

Režimi rada zrakoplovnoga klipnog motora tijekom osposobljavanja pilota

Mušterić, Borna

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:119:464546>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-11**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

BORNA MUŠTERIĆ
ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Zagreb, 13. svibnja 2021.

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

ZAVRŠNI ZADATAK br. 6386

Pristupnik: **Borna Mušterić (0135253164)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Režimi rada zrakoplovnoga klipnog motora tijekom osposobljavanja pilota**

Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati tehničko-eksploatacijske karakteristike tipičnog klipnog motora školskog zrakoplova te opisati uređaj za praćenje parametara rada motora. Analizirati rad motora u različitim fazama školovanja temeljem snimljenih parametara motora. Utvrditi razdiobu opterećenja motora tijekom školovanja pilota.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

prof. dr. sc. Ernest Bazijanac

ZAVRŠNI RAD

**Režimi rada zrakoplovnoga klipnog motora tijekom
osposobljavanja pilota**

Operation of an aircraft piston engine in flight school

Borna Mušterić

Mentor: dr.sc. Ernest Bazijanac

Student: Borna Mušterić

JMBAG: 0135253164

Zagreb, rujan 2021

Sažetak

Cilj ovog završnog rada je prikaz i usporedba snimljenih parametara motora u različitim fazama pilotskog školovanja.

U radu je opisana tehničko-eksploatacijska karakteristika tipičnog školskog zrakoplova i njegovog motora, a za primjer su uzeti zrakoplov Cessna 172N i motor Lycoming O-320. Detaljnije je opisan izgled, rad i funkcije zrakoplovnog uređaja EDM 900, dizajniran od tvrtke J.P Instruments. Opisan je tijek školovanja pilota prije dobivanja licence i objašnjene su vježbe iz kojih će se snimati podatci motora kao i očekivanja samih podataka. Pomoću snimljenih podataka parametara motora, prikazani su njihovi trendovi i vrijednosti za vrijeme leta u različitim fazama školovanja.

Ključne riječi: Školski zrakoplovni klipni motor; motorski parametri; uređaj za praćenje parametara rada motora; faze školovanja

Summary

The aim of this paper is to present and compare the recorded engine parameters in different phases of pilot training.

The paper describes the technical and operational characteristics of a typical school aircraft and its engine, where aircraft Cessna 172N and the Lycoming O-320 engine are taken as examples. The operation, benefits and display of the aircraft instrument EDM 900 aircraft, designed by J.P Instruments, are described in more detail. The course of pilot training before obtaining a license is described and the exercises from which the engine data will be recorded are explained, as well as the expectations of the data themselves. Using the recorded data of engine parameters, their trends and values during the flight in different phases of schooling are shown.

Key words: school aircraft piston engine; motor parameters; engine data monitoring device; school phases

Sadržaj

1. Uvod.....	5
2. Tehničko-eksplotacijske karakteristike tipičnog klipnog motora školskog zrakoplova	2
2.1 Povijest i razvoj zrakoplovnih klipnih motora	2
2.2 Princip rada klipnog motora.....	2
2.3 Osnovne podjele klipnog motora	4
2.4 Tehničko-eksplotacijske karakteristike školskog zrakoplova Cessna 172N (registracijske oznake 9A-DMB).....	5
3. Uređaj za praćenje parametara rada motora.....	10
3.1 Instrument J.P. EDM 900	10
3.2 Prikaznik uređaja.....	11
3.3 Modovi rada uređaja.....	13
4. Teorijske pretpostavke rada motora u snimljenim letovima	15
4.1 Struktura pilotske obuke	15
4.2 Parametri snimanja motora.....	16
4.3 Analiza zrakoplovnih vježbi.....	18
4.4 Pretpostavke ponašanja motorskih parametara tijekom izvođenja vježbi	20
5 Analiza snimljenih podataka u različitim fazama obuke	22
5.1 Let 1 - Vježba 4.....	22
5.2 Let 2 - Vježba 5.....	27
5.3 Let 3 - Vježba 30.....	31
5.4 Razlike snimljenih letova	36
5.5 Analiza parametara u različitim režimima letenja	36
Zaključak.....	40
Popis literature	42
Popis slika	42
Popis tablica.....	43
Popis grafikona.....	43

1. Uvod

Svaki pilot prije nego što je sjeo u moderne putničke, transportne ili privatne zrakoplove, morao je proći obuku na školskim zrakoplovima s klipnim motorima. Same karakteristike školskih zrakoplova su njihova ekonomičnost, pouzdanost u radu, jednostavnost sustava zrakoplova i njegovo održavanje te mogućnost lagane nabave rezervnih dijelova.

Ovaj rad se bavi analizom praćenja parametara rada školskog zrakoplovnog klipnog motora u različitim fazama školovanja pilota. Motorski parametri se snimaju i prate pomoću uređaja EDM 900 dizajniranog od tvrtke J.P. Instruments.

Rad se sastoji od 6 poglavlja. Nakon uvodnog dijela se opisuje povijesni razvoj zrakoplovnog klipnog motor, princip rada i njihova podjela prema različitim karakteristikama. Također se opisuju tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova Cessna 172N i motora Lycoming O-320 pomoću kojeg su mjereni parametri rada motora.

U trećem poglavlju se detaljnije opisuje rad uređaja za praćenja motorskih parametara EDM 900, zajedno s njegovim dizajnom i modovima rada.

U četvrtom poglavlju analizira se tijek obuke pilota, objašnjavaju se parametri koji će se promatrati, opisuju se vježbe iz kojih su bili snimani parametri te analiziraju pretpostavke kakve se vrijednosti parametara očekuju.

U petom poglavlju rada, grafički su prikazani izmjereni parametri snimljeni u tri različite vježbe. Na kraju poglavlja su same vrijednosti analizirane posebno za svaki parametar.

U posljednjem poglavlju iznosi se zaključak rada na temelju analizi podataka.

2. Tehničko-eksplatacijske karakteristike tipičnog klipnog motora školskog zrakoplova

Pogonski sustav tipičnog školskog zrakoplova čine elisa zrakoplova i klipni motor te sama masa zrakoplova pri polijetanju ne smije prelaziti 5700 kg, pa takvi zrakoplovi spadaju pod kategoriju lakih zrakoplova. U ovom poglavlju opisuje se sama povijest klipnog motora, njegova podjela i karakteristike zrakoplovnog tipa motora.

2.1 Povijest i razvoj zrakoplovnih klipnih motora

Prvi praktični klipni motor s unutarnjim izgaranjem je izradio francuski izumitelj Lenoir 1806. godine te su se oni koristili za pogon raznih strojeva u razdoblju od par godina. 1878. godine u Parizu je na III. svjetskoj izložbi prikazan prvi četverotaktni motor koji je po načelu rada sličan današnjim Ottovim motorima, a izumitelj je bio njemac Nikolaus August Otto. Prva uporaba klipnih motora u zrakoplovstvu je bila 17. prosinca 1903. godine kada su braća Wright obavila prvi let. Sam motor su izradila braća Wright zajedno s mehaničarom Charlesom Taylorom, a napravljen je prema uzoru na tadašnje automobilske motore. Blok i glava motora su bili od aluminijske legure, hlađen vodom, mase 82 kg, sustav za paljenje je bio magnetski i davao je snagu od 8,94 kW (12 hp). Nakon prvog leta uporaba motora u zrakoplovstvu je bila sve češća. [1]

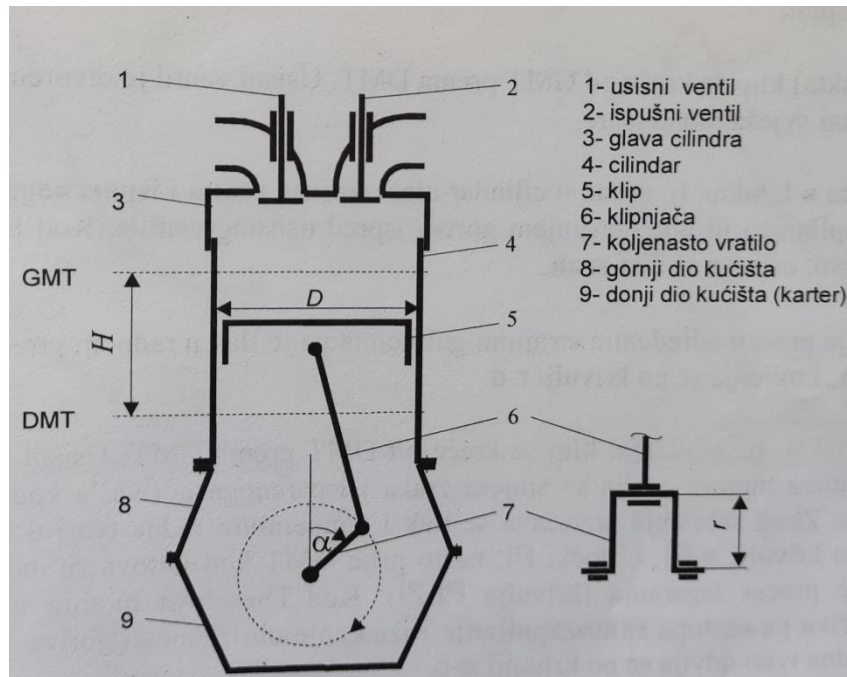
Tijekom Prvog svjetskog rata došlo je do promjene u dizajnu te su se koristili radijalni motori ili Gnome motori koji su bili hlađeni zrakom. Proizvodnja i razvoj konvencionalnih motora se nastavila te i dalje se moglo naći motore u V-izvedbi, hlađeni tekućinom ili zrakom i motori s rednim rasporedom cilindra, hlađeni tekućinom. [1.]

Nakon Drugog svjetskog rata nastavlja se razvoj klipnih motora hlađenih i zrakom i tekućinom. Razvoj zrakoplovnih motora je dosegao vrhunac, a to pokazuje najpoznatiji model Ottovih motora Merlin, tvrtke Rolls-Royce. Motor je bio hlađen tekućinom, imao je 12 cilindra u V izvedbi i prednabijen s 2 kompresora, te npr. zvjezdasti 4-reni motor s 28 cilindara Wasp R-4360 tvrtke Pratt & Whitney hlađeni zrakom, pri čemu su neki modeli imali snagu od 2800 kW (3800 hp). [1]

2.2 Princip rada klipnog motora

Klipni motori mogu biti izvedeni s rotacijskim gibanjem klipa, kao Wankelov motor ili s pravocrtnim oscilacijskim gibanjem klipa. Motori s rotacijskim gibanjem klipa su ograničeni u primjeni pa će se ovdje opisivati klipni motor s pravocrtnim oscilacijskim gibanjem klipa. [1]

Slika 1. prikazuje klip zrakoplovnog klipnog motora s označenim glavnim dijelovima.



Slika 1. Skica koncepcije klipnog motora s označenim dijelovima [1]

Motori koji se koriste u školskim zrakoplovima su četverotaktni što znači da se njihov radni ciklus obavlja u dva okretaja koljenastog vratila, tj. četiri takta. [1]

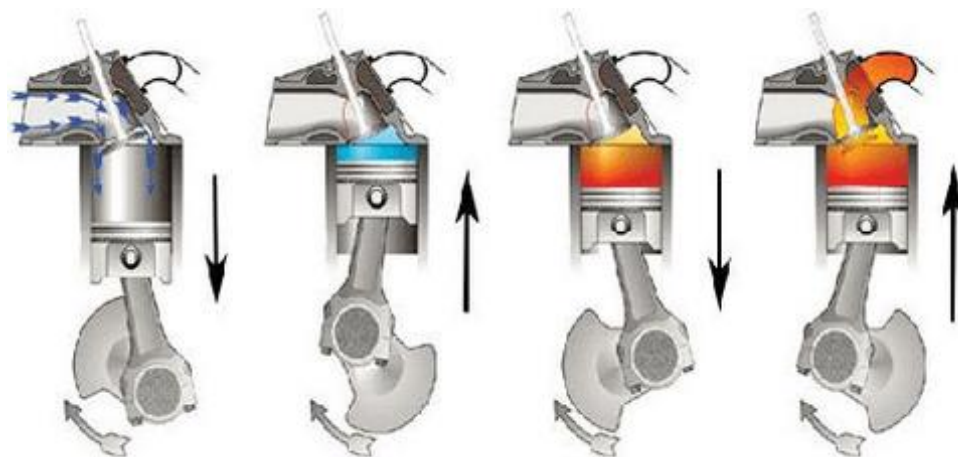
Tijekom prvog takta ili usisa, u cilindar ulazi smjesa zraka ili smjesa goriva i zraka, što ovisi o vrsti motora. Ulaskom smjese, klip se kreće od gornje mrtve točke (GMT) do donje mrtve točke (DMT). [1]

U drugom taktu ili kompresiji/sabijanju, klip se kreće od DMT do GMT te time sabija samu smjesu pri čemu dolazi do povećanja tlaka i temperature smjese. Prije dolaska klipa na GMT dolazi do paljenja iskre na svjećici koja započinje proces izgaranja. Kod Ottovih motora smjesa goriva i zraka mora biti otporno na samozapaljenje kako ne bi došlo do nekontroliranog izgaranja smjese te samim time i nepravilnog rada motora. [1]

Tijekom trećeg takta ili ekspanzije dolazi do širenja smjese koja pomiče klip s GMT do DMT te se time proizvodi rad koji se djelomično prekriva vlastiti gubitak motora dok se ostatak preko klipnjače predaje koljenastom vratilu u obliku korisnog rada kojim se pogoni elisa. [1]

U četvrtom taktu ili ispuhu, klip se pomiče s DMT prema GMT te samim time potiskuje gorivni produkt kroz ispušni ventil iz cilindra motora. Ispuhivanjem gorivnog produkta završava jedan radni ciklus četverotaktnog motora. [1]

Na Slici 2 je prikazano kretanje smjese kroz usisni i ispušni ventil kao i kretanje samog klipa pri radu motora. Usisni i ispušni ventili se naizmjenice otvaraju i zatvaraju zavisno o kojem je taktu riječ. [1]



Slika 2. Radni ciklus četverotaktnog motora [1]

2.3 Osnovne podjele klipnog motora

Klipni se motori mogu razvrstati prema nekoliko kriterija. Ovdje se navode samo osnovne podjele u svrhu lakšeg razumijevanja same problematike zrakoplovnih klipnih motora i njihovog održavanja.

