

# Parametriziranje upravljačke jedinice motora s unutarnjim izgaranjem primjenom virtualnog motora

---

**Matejčić, Bruno**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:669018>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-10**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Bruno Matejčić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Momir Sjerić

Student:

Bruno Matejčić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru Doc. dr. sc. Momiru Sjeriću na svojoj pomoći pruženoj u izradi ovog završnog rada, posebno na kontinuiranom navođenju rješavanja problema.

Zahvaljujem se roditeljima Tamari i Nenadu Matejčiću na iskazanoj financijskoj i moralnoj podršci tijekom cijelog preddiplomskog studija.

Bruno Matejčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Bruno Matejčić** Mat. br.: 0035204777

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Parametriziranje upravljačke jedinice motora s unutarnjim izgaranjem primjenom virtualnog motora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of engine ECU by using virtual engine**

Opis zadatka:

Simulacije radnog ciklusa motora s unutarnjim izgaranjem sve su važniji alat u razvoju motora s unutarnjim izgaranjem. Ove simulacije omogućuju proračun termodinamičkih procesa u cijelom motoru te izračun značajki rada motora kao što su snaga, moment, potrošnja goriva itd. u ranoj fazi razvoja. Pored toga, simulacije radnog ciklusa mogu biti koristan alat pri određivanju parametara upravljačkog računala motora. U ovom radu potrebno je provesti kalibraciju upravljanja trenutkom preskakanja iskre na svjećici te duljine trajanja ubrizgavanja primjenom modela motora pripremljenog u programu AVL Boost™.

U radu je stoga potrebno:

- Odabrati suvremeni Ottov motor i za isti napraviti simulacijski model u programu AVL Boost™. Podesiti model tako da daje približne značajke rada onima koje su dostupne za taj motor.
- Na model dodati upravljačku jedinicu koja upravlja trenutkom preskakanja iskre na svjećici i duljinom trajanja ubrizgavanja u ovisnosti o brzini vrtnje i opterećenju motora te primjenom stacionarnih radnih točaka odrediti mape u upravljačkoj jedinici uz kriterij minimalne potrošnje i održavanja faktora pretička zraka jednakim jedan.
- S tako definiranim modelom provesti simulacije u nestacionarnom (promjenjivom) režimu rada.
- Analizirati odstupanje značajki rada motora u nestacionarnom režimu u odnosu na stacionarne radne točke.
- Prikazati rezultate i izvesti zaključke.

Pri izradi se treba pridržavati pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:  
1. rok: 18. veljače 2021.  
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.  
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.  
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.  
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

*M. Sjerić*

Doc. dr. sc. Momir Sjerić

Predsjednik Povjerenstva:

*V. Soldo*

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
KRATICE.....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. UKRATKO O MOTORIMA S UNUTARNJIM IZGARANJEM.....	2
2.1. Procesi u motorima .....	2
2.1.1. Idealni procesi .....	2
2.1.2. Realni procesi.....	2
2.2. Vanjske karakteristike motora .....	3
2.3. Izgaranje u Ottovom motoru .....	5
2.3.1. Kut prepaljenja i početak izgaranja.....	5
2.3.2. Trajanje izgaranja.....	6
3. ODABRAN MOTOR I SIMULACIJSKI MODEL .....	7
3.1. Značajke motora.....	7
3.2. Simulacijski model.....	8
3.2.1. Dvozonski Vibeov model izgaranja.....	9
3.2.2. Početna kalibracija simulacijskog modela .....	10
3.2.3. Simulacija djelomičnih opterećenja .....	11
3.3. Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje .....	13
4. MAPE UPRAVLJAČKE JEDINICE MOTORA .....	14
4.1. Upravljačka jedinica motora .....	14
4.2. Način određivanja stacionarnih radnih točaka .....	14
4.2.1. Detonantno izgaranje .....	15
4.2.2. Utjecaj detonantnog izgaranja na odabir stacionarnih radnih točaka .....	17
4.2.3. Određivanje stacionarnih radnih točaka kod djelomičnih opterećenja .....	18
4.3. Dodavanje upravljačke jedinice motora na simulacijski model.....	18
4.4. Mape upravljačke jedinice motora .....	19
5. NESTACIONARNI REŽIMI RADA.....	22
5.1. WLTP vozni ciklus .....	22
5.1.1. Klasa 3 voznog ciklusa [8].....	23
5.2. Podaci o vozilu.....	24
5.2.1. Otpor zraka.....	26
5.2.2. Otpor kotrljanja .....	27
5.2.3. Otpor ubrzanja .....	27
5.2.4. Ukupni otpori vožnje .....	28
5.3. Dodavanje elementa vozila u simulacijski model.....	29

---

6. Odstupanja značajki rada motora u nestacionarnom režimu u odnosu na stacionarne radne točke.....	30
6.1. Odstupanje specifične efektivne potrošnje goriva .....	31
6.2. Odstupanje specifične indicirane potrošnje goriva .....	32
6.3. Odstupanje najviše temperature izgaranja .....	32
6.4. Odstupanje najvišeg tlaka izgaranja.....	33
6.5. Razlozi odstupanja nestacionarnih radnih točaka .....	34
7. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36
PRILOZI.....	37

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Lijevo: Indikatorski dijagram; Desno: zajednički prikaz indikatorskog dijagrama i dijagrama idealnog procesa [1] .....	3
Slika 2.	Dijagram vanjske karakteristike motora [1] .....	4
Slika 3.	Primjer topografskog dijagrama specifične efektivne potrošnje za proizvoljni motor .....	5
Slika 4.	Dijagram tlaka u cilindru [1] .....	6
Slika 5.	Ford 1.5 16V Zetec [3] .....	7
Slika 6.	Simulacijski model .....	8
Slika 7.	Usporedba efektivne snage.....	10
Slika 8.	Usporedba efektivnog momenta.....	11
Slika 9.	Konvergencija kuta zaklopke .....	12
Slika 10.	Konvergencija srednjeg efektivnog tlaka .....	12
Slika 11.	Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva .....	13
Slika 12.	Utjecaj početka izgaranja na specifičnu efektivnu potrošnju goriva i oktanski broj .....	15
Slika 13.	Profil tlaka u cilindru prilikom normalnog izgaranja[1] .....	16
Slika 14.	Dijagram specifične efektivne potrošnje goriva i oktanskog broja u ovisnosti o početku izgaranja, pri punom opterećenju i brzini vrtnje 5000 min <sup>-1</sup> .....	18
Slika 15.	Simulacijski model sa dodanom upravljačkom jedinicom.....	19
Slika 16.	Topografski dijagram početka izgaranja u ovisnosti o opterećenju i brzini vrtnje.....	20
Slika 17.	Topografski dijagram početka ubrizgavanja u ovisnosti o opterećenju i brzini vrtnje.....	20
Slika 18.	Topografski dijagram trajanja ubrizgavanja u ovisnosti o opterećenju i brzini vrtnje.....	21
Slika 19.	WLTP vozni ciklus za vozila klase 3 [8] .....	23
Slika 20.	Ford Focus [3] .....	25
Slika 21.	Dijagram faktora rotirajućih masa[9] .....	28
Slika 22.	Simulacijski model sa dodanim elementom vozila .....	29
Slika 23.	Usporedba zadane brzine vožnje i ostvarene brzine vožnje.....	30
Slika 24.	Usporedba specifične efektivne potrošnje goriva .....	31
Slika 25.	Usporedba specifične indicirane potrošnje goriva .....	32
Slika 26.	Usporedba najviše temperature izgaranja.....	33
Slika 27.	Usporedba najvišeg tlaka izgaranja .....	33
Slika 28.	Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva sa ucrtanim promatranim radnim točkama i odstupanjima.....	34



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Podaci motora [3] .....	7
Tablica 2. Vrijednosti srednjeg efektivnog tlaka [bar] u ovisnosti o opterećenju i brzini vrtnje .....	11
Tablica 3. Karakteristike svakog dijela [8] .....	24
Tablica 4. Značajke vozila [3] .....	25
Tablica 5. Vrijednosti faktora rotirajućih masa za pojedine stupnjeve prijenosa .....	28
Tablica 6. Radne točke odabrane za analizu odstupanja .....	31

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$m^2$	Čeona površina vozila
$a$	$m/s^2$	Ubrzanje vozila
$a_{max}$	$m/s^2$	Najveće ubrzanje vozila
$a_{min}$	$m/s^2$	Najmanje ubrzanje vozila
$c_w$	-	Faktor otpora zraka
$D$	mm	Promjer klipa
$d_{i,v}$	mm	Promjer ispušnih ventila
$d_{u,v}$	mm	Promjer usisnih ventila
$F_a$	N	Sila otpora ubrzanja
$F_k$	N	Sila otpora kotrljanja
$F_z$	N	Sila otpora zraka
$f_k$	-	Faktor otpora kotrljanja
$g$	$m/s^2$	Ubrzanje gravitacije
$g_e$	g/kWh	Specifična efektivna potrošnja goriva
$g_i$	g/kWh	Specifična indicirana potrošnja goriva
$H$	mm	Hod klipa
$h$	J/kg	Specifična entalpija
$I_P$	°KV	Početak ubrizgavanja
$I_K$	°KV	Kraj ubrizgavanja
$i_{m,1}$	-	Prijenosni omjer 1. brzine
$i_{m,2}$	-	Prijenosni omjer 2. brzine
$i_{m,3}$	-	Prijenosni omjer 3. brzine
$i_{m,4}$	-	Prijenosni omjer 4. brzine
$i_{m,5}$	-	Prijenosni omjer 5. brzine
$i_{or}$	-	Prijenosni omjer diferencijala
$k_{m,i}$	-	Faktor rotirajućih masa
$l$	mm	Duljina klipnjače
$M_e$	Nm	Efektivni moment motora
$m_{G,h}$	l/h	Satna potrošnja goriva
$m_v$	kg	Masa vozila
$n_{i,v}$	-	Broj ispušnih ventila po cilindru
$n_{u,v}$	-	Broj usisnih ventila po cilindru
$n_{min}$	$min^{-1}$	Brzina vrtnje praznog hoda
$P_e$	kW	Efektivna snaga
$P_i$	kW	Indicirana snaga
$p_e$	bar	Srednji efektivni tlak izgaranja
$p_c$	bar	Tlak u cilindru

---

$r_d$	m	Dinamički radijus kotača
$Q_1$	J	Dovedena toplina
$Q_2$	J	Odvedena toplina
$Q_W$	J	Toplina pretvorena u rad
$Q_F$	J	Toplina odvedena iz sustava
$T$	-	Broj taktova
$s$	m	Prijeđeni put
$t_{uk}$	s	Ukupno vrijeme vožnje
$t_z$	s	Vrijeme zaustavljanja
$U_z$	-	Udio zaustavljanja
$u$	J/kg	Specifična unutarnja energija
$v$	km/h	Brzina vožnje
$v_{max}$	km/h	Najveća brzina vožnje
$v_{sr,bz}$	km/h	Prosječna brzina vožnje bez zaustavljanja
$v_{sr,z}$	km/h	Prosječna brzina vožnje sa zaustavljanjima
$V$	cm <sup>3</sup>	Volumen radne tvari
$V_H$	cm <sup>3</sup>	Radni volumen
$W_i$	J	Indicirani rad
$\alpha$	°	Kut koljenastog vratila
$\varepsilon$	-	Kompresijski omjer
$\eta_e$	-	Efektivni stupanj djelovanja
$\rho_g$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća goriva
$\rho_z$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća zraka

