što klip dođe do gornje mrtve točke, a završava u trećem taktu, ekspanziji.

Efektivni pokazatelji procesa

Indikatorska se snaga ne može u potpunosti iskoristiti za pogon elise, već je za njen pogon na raspolaganju efektivna snaga, a razlika između indikatorske i efektivne snage je snaga koja se utroši na mehaničke gubitke u motoru.

- Prosječni efektivni tlak

$$\bar{p}_e = \bar{p}_i \cdot \eta_m \quad (7.4.8)$$

$$\bar{p}_e = 0,87 \cdot 0,85$$

$$\bar{p}_e = 0,74 \text{ MPa} = 7,4 \text{ bar}$$

- Efektivna snaga

$$P_e = P_i \cdot \eta_m \quad (7.4.9)$$

$$P_e = 102,61 \cdot 0,85$$

$$P_e = 87,22 \text{ kW}$$

- Efektivni stupanj iskoristivosti

Iskoristivost toplinske energije goriva definira se efektivnim stupnjem iskoristivosti.

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m \quad (7.4.10)$$

$$\eta_e = 0,45 \cdot 0,85$$

$$\eta_e = 0,38$$

Za Ottove motore vrijednost efektivnog stupnja iskoristivosti kreće se u granicama od 0,2 do 0,3 što govori da izračunata vrijednost približno odgovara uobičajenim vrijednostima [1].

5. Usporedba idealnog i realnog ciklusa

Prema razlikama koje postoje između pretpostavki i stvarnog stanja prilikom proračuna i analiziranja idealnog i realnog ciklusa navedenih u prethodnim poglavljima može se zaključiti da proračunate vrijednosti kod ta dva ciklusa neće biti iste.

Iz dobivenih vrijednosti očigledno je da su tlakovi u karakterističnim točkama procesa kod realnog ciklusa u prosjeku 25% manji od tlakova idealnog ciklusa. Jedan od razloga tomu je razlika u izentropskim i politropskim eksponentima promjene stanja kod kompresije i ekspanzije koji su manji kod realnog ciklusa. Temperature u karakterističnim točkama realnog ciklusa neznatno su veće od temperatura kod idealnog ciklusa što je posljedica zaostalih produkata izgaranja unutar cilindra i zagrijavanja samih cilindara prilikom rada motora.

Proračunati prosječni tlak realnog ciklusa je 23% manji od proračunatog tlaka idealnog ciklusa što odgovara prosječnom odstupanju tlakova kod realnog ciklusa za razliku od idealnog. Posljednično, manji prosječni tlak rezultira i 23% manjom snagom realnog ciklusa od idealnog. Dobivena snaga kod realnog ciklusa pretežito je manja zbog neizbježnih mehaničkih gubitaka, utrošenog rada prilikom punjenja i pražnjenja cilindra, nepotpunog iskorištenja toplinske energije goriva kao i zbog nepotpunog izgaranja.

6. Zaključak

Kod razvoja klipnih motora za lake zrakoplove teži se što većenjm indikatorskom kao i efektivnom stupnju iskoristivosti što se može postići manjim mehaničkim gubicima, manjim gubitkom topline itd.

U ovom radu prikazani su općeniti podaci o zrakoplovnim klipnim motorima i objašnjen je njihov princip rada kao motora koji rade po Ottovom ciklusu.

Nadalje, opisan je idealni ciklus i definirani su stupanj toplinske iskoristivosti i prosječan tlak unutar cilindra za vrijeme jednog radnog ciklusa. Također je opisan realni ciklus i njegove razlike u odnosu na idealni.

Za proračun realnog ciklusa promatrao se motor u uvjetima standardne atmosfere na srednjoj razini mora, a dobivene vrijednosti se zbog nepoznanica i pretpostavki razlikuju se od stvarnih rezultata, ali odgovaraju teorijskim modelima i primjerima dostupnih u literaturi.

Dijagrami na kraju rada bazirani su na indikatorskim pokazateljima procesa jer oni pokazuju stvarnu dobivenu snagu motora koja se može izračunati mjerenjem indikatorskog tlaka unutar cilindra koji proizvede stvarni rad u jednom radnom procesu. Svi dijagrami dobiveni proračunom imaju oblik i tendenciju kretanja krivulja koje odgovaraju navedenoj literaturi.

Ovakav termodinamički model može se koristiti u cilju određivanja karakterističnih parametara za ocjenu eksploatacijskih specifikacija Ottovih motora u raznim uvjetima koji mogu biti razni početni tlakovi i temperature. Model uz određena poboljšanja poput unosa stvarnih parametara umjesto pretpostavljenih može biti precizniji u proračunu te se može upotrebljavati za točniju i detaljniju izradu termodinamičkih modela zrakoplovnih klipnih motora.