Podjela prema načinu paljenja smjese

Prema ovoj podjeli razlikuju se:

- a) Ottovi motori
- b) Dieselovi motori [1]

Razlika između ove vrste motora je ta što kod Ottovih motora se koristi smjesa zraka i goriva te se zapaljenje smjese ostvaruje pomoću svjećica, dok se kod Diesel motora ubrizgava smjesa samog goriva koja preko povećanja tlaka i temperature dolazi do samozapaljenja. U zrakoplovstvu se koriste pretežito samo Ottovi motori. [1]

Podjela prema taktnosti

Klipni motori mogu biti:

- a) četverotaktni
- b) dvotaktni [1]

Kod školskih zrakoplova se najviše koriste četverotaktni motori, dok se dvotaktni motori koriste kod ultralakih letjelica ili maketa. [1]

Podjela prema načinu hlađenja

Zbog temperaturnih ograničenja samih materijala na motoru, dijelovi koji su u kontaktu sa zapaljivom smjesom, moraju se hladiti kako ne bi došlo do oštećenja. Prema načinu hlađenja može se podijeliti na:

- a) motori hlađenim tekućinom
- b) motori hlađeni zrakom [1]

Zrakoplovni klipni motori najčešće su hlađeni zrakom. [1]

Podjela Ottovih motora prema vrsti sustava za napajanje gorivom

Smjesa goriva i zraka kod Ottovih motora priprema se:

- a) u rasplinjaču/karburatoru
- b) ubrizgavanjem goriva ispred usisnog ventila [1]

Podjela prema broju, položaju i rasporedu cilindra

Prema broju cilindra motori mogu biti jednocilindrični ili višecilindrični. Zrakoplovni klipni motori najčešće se izvode kao četverocilindrični i šestercilindrični motori. [1]

Prema izvedbi se dijele na:

- a) zvjezdasti ili radijalni
- b) V-izvedba
- c) bokser
- d) redni [1]

Najčešći motori koji se koriste u školskom zrakoplovu su četvertocilindrični, bokser motori koji su hlađeni zrakom te im se smjesa zraka i goriva priprema u karburatoru, a imaju elisu s fiksnim korakom. Danas se također mogu vidjeti zrakoplovi s Diesel motorima koji se koriste zbog boljih performansi, jedan od prvih proizvođača takvih zrakoplova je Diamond Aircraft.

2.4 Tehničko-eksploatacijske karakteristike školskog zrakoplova Cessna 172N (registracijske oznake 9A-DMB)

Tipični zrakoplov koji se koristi u svrhu školovanja pilota je Cessna 172N. U ovom radu se opisuje zrakoplov Cessna 172N registracijskih oznaka 9A-DMB koji se nalazi u vlasništvu Fakulteta prometnih znanosti, Sveučilišta u Zagrebu. Trenutno se zrakoplov koristi za osposobljavanje novih pilota u Hrvatskom zrakoplovnom nastavnom središtu (HZNS) na sportskom aerodromu Lučko.

Zrakoplov je, zbog novih regulativa vezanih za osposobljavanje pilota prema PBN navigaciji, moderniziran početkom 2020. godine ugradnjom novih digitalnih instrumenata i uređaja. Među tim

uređajima ugrađeni su: dva Garmina G5 (umjetni horizont i prikaznik vodoravne situacije), Garmin GTN 750, Garmin 650 i J.P. Instruments EDM 900 Primary. Na Slici 3. je vidljiv izgled kabine nakon modernizacije zrakoplova.



Slika 3. Kokpit zrakoplova 9A-DMB

Zrakoplov Cessna 172N je jednomotorni klipni zrakoplov koji spada u kategoriju lakih zrakoplova, odnosno masa pri polijetanju ne prelazi 5700 kg. Osnovne tehničke karakteristike zrakoplova Cessna 172 vide se u Tablici 1. [2]

Tablica 1. Tehničke karakteristike zrakoplova Cessna 172N [2]

Tip motora	Lycoming O-320 (četverocilindričan, hlađen zrakom, horizontalno položen, opremljen karburatorom)
Masa praznog zrakoplova	693,5 kg
Maksimalna masa zrakoplova	1045 kg
Vrsta goriva	AVGAS 100LL
Kapacitet goriva	2 spremnika po 21,5 USGAL (81,35 l), samo 40 USGAL (151,4) iskoristivo
Kapacitet ulja	6,6 l, 5,67 l iskoristivo
Vrsta propelera	Proizvođač McCauley Accessory Division, 2 kraka, fiksnog koraka, promjer od 74 do 75 inch-a

Zbog atmosfernih utjecaja, performanse zrakoplovnih klipnih motora će stalno biti promjenjive. Zbog smanjenja gustoće zraka kod većih visina performanse zrakoplovnog klipnog motora će se smanjivati. [1]

Performanse motora uvijek su dane za uvijete međunarodne standardne atmosfere, odnosno International Standard Atmosphere (ISA), a to su:

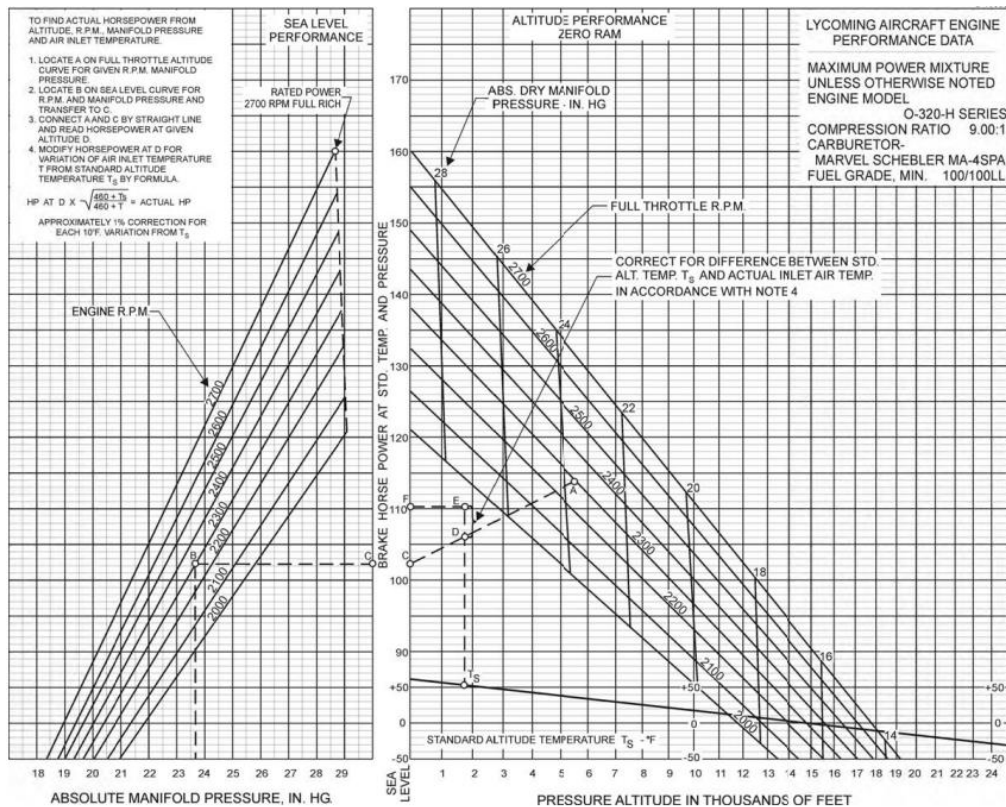
- Tlak zraka na razini mora- 1013,25 hPa
- Temperatura zraka na razini mora je 15 °C ili 288,15 K
- Gustoća zraka je 1,225 kg/m³
- Temperaturni gradijent do 11 km visine je -0,0065 °C/m [3]

U Tablici 2 vide se osnovni podaci performansi zrakoplova Cessne 172N.

Tablica 2. Eksplatacijske karakteristike Cessne 172N [2]

Snaga motora	160 BHP(<i>Break Horse Power</i>)
Maksimalna brzina okretaja	2700 RPM (<i>Revolutions Per Minute</i>)
Potrošnja goriva	Pri standardnoj temperaturi i visini od 8000 ft je 8 GPH (<i>Gallons Per Hour</i>)
Plafon leta	14200 ft
Maksimalni dolet	Pri visini od 10000 ft i na postavkama 75% snage iznosi 575 NM
Istrajnost	Pri visini od 10000 ft i na 75% snage je 4,1 sat

Performanse klipnih zrakoplova se mijenjaju s povećanjem visine jer dolazi do smanjenja tlaka i temperature zraka. Zbog smanjenja tlaka i temperature zraka dolazi do degradacije performansi: smanjenje raspoložive snage motora, pad brzine vrtnje motora, pad brzine zrakoplova, pad brzine penjanja, smanjena istrajnosti i doleta itd. Proizvođač daje performanse zrakoplova i motora za standardne uvijete atmosfere te, koji se onda mogu korigirati za specifične uvjete leta. [1]



Slika 4. Dijagram performansi motora [4]

Slika 4. prikazuje dijagram performansi motora pomoću karakteristike opterećenja na razini mora i visinske karakteristike. Dijagram se dijeli na dva dijela, lijeva strana prikazuje performanse na razini mora, dok desna strana prikazuje vrijednosti visinske karakteristike. Pomoću ovog dijagrama mogu se izračunati parametri brzine vrtnje motora, tlaka punjenja i snagu motora za različite atmosferske uvjete i visine.

Postupak iščitavanja podataka objašnjen je pomoću sljedećeg primjera:

- Brzina vrtnje motora- 2300 RPM
- Tlak punjenja 23,5 in HG
- Visina leta- 1800 ft
- Temperatura zraka na visini leta- -10 °F

Na dijagramu je označena točka A koja prikazuje zadane parametre vezane za visinsku karakteristiku. Za istu tu vrijednost brzine vrtnje motora i tlaka punjenja na dijagramu s lijeve strane se označuje točka B. Iz točke B vuče se horizontalna linija do granice dijagrama te se označuje s točkom C. Točka C prikazuje snagu motora na razini mora za navedene postavke koja iznosi 76,06 kW (102 hp). Spajanjem točke C i točke A dobiva se linija promjene snage, a križanje linije promjene snage i standardne temperature za visinu od 1800 ft označava se točkom D. Pomoću točke D se vidi da je snaga motora na traženoj visini pri standardnim uvjetima temperature iznosi 79,04 kW (106 hp). Zbog razlike u

standardnoj i izmjerenoj temperaturi, korekcija za snagu motora će se primijeniti, a ona iznosi 1% za svakih 10 °F razlike. Kako u ovom primjeru standardna temperatura na visini od 1800 ft iznosi 53 °F, a u primjeru je izmjerena na -10 °F, korekcija za snagu će iznositi 4%. Završna snaga za zadane uvijete atmosfere i parametre motora će iznositi 82,03 kW (110 hp).

3. Uređaj za praćenje parametara rada motora

U većini slučajeva školski zrakoplovi su opremljeni analognim instrumentima koji prikazuju trenutno stanje zrakoplovnog pogonskog sustava. Oni su smješteni na instrumentalnoj ploči zrakoplova, a u Cessni 172N su smješteni između sjedala studenta i instruktora te zauzimaju veći dio ploče. Oni su jako nepregledni u točnom određivanju stanja te pilotima pomaže skala s bojama (zeleno, žuto i crveno) koja signalizira radno stanje motora.

Razvojem tehnologije, danas imaju razni uređaji koji mogu prikazivati više podataka pilotu, ali sve na jednom mjestu. Jedan od tih uređaja je EDM 900, dizajniran od tvrtke J.P. Instruments. U ovom poglavlju će se opisati njegov izgled, funkcije i rad samog uređaja.

3.1 Instrument J.P. EDM 900

Instrument EDM 900 ugrađen je početkom 2020. godine na zrakoplov Cessna 172N, registracijskih oznaka 9A-DMB te ga to čini prvi zrakoplov u floti koji je opremljen digitalnim uređajem za praćenje motorskih parametara.



Slika 5. Izgled uređaja EDM 900 [5]

Ovaj uređaj, prikazan na Slici 5., ima velike prednosti kao što su: povećan broj prikaza instrumenata pilotu, pojednostavljenje i detaljnije prikazivanje parametara, memoriranje podataka tijekom leta i spremanje za daljnju obradu i analizu rada motora, olakšavanje održavanja pogonskog sustava zrakoplova. [5]

Uređaj pilotu tijekom leta prikazuje:

- Brzinu vrtnje motora (RPM)
- Tlak punjenja (MAP- *Manifold Absolute Pressure*)
- Temperaturu glave cilindra (CHT- *Cylinder Head Temperature*)
- Temperaturu ispušnih plinova (EGT- *Exhaust Gas Temperature*)
- Temperaturu ulja (*Oil Temperature*)
- Tlak ulja (*Oil Pressure*)
- Tlak goriva (*Fuel pressure*)
- Protok goriva (*FF- Fuel Flow*)
- Količinu goriva (*Fuel Quantity*)
- Napon alternatora i generatora (*Alternator, Generator Output*)
- Temperaturu okolnog zraka (OAT- *Outside Air Temperature*)
- Temperaturu na ulazu u turbinu (TIT- *Turbine Inlet Temperature*)
- Temperaturu na ulazu u karburator (*Carburetor Inlet Temperature*)
- Postotak snage motora (*Percent of HorsePower*) [5]

3.2 Prikaznik uređaja

Izgled i dijelovi prikaznika vidljivi su na Slici 6., a prijevod nazivlja se nalazi u Tablici 3.



Slika 6. Horizontalni izgled i dijelovi prikaznika [6]

Tablica 3. Prijevod dijelova prikaznika

<i>Percent of HorsePower</i>	Prikaz korištene snage u postotcima
<i>All engine Temp's F or C</i>	Sve temperature motora (EGT i CHT)
TIT	Temperatura na ulazu turbine
<i>Outside Air F or C</i>	Temperatura vanjskog zraka
<i>Primary gauges only</i>	Primarni parametri
<i>Manual dimming with CD Cell bias</i>	Ručno zatamnjenje
<i>Message area</i>	Poruke uređaja
<i>USB port</i>	Utor za USB
<i>Non-Primary gauges digital only</i>	Sekundarni parametri uređaja
<i>Fuel level</i>	Količina goriva

Uređaj ima mogućnost dva prikaza, vertikalni i horizontalni. Zbog bolje preglednosti pilotima je preporučeno horizontalni izgled parametara. Izgled i razliku između dva prikaza vidljiva je na slikama 7. i 8. [6]



Slika 7. Izgled horizontalnog prikaznika [6]



Slika 8. Izgled vertikalnog prikaznika [6]

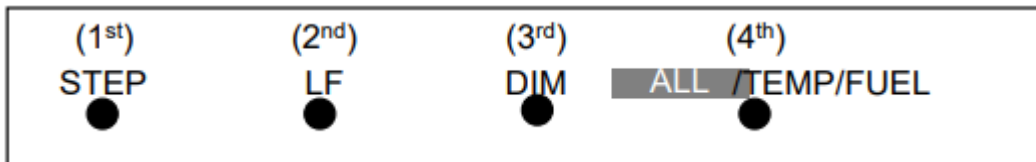
U oba načina prikaza, zaslon se dijeli na tri dijela. Prvi dio se nalazi u gornjem lijevom dijelu te prikazuje trenutne vrijednosti RPM-a i MAP-a, drugi dio obuhvaća većinu zaslona, a nalazi se u donjem lijevom dijelu. On prikazuje vrijednosti EGT i CHT za svaki cilindar posebno zajedno s sekundarnim parametrima motora (napon mreže, preostalo gorivo, vrijeme do potpunog nestanka goriva, tlak goriva i potrošeno gorivo) te se također na njemu prikazuju poruke uređaja upućene pilotu. Treći dio se nalazi u desnom dijelu zaslona te prikazuje primarne parametre: temperatura ulja, tlak ulja, potrošnja goriva, količina goriva u lijevom i desnom tanku. [6]