**KRATICE**

BMEP	Srednji efektivni tlak izgaranja ( <i>eng. Brake Mean Effective Pressure</i> )
C1-C4	Cilindar ( <i>eng. Cylinder</i> )
CL1	Filter zraka ( <i>eng. Air Cleaner</i> )
CAT1	Katalizator ( <i>eng. Catalyst</i> )
PL1-PL3	Volumenski prostor ( <i>eng. Plenum</i> )
OB	Oktanski broj ( <i>eng. Octane Number</i> )
I1-I4	Brizgaljke ( <i>eng. Injector</i> )
TH1	Zaklopka snage ( <i>eng. Throttle</i> )
DMT	Donja mrtva točka
GMT	Gornja mrtva točka
SB	Granica sustava ( <i>eng. System Boundary</i> )
ECU	Upravljačka jedinica ( <i>eng. Engine Control Unit</i> )
NEDC	Vozni ciklus ( <i>eng. New European Driving Cycle</i> )
WLTP	Vozni ciklus ( <i>eng. World Harmonized Light-duty vehicles Test Procedure</i> )
V1	Element vozila ( <i>eng. Vehicle</i> )

## **SAŽETAK**

U ovom završnom radu provedeno je parametriziranje upravljačke jedinice motora s unutarnjim izgaranjem, s ciljem određivanja najmanje specifične efektivne potrošnje goriva. Odabrani motor simuliran je u programskom paketu AVL BOOST™. Simulirano je puno područje rada od najmanje do najveće brzine vrtnje, te od punog opterećenja do 5% djelomičnog opterećenja. Zatim su korištenjem stacionarnih radnih točaka određene mape upravljačke jedinice. Odabrani su parametri početka izgaranja i duljine trajanja ubrizgavanja goriva, pazeći pritom da motor ne radi u detonantnom području. Radna smjesa je stehiometrijska u cijelom području rada osim pri punom opterećenju. Na model je dodana upravljačka jedinica, te su u nju učitane mape koje definiraju početak izgaranja i duljinu trajanja ubrizgavanja u ovisnosti o brzini vrtnje i opterećenju motora.. S tako definiranim modelom provedene su simulacije u nestacionarnim uvjetima rada. Za to je odabran dio standardiziranog voznog ciklusa WLTP. Zatim su uspoređeni rezultati dobiveni u stacionarnim uvjetima sa onim dobivenim u promjenjivim uvjetima rada.

Ključne riječi: Upravljačka jedinica motora, AVL BOOST™, specifična efektivna potrošnja goriva, vozni ciklus.

**SUMMARY**

This paper conducts the calibration of internal combustion engine control unit with the goal of determining the lowest brake-specific fuel consumption.

The chosen engine has been simulated using the AVL BOOST™ program package. This includes simulations of the whole operation range from lowest to highest rotation speed along with a full to partial 5% engine load.

Control unit maps were determined using stationary operating points. Chosen parameters were the start of combustion and injection duration while making sure there is no engine knock.

Stoichiometric air to fuel ratio was used throughout the whole operation range, except with a full engine load. A control unit was added to the model and the maps were loaded into it.

This defined model was used to conduct a series of simulations in a non-stationary environment using the standardized WLTP drive cycle.

The results obtained from the stationary were compared to those in the non-stationary environment.

Key words: Engine control unit, AVL BOOST™, Brake specific fuel consumption, drive cycle.

## 1. UVOD

U posljednje vrijeme automobilska industrija suočava se sa sve većim pritiskom smanjenja emisija ispušnih plinova, poboljšavanja stupnja djelovanja motora i smanjenja potrošnje goriva. Kako bi zadovoljili stroge zakone potrebno je prilagoditi motor da radi s najvećom mogućom efikasnošću u svim režimima rada. Parametre rada motora poput faktora pretička zraka, trenutka preskakanja iskre na svjećici, duljine trajanja ubrizgavanja, kompresijskog omjera, trenutke i visinu podizaja ventila, duljine usisnih kanala motora, količine ispušnih plinova u usisu, te mnoge druge potrebno je prilagoditi za cjelokupno radno područje motora. Uz to je potrebno da motor razvija i zadovoljavajuću snagu i moment. Proces parametriziranja je najčešće vrlo dugotrajan i skup. Kako bi taj proces bio što uspješnije i jeftinije proveden, koriste se simulacije radnog ciklusa motora s unutarnjim izgaranjem. Nakon uspješno provedenog parametriziranja, parametri se pohranjuju u radne mape i koriste se kao setovi instrukcija za rad motora. Upravljačka jedinica motora (eng. *ECU*) čita te mape i prema njima izvršava naredbe. Na upravljačku jedinicu su spojeni brojni senzori poput senzora masenog protoka zraka na usisu, senzora pozicije zaklopke usisa, lambda senzora, senzora detonantnog izgaranja, senzora temperature i dr. Prema informacijama dobivenih iz senzora i radnim mapama, upravljačka jedinica dodatno prilagođava promjenjive parametre kako bi rad bio još efikasniji. Zato parametri dobiveni parametriziranjem u stacionarnim radnim uvjetima mogu odstupati od onih korištenim u stvarnim, nestacionarnim uvjetima.

U ovom završnom radu biti će provedena parametrizacija upravljačke jedinice motora s unutarnjim izgaranjem primjenom virtualnog motora. Korišteni parametri biti će kut prepaljenja i duljina ubrizgavanja goriva. Parametriziranje će biti provedeno s ciljem smanjenja specifične efektivne potrošnje goriva. Nakon toga će se usporediti ponašanje u stacionarnim i nestacionarnim radnim uvjetima. Za nestacionarne radne uvjete odabran je standardizirani vozni ciklus. Simulacijski proračun provest će se u programskom paketu AVL BOOST™. Rezultati dobiveni u voznom ciklusu biti će uspoređeni sa stacionarnim radnim točkama.

## 2. UKRATKO O MOTORIMA S UNUTARNJIM IZGARANJEM

U ovom dijelu biti će objašnjeni dijagrami i izrazi korišteni u ostatku završnog rada, te će biti dano kratko objašnjenje rada motora sa unutarnjim izgaranjem.

### 2.1. Procesi u motorima

Procesi u motorima mogu se promatrati se kao [1]:

- idealni procesi,
- realni procesi.

#### 2.1.1. Idealni procesi

To su zamišljeni procesi koji se odvijaju u termodinamičkim zatvorenim sustavima tj. u sustavima kod kojih nema izmjene tvari između motora (sustava) i okoliša .

Idealni procesi se odvijaju uz određene pretpostavke, a to su[1]:

- radna tvar je idealni dvoatomni plin,
- radna tvar u cilindru ne mijenja masu ni sastav,
- izgaranje je potpuno, a proces izgaranja se zamjenjuje dovođenjem topline  $Q_1$ ,
- nema izmjene radne tvari, izmjena se zamjenjuje odvođenjem topline  $Q_2$  na kraju ekspanzije,
- kompresija i ekspanzija su izentropske,
- kompresijski omjer je isti kao i kod stvarnog motora.

Idealni procesi imaju isti oblik bez obzira radi li se o dvotaktnim ili četverotaktnim motorima, jer u idealnim procesima nema izmjene radne tvari. Možemo skicirati dijagram idealnog procesa. Idealni Ottov proces sastoji se od 4 promjene stanja:

- izentropske kompresije (1-2),
- izohornog zagrijavanja (2-3),
- izentropske ekspanzije (3-4),
- izohornog hlađenja (4-1).

#### 2.1.2. Realni procesi

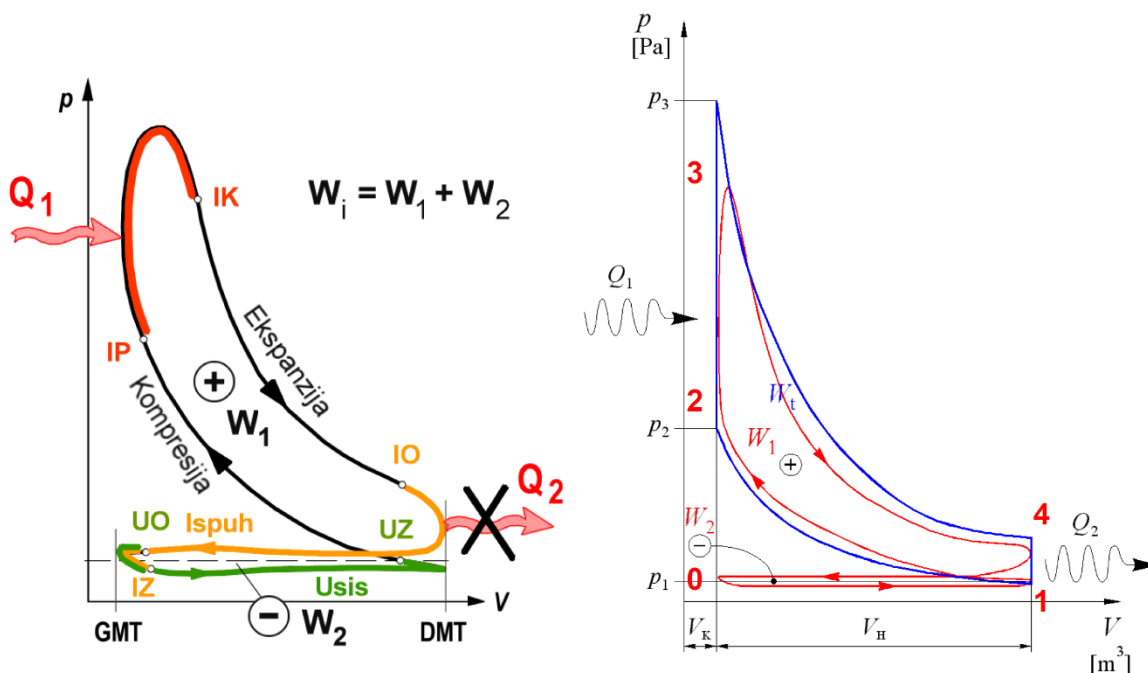
To su procesi koji u većoj ili manjoj mjeri nalikuju stvarnim procesima u motoru, kod kojih postoji izmjena radne tvari između motora i okoliša i kod kojih se motor promatra kao termodinamički otvoreni sustav. Postoji izmjena radnog medija, pa postoji i razlika između četverotaktnog i dvotaktnog procesa. Četverotaktni proces traje dvostruko duže. Izgaranje je



nepotpuno, a energija dovedena gorivo ne dovodi se u potpunosti u obliku toplinske energije radnom mediju. Radna tvar je stvarna tvar i ona se mijenja tokom procesa. Kompresija i ekspanzija nisu izentropske, te se događa izmjena topline između radne tvari i okoline. Vrijeme trajanja procesa značajno utječe na proces. Tijekom procesa se događaju određeni gubici, kao što su npr.:

- Propuštanje zbog nesavršenosti brtvljenja klipa,
- Gubici rada izmjene radnog medija, itd.

Možemo skicirati indikatorski dijagram realnog Ottovog procesa.