Literatura

- [1] Bazijanac E. Zrakoplovni klipni motori, Zagreb: Fakultet Prometnih Znanosti; 2005.
- [2] Galović A. Termodinamika I, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2002.
- [3] Budin R. Mihelić-Bogdanić A, Osnove tehničke termodinamike, Zagreb: Školska knjiga; 2002.
- [4] Highley JL. "Thermodynamics Based Model For Predicting Piston Engine performance For Use In Aviation Vehicle Design", 2. April 2004. Preuzeto sa: https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/5146/highley_justin_l_200405_ms.pdf. [Pristupljeno: 25 Lipanj 2019.]
- [5] Quora, "What are the basic parts of an engine" 2018. Preuzeto sa: <https://www.quora.com/What-are-the-basic-parts-of-an-engine>. [Pristupljeno: 29 Lipanj 2019.]
- [6] Mahalec I. Kozarac D, Lulić Z, "Konstrukcije motora," 2015. Preuzeto sa: https://www.fsb.unizg.hr/miv/MSUI/KonMot/KonMot_2015/1_Predavanja/KonMot_2015.pdf. [Pristupljeno: 29 Lipanj 2019.]
- [7] Croatian Civil Aviation Agency, "Popis registriranih zrakoplova," 1 Lipanj 2019. Preuzeto sa: https://www.ccaa.hr/hrvatski/popis-registriranih-zrakoplova_101/. [Pristupljeno: 25 Lipanj 2019.]
- [8] Lycoming, "320 series engine details" Preuzeto sa: <https://www.lycoming.com/node/17171>. [Pristupljeno: 25 Lipanj 2019.]
- [9] Piperflyer, "PA-28 Cherokee" Preuzeto sa: <https://www.piperflyer.org/piper-models/piper-singles/piper-pa-28-cherokees.html>. [Pristupljeno: 25 Lipanj 2019]
- [10] All-aero, "Beechcraft 23 / 24 / Super III / Custom III / Sport III / Sundowner / CT-134 / Musketeer / Sierra" Preuzeto sa: <http://all-aero.com/index.php/59-planes-b-c/1385-beech-23-24>. [Pristupljeno 29 Lipanj 2019.]
- [11] Lycoming, "Operator's Manual" Listopad 2006. Preuzeto sa: <https://www.lycoming.com/sites/default/files/O-320%20Operator%20Manual%2060297-30.pdf>. [Pristupljeno: 26 Lipanj 2019.]
- [12] Cessna Aircraft Company, Pilot's operating handbook Cessna 172N, Wichita, Kansas: Cessna Aircraft Company, 1977.
- [13] Federal Aviation Administration, "Type certificate", 13. Rujan 2019. Preuzeto sa: [http://www.airweb.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgMakeModel.nsf/0/7bfb5a7ace53d4c486257085006e9e7b/\\$FILE/E-274.pdf](http://www.airweb.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgMakeModel.nsf/0/7bfb5a7ace53d4c486257085006e9e7b/$FILE/E-274.pdf). [Pristupljeno: 24 Lipanj 2019.]
- [14] Kesić P. Osnove aerodinamike, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2003.
- [15] Trupina A. Sustav podmazivanja automobilskog Ottovog motora, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 1994.

Popis slika

Slika 1: Četverotaktni ciklus klipnog motora.....	5
Slika 2: Glavni dijelovi motornog mehanizma.....	6
Slika 3: Idealni Ottov ciklus prikazan u p - V dijagramu.....	9
Slika 4: Realni Ottov ciklus prikazan u p - V dijagramu.....	18

Popis tablica

Tablica 1: Tehničke i eksploatacijske karakteristike motora Lycoming O-320.....	8
Tablica 2: Vrijednosti tlaka i temperature za karakteristične točke idealnog ciklusa.....	16
Tablica 3: Vrijednosti tlaka i temperature za karakteristične točke realnog ciklusa	26

Popis grafikona

Grafikon 1: Ovisnost toplinskog stupnja iskoristivosti o stupnju kompresije.....	13
Grafikon 2: Proračunati p - V dijagram idealnog ciklusa	17
Grafikon 3: Ovisnost indikatorske snage o broju okretaja motora.....	29
Grafikon 4: Aproksimirani indikatorski p - V dijagram realnog ciklusa	29



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.
Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.
Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.
Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ završnog rada
pod naslovom **Termodinamički proračun radnog procesa zrakoplovnog**
klipnog motora
na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 8/20/2019

Tary Pan
(potpis)