3.3 Modovi rada uređaja

EDM uređaj ima 4 osnovna operativna moda: „Automatic“, „Manual“, „Program“ i „Lean Find“. Prvi mod koji je aktivan nakon paljenja uređaja je „Manual“ mod, ali nakon par minuta prijelazi u „Automatic“ mod. Za vrijeme rada na „Automatic“ modu, uređaj prikazuje podatke za nadgledanje parametara motora tijekom cijelog leta. „Lean Find“ mod se koristi kod postupka osiromašivanja smjese zraka i goriva te u tom modu rada uređaja postoje dva načina postupka: ROP (Rich Of Peak) and LOP (Lean Of Peak). Razlika između ta dva postupka je u tome što se kod ROP gleda prvi cilindar koji dođe do maksimalne vrijednosti EGT-a, dok se kod LOP gleda zadnji. U „Program“ modu rada namještaju se postavke samog uređaja. [5]

Za prikazivanje i korištenje posebnih parametara motora koristi se „Manual“ mod. Kod rada uređaja u „Automatic“ i „Manual“ modu, zaslon uvijek pokazuje vrijednosti EGT-a i CHT-a za svaki cilindar posebno, također prikazuje vrijednosti TIT-a ukoliko je motor opremljen s prednabijanjem. [6]

Na uređaju se također nalaze 4 glavne tipke koje imaju različite funkcije zavisno u kojem modu radi uređaj. Raspored i nazivi tipki su prikazani na Slici 9. [6]



Slika 9. Raspored i nazivi glavnih tipki [6]

4. Teorijske pretpostavke rada motora u snimljenim letovima

Tijekom svog školovanja pilot prolazi kroz različite vježbe koje su propisane i osmišljene kako bi usavršio svoje znanje i vještinu kao pilot. Svaka vježba ima različite operacije i ciljeve koje treba zadovoljiti kako bi vježba bila uspješna. Prilikom izvođenja vježbi pilot upravlja zrakoplovom u različitim postavkama snage, tj. režimima leta pa su samim time i parametri zrakoplova mijenjaju. U početku obuke se lete kraći i intenzivniji letovi dok kasnije to prelazi u duže i monotonije letove. U ovom poglavlju će se detaljnije obraditi samo školovanje, parametri motora koja će se gledati i vježbe koje će biti snimane te njihova očekivanja.

4.1 Struktura pilotske obuke

Svaki pilot, kako bi stekao svoju dozvolu, mora proći kroz obuku koje organiziraju i provode pilotske škole. Jedna od takvih ustanova je HZNS koje je organizirano u sklopu Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. Praktična obuka studenata pilota u HZNS-u je strukturirana od 140 sati naleta na zrakoplovu, od čega je 127 sati na jednomotornom zrakoplovu tipa Cessna 172N, Cessna 172R i Diamond DV20 Katana, te 13 sati na dvomotornom klipnom zrakoplovu tipa Beechcraft Duchess 76. Osim na zrakoplovu obuka se radi i na trenažeru letenja FNTP 2 koja se sastoji od 55 sati leta, a uključuje jednomotorne i dvomotorne IFR (*Instrument Flight Rules*) operacije i MCC (*Multi Crew Cooperation*) obuku. [7]

Samo školovanje vezano za jednomotorne zrakoplove može se podijeliti na 2 dijela s obzirom na režime letenja:

1. Letove prije laširanja tj. prvog samostalnog leta, i netom nakon
2. Početak letenja VFR (*Visual Flight Rules*) i IFR ruta

Studenti prve letačke sate rade po vizualnim pravilima letenja (VFR), što znači da vremenske prilike moraju zadovoljiti uvjete prikazane u Tablici 4. Sami letovi prema vizualnim uvjetima u zračnom prostoru klasifikacije A su zabranjeni.

Tablica 4. Vizualni uvjeti letenja [8]

Visine	Klasifikacije zračnog prostora	Vidljivost	Udaljenost od oblaka
Na i iznad 3050 m (10000 ft) iznad srednje razine mora (AMLS)	A B C D E F G	8 km	1500 m horizontalno 300 m (1000 ft) vertikalno
Ispod 3050 m (10000 ft) AMSL ili 300 m (1000 ft) iznad terena, što je više	A B C D E F G	5 km	1500 m horizontalno 300 m (1000 ft) vertikalno
Na i ispod 900 m (3000 ft) AMSL ili 300 m (1000 ft) iznad terena, što je više	A B C D E	5 km	1500 m horizontalno 300 m (1000 ft) vertikalno
	F G	5 km	Bez oblaka i s površinom na vidiku

Obuka do samog laširanja se sastoji od 8 vježbi u trajanju od 12 sati i oko 52 slijetanja. Ovaj period letenja je jako intenzivan zbog velikog broja slijetanja kod kojih dolazi do velikih oscilacija u radu motora. Osim slijetanja u zraku se odrađuju različite vježbe koje zahtijevaju različite postavke motora u kratkim vremenskim intervalima. [7]

Nakon prve faze studenti prelaze na VFR rute koje su dužeg trajanja i smanjen je broj slijetanja s obzirom na vrijeme provedeno u zraku. Ukupno trajanje VFR ruta je 44 sati i 10 minuta, a broj slijetanja kojeg studenti naprave na različitim aerodromima je oko 56. [7]

Pri završetku letenja VFR rute studenti prelaze za trenera kako bi se upoznali s pravilima IFR letenja te naučili pravilno izvođenje procedura odlaska i dolaska na aerodrom. Nakon trenera prelaze na letenje u zrakoplovu te provedu 48 sati u zraku tijekom ove faze i naprave oko 64 slijetanja. [7]

Zaključno se vidi kako u prvoj fazi pilot približno svakih 14 minuta napravi slijetanje, u drugoj približno svakih 47 minuta tijekom VFR ruta i svakih 45 minuta za vrijeme IFR ruta. Iz ovih podataka se vidi kako je prva faza najintenzivnija za zrakoplov i pilota te će podatci snimljeni s tih vježbi imati najveće promjene u letu.

4.2 Parametri snimanja motora

Tijekom leta pilot je dužan pridržavati se uputa proizvođača zrakoplova koje su propisane za održavanje motorskih parametara u letu u dopuštenim granicama kako bi se izbjegla veća oštećenja motora ili

njegov nepravilan rad koji može prouzročiti smanjenu pouzdanost i životni vijek trajanja. Parametri koji će se pratiti na letovima su:

- Temperatura glave cilindra
- Temperatura ispušnih plinova
- Brzina vrtnje motora
- Trenutačna snaga motora
- Tlak ulja motora
- Temperatura ulja
- Nominalna snaga motora

Temperatura glave cilindra je bitan podatak koji pokazuje toplinsko opterećenje cilindra. Kako se u cilindru odvijaju procesi izgaranja i kompresije, sam cilindar je izložen velikim promjenama tlakova i temperatura. Zbog ograničenosti strukture materijala od kojeg je građen, on ima svoju temperaturnu granicu koja se ne smije prijeći kako ne bi došlo do mikropuknuća materijala, a na kraju i samog puknuća cilindra. [7]

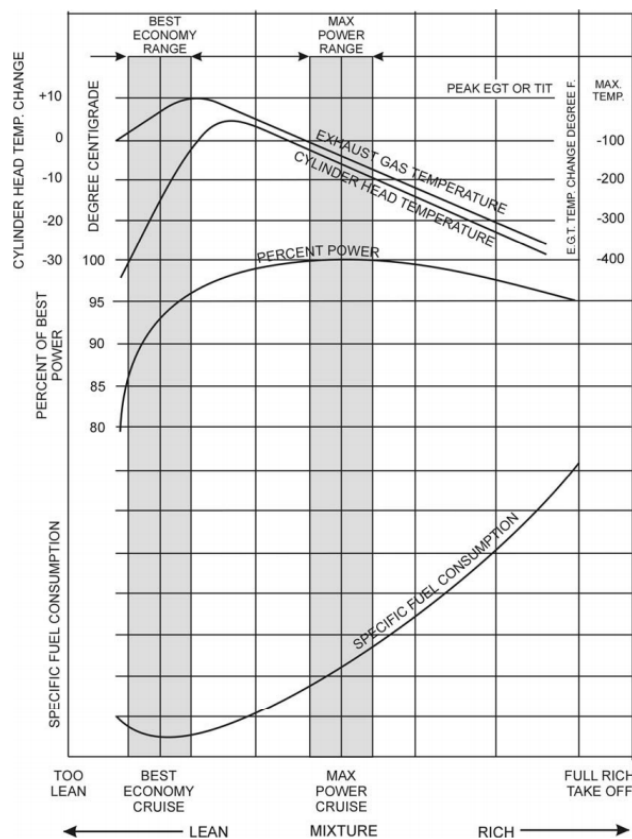
Temperatura ispušnih plinova se mjeri na izlazu iz cilindra u ispušnim kolektorima pomoću senzora temperature. Najznačajniji faktor koji utječe na nju su stupanj kompresije i faktori koji se mijenjaju tijekom rada motora kao što je omjer goriva i zraka u smjesi te tehničko stanje motora [9]

Temperatura ispušnih plinova -EGT ovisi o bogatstvu smjese goriva i zraka u cilindrima motora te je najviša kod stehiometrijske smjese koja iznosi 15 kg zraka na 1 kg goriva. [1]

Zbog navedenoga, koristeći se temperaturom ispušnih plinova koja se prikazuje na instrumentu u kokpitu, obavlja se podešavanje smjese goriva na određenoj visini leta.

Tijekom leta pilot postavlja željenu vrijednost smjese kako bi dobio najbolje rezultate. Tijekom paljenja motora i penjanja, ručica smjese je postavljena na "Full Rich" poziciju kako bi se smanjila mogućnost detonacija u cilindru te dala najvišu moguću snagu motora. Kada zrakoplov leti u režimu krstarenja pilot osiromašivanjem smjese želi postići bolju ekonomičnost potrošnje goriva tijekom leta. Tijekom najekonomičnijeg režima leta zrakoplova, postotak snage iznosi od 90 do 95%. [1]

Na Slici 10. se vidi ovisnost temperature ispušnih plinova, temperature glave cilindra i snage motora o bogatstvu smjese. Iz dijagrama je uočljivo kako prilikom postupka osiromašivanja smjese temperatura EGT-a i CHT-a pada, ali u trenutku kada uđe u zonu ekonomičnog leta počinje ponovno rasti do određene vrijednosti.



Slika 10. Ovisnost EGT-a, CHT-a, snage motora i specifične potrošnje goriva o smjesi [4]

Brzina vrtnje motora (RPM) se mjeri preko tahometra, a sam podatak je važan prilikom svake operacije zrakoplova, od pokretanja zrakoplova do zaustavljanja. Održavanje i pravilno korištenje veličina brzine vrtnje motora je propisano od strane proizvođača, a sam pilot ih se mora pridržavati kako bi motor bio što duže učinkovit. Kod motora s elisom kontaktnog koraka broj okretaja ujedno prikazuje i snagu motora s korekcijama stanja okoline. [1]

Tlak i temperatura ulja i je podatak koji je jako bitan za ispravan i rad klipnog motora. Zbog svojih funkcija, ulje se mora neprekidno opskrbljivati dijelovima motora kod kojih dolazi do velikih trenja ili temperatura. Temperatura ulja je bitan faktor ulja koji određuje njegovu efektivnost u obavljanju funkcija. Povećanjem temperature ulja dolazi do promjene u njegovoj viskoznosti koja je bitna pri korištenju ulja u klipnom motoru. Njegova vrijednost je najviša kod hladnog motora, a najniža kod ulja ugrijanog na radnu temperaturu. [1]

Ukoliko se temperatura i tlak ulja ne nalaze u dopuštenim granicama postoji mogućnost otkaza motora. Uzrok tome mogu biti mala količina ulja u motoru, curenje ulja, povećane zračnosti ležajeva itd.

4.3 Analiza zrakoplovnih vježbi

U ovom radu će se analizirati 3 vježbe:

Vježba 30 - letenje IFR ruta

Vježba se sastoji od 18 letova i ukupnog vremena od 36 sati letenja. Cilj joj je učenje studenta održavati sigurnost leta u instrumentalnim uvjetima i pravilnim raspoređivanjem radnji u zrakoplovu kako bi prilaz na aerodrom bio što precizniji i točniji. [7]

Studenti za vrijeme ove vježbe treniraju navigacijsko letenje preko zračnih puteva u instrumentalnim uvjetima, kao instrumentalne prilazne i odlazne procedure. Studenti letove moraju odraditi u zadanim normama, što znači da odstupanja od zadanih visina i putanje letenja moraju biti u standardu. Ukoliko dođe do većih odstupanja, studenti moraju sami uočiti svoje pogreške, ispraviti ih na vrijeme i na kraju leta analizirati što je dovelo do samog odstupanja od zadanih vrijednosti. [7]

4.4 Pretpostavke ponašanja motorskih parametara tijekom izvođenja vježbi

U standardnom letu zrakoplova Cessna 172N može se odrediti 3 glavna režima leta: polijetanje/penjanje, krstarenje i spuštanje/slijetanje.

U svakom od nabrojanih režima proizvođač daje preporuke kojim postavkama se treba pridržavati pri uporabi zrakoplova. Pilotske škole prema preporukama proizvođača u svom SOP-u (*Standard Operating Procedure*) daju zadane postavke motora u različitim fazama leta koje se studenti pridržavaju ukoliko se radi o normalnim uvjetima.

Prije samog polijetanja pilot mora napraviti probu motora kako bi provjerio normalan rad motora. Tijekom izvođenja probe motora pilot mora postaviti punu snagu te pratiti ponašanje motorskih parametara. Nakon maksimalne snage pilot postavlja ručicu snage u režim praznog hoda motora.

Kod polijetanja i penjanja zrakoplova pilot postavlja ručicu snage za maksimalne vrijednosti te se time dobiva vrijednost brzine vrtnje motora od 2500 RPM i 80-90% snage motora. Tijekom penjanja motor radi na maksimalnoj snazi te se zbog većeg opterećenja povećava temperatura i tlaka ulja kao i rast CHT-a i EGT-a.

Kod prelaska iz režima penjanja u režim krstarenja pilot oduzima snagu motora na vrijednost od 65% čime se dobiva 2300 RPM. Kako se brzina vrtnje motora smanjuje, a time i samo radno opterećenje, može se očekivati pad vrijednosti ostalih parametara motora.

Prelaskom u režim spuštanja, pilot dodatno oduzima snagu motora na oko 2000 RPM te kako je navedeno i kod režima krstarenja, očekujemo pad vrijednosti parametara motora

Vježba 4 u sebi sadrži rad u pilotažnoj zoni od oko 20 minuta, a tijekom rada u zoni zrakoplov će biti podvrgnut različitim postavkama snage motora i nagibima. Zbog vrsti vježbi gdje pilot mora skinuti

snagu kako bi simulirao gubitak uzgona zrakoplova i uvjete prije ulaska u kovit te kasnije dodavanja snage zbog oporavka iz navedenih situacija, očekuje se veliki broj intenzivnih skokova u mjerenim parametrima motora.