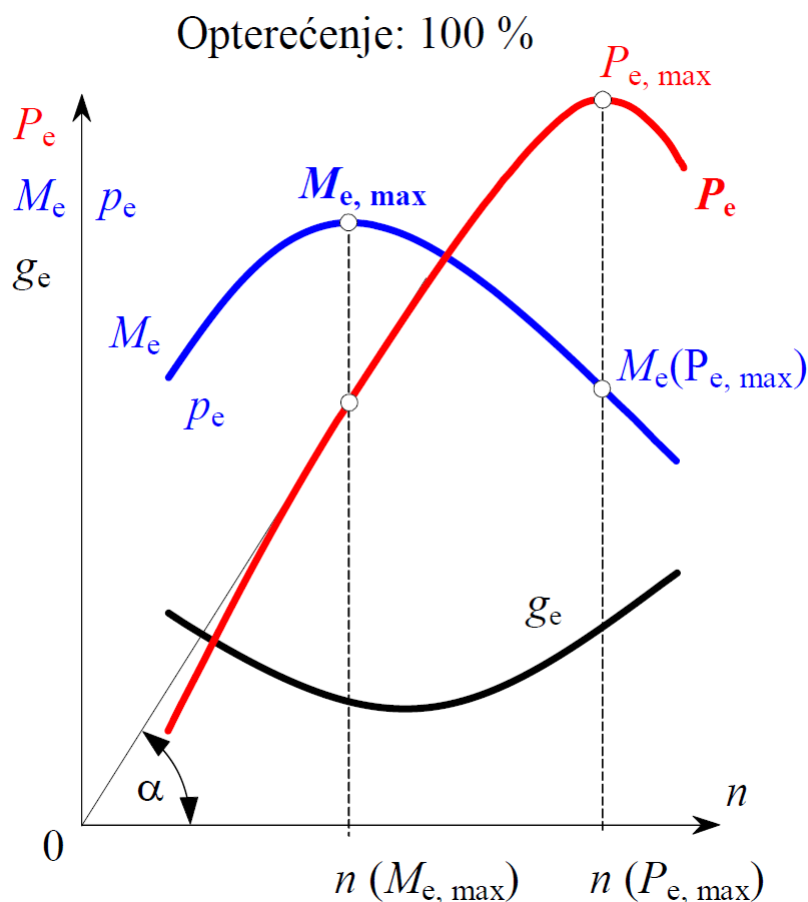
Slika 1. Lijevo: Indikatorski dijagram; Desno: zajednički prikaz indikatorskog dijagrama i dijagrama idealnog procesa [1]

Na slici 1. možemo uočiti da indikatorski dijagram četverotaktnog Ottovog procesa ima dva dijela: visokotlačni dio koji je desnokretan i niskotlačni (dio izmjene radne tvari) dio koji je ljevokretan. Ispuh i usis u indikatorskom dijagramu nisu izobare.

## 2.2. Vanjske karakteristike motora

Motora s unutarnjim izgaranjem proizvode određenu efektivnu snagu pri određenoj brzini vrtnje motora, određeni efektivni moment pri određenoj brzini vrtnje, te za to koriste određenu količinu goriva. Tu karakteristiku je moguće prikazati dijagramom, a ti dijagrami se nazivaju dijagrami vanjskih karakteristika motora. Prikazuju se dijagrami efektivne snage, efektivnog momenta i specifične efektivne potrošnje pri punom opterećenju motora. Ti dijagrami se ne

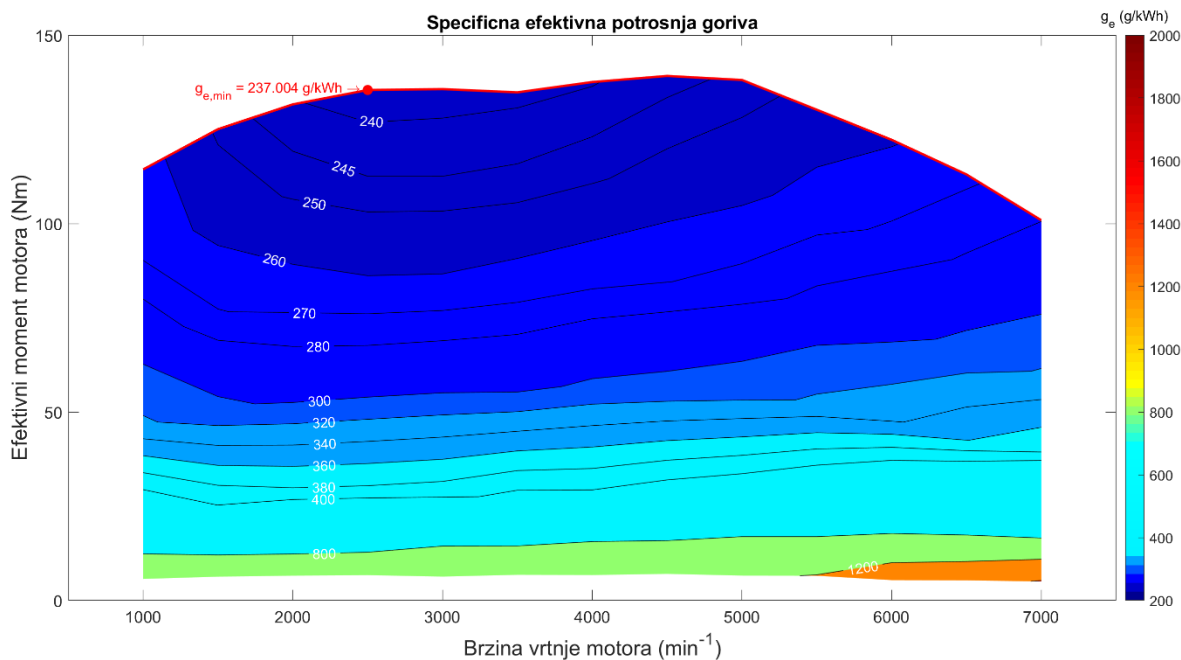
dobivaju računskim putem, nego ispitivanjem motora na kočnici za motore. Izraz „Puno opterećenje“ kod Ottovog motora znači da je zaklopka za snagu potpuno otvorena, a kod Diesellovog motora znači da je ubrizgana maksimalna količina goriva po procesu. Kod oba motora to se postiže pritiskanjem papučice gasa do kraja. Primjer takvog dijagrama moguće je vidjeti na slici 2.



Slika 2. Dijagram vanjske karakteristike motora [1]

U eksploataciji motori ne rade cijeli vijek pod punim opterećenjem, nego većinu svog radnog vijeka provode pod djelomičnim opterećenjem, dakle proizvode manju snagu i moment, te je specifična efektivna potrošnja goriva u tom slučaju najčešće veća. Kako bi mogli prikazati ovisnost specifične efektivne potrošnje goriva o opterećenju motora i brzini vrtnje motora, potreban nam je topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva. Na dijagramu su ucrtane krivulje konstantne specifične efektivne potrošnje goriva. Ukoliko podatak o specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva pomnožimo s efektivnom snagom, dobit ćemo satnu potrošnju goriva. Iz spomenutog dijagrama također možemo vidjeti hoće li potrošnja goriva biti niža promijenimo li prijenosni omjer, te na taj način promijenimo i brzinu vrtnje, traženi

efektivni moment (kako bi nam efektivna snaga ostala ista), te izabiremo (naj)ekonomičniji prijenosni omjer. Primjer takvog dijagrama za proizvoljni motor moguće je vidjeti u slici 3.



**Slika 3. Primjer topografskog dijagrama specifične efektivne potrošnje za proizvoljni motor**  
Dijagram jasno prikazuje da specifična efektivna potrošnja goriva raste ukoliko opterećenje motora pada. Prikazano je samo radno područje pri kojem motor radi sa stehiometrijskom smjesom goriva.

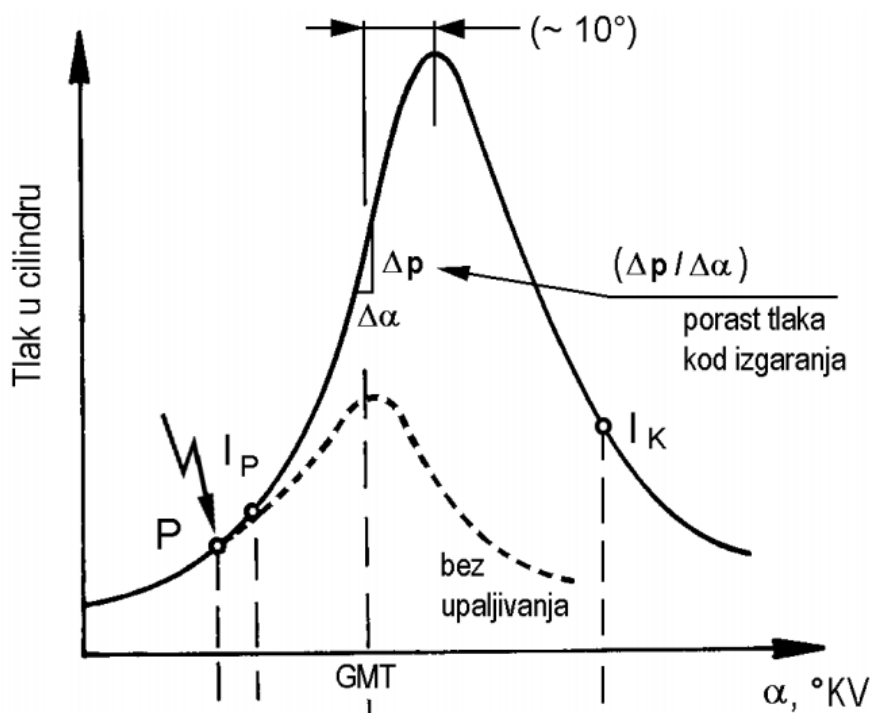
### 2.3. Izgaranje u Ottovom motoru

Izgaranje u Ottovu motoru je vrlo zamršen proces. Postoji puno varijabli koje utječu na izgaranje, a promjenom neke ili više njih značajno se mijenjaju performanse i rad motora,

#### 2.3.1. Kut pretpaljenja i početak izgaranja

Trenutak paljenja vrlo je važna varijabla za učinkovit rad motora. Motor radi najefikasnije kada se vršna vrijednost tlaka u cilindru i težište izgaranja nalaze oko 10 do 15 °KV nakon GMT [2]. Kako bi se to postiglo potrebno je da iskra na svjećici preskoči prije toga. Kut koljenastog vratila u trenutku kada se događa preskakanje iskre na svjećici naziva se kut pretpaljenja. Nakon preskakanja iskre početni rast plamena i tlaka je neprimjetan. Vrijeme proteklo od preskakanja iskre na svjećici do trenutka u kojem se primjećuje promjena krivulje tlaka u odnosu na krivulju tlaka bez izgaranja naziva se zakašnjenje paljenja [1]. Točnije vrijeme proteklo od preskakanja iskre na svjećici do početka izgaranja naziva se zakašnjenje paljenja. Ono se događa jer gorivo mora proći kroz mnoge zamršene kemijske procese prije nego li potpuno izgori, a za to je

potrebno vrijeme. Dakle pri povišenim brzinama vrtnje kut prepaljenja mora biti veći nego pri nižim brzinama vrtnje kako bi kompenzirao zakašnjenje paljenja.



Slika 4. Dijagram tlaka u cilindru [1]

Na slici 4. prikazan je dijagram tlaka u cilindru. Preskakanje iskre na svjećici događa se u točki P, početak izgaranja u točki  $I_P$ , a kraj izgaranja je u točki  $I_K$ . Kut prepaljenja ograničen je pojavom detonantnog izgaranja (biti će kasnije objašnjeno) i efikasnošću motora.

### 2.3.2. Trajanje izgaranja

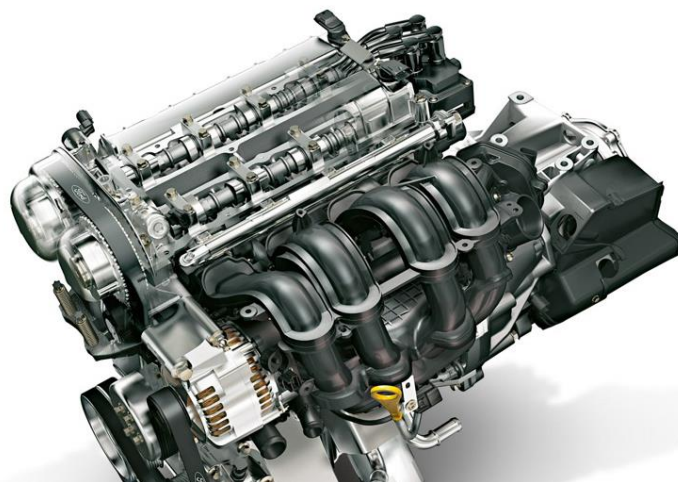
Nakon procesa upaljivanja (stvaranja jezgre plamena) počinje izgaranje. Fronta plamena prelazi i laminarnog u turbulentni, a pri kraju izgaranja događa se samo izgaranje uz stjenke. Brzina širenja plamena ovisi o tlaku i temperaturi (pa samim time i o kompresijskom omjeru), udjelu zaostalih produkata izgaranja, te o stupnju punjenja [1]. Što je veći kompresijski omjer, time je i viša temperatura i viši tlak, pa je time i brzina širenja plamena veća. Povećanjem zaostalih produkata izgaranja smanjuje se brzina širenja plamena, a što je veći stupanj punjenja to je i veća brzina izgaranja. Na brzinu izgaranja utječu i oblik prostora izgaranja, položaj svjećice u cilindru, broj svjećica po cilindru, faktor pretička izgaranja i dr [1].

### 3. ODABRAN MOTOR I SIMULACIJSKI MODEL

U ovom poglavlju biti će definiran korišteni motor, korišteni simulacijski model i model izgaranja. Također će biti provedena početna kalibracija punog opterećenja i simulacija djelomičnih opterećenja.

#### 3.1. Značajke motora

Odabran je motor Ford Sigma-series 1.6 16V Zetec. Koristi ubrizgavanje goriva u usisnu granu i ne koristi prednabijanje. Podaci motora prikazani su u Tablica 1, a motor je prikazan na slici 5.



Slika 5. Ford 1.5 16V Zetec [3]

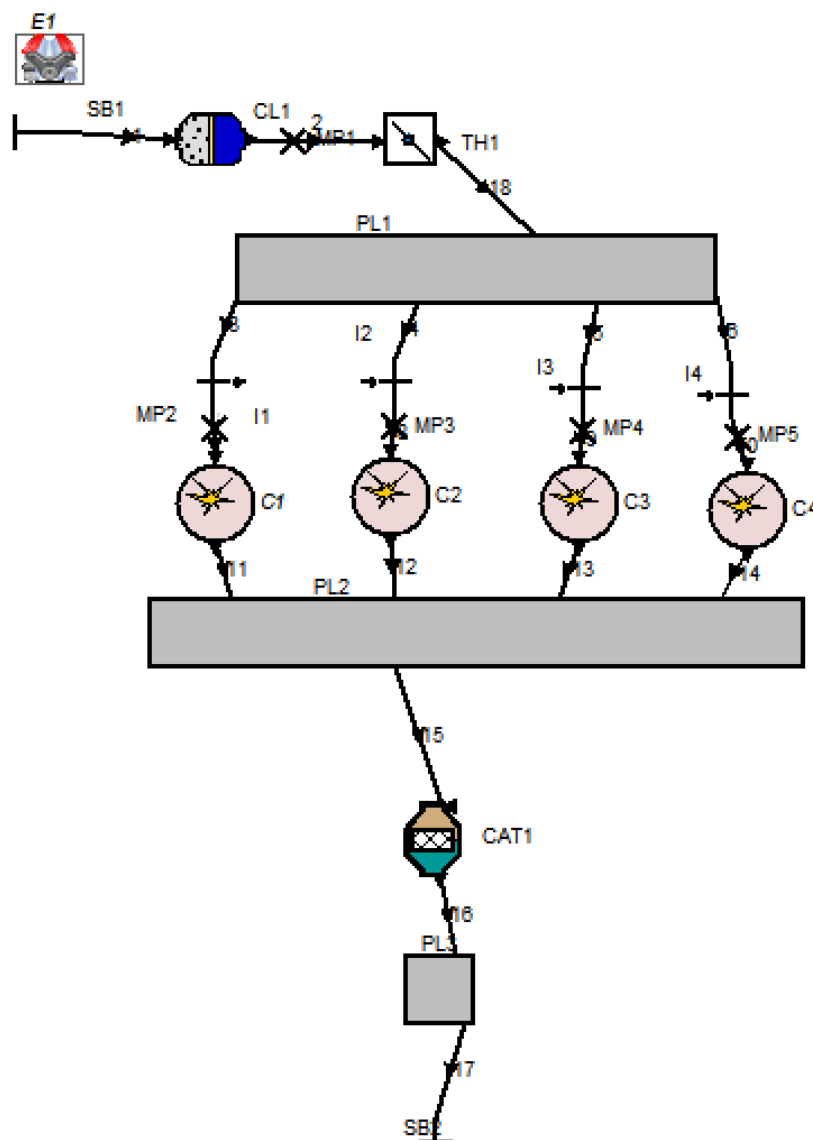
Tablica 1. Podaci motora [3]

Veličina	Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Maksimalna efektivna snaga	$P_{e,max}$	74	kW
Maksimalni efektivni moment	$M_{e,max}$	145	Nm
Radni volumen motora	$V_H$	1596	cm <sup>3</sup>
Broj cilindra	$z$	4	[-]
Promjer klipa	$D$	79	mm
Hod klipa	$H$	81,4	mm
Broj taktova	$T$	4	[-]
Kompresijski omjer	$\varepsilon$	11	[-]
Broj usisnih ventila po cilindru	$n_{u,v}$	2	[-]

<b>Broj ispušnih ventila po cilindru</b>	$n_{i,v}$	2	[-]
<b>Promjer usisnih ventila</b>	$d_{u,v}$	26	mm
<b>Promjer ispušnih ventila</b>	$d_{i,v}$	21	mm

### 3.2. Simulacijski model

U programu AVL BOOST™ izrađen je simulacijski model. Na slici 6. prikazan je simulacijski model.



Slika 6. Simulacijski model

Simulacijski model se sastoji od 4 cilindra (C1-C4), 4 brizgaljke (I1-I4), cijevi (1-18), filtera zraka (CL1), zaklopke usisa (TH1), usisne grane (PL1), ispušne grane (PL2), katalizatora (CAT1) i prigušivača (PL3). Rubni uvjeti (temperatura i tlak) postavljeni su kao sastav standardne atmosfere. Regulacija snage se vrši zaklopkom na usisu.

Simulacijski model koristi vanjsku pripremu gorive smjese, točnije ubrizgavanje goriva u usisnu cijev cilindra. Zato su brizgaljke postavljene po jedna u svakoj usisnoj cijevi cilindra. Ubrizgavanje također može biti kontinuirano i isprekidano (engl. intermittent). Kod kontinuiranog ubrizgavanja gorivo se ubrizgava neovisno o kutu koljenastog vratila i trenutnom taktu motora, ali se intenzitet ubrizgavanja mijenja ovisno o dva prethodno spomenuta parametra. U simulacijskom modelu odabrano je isprekidano ubrizgavanje goriva. Ubrizgavanje se vrši samo u određenim trenucima usisnog takta. Izraz „elektroničko ubrizgavanje goriva“ označava sam po sebi da simulacijski model koristi upravljačku jedinicu motora, koja će kasnije i biti dodana na model.

### 3.2.1. Dvozonski Vibeov model izgaranja

Za model izgaranja odabran je Vibeov dvozonski. Vibeov matematički model se koristi za računanje količine oslobođene topline tokom izgaranja, a time i izgorjele smjese. Radna tvar u cilindru dijeli se u dvije zone: izgorjelu i neizgorjelu zonu. Važno je napomenuti da model računa da izgorjela i neizgorjela zona nemaju istu temperaturu. Prvi zakon termodinamike primijenjen je na izgorjeli i na neizgorjeli dio. Dvozonski Vibeov model naveden je u jednadžbama (1) i (2)[4]:

$$\frac{dm_b u_b}{d\alpha} = -p_c \frac{dV_b}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_{W_b}}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} + h_u \frac{dm_b}{d\alpha} - h_{BB,b} \frac{dm_{BB,b}}{d\alpha}, \quad (1)$$

$$\frac{dm_u u_u}{d\alpha} = -p_c \frac{dV_u}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_{W_u}}{d\alpha} + h_u \frac{dm_B}{d\alpha} - h_{BB,u} \frac{dm_{BB,u}}{d\alpha}. \quad (2)$$

gdje je:  $m$  [kg] – masa smjese,  $u$  [J/kg] – specifična unutarnja energija,  $V$  [m<sup>3</sup>] – volumen smjese,  $\alpha$  [°] – kut koljenastog vratila,  $Q$  [J] – oslobođena toplina,  $h$  [J/kg] – specifična entalpija,  $p_c$  [Pa] – tlak u cilindru, indeks „u“ odnosi na neizgorjelu zonu, a indeks „b“ se odnosi na izgorjelu zonu.

Također promjena volumena mora bit jednaka promjeni volumena cilindra i zbroj volumena mora biti jednak volumenu cilindra kao što je navedeno u jednadžbama (3) i (4) [4]:

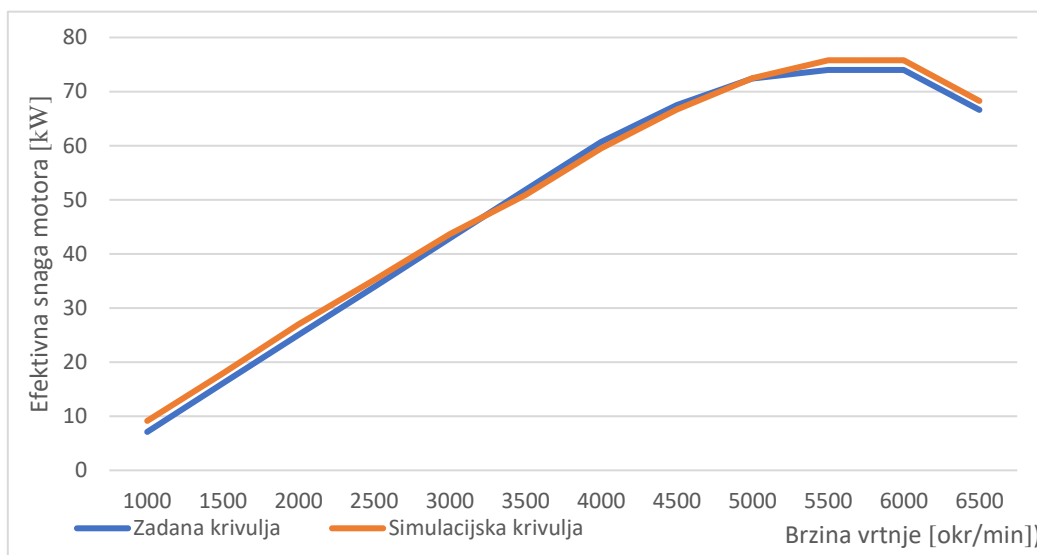
$$\frac{dV_B}{d\alpha} + \frac{dV_u}{d\alpha} = \frac{dV}{d\alpha}, \quad (3)$$

$$V_b + V_u = V. \quad (4)$$

Vibeova funkcija u svakom trenutku računa udio izgorjelog goriva.