Vježba 5 uključuje vježbu školskih krugova na aerodromu u trajanju od 40 minuta. Kako su same postavke motora propisane od strane HZNS-a, očekuju se simetrične oscilacije vrijednosti parametara motora te jasna slika početka i kraja jednog školskog kruga.

Vježba 30 uključuje rutne letove gdje se očekuje normalno ponašanje vrijednosti parametara motora za svaki režim u kojem se zrakoplov nalazi.

5 Analiza snimljenih podataka u različitim fazama obuke

U ovom poglavlju će se grafički prikazati parametri motora snimljeni u različitim fazama obuke. Podatci su snimljeni pomoću zrakoplova Cessna 172N registracijske oznaka 9A-DMB i pomoću uređaja J.P Instruments EDM 900. Kako uređaj snima stanje motora za svaku sekundu leta broj podataka uzetih za grafikone je jednak trajanja leta u sekundama.

Letovi koji će biti analizirani u radu su:

1. VFR- vježba 4, let proveden 19.08.2021.
2. VFR- vježba 5, let proveden 20.08.2021.
3. IFR- vježba 30, let proveden 20.08.2021.

5.1 Let 1 - Vježba 4

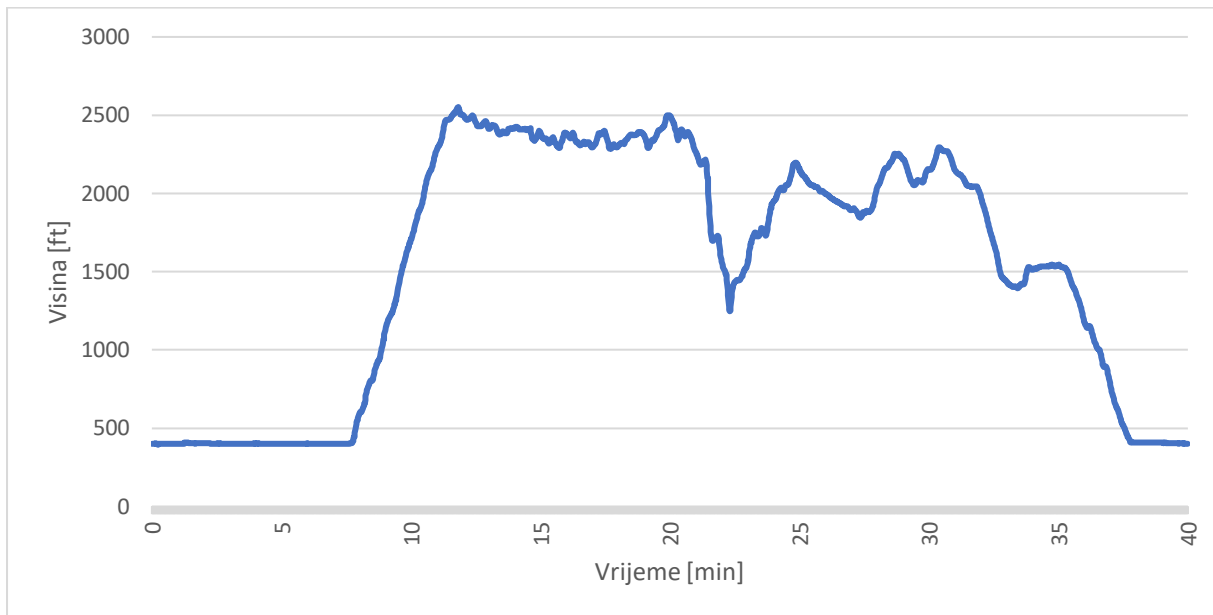
Let Vježbe 4 snimljen je 19.08.2021. godine u jutarnjim satima. Polijetanje i slijetanje je odrađeno na aerodromu Lučko dok se rad u pilotažnoj zoni odvijao u zoni Samobor. U tablici su vidljivi osnovni podaci o aerodromu i letu.

Tablica 5. Osnovni podaci aerodroma i leta

Nadmorska visina aerodroma	405 ft
Duljina piste	850 m
Granice pilotažne zone	1000 ft AGL (above ground level)-2500 ft AMSL
Temperatura vanjskog zraka na aerodromu	17 °C
Temperatura vanjskog zraka u pilotažnoj zoni	16 °C
Masa zrakoplova pri polijetanju	2070 lbs
Vrijeme polijetanja	08:00 UTC
Vrijeme slijetanja	08:40 UTC
Broj slijetanja	1

Izgled vertikalnog profila leta je vidljiv iz Grafikona 1, a najviša visina je bila 2550 ft. Faza polijetanja i penjanja započeta je u 8. minuti, te se nastavlja do dostizanja visine 2500 ft u 12. minuti. Nakon faze penjanja započinje rad u zoni te se iz grafa vide oscilacije u visini. Najveći pad se događa u 23. minuti kada zrakoplov dolazi na visinu od 1250 ft. Nakon završetka radnji u pilozažnoj zoni zrakoplov kreće u

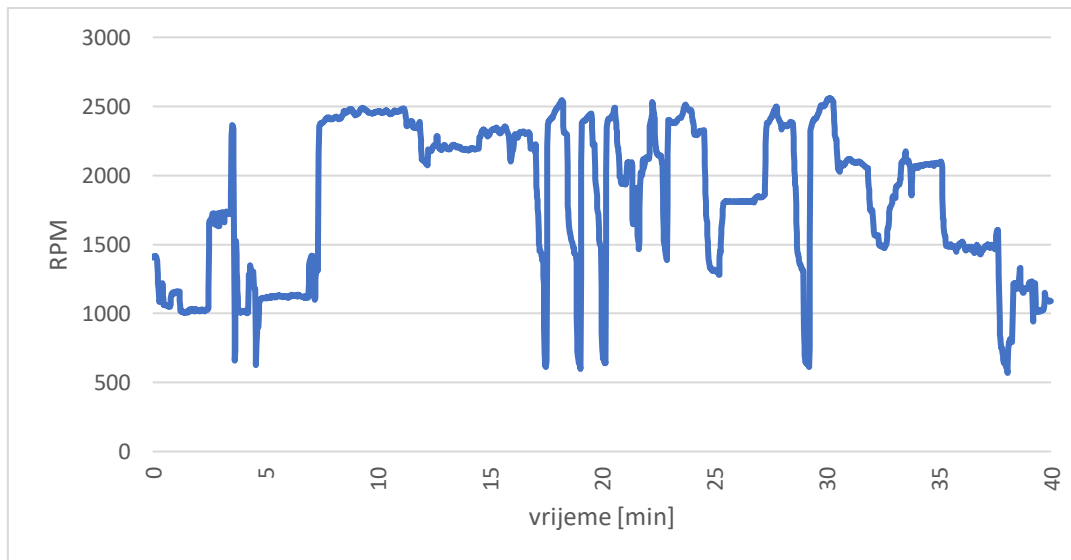
spuštanje na visinu školskog kruga, koja za Lučko iznosi 1500 ft, te dalje nastavlja proceduru slijetanja na aerodrom.



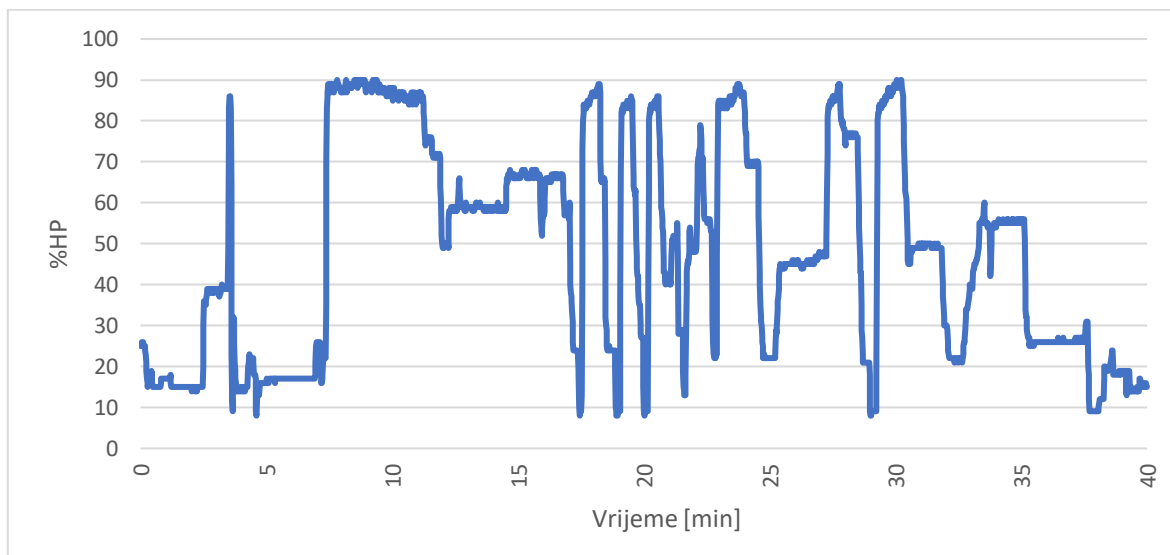
Grafikon 1. Vertikalni profil Leta 1

Grafikon 2 prikazuje vrijednosti brzine vrtnje motora tijekom leta. U 3. minuti uočavamo porast broja okretaja te nagli pad što odgovara operaciji provjere motora prije samog leta. Nakon provjere motora značajniji porast vidi se kod polijetanja gdje pilot koristi maksimalnu snagu motora. U fazi penjanja se vidi konstantna vrijednost koja iznosi 2450 RPM-a. Od trenutka početka rada u pilotažnoj zoni se vide velike oscilacije u broju okretaja što odgovara vježbama gubitka uzgona zrakoplova. U 30. minuti, nakon završetka operacija u zoni, dolazi do pada vrijednosti od 1500 RPM-a, što je postavka koja se koristi kod leta u školskim krugovima.

Na Grafikonu 3 se mogu primijeniti iste promjene kao i u Grafikonu 2, što je očekivano jer nominalnu snagu motora određuje broj okretaja motora. U režimu penjanja se koristi 85-90% nominalne snage motora.

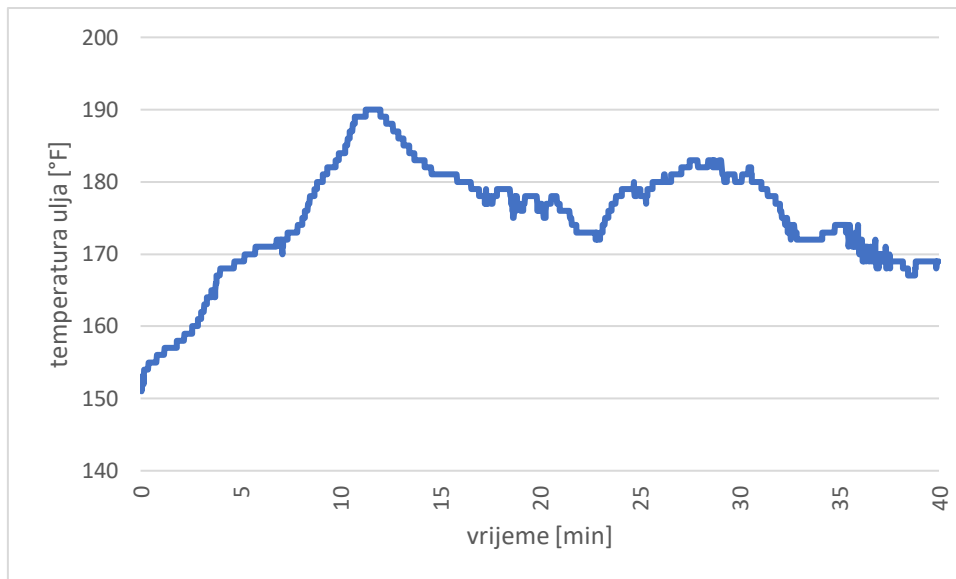


Grafikon 2. Brzina vrtnje tijekom Leta 1

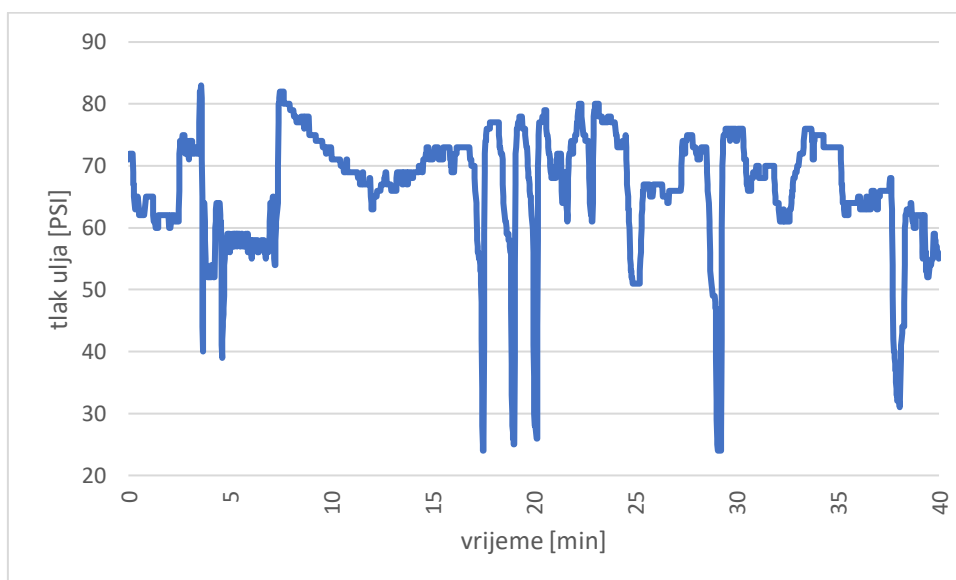


Grafikon 3. Snaga motora tijekom Leta 1

Stanje temperature i tlaka ulja vidljivo je iz grafikona 4. i 5. Kako je snimljeni let bio drugi po redu tog dana, uočava se kako je ulje već zagrijano na temperaturu od 150 °F te se nalazi u normalnoj zoni rada koja je od 100° do 245°F. Tijekom leta ulje varira od 170° do 190°F. Tlak ulja je također u normalnoj zoni rada, koja je od 60 do 90 PSI, osim u trenucima kod rada u zoni pri vježbama prevlačenja zrakoplova u kojoj se oduzima snaga motora.



Grafikon 4. Temperatura ulja tijekom Leta 1



Grafikon 5. Tlak ulja tijekom Leta 1

U grafikonima 6. i 7. su prikazane vrijednosti CHT-a i EGT-a za svaki od četiri cilindra.

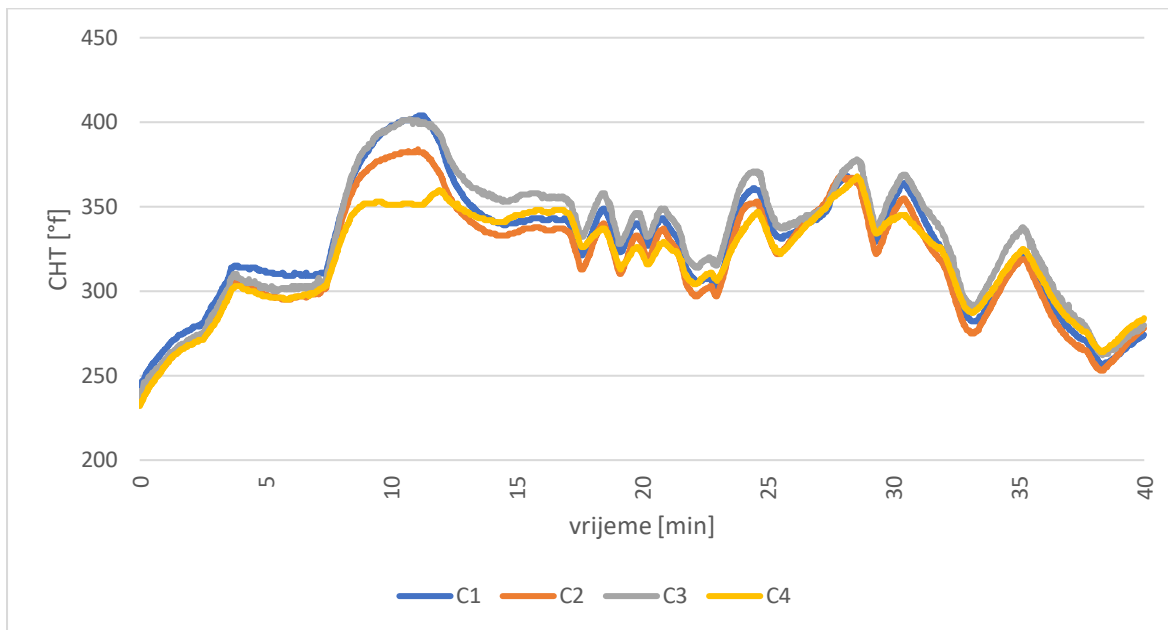
Kako uređaj mjeri svaki cilindar posebno, a zbog različitog rasporeda tj. udaljenosti svakog cilindra od rasplinjača, struje zraka i otvora za hlađenje, može se očekivati različite vrijednosti za svaki cilindar u istom trenutku mjerenja.

Oznake C1, C2, C3 i C4 predstavljaju broj cilindra.

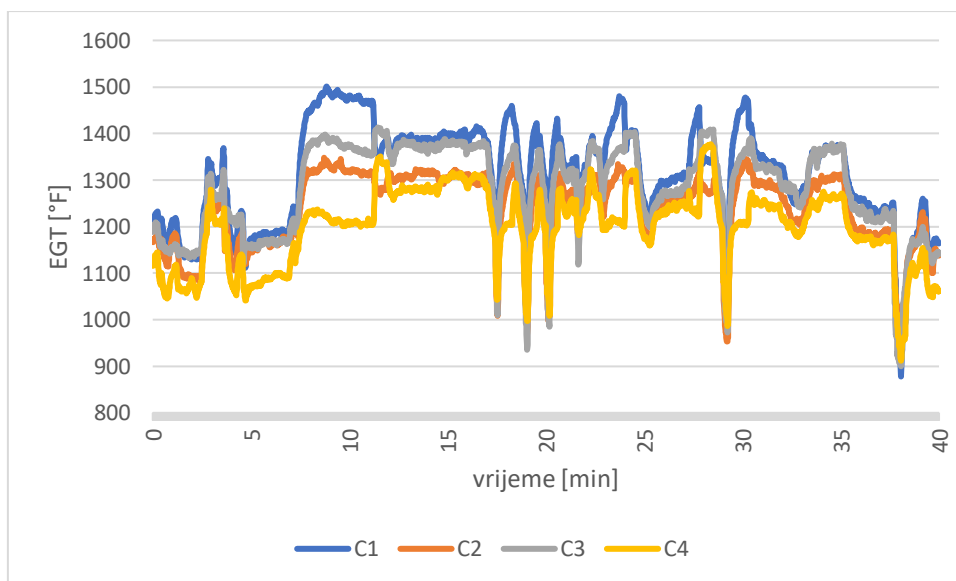
Grafikoni nam pokazuju normalni rast vrijednosti do trenutka početka rada u zoni gdje zbog različitih vježbi dolazi do velikih oscilacija vrijednosti. Najveća izmjerena vrijednost CHT-a je 410 °F, postignuta u cilindru broj 1, a najmanja vrijednost je postignuta u cilindru broj 2 te iznosi 250 °F. Kod izmjerenih

vrijednosti EGT-a, najveća temperatura iznosi 1500 °F, a najmanja 890 °F te su obje vrijednosti izmjerene u cilindru broj 1.

Iz grafikona se može uočiti kako CHT i EGT imaju tendenciju rasta kod povećanje snage motora, isto tako imaju tendenciju pada kod oduzimanja snage motora. Ove promjene su normalne jer prilikom povećanje snage motora dolazi do većih temperatura izgaranja pa samim time i povećavaju temperaturu dijelova motora.



Grafikon 6. Vrijednosti CHT-a tijekom Leta 1



Grafikon 7. Vrijednosti EGT-a tijekom Leta 1

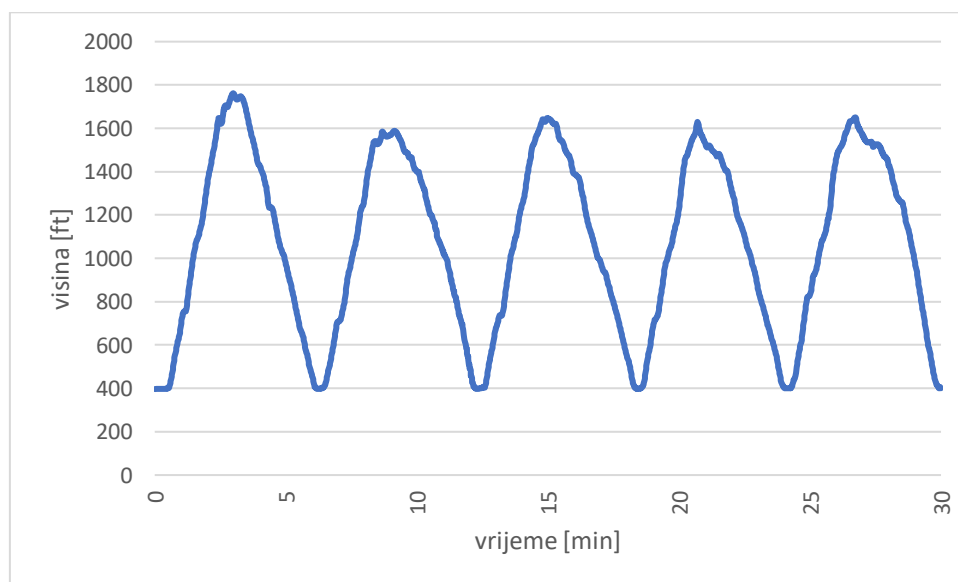
5.2 Let 2 - Vježba 5

Drugi let u kojem je odrađena Vježba 5 snimljen je 20.08.2021. godine. Svih 5 školskih krugova koji su bili dio Vježbe 5 su odrađeni na aerodromu Lučkom. Osnovni podaci o letu se nalaze u tablici ispod.

Tablica 6. Osnovni podaci o Letu 2.

Nadmorska visina aerodroma	405 ft
Duljina piste	850 m
Visina školskog kruga	1500 ft AMSL
Temperatura vanjskog zraka na aerodromu	19 °C
Masa zrakoplova pri polijetanju	2100 lbs
Vrijeme polijetanja	06:00 UTC
Vrijeme slijetanja	06:40 UTC
Broj slijetanja	5

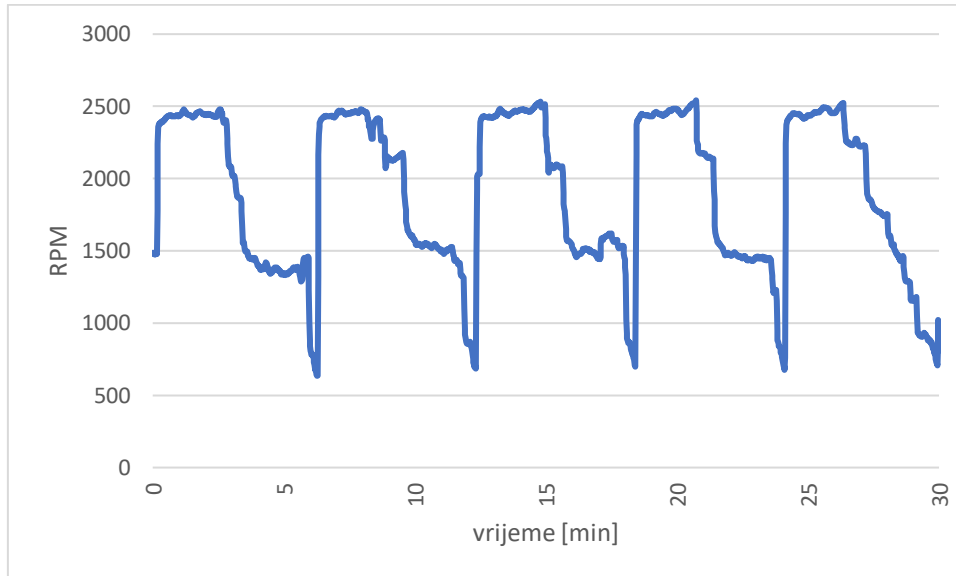
Na Grafikonu 8, koji prikazuje vertikalni profil Vježbe 5, jasno se vidi početak i kraj svakog školskog kruga. Svako polijetanje i penjanje je trajalo oko 2 minute, horizontalni let oko 1 minutu, a spuštanje oko 2 minute. Također je uočljivo da je visina kruga varirala između 1500-1650 ft, što je normalno jer su studenti na početku svoga školovanja te nemaju još naprednu vještinu pilotiranja.



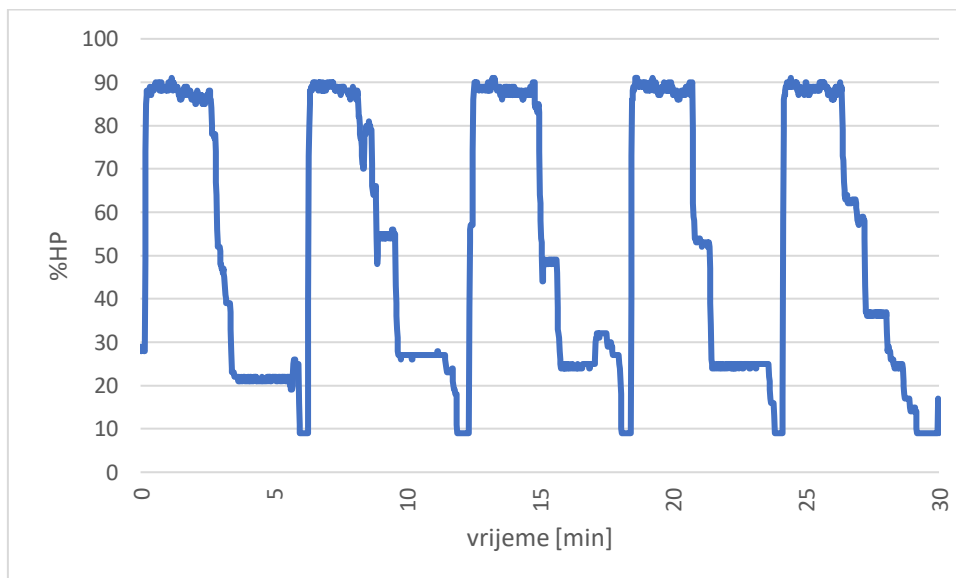
Grafikon 8. Vertikalni profil Letu 2

Promjena brzine vrtnje motora i postavke nominalne snage motora se može vidjeti na grafikonima 9. i 10. Kod polijetanja i penjanja u svih 5 slučajeva iščitava se vrijednosti brzine okretaja motora koje variraju od 2400 do 2500 RPM-a, koja daju 85-90% nominalnu snagu motora. Tijekom horizontalnog

leta vidljiva je vrijednost brzine okretaja motora od 1500 RPM-a i snage od 20 do 30%, što odgovara propisanim postavkama motora u školskom krugu od strane HZNS-a. Prije samog slijetanja dolazi do malih varijacija u brzini okretaja motora, što je normalno jer pilot njome korigira visinu zrakoplova ukoliko je nizak ili visok u prilazu.



Grafikon 9. Vrijednosti brzine vrtnje motora Leta 2

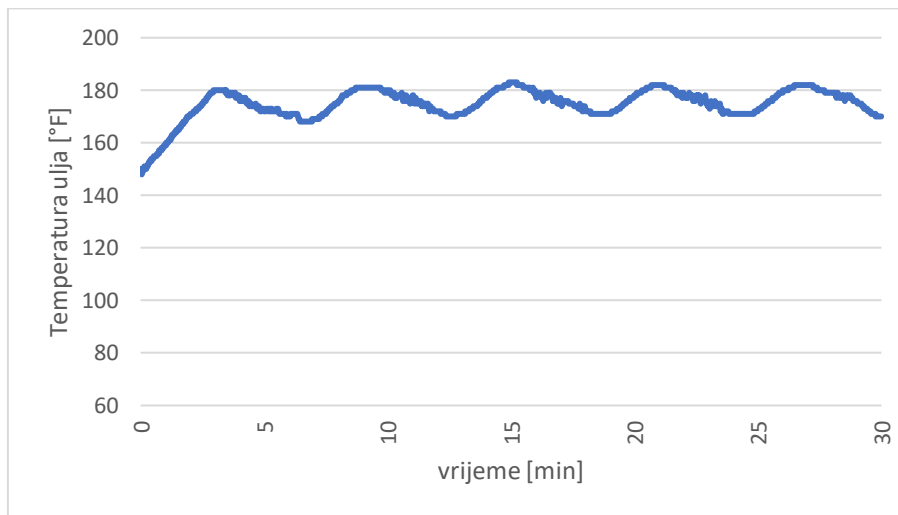


Grafikon 10. Vrijednosti postavke nominalne snage motora tijekom Leta 2

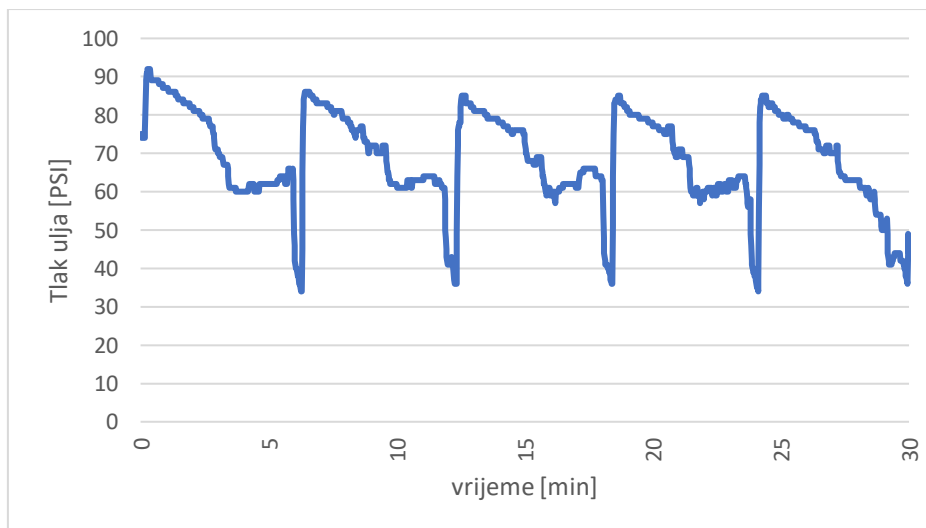
Vrijednosti temperature ulja i tlaka ulja vidljive su na grafikonima 11. i 12. Iz njih je vidljivo kako su se vrijednosti tijekom leta nalazile u dopuštenim granicama proizvođača zrakoplova. Temperatura se od

početka polijetanja do slijetanja kretala od 150 do 180 °F, dok se tlak ulja kretao od 60 do 85 PSI. Iznimke su faze slijetanja u kojima se snaga motora oduzimala do pozicije praznog hoda.