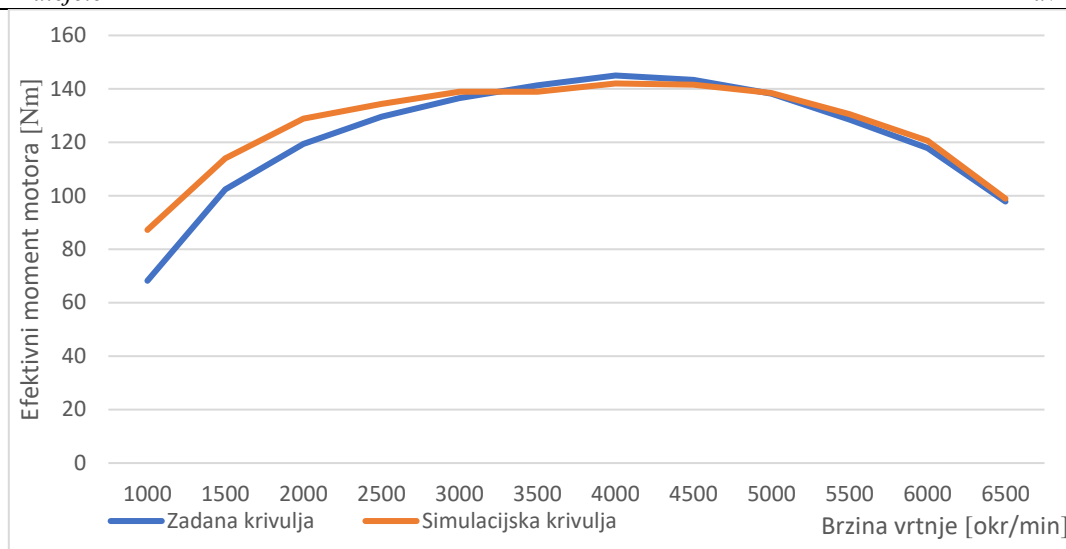
### 3.2.2. Početna kalibracija simulacijskog modela

Simulacijski model je potrebno prilagoditi da daje približne značajke rada onima koje daje stvarni motor. Koristeći dijagram vanjskih karakteristika motora [3] dobivene su tražene vrijednosti s kojima se simulacijski model mora podudarati. Podaci za izradu modela su uzeti od podataka stvarnog motora. Za podatke koji su bili nedostupni su uzete preporučene vrijednosti programskog alata AVL BOOST™ koristeći priručnik [4]. Na slikama 7. i 8. prikazana je usporedba dijagrama vanjskih karakteristika stvarnog motora i simulacijskog modela.



Slika 7. Usporedba efektivne snage





Slika 8. Usporedba efektivnog momenta

### 3.2.3. Simulacija djelomičnih opterećenja

Dobivanje djelomičnih opterećenja vrši se koristeći BMEP Control. Za dobivene vrijednosti srednjeg efektivnog tlaka pri punom opterećenju za određene radne točke, koristeći program Microsoft Excell izrađena je tablica sa potrebnim srednjim efektivnim tlakovima za pojedina opterećenja. Izračunate su vrijednosti za 80%, 60%, 40%, 20% i 5% opterećenje motora.

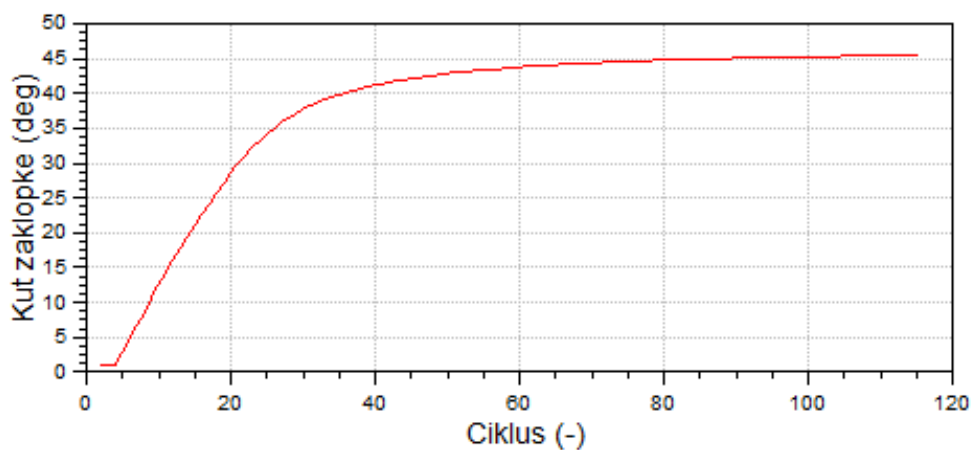
Vrijednosti su prikazane u tablici 2.

**Tablica 2. Vrijednosti srednjeg efektivnog tlaka [bar] u ovisnosti o opterećenju i brzini vrtnje**

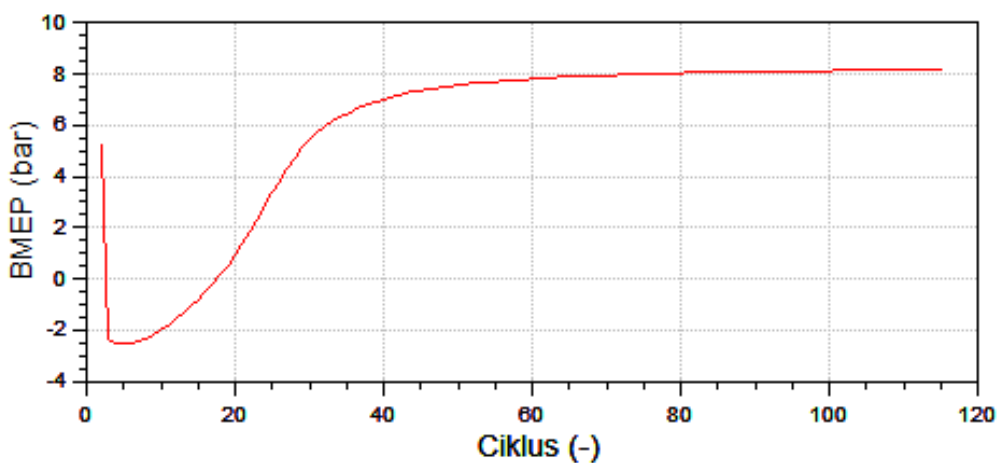
Brzina vrtnje [min <sup>-1</sup> ]	Puno opterećenje	80% punog opterećenja	60% punog opterećenja	40% punog opterećenja	20% punog opterećenja	5% punog opterećenja
1000	9,043	7,235	5,434	3,662	1,831	0,452
1500	9,978	7,983	5,987	3,992	1,996	0,499
2000	10,665	8,532	6,4	4,266	2,132	0,533
2500	10,906	8,725	6,544	4,363	2,181	0,545
3000	10,934	8,75	6,562	4,375	2,188	0,547
3500	10,935	8,748	6,561	4,374	2,187	0,547
4000	11,186	8,949	6,71	4,473	2,237	0,559

4500	11,143	8,915	6,686	4,458	2,229	0,557
5000	10,898	8,719	6,54	4,36	2,18	0,545
5500	10,281	8,225	6,17	4,112	2,06	0,514
6000	9,5	7,599	5,697	3,798	1,9	0,475
6500	8,84	7,072	5,304	3,356	1,77	0,442
7000	8,363	6,291	4,718	3,146	1,573	0,518

Program mijenja položaj zaklopke na usisu, sve dok ne dobije potrebni srednji efektivni tlak. Na slikama 9. i 10. prikazana su primjeri konvergencije rješenja kuta zaklopke i srednjeg efektivnog tlaka izgaranja za slučaj 80% opterećenja i brzine vrtnje od  $5500 \text{ min}^{-1}$ .



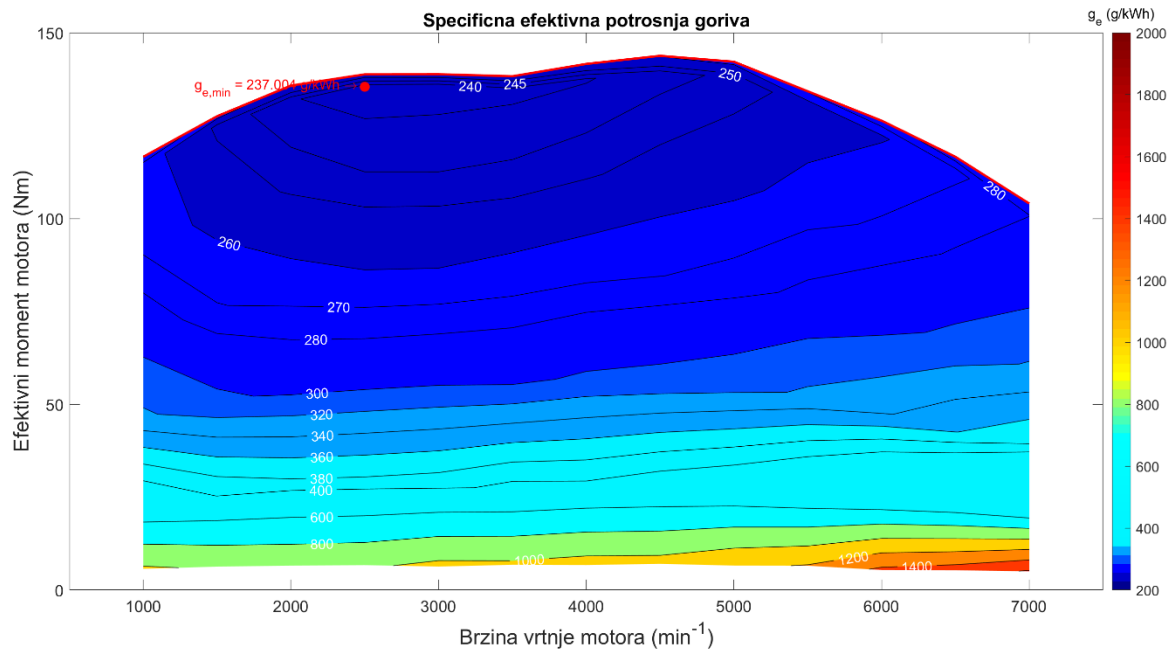
Slika 9. Konvergencija kuta zaklopke



Slika 10. Konvergencija srednjeg efektivnog tlaka

### 3.3. Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje

Nakon provedene kalibracije simulacijskog modela prikazana je specifična efektivna potrošnja goriva.



Slika 11. Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva

## 4. MAPE UPRAVLJAČKE JEDINICE MOTORA

U ovom poglavlju biti će objašnjeni način rada upravljačke jedinice motora, postupak određivanja mapa rada, te potencijalni problemi prilikom određivanja stacionarnih radnih točaka.

### 4.1. Upravljačka jedinica motora

Upravljačka jedinica motora (engl. Engine Control Unit = ECU) kontrolira mnogo parametra rada motora, ali ovaj završni rad promatra sljedeće: ubrizgavanje goriva i vrijeme paljenja svjeće. Upravljačka jedinica određuje položaj koljenastog vratila pomoću senzora položaja radilice tako da se brizgaljke i svjeće aktiviraju u točno određeno vrijeme. Točnije upravlja kutom prepaljenja, kutom početka ubrizgavanja i duljinom trajanja ubrizgavanja, koristeći predefinirane mape. Na taj način kontrolira omjer goriva i zraka u smjesi, brzinu vrtnje u praznom hodu, najvišu brzinu vrtnje motora, te razne ostale vrijednosti.