Kako je ovaj letio bio prvi na zrakoplovu toga dana, ulje se moralo dodatno zagrijati kako bi postiglo svoju radnu temperaturu za normalan rad motora. Vrijednost ulja na početku paljenja motora je bila 70 °F što je 30 °F manje od dopuštene vrijednosti. Ovaj podatak se ne može vidjeti na grafu jer su vrijednosti na grafovima uzete netom prije polijetanja kada je ulje već bilo u dopuštenim granicama.



Grafikon 11. Vrijednosti temperature ulja tijekom Leta 2



Grafikon 12. Vrijednosti tlaka ulja tijekom Leta 2

U grafikonima 13. i 14. prikazane su promjene vrijednosti CHT-a i EGT-a tijekom leta. Kako se svaki cilindar mjeri posebno, naznačeni su oznakama C1, C2, C3 i C4 na grafikonu. S grafikona se uočava

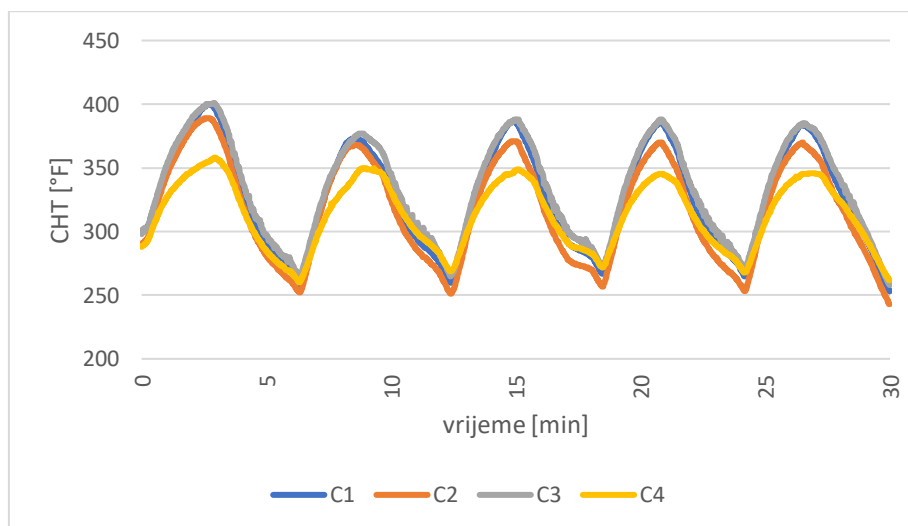
normalan trend dinamičkog rasta i pada temperature glave cilindra zbog promjene postavke snage letenja u kratkim vremenskim intervalima. Vrijednosti CHT-a se kreću od 250 do 400 °F.

Kod vrijednosti EGT-a uočava se nagli pad i rast temperature kod uzlijetanja i penjanja, ali i u trenucima slijetanja kad je ručica snage stavljena na prazan hod motora te vrijednost EGT-a dosegne vrijednost od 750 do 900 °F. Postupna promjena EGT-a je uočljiva kod prelaska zrakoplova iz režima penjanja sve do trenutka oduzimanja snage motora, a vrijednosti se kreću od 1500 do 1200 °F.

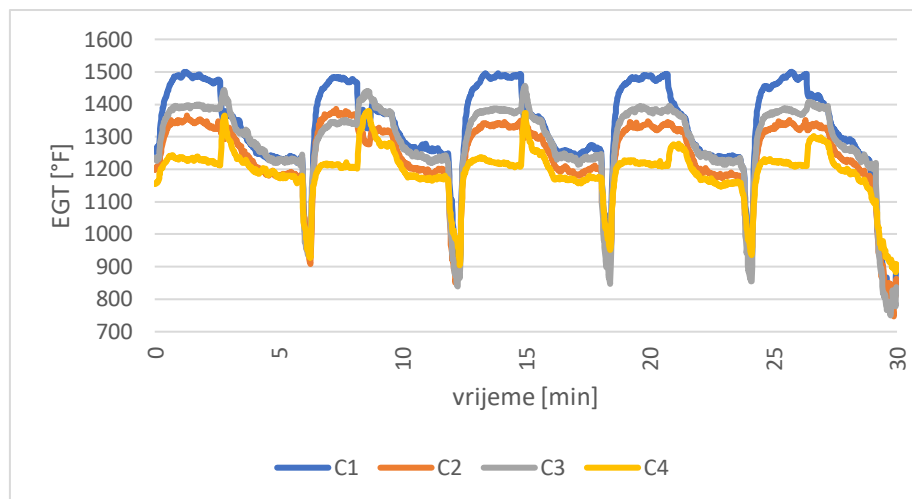
Iz grafikona se vidi kako su vrijednosti CHT-a kod cilindra 1 i 3 veće nego kod cilindra 2 i 4. Razlog tome je udaljenost pojedinog cilindra od rasplinjača zbog koje svaki cilindar dobiva različitu bogatu smjesu i položaja naspram otvora za hlađenje zrakom zbog kojeg zrak opstrujava i samim time hladi više pojedine cilindre. [11]

Razlog udaljenosti rasplinjača od cilindra je također jedan od razlog zbog različitih vrijednosti EGT-a. Kako jedan rasplinjač priprema smjesu za 4 cilindra, svaki dobije različitu smjesu goriva i zraka te su temperatura ispušnih plinova automatski različitih vrijednosti. Ako su razlike u temperaturama znatno veće, mogući su drugi problemi kao neisprana svjećica ili ispušni ventil [11]

Kako je ovo bio prvi let tog dana vrijednost CHT-a kod startanja motora bila je jednaka vanjskoj temperaturi zraka a iznosila je 70 °F za svaki cilindar. Podatak se ne može primjetiti na grafikonu jer podaci prikazuju vrijednosti netom prije polijetanja.



Grafikon 13. Vrijednosti CHT-a tijekom Leta 2



Grafikon 14. Vrijednosti EGT-a tijekom Leta 2

5.3 Let 3 - Vježba 30

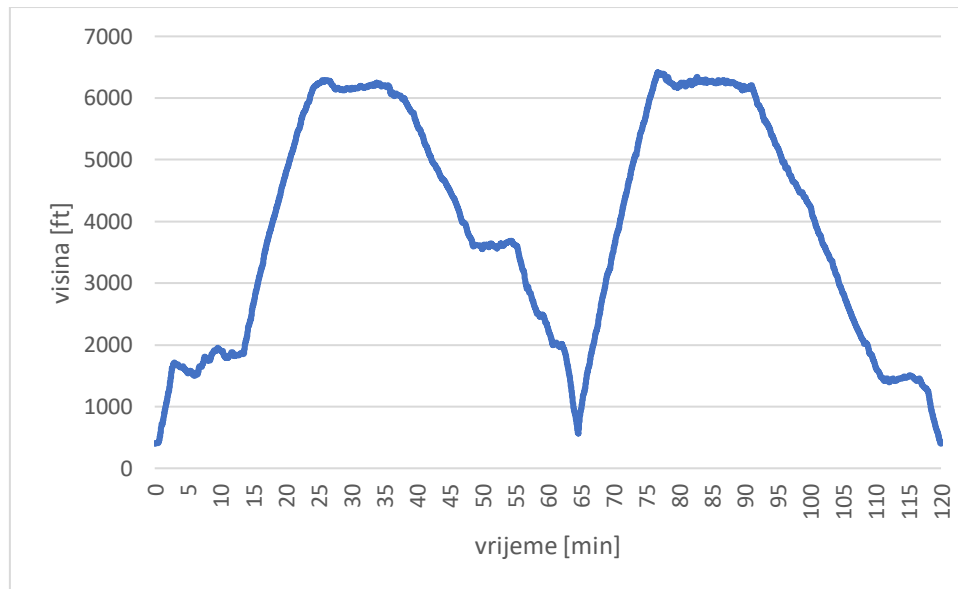
Treći snimljeni let je odrađen 20.08.2021 godine. Za razliku od prva dva leta koja su odrađena u CTR Lučko, kod trećeg leta su se također slijetanje i polijetanje odvijali na aerodromu Lučko, ali cilj ove vježbe je bila IFR ruta koja je odrađena do Međunarodne zračne luke Banja Luka, gdje je napravljen jedan prilaz. Podaci o samom letu se nalaze u tablici ispod.

Tablica 7. Osnovni podaci leta vježbe 30

Nadmorska visina aerodroma Lučko	405 ft
Duljina piste aerodroma Lučko	850 m
Nadmorska visina Zračne luke Banja Luka	401 ft
Duljina piste Zračne luke Banja Luka	2500 m
Temperatura vanjskog zraka na aerodromu Lučko	26 °C
Temperatura vanjskog zraka na visini krstarenja	10 °C
Temperatura zraka na Zračnoj luci Banja luka	26 °C
Masa zrakoplova pri polijetanju	2080 lbs
Vrijeme polijetanja	14:20 UTC
Vrijeme slijetanja	16:30 UTC
Broj slijetanja i prilaza	2

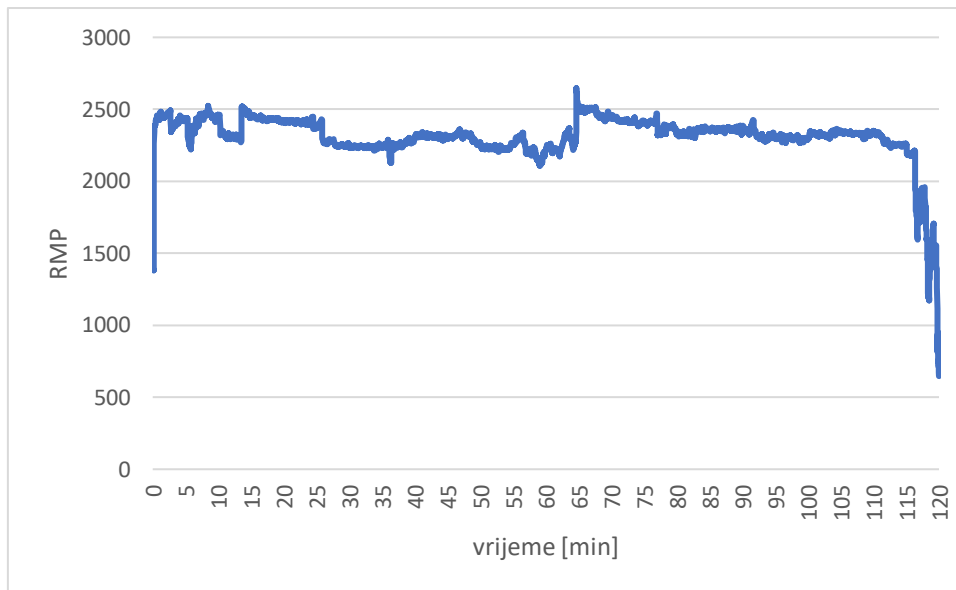
Početak različitih faza se može vidjeti na Grafikonu 15. koji prikazuje vertikalni profil leta. Podaci su snimljeni netom prije polijetanja pa se na grafu ne mogu vidjeti podaci za vrijeme taksiranja te provjere

motora. Faza polijetanja traje do 4. minute kada zrakoplov dolazi do visine od 1500 ft. U 15. minuti počinje faza penjanja do visine od 6200 ft koja se dostiže u 20. minuti te zrakoplov prelazi u horizontalni let. Početak spuštanja zrakoplova za početak prilaz na zračnoj luci Banja luka počinje u 40. minuti. Nakon završene prilazne procedure i procedure neuspjelog prilaza, zrakoplov prati odlaznu proceduru i penje se na visinu od 6200 ft. Povratno krstarenje je trajalo 20 minuta te je započeta faza spuštanja i samo slijetanje na aerodrom Lučko

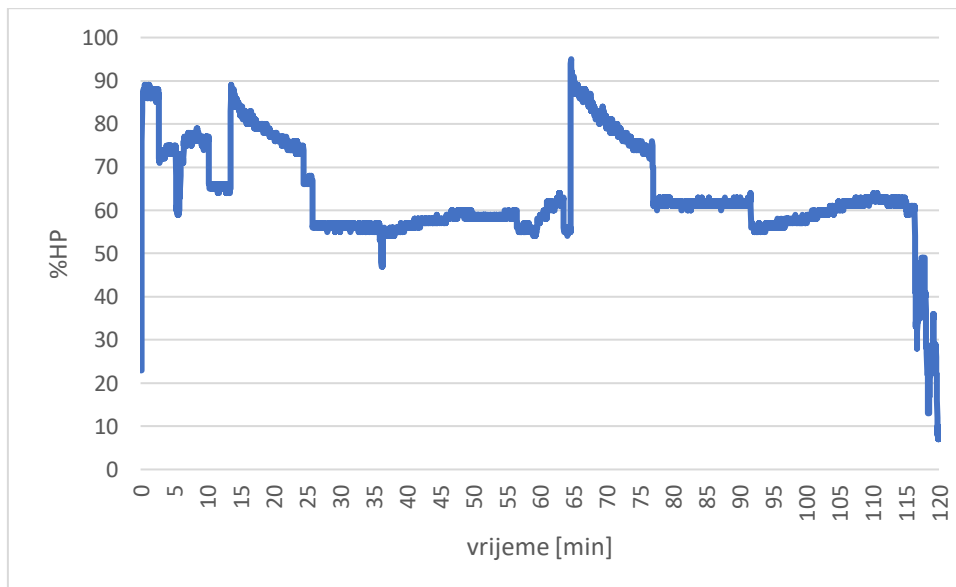


Grafikon 15. Vertikalni profil Leta 3

Na grafikonima 16. i 17. vidljive su promjene brzine vrtnje motora i nominalne snage motora tijekom leta. U fazi polijetanja brzina vrtnje zrakoplova motora iznosi 2500 RPM čime se dobiva 90% snage motora. Kod faze penjanja zrakoplov također ima brzinu vrtnje motora, kao i kod polijetanja, ali zbog povećanje visine zrakoplov daje snagu od 80 do 90%. U režimu krstarenja brzina vrtnje se kreće oko 2250 RPM što daje snagu oko 60%. U ovom slučaju kod režima spuštanja, vrijednost brzine vrtnje je ista kao i kod krstarenja, a posljedica toga je veća brzina zrakoplova.