Upravljačka jedinica mora računati sa mnogo varijabli kako bi izgaranje bilo što idealnije. Neke od tih varijabli su:

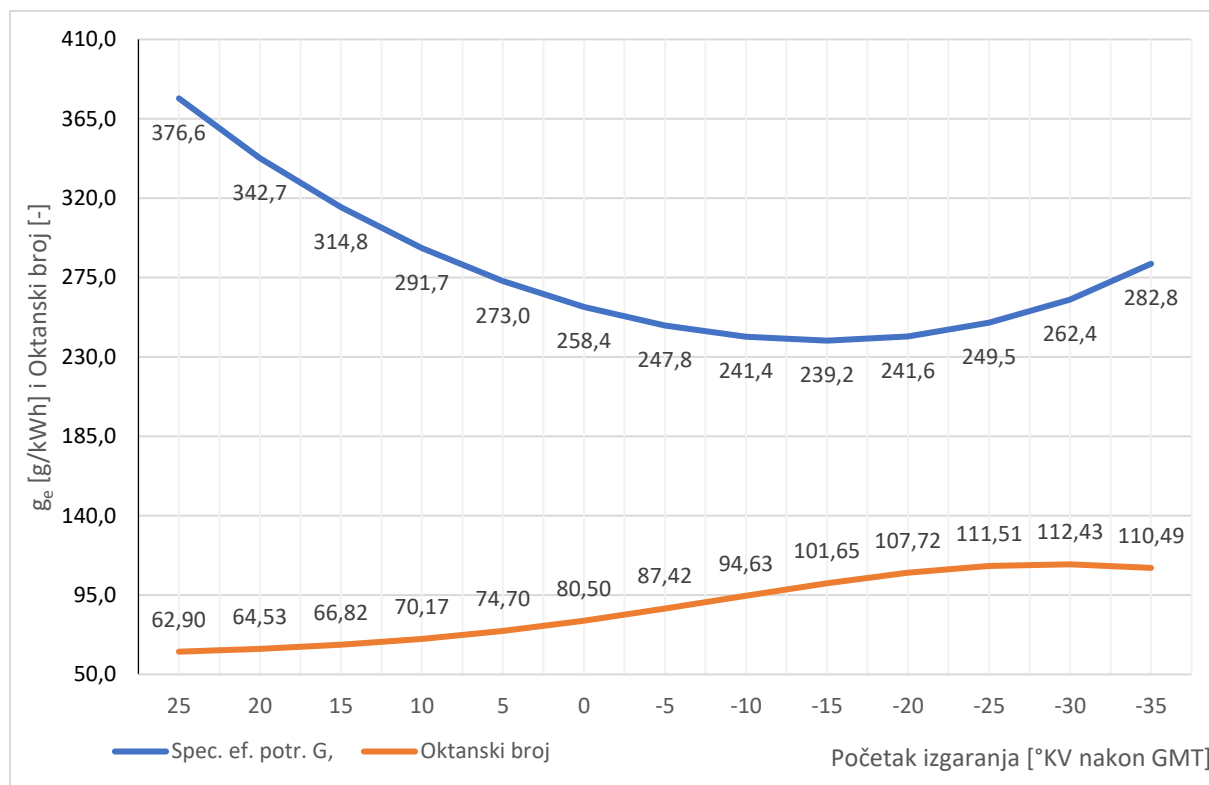
- opterećenje motora,
- brzina vrtnje,
- temperatura motora (rashladne tekućine),
- temperatura okolnog zraka,
- tlak okolnog zraka,
- temperatura goriva,
- maseni protok zraka u usisnoj cijevi.

Za to su potrebni mnogi senzori (poput senzora masnog protoka zraka na usisu) koji šalju parametre upravljačkoj jedinici. U okviru ovog simulacijskog modela uzeti su parametri opterećenja motora i brzine vrtnje, a svi ostali su postavljeni kao konstantne vrijednosti.

### 4.2. Način određivanja stacionarnih radnih točaka

Kako je prethodno spomenuto, upravljačka jedinica motora upravlja radom motora koristeći predefinirane mape motora. U okviru ovog završnog rada potrebno je primjenom stacionarnih točaka odrediti mape rada uz kriterij minimalne specifične efektivne potrošnje goriva uz održavanje faktora pretička zraka jednakim jedan. Dakle potrebno je za svaku stacionarnu radnu

točku pronaći parametre kuta pretpaljenja i duljine trajanja ubrizgavanja koji rezultiraju sa najmanjom potrošnjom goriva. Programski paket AVL BOOST™ koristi parametar početka izgaranja, te je on korišten umjesto kuta pretpaljenja. Razlika između ta dva parametra je objašnjena u poglavlju 2.3.1. Mijenjajući parametar početka izgaranja i promatrajući vrijednosti specifične efektivne potrošnje, određene su povoljne vrijednosti početka izgaranja. Na slici 12. vidimo kako se mijenjaju vrijednosti za radnu točku punog opterećenja i brzine vrtnje 2000 od  $\text{min}^{-1}$ .



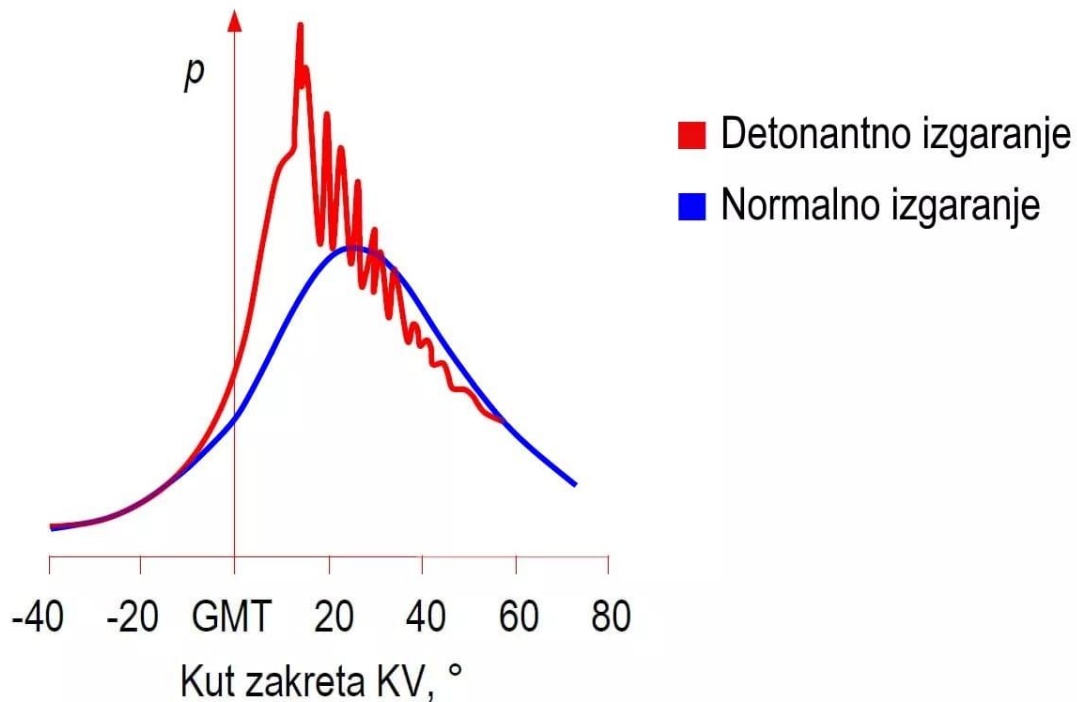
**Slika 12. Utjecaj početka izgaranja na specifičnu efektivnu potrošnju goriva i oktanski broj**

Iz slike 12. vidimo da se najmanja specifična efektivna potrošnja ostvaruje za kut početka izgaranja od 15°KV pri GMT. Pogledamo li detalje simulacije možemo iščitati da je početak ubrizgavanja 447°KV, te da ubrizgavanje traje 33°KV.

#### 4.2.1. Detonantno izgaranje

Detonantno izgaranje je oblik izgaranja koji je karakteriziran visokom brzinom širenja plamena (do 300 m/s), visokim porastom tlaka (do 8bar/°KV), visokim vršnim tlakovima, tlačnim valovima, visokom količinom toplinske energije predane sa dimnih plinova na stijenke cilindra i klipa i dr. [1] Zbog toga je detonaciju potrebno izbjeći, a ukoliko motor radi u detonantnom izgaranju on može biti uništen u kratkom vremenu. Najosjetljiviji dio motora na detonacije je klip, jer ima niže talište i ograničene mogućnosti hlađenja [7]. Detonacija se događa kada se u

neizgorjelom djelu smjese pojave sekundarni izvori upaljivanja na nekom vrućem mjestu (poput ispušnom ventilu) [2]. Sekundarni izvori upaljivanja se pojavljuju jer je na tom mjestu temperatura zbog kompresije viša od granične temperature samozapaljivanja. Na slici 13. je prikazan profil tlaka prilikom normalnog izgaranja i profil tlaka prilikom detonantnog izgaranja.



Slika 13. Profil tlaka u cilindru prilikom normalnog izgaranja[1]

Određeni faktori koji povećavaju rizik od detonacije kod Ottovog motora [1]:

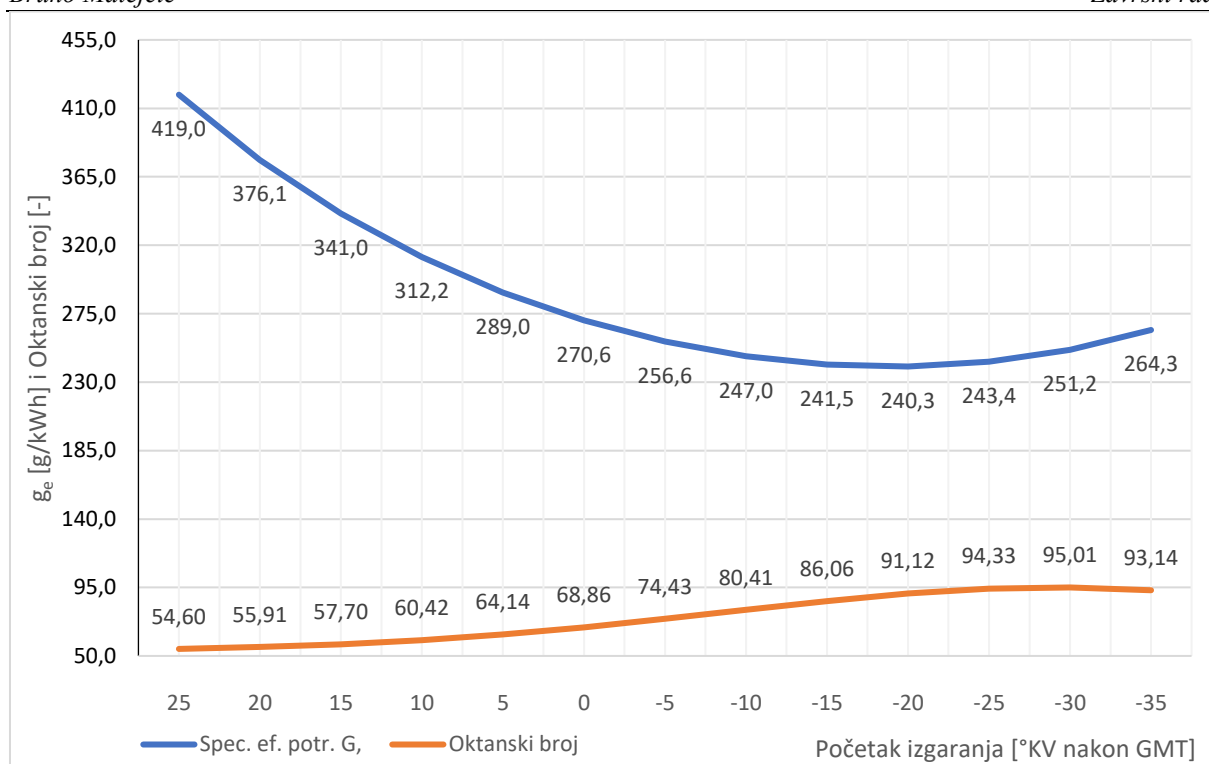
- visok kompresijski omjer,
- garež u prostoru izgaranja,
- visoke temperature motora,
- nabijanje motora,
- nizak oktanski broj goriva,
- veliki kut prepaljenja.

Kod Ottovog motora detonantno izgaranje se najčešće javlja u režimima visokog opterećenja i niske brzine vrtnje.