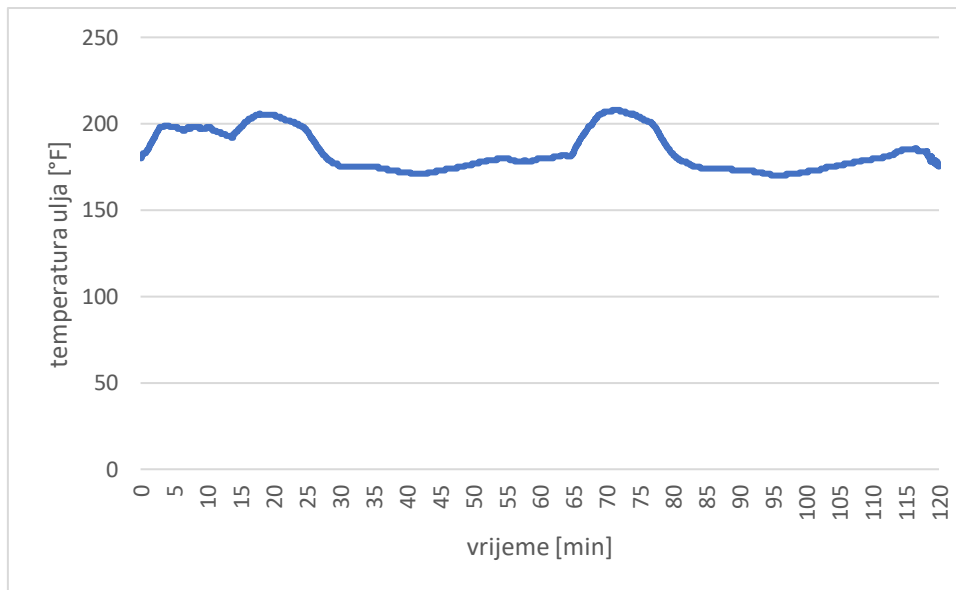


Grafikon 16. Vrijednosti brzine vrtnje motora tijekom Leta 3

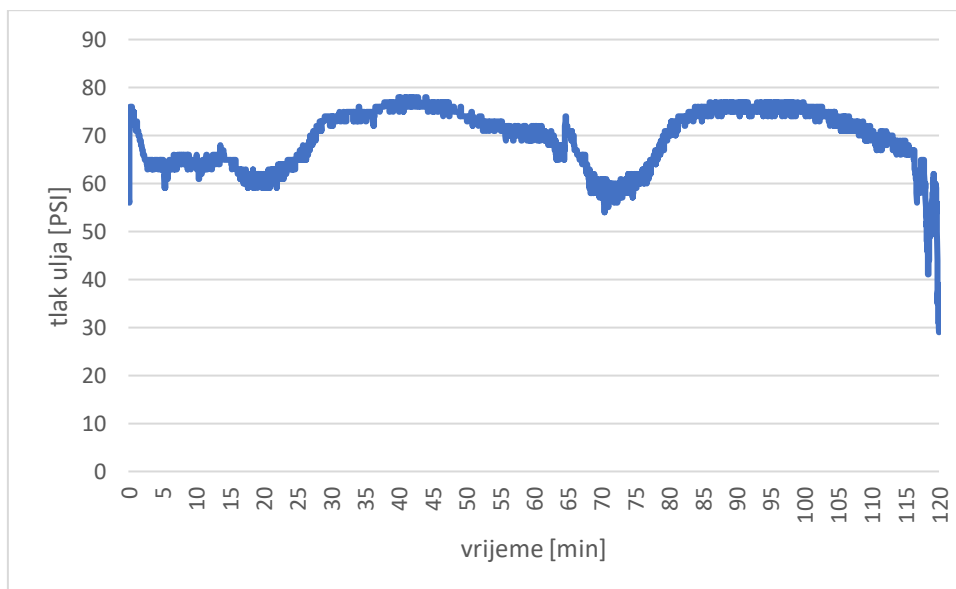


Grafikon 17. vrijednosti snage motora tijekom Leta 3

Vrijednosti temperature ulja i tlaka ulja vidljive su na grafikonima 11 i 12. Tijekom ovog leta vrijednosti temperature ulja se kreću od 170 do 210 °F što je prema uputama proizvođača u dopuštenim granicama. Tlak ulja se također tijekom leta kreće u vrijednosti od 55 do 80 PSI što je u dopuštenim granicama. Vrijednost ispod 50 PSI dostiže se pri slijetanju na aerodrom Lučko kada pilot skroz oduzima snagu zrakoplova.



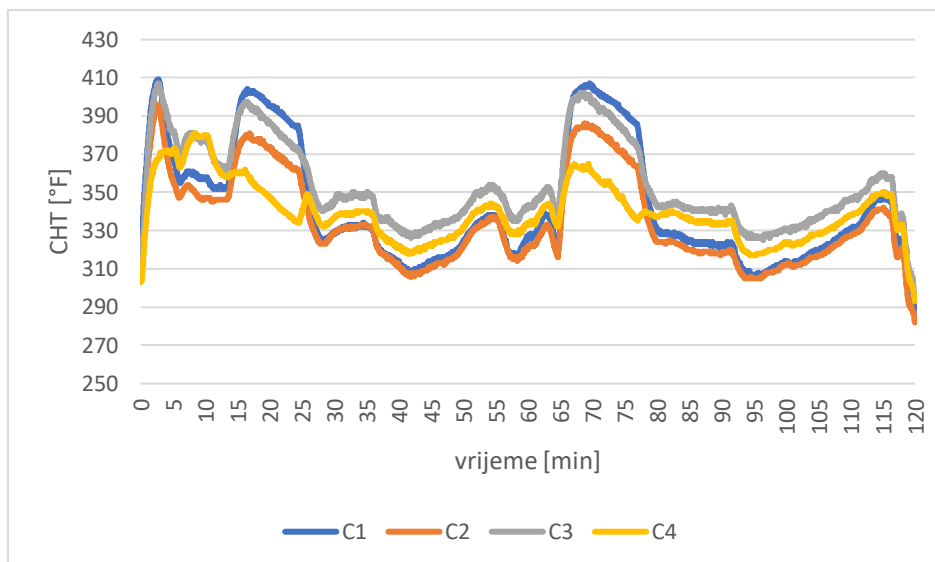
Grafikon 18. Vrijednosti temperature ulja tijekom Leta 3



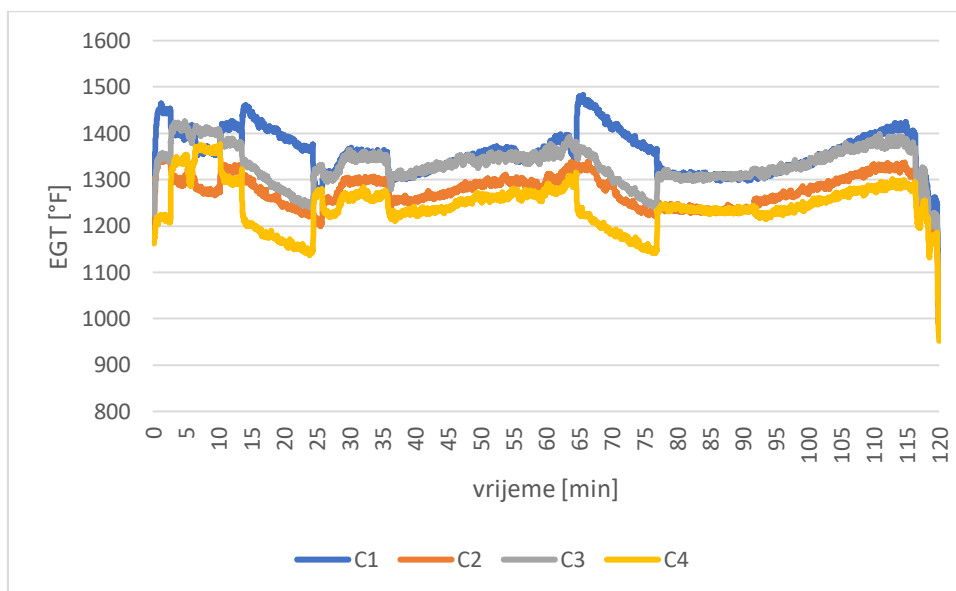
Grafikon 19. Vrijednosti tlaka ulja tijekom Leta 3

Na grafikonima 20. i 21. prikazana je promjena vrijednosti parametara CHT-a i EGT-a. Pri polijetanju vrijednosti CHT-a se kreću od 310 do 410 °F, dok se u fazi penjanja kreću od 370 do 410 °F. U fazi krstarenja vrijednosti su manje pa se kreću od 310 do 350 °F, a u fazi spuštanja su vrijednosti iste kao u fazi krstarenja zbog iste brzine vrtnje motora.

Vrijednosti EGT-a kod polijetanja imaju nagli skok s 1200 na 1450 °F, a u fazi penjanja one se kreću od 1150 do 1450 °F. Nakon prelaska zrakoplova u režim krstarenja, vrijednosti se kreću od 1250 do 1350 °F, dok se režimu spuštanja one kreću od 1200 do 1400 °F. Važno je naznačiti da su ove vrijednosti uzete za kretanje temperatura svih cilindara, a da vrijednosti za svaki cilindar variraju u različitim fazama do maksimalnih 100 °F.



Grafikon 20. Vrijednosti CHT-a tijekom Leta 3



Grafikon 21. Vrijednosti EGT-a tijekom Leta 3

U grafikonima CHT-a i EGT-a kod režima penjanja vidi se blagi pad u vrijednosti temperatura što je neuobičajeno jer se koristi maksimalna snaga zrakoplova. No kako se sam let izvodio na visini od 6200 ft, na kojoj je gustoća zraka znatno manja nego na površini, blagi pad nije neočekivan jer smjesa goriva i zraka postaje bogatija pa se energija troši na izbacivanje neizgorenog goriva. Temperatura okolnog zraka iznosila 10 °C, što je 16 °C manje od temperature na aerodromima. To je još jedan faktor zašto je došlo do smanjenja temperatura jer je zrak koji je bio zadužen za hlađenje dijelova motora bio hladniji nego na površini.

U fazi slijetanja se vidi blagi porast temperature s obzirom kod faze krstarenja. Razlog tome je održavanje iste brzine vrtnje motora u oba režima leta, a razlika je što kod faze spuštanja zrakoplov je

snižavao visinu i time se gustoća zraka i temperatura zraka povećala što je dovelo do rasta CHT-a i EGT-a.

5.4 Razlike snimljenih letova

Usporedbom podataka u 3 različita leta u kojem su se izvodile drugačije vježbe uočavamo veliku razliku u izmjenjenim parametrima u različitim vremenskim intervalima.

U grafovima koji su prikazivali vertikalni profil letova vidljiva je velika razlika u samom izgledu i trajanju leta. Let 1 i 2 nemaju velikih razlika jer su se letovi odvijali u CTR-u Lučko. Maksimalna visina za Let 1 bila je 2500 ft, za Let 2 1800 ft, dok je maksimalna visina na Letu 3 iznosila 6200 ft.

Kod postavki brzine vrtnje motora i nominalne snage motora se mogu vidjeti razlike u svim letovima. U Letu 1 vide se nagli neperiodični skokovi brzine vrtnje i snage motora koji su odgovarali vježbama u pilotažnoj zoni. Tako se može vidjeti ukupno 7 skokova u 15 minuta, dok se u Letu 2 vidi 5 periodičnih oscilacija u vrijednostima parametara koji su odgovarali izvođenju školskim krugovima u trajanju od 30 minuta. U Letu 3 nema velikih oscilacija kao i u prethodnim letovima zbog izvođenja same vježbe u kojoj svaka faza traje po 25 minuta te je svaka promjena parametara blaga. Jedini nagli skokovi su bili u fazi polijetanja i slijetanja.

Tlak i temperatura ulja su se u svim letovima nalazili u granicama propisanim od strane proizvođača. Tlak ulja je imao veće oscilacije u prva dva leta nego u trećem zbog većeg broja postavljanja snage motora u prazan hod, dok je temperatura ulja blago pratila režime motora. U Letu 3 se vidi veći porast temperature nego u prva dva zbog dužeg leta zrakoplova s velikim brojem okretaja motora.

Vrijednosti CHT-a i EGT-a prati isti trend kao i kod ostalih parametara u svakom letu zrakoplova. U prvom letu vrijednosti CHT-a nemaju velike skokove kao EGT zbog vježbi u pilotažnoj zoni, dok u drugom letu obje vrijednosti imaju periodične oscilacije koje prate režime motora pri izvođenju vježbe školskih krugova. Kod Leta 3 se jasnije vide vrijednosti zavisno o kojem režimu se radi zbog već spomenutog dužeg trajanja rada motora u određenom režimu.

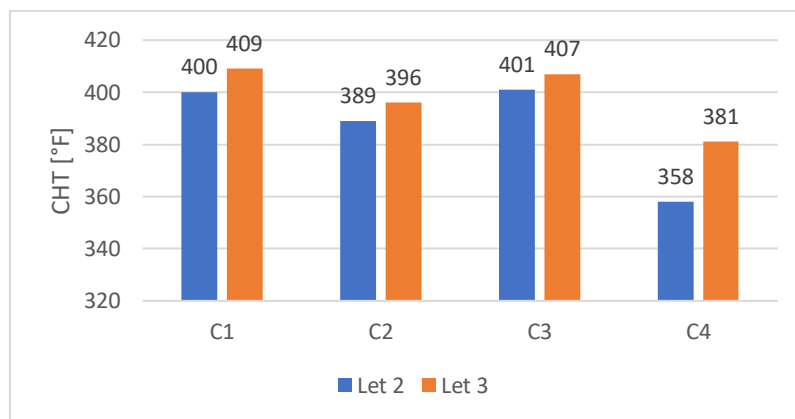
5.5 Analiza parametara u različitim režimima letenja

Kako bi se bolje približila razlika između letova u početnoj fazi i rutnoj fazi, prikazat će se razlika u vrijednosti parametara motora u letovima 2. i 3. Ova dva leta su uzeta za usporedbu jer se kod njih letovi mogu raspodijeliti na različite režime (penjanje, horizontalni let i spuštanje), dok se kod Leta 1 zbog rada zrakoplova u pilotažnoj zoni takva podjela teško uočljiva. Dva parametara koja će se gledati su temperatura glave cilindra i brzina vrtnje motora.

Temperatura glave cilindra (CHT) je važan pokazatelj stanja motora. Preko ovog parametar može se zaključiti koliko je veliko opterećenje motora tj. cilindra motora. Ukoliko je cilindar opterećen velikim temperaturnim vrijednostima te brzim promjenama temperature, tada može doći do mikropuknuća materijala koji se s vremenom sve više povećava te može uzrokovati puknućem cilindra. [1]

Maksimalnu temperaturu glave cilindra određuje proizvođač zrakoplova, a ona iznosi 435 °F prilikom uporabe maksimalne snage i 400 °F prilikom ekonomičnog leta. [2]

U grafikonu 22. i 23. prikazane su razlike maksimalnih i minimalnih temperatura za svaki cilindar posebno od početka polijetanja. Iz Grafikona 22. vidi se kretanje razlike u temperaturi kod prva tri cilindra do 10 °F, a najveća razlika je kod četvrtog cilindra gdje je iznosi 23 °F. Kod minimalnih temperatura razlike za sva četiri cilindra se kreće od 30 do 40 °F. Razlike između minimalnih i maksimalnih temperatura za svaki let se kreću od 100 do 150 °F.