#### 4.2.2. Utjecaj detonantnog izgaranja na odabir stacionarnih radnih točaka

Motor u svom radu ne može utjecati na kompresijski omjer i količinu gareži u prostoru izgaranja. Istraživački oktanski broj goriva je zadan i iznosi 95, temperature motora su ovisne u sustavu hlađenja i na njih se ne može bitnije utjecati. Odabrani motor nema sustav prednabijanja, pa on neće utjecati na detonantno izgaranje. Ukoliko se pri određenom opterećenju i brzini vrtnje motora događa detonantno izgaranje, upravljačka jedinica mora smanjiti kut pretpaljenja, jer je to jedini parametar na koji može utjecati kako bi se izbjeglo detonantno izgaranje i razvijala potrebna snaga motora. Upravljačka jedinica također može prekinuti ubrizgavanje goriva, ali u tom slučaju motor više ne razvija snagu. Iako na slici 12. vidimo da se najmanja specifična efektivna potrošnja za puno opterećenje i brzinu vrtnje od  $2000\text{min}^{-1}$  ostvaruje pri kutu početka izgaranja od  $15^\circ\text{KV}$  prije GMT, motor ne smije raditi u toj radnoj točki. Slika 12. također prikazuje i ovisnost oktanskog broja o kutu početka izgaranja pri punom opterećenju i brzini vrtnje od  $2000\text{ min}^{-1}$ . Pri odabranom kutu oktanski broj je 101,65. Pošto je taj broj veći od oktanskog broja korištenog goriva, motor će raditi u detonantnom području. Zato je za navedenu radnu točku odabran kut početka izgaranja od  $10^\circ\text{KV}$  prije GMT.

U prethodnom poglavlju je rečeno da se detonantno izgaranje najčešće javlja prilikom niskih brzina vrtnje. Pogledamo li na slici 14., vidjet ćemo da se pri punom opterećenju (isto kao i u prethodnom slučaju) i brzini vrtnje  $5000\text{ min}^{-1}$  najniže specifična potrošnja ostvaruje pri početku izgaranja od  $20^\circ\text{KV}$  prije GMT. Međutim u ovom slučaju ne postoji opasnost od detonantnog izgaranja, jer je oktanski broj u tom slučaju jednak 91,12. Za tu radnu točku je moguće odabrati kut početka izgaranja od  $20^\circ\text{KV}$  prije GMT, što je i učinjeno.



**Slika 14.** Dijagram specifične efektivne potrošnje goriva i oktanskog broja u ovisnosti o početku izgaranja, pri punom opterećenju i brzini vrtnje  $5000 \text{ min}^{-1}$

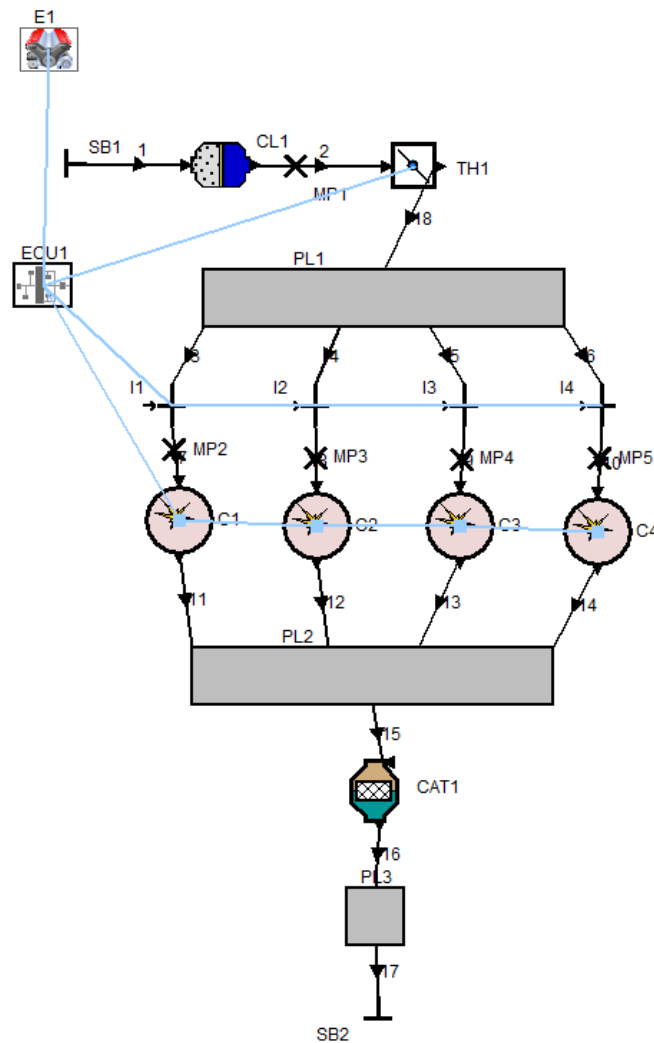
#### 4.2.3. Određivanje stacionarnih radnih točaka kod djelomičnih opterećenja

Smanjenjem opterećenja motora opada opasnost od detonantnog izgaranja. Pri brzinama vrtnje nižim od  $2500 \text{ min}^{-1}$ , te 80% djelomičnom opterećenju uočena je opasnost od detonantnog izgaranja, ali u svim ostalim radnim točkama nije postojalo opasnosti. Zato su kreirane radne točke s najnižom specifičnom efektivnom potrošnjom goriva bez obzira na oktanski broj.

#### 4.3. Dodavanje upravljačke jedinice motora na simulacijski model

U okviru ovog završnog rada upravljačka jedinica upravlja početkom izgaranja i duljinom trajanja ubrizgavanja u ovisnosti o brzini vrtnje i opterećenju motora. Zato je upravljačka jedinica spojena sa sljedećim elementima: svim cilindrima, svim brizgaljkama i motorom. Model sa dodanom upravljačkom jedinicom prikazan je na slici 15. Mape upravljačke jedinice određene su pomoću stacionarnih radnih točaka i prikazane su u sljedećem poglavlju.

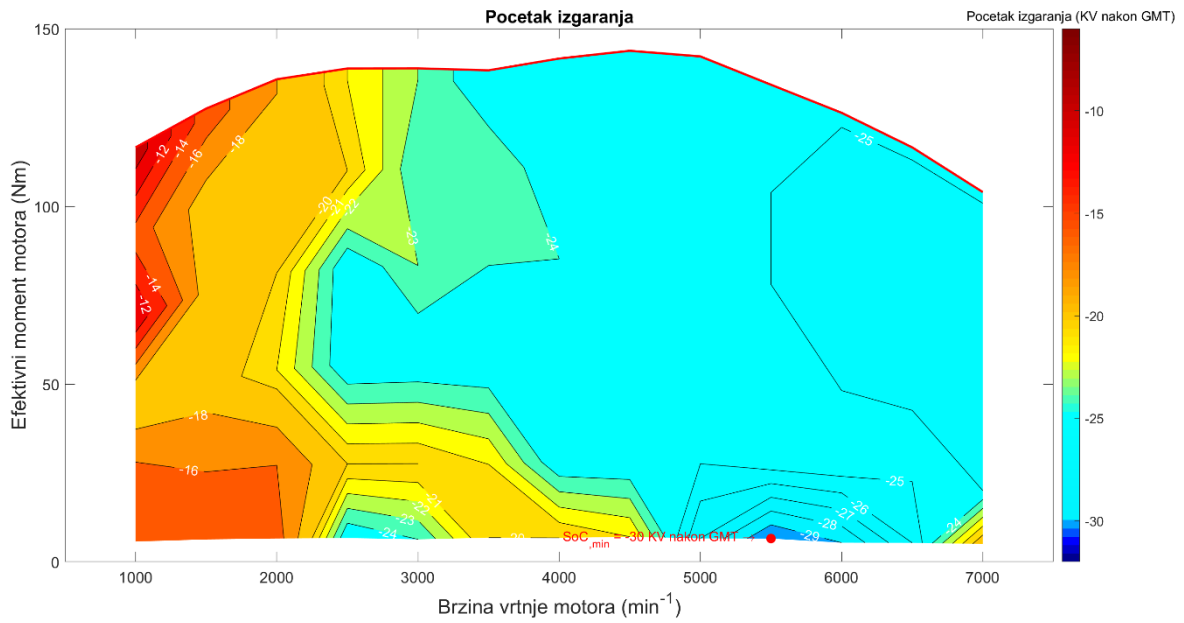




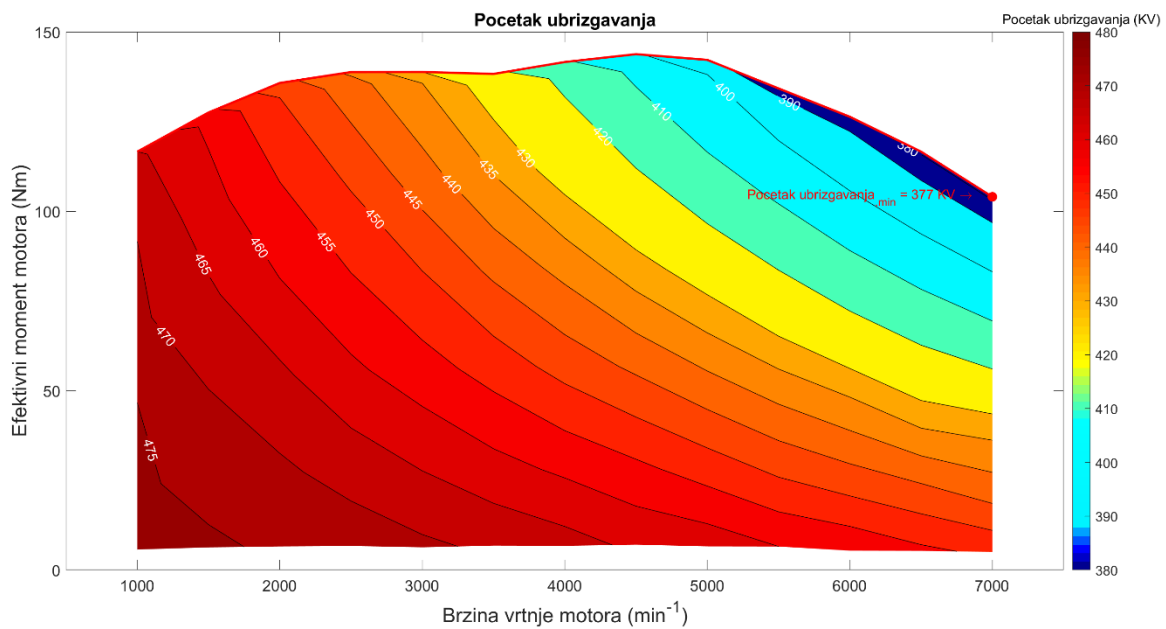
Slika 15. Simulacijski model sa dodanom upravljačkom jedinicom

#### 4.4. Mape upravljačke jedinice motora

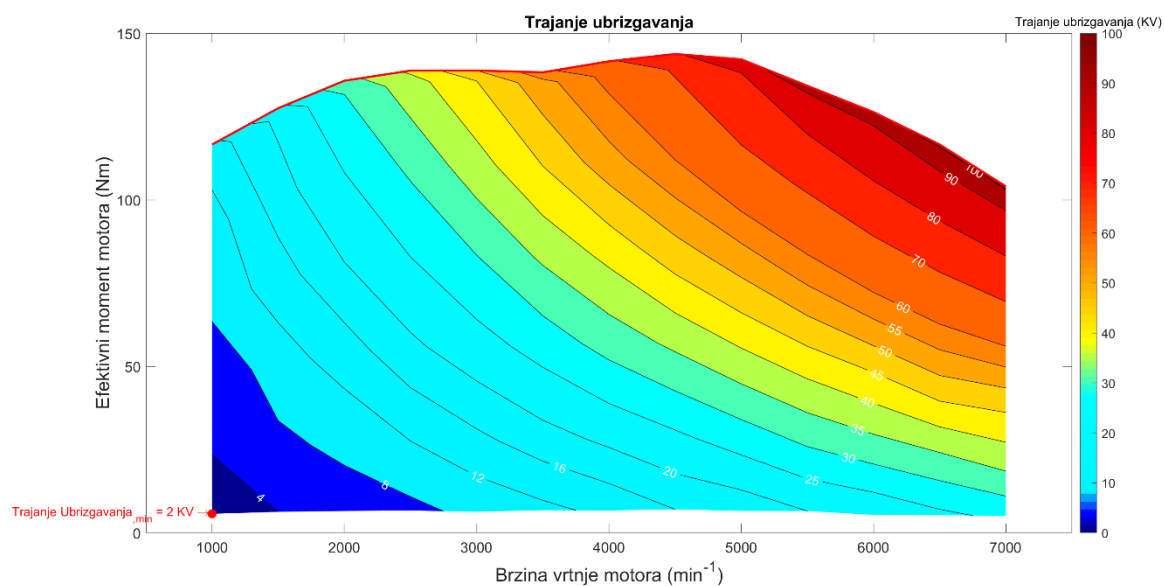
Koristeći prethodno određene stacionarne radne točke, određene su mape upravljačke jedinice motora. Na slici 16. prikazan je topografski dijagram početka izgaranja. Pri višim brzinama vrtnje izgaranje započinje ranije. Najraniji početak izgaranja je u radnoj točki 5% djelomičnog opterećenja pri brzini vrtnje od  $5500 \text{ min}^{-1}$  i iznosi  $30^\circ\text{KV}$  prije GMT. Najkasniji početak izgaranja je pri punom opterećenju i brzini vrtnje od  $1000 \text{ min}^{-1}$  kada izgaranje započinje točno u GMT.