Grafikon 22. Usporedba maksimalnih vrijednosti CHT-a između Leta 2 i Leta 3



Grafikon 23. Usporedba minimalnih vrijednosti CHT-a između Leta 2 i Leta 3

U grafikonu 24. prikazane su prosječne vrijednosti CHT-a kako bi bolje bila vidljiva sama razlika kroz letenje zrakoplova. Razlike prosječnih temperatura se kreću oko 20 °F, a razlog je različite postavke zrakoplova i dužina trajanja postavljenog režima letenja. Let 1 je trajao 30 minuta te se maksimalna

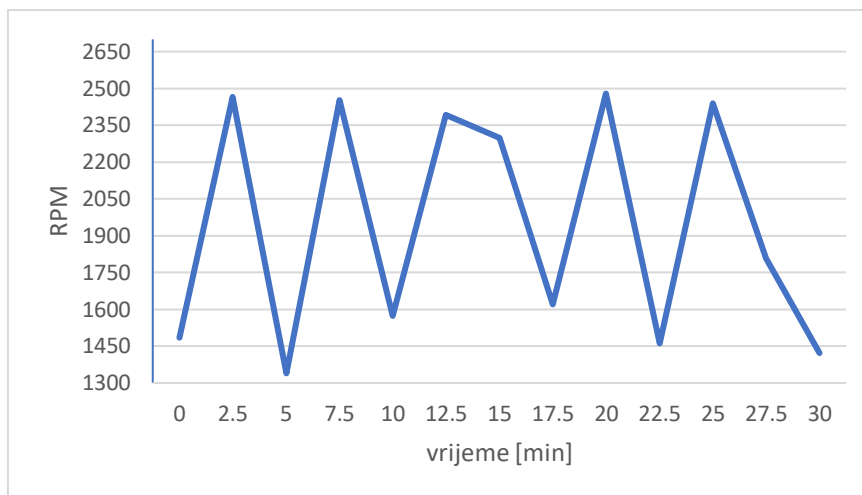
snaga koristila pet puta pri polijetanju i penjanju do 1500 ft, a pri horizontalnom letu brzina vrtnje motora bila je postavljena na 1800 RPM-a. Let 3 trajao je 2 sata te se maksimalna snaga koristila u dva navrata prilikom polijetanja i penjanja na visinu od 6200 ft koje sveukupno trajalo 50 minuta, a prilikom krstarenja i spuštanja brzina vrtnje motora bila je postavljena na oko 2300 RPM-a i trajala je 60 minuta. Grafikoni su samo potvrdili sumnje kako će se mikropuknuća prije pojaviti na dužim letovima pri dužim trajanjima većeg opterećenja motora koji su karakteristični za rutno letenje nego kod kratkih letova koji se izvode u početku obuke.



Grafikon 24. Usporedba prosječnih vrijednosti CHT-a između Leta 2 i Leta 3

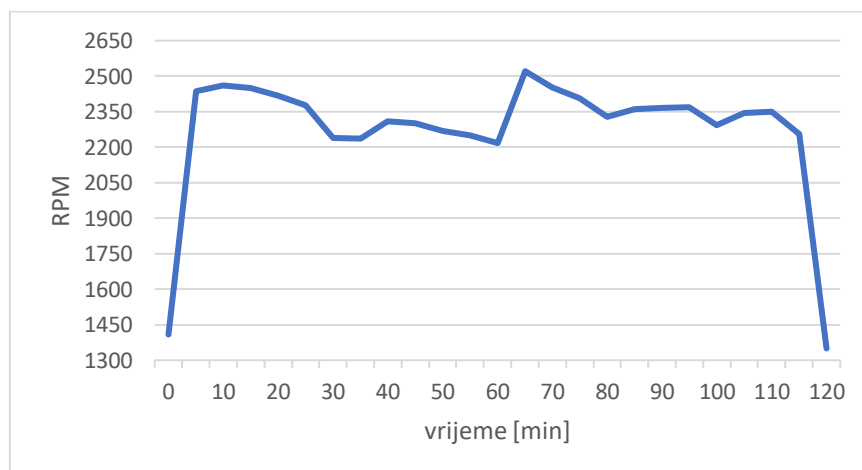
Brzina vrtnje motora je također bitan faktor koji pokazuje opterećenost zrakoplova, ali određuje kretanje drugih vrijednosti parametara.

U Grafikonu 25. prikazane su vrijednosti brzine vrtnje motora tijekom leta za Let 2. Ovaj graf se razlikuje od prethodnog (poglavlje 5.1, Grafikon 2.) zbog manjeg broja unosa vrijednosti. Pomoću grafikona se vidi oscilacije između minimalne brzine vrtnje motora od 1300 RPM-a do maskimlanih vrijednosti od 2500 RPM-a. Tijekom izvođenja leta brzina vrtnje motora prelazi iz minimalnih u maksimalne vrijednosti i obratno, svake 2 minute i 30 sekundi. Takvih promjena u ovom letu je bilo 10 što prikazuje kolika su velika opterećenja na zrakoplov u kratkom vremenu prilikom izvođenja ovakvih i sličnih vježba.



Grafikon 25. Promjena brzine vrtnje motora tijekom Leta 2

Tijekom izvođenja Leta 3 nije bilo veći broj naglih promjena vrijednosti brzine vrtnje motora. Jedine velike promjene su prilikom polijetanja i slijetanja zrakoplova što je se vidi na Grafikonu 26. Vrijednosti brzine vrtnje motora su se kretale od 2200 do 2500 RPM-a u vremenskom periodu od 100 minuta.



Grafikon 26 Promjena brzine vrtnje motora tijekom Leta 3

Zaključak

Tijekom pilotskog osposobljavanja vidljivo je kako zrakoplov radi u različitim režimima tijekom izvođenja vježbi.

Kod snimljenih podataka Leta 1, gdje se izvodila Vježba 4, vidi se da od početka rada zrakoplova u pilotažnoj zoni dolazi do velikih oscilacija u izmjerenim parametrima, pa tako je brzina vrtnje motora oscilirala od 1000 do 1500 RPM-a 7 puta u periodu od 15 minuta. Kako brzina vrtnje motora oscilirala tako su je pratili i ostali parametri kao što su CHT i EGT. Promjene CHT-a su varirale oko 100 °F razlike između maksimalnih i minimalnih vrijednosti za svaki cilindar posebno, dok su promjene EGT-a varirale oko 300 °F razlike od minimalnih i maksimalnih vrijednosti za pojedini cilindar.

Tijekom izvedbe Leta 2, gdje se provodila Vježba 5, također je dolazilo do većih oscilacija izmjerenih parametara, ali može se primijetiti kako su bile periodične za razliku do Leta 1. Također je razlika što je do promjene vrijednosti dolazilo sveukupno 5 puta u periodu od 30 minuta. Brzina vrtnje motora se mijenjala od minimalne do maksimalne vrijednosti kao i u Letu 1, ali se prilikom horizontalnog leta brzina bila postavljena na 1500 RPM-a. Vrijednosti CHT-a varirale su oko 150 °F razlike između minimalnih i maksimalnih vrijednosti, dok su vrijednosti EGT-a oscilirale oko 400 °F razlike.

Kod snimljenih podataka Leta 3, gdje se izvodila Vježba 30, nema većih oscilacija parametara u kratkom vremenskom roku jer je let trajao 2 sata, a režimi leta su samim time bili dužeg vremenskog trajanja. Brzina vrtnje motora je većim dijelom bila u rasponu od 2200 do 2500 RPM-a, dok su ostale vrijednosti pratile trendove režima zrakoplova. Razlike maksimalnih i minimalnih vrijednosti CHT-a nije bila veća od 30 °F za određenu fazu letenja, razlike vrijednosti EGT-a su iznosile oko 100 °F.

Prema pokazanoj analizi letova provedenih tijekom različitih faza školovanja, pokazuje se kako početni dio pilotske obuke stvara velike promijene tijekom rada zrakoplovnog motora. Prilikom izvođenja letova u početnoj fazi motor mora biti u odličnom stanju kako bi se izbjegle abnormalne situacije rada motora prilikom izvođenja naglih promjena vrijednosti snage motora. Kod druge faze rutnih letova nagle promjene u radu motora nisu uočene. Najznačajniji problem koji je uočen je kod dugog režima penjanja gdje dolazi do povećanje temperature ulja i glave cilindra blizu dopuštenih granica. Također kod režima spuštanja dolazi do povećanje temperature u svim parametrima ukoliko ne dođe do smanjenja vrijednosti brzine vrtnje motora.

Ugradnjom uređaja EDM 900 zaduženog za praćenje parametara rada motora, može se poboljšati način održavanja zrakoplovnog motora te samim time je i veća mogućnost produženja resursa do obnove motora. Uređaj također može pomoći pilotu analizirati vrijednosti bitnih parametara tijekom leta i pomoći mu uočiti faze leta gdje su parametri bili blizu prelaska optimalnih granica proizvođača kako bi se sljedeći letovi poboljšali zbog ekonomičnosti i boljem očuvanju zrakoplovnog motora. Također

prilikom održavanja, mehaničari mogu dobiti jasniju sliku stanja motora te samim time lakše uočiti i riješiti moguće probleme.

Za detaljniju analizu rada motora tijekom osposobljavanja pilota potrebno je snimanje više letova kako bi se vidjeli trendovi te izračunale prosječne vrijednosti parametara. Za potrebe ovog rada podaci motora su snimljeni iz jednog leta za svaku vježbu što je bilo dovoljno za ispunjavanje zadatka prikazivanja razlike rada motora tijekom pilotskog osposobljavanja.

Popis literature

- [1] Bazijanac E. Zrakoplovni klipni motori. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2005.
- [2] Pilot's operating handbook Cessna 172N originalno izdanje, revizija 1, siječanj 1977
- [3] Kvesić P. Osnove aerodinamike. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [4] Operato's manual Lycoming, 2nd Edition, Williamsport, Pennsylvania, 2007
- [5] FAA Approved Instalation Manual for the EDM 900 nd EDM 930. Preuzeto sa: https://www.jp instruments.com/wp-content/uploads/2012/08/Install908-Primary_REV-L-9-20-2020-JFP.pdf [Pristupljeno: srpanj 2021.]
- [6] Pilots Guide, EDM 900. Preuzeto sa: <https://www.jp instruments.com/wp-content/uploads/2012/08/PG-EDM-900-Primary-REV-B-02-01-2016-pls-jfp.pdf> [Pristupljeno: srpanj 2021.]
- [7] HZNS-integrated ATP(A) training programme. Preuzeto sa: https://www.fpz.unizg.hr/zan/wp-content/uploads/2020/09/HZNS-M-3_Int_ATPA_Issue4_Rev5_signed.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2021.]
- [8] ICAO Annex 2. Rules of the air Preuzeto sa: https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/an02_cons%5B1%5D.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2021.]
- [9] Savy Analysis. Preuzeto sa: <https://resources.savvyaviation.com/understanding-cht-and-egt-2/> [Pristupljeno: kolovoz 2021.].
- [10] Postupci i razrada elemenata programa praktičnog školovanja na avionu u vizualnom letenju. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 1999.
- [11] Miljković D. Detecting aircraft piston engine problems by analysis of engine parameters. International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Opatija, 2019

Popis slika

Slika 1. Skica koncepcije klipnog motora s označenim dijelovima [1]	3
Slika 2. Radni ciklus četverotaktnog motora [1]	4
Slika 3. Kokpit zrakoplova 9A-DMB	6

Slika 4. Dijagram performansi motora [4]	8
Slika 5. Izgled uređaja EDM 900 [5]	10
Slika 6. Horizontalni izgled i dijelovi prikaznika [6]	11
Slika 7. Izgled horizontalnog prikaznika [6]	12
Slika 8. Izgled vertikalnog prikaznika [6]	13
Slika 9. Raspored i nazivi glavnih tipki [6]	14
Slika 10. Ovisnost EGT-a, CHT-a, snage motora i specifične potrošnje goriva o smjesi [4]	18
Slika 11. Školski krug Cessne 172N i standardni postupci [10]	19

Popis tablica

Tablica 1. Tehničke karakteristike zrakoplova Cessna 172N [2]	6
Tablica 2. Eksploatacijske karakteristike Cessne 172N [2]	7
Tablica 3. Prijevod dijelova prikaznika	12
Tablica 4. Vizualni uvjeti letenja [8]	16
Tablica 5. Osnovni podaci aerodroma i leta	22
Tablica 6. Osnovni podaci o Letu 2.	27
Tablica 7. Osnovni podaci leta vježbe 30	31

Popis grafikona

Grafikon 1. Vertikalni profil Leta 1	23
Grafikon 2. Brzina vrtnje tijekom Leta 1	24
Grafikon 3. Snaga motora tijekom Leta 1	24
Grafikon 4. Temperatura ulja tijekom Leta 1	25
Grafikon 5. Tlak ulja tijekom Leta 1	25
Grafikon 6. Vrijednosti CHT-a tijekom Leta 1	26
Grafikon 7. Vrijednosti EGT-a tijekom Leta 1	26
Grafikon 8. Vertikalni profil Leta 2	27
Grafikon 9. Vrijednosti brzine vrtnje motora Leta 2	28
Grafikon 10. Vrijednosti postavke nominalne snage motora tijekom Leta 2	28
Grafikon 11. Vrijednosti temperature ulja tijekom Leta 2	29
Grafikon 12. Vrijednosti tlaka ulja tijekom Leta 2	29
Grafikon 13. Vrijednosti CHT-a tijekom Leta 2	30
Grafikon 14. Vrijednosti EGT-a tijekom Leta 2	31
Grafikon 15. Vertikalni profil Leta 3	32
Grafikon 16. Vrijednosti brzine vrtnje motora tijekom Leta 3	33
Grafikon 17. vrijednosti snage motora tijekom Leta 3	33
Grafikon 18. Vrijednosti temperature ulja tijekom Leta 3	34
Grafikon 19. Vrijednosti tlaka ulja tijekom Leta 3	34
Grafikon 20. Vrijednosti CHT-a tijekom Leta 3	35
Grafikon 21. Vrijednosti EGT-a tijekom Leta 3	35
Grafikon 22. Usporedba maksimalnih vrijednosti CHT-a između Leta 2 i Leta 3	37
Grafikon 23. Usporedba minimalnih vrijednosti CHT-a između Leta 2 i Leta 3	37
Grafikon 24. Usporedba prosječnih vrijednosti CHT-a između Leta 2 i Leta 3	38

Grafikon 25. Promjena brzine vrtnje motora tijekom Leta 2	39
Grafikon 26 Promjena brzine vrtnje motora tijekom Leta 3	39



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 Režimi rada zrakoplovnog klipnog motora tijekom osposobljavanja pilota

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 6.9.2021

Student/ica:

Bianca Mustenić

(potpis)