**Slika 16. Topografski dijagram početka izgaranja u ovisnosti o opterećenju i brzini vrtnje**  
 Na slici 17. prikazan je topografski dijagram početka ubrizgavanja. Što je brzina vrtnje i opterećenje motora više, to je početak ubrizgavanja raniji, i suprotno. Najraniji početak ubrizgavanja je pri  $377^\circ\text{KV}$ , što odgovara  $103^\circ\text{KV}$  prije GMT.



**Slika 17. Topografski dijagram početka ubrizgavanja u ovisnosti o opterećenju i brzini vrtnje**



**Slika 18. Topografski dijagram trajanja ubrizgavanja u ovisnosti o opterećenju i brzini vrtnje**

Na slici 18. prikazan je topografski dijagram trajanja ubrizgavanja. Pri višim brzinama vrtnje trajanje ubrizgavanja izraženo u °KV je veće, jer sam °KV vremenski traje kraće. Kako brizgaljke ubrizgavaju gorivo masenim protokom od 0,011 kg/s, za istu količinu ubrizganog goriva koljenasto vratilo rotira za vaći kut pri višim brzinama vrtnje.

## 5. NESTACIONARNI REŽIMI RADA

Vozni ciklus je skup podataka kojim je određena brzina vozila u danim vremenskim intervalima. Cilj voznog ciklusa je ocjena performansi vozila. Najčešće se ocjenjuju potrošnja goriva, autonomija vozila, te emisije ispušnih plinova. Vozni ciklusi također mogu biti korišteni za testiranje performansi motora, mjenjača, električnog pogonskog sustava, te različitih drugih komponenta u vozilu. Provode se na valjcima na kojima se simuliraju otpori vožnje vozila u pokretu. Postoje dvije vrste voznih ciklusa:

- Nestacionarni vozni ciklusi – karakterizira ih česta i nagla promjena brzine vožnje, što odgovara uvjetima u prometu.
- Stacionarni vozni ciklusi – karakterizira ih duga razdoblja vožnje sa konstantnom brzinom

Postoje razni standardizirani vozni ciklusi. NEDC (engl. New European Driving Cycle = NEDC) vozni ciklus je napravljen da odgovora određenim uvjetima vožnje koji nemaju puno sličnosti uvjetima vožnje u stvarnom prometu. Zato ga mnogi smatraju zastarjelim. WLTP (eng. World Harmonized Light-duty vehicles Test Procedure) vozni ciklus je kreiran kao zamjena za NEDC. On nastoji oponašati uvjete vožnje u stvarnom prometu, te spada u skupinu nestacionarnih voznih ciklusa.

### 5.1. WLTP vozni ciklus

WLTP je vozni ciklus koji koriste mnoge države kako bi procijenile potrošnju goriva i emisije ispušnih plinova prilikom homologacije vozila. U usporedbi sa NEDC voznim ciklusom, karakteriziraju ga: veće prosječne i najviše vrzine vožnje, veći otpori vožnje, širi raspon voznih uvjeta, veće akceleracije, duži ukupni put, te testiranje utjecaja dodatne opreme vozila. Kao rezultat navedenog, emisije ispušnih plinova veće su u WLTP voznom ciklusu. Za razliku od NEDC-a, WLTP vozni ciklus nema definirane stupnje prijenosa, te svako vozilo može odabrati optimalne stupnjeve prijenosa u svakom trenutku.

Ovisno o omjeru deklarirane najviše snaga i mase praznog vozila, postoje 3 klase voznih ciklusa [8]:

- klasa 1 – do 22 W/kg,
- klasa 2 – do 34 W/kg,
- klasa 3 – iznad 34 W/kg.

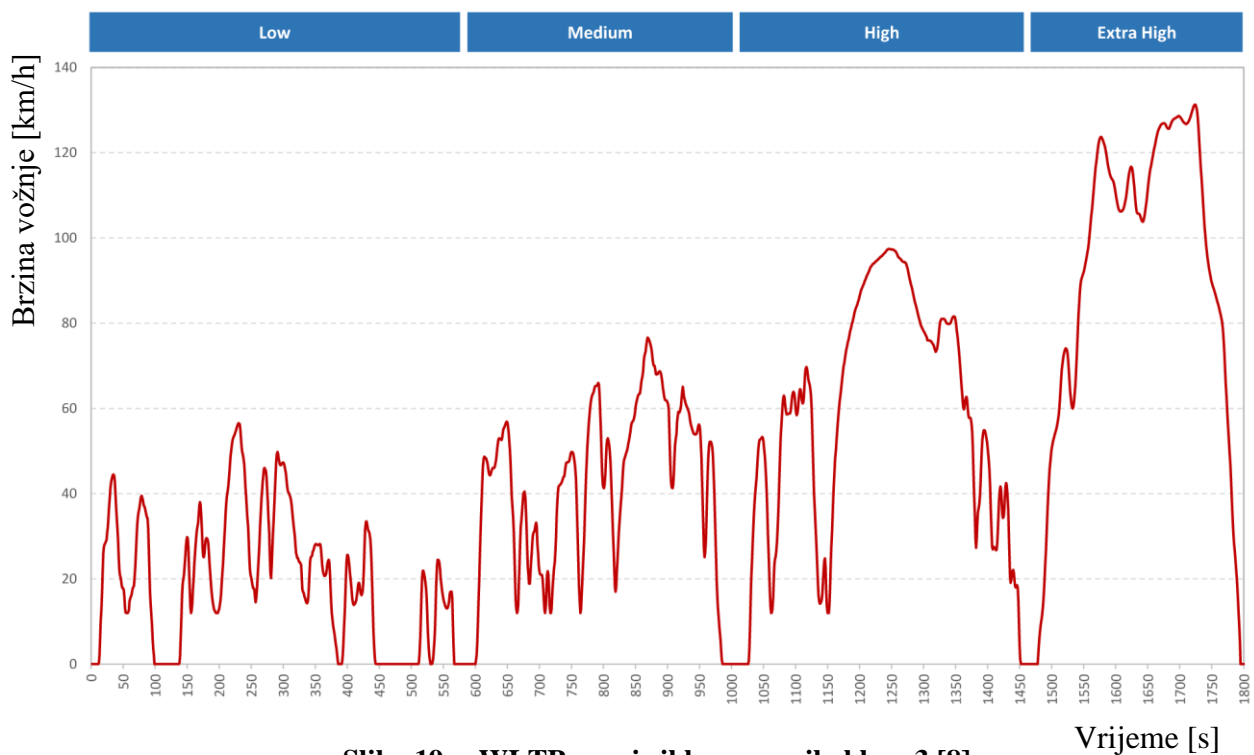
Većina današnjih vozila spada u klasu 3, a to je slučaj i sa odabranim vozilom.

### 5.1.1. Klasa 3 voznog ciklusa [8]

WLTP vozni ciklus za vozila koja spadaju u klasu 3 sastoji se od četiri dijela, svaki od njih sa različitim najvećim brzinama vožnje:

- niska (engl. Low) - do 56,4 km/h,
- srednja (engl. Medium) – do 76,6 km/h,
- visoka (engl. High) – do 97,4 km/h,
- izrazito visoka (engl. Extra High) – do 131,3 km/h.

Ovi dijelovi simuliraju gradsku, prigradsku, vožnju državnom cestom i vožnju autocestom. Na slici 19. prikazan je WLTP vozni ciklus.



Slika 19. WLTP vozni ciklus za vozila klase 3 [8]

U tablici 3. prikazane su pojedinosti svakog dijela.

Tablica 3. Karakteristike svakog dijela [8]

			Low	Medium	High	Extra High	Ukupno
Veličina	Oznaka	Mjerna jedinica	Iznos				
Ukupno vrijeme	$t_{uk}$	s	589	433	455	323	1800
Vrijeme zaustavljanja	$t_z$	s	150	49	31	8	235
Prijeđena udaljenost	$s$	m	3095	4756	7162	8254	23266
Udio zaustavljanja	$U_z$	-	26,5%	11,1%	6,8%	2,2%	13,4%
Najveća brzina	$v_{max}$	km/h	56,5	76,6	97,4	131,3	-
Prosječna brzina bez zaustavljanja	$v_{sr,bz}$	km/h	25,3	44,5	60,7	94,0	53,5
Prosječna brzina sa zaustavljanjima	$V_{sr,z}$	km/h	18,9	39,4	56,5	91,7	46,5
Najviša akceleracija	$a_{max}$	ms <sup>-2</sup>	1,611	1,611	1,666	1,055	-
Najniža akceleracija	$a_{min}$	ms <sup>-2</sup>	-1,5	-1,5	-1,5	-1,44	-

Za provođenje simulacije u nestacionarnom (promjenjivom) režimu rada odabran je srednji (engl. Medium) dio WLTP voznog ciklusa za vozila klase 3.

## 5.2. Podaci o vozilu

Za izračunavanje nestacionarnih značajki rada u voznom ciklusu odabrano je vozilo Ford Focus prve generacije. U vozilo se tvornički ugrađuje odabrani motor. Vozilo je prikazano na slici 20.



Slika 20. Ford Focus [3]

U tablici 4. prikazane su značajke vozila.

Tablica 4. Značajke vozila [3]

<b>Fizikalna veličina</b>	<b>Oznaka</b>	<b>Iznos</b>	<b>Mjerna jedinica</b>
<b>Masa praznog vozila</b>	$m_v$	1077	kg
<b>Prijenosni omjer u 1. brzini</b>	$i_{m1}$	3,583	-
<b>Prijenosni omjer u 2. brzini</b>	$i_{m2}$	1,926	-
<b>Prijenosni omjer u 3. brzini</b>	$i_{m3}$	1,281	-
<b>Prijenosni omjer u 4. brzini</b>	$i_{m4}$	0,951	-
<b>Prijenosni omjer u 5. brzini</b>	$i_{m5}$	0,756	-
<b>Prijenosni omjer diferencijala</b>	$i_{or}$	3,82	-
<b>Stupanj korisnosti prijenosnika</b>	$\eta_m$	0,93	-
<b>Čeona površina vozila</b>	$A$	2,09	m <sup>2</sup>
<b>Faktor otpora zraka</b>	$c_w$	0,32	-
<b>Faktor otpora kotrljanja</b>	$f_k$	0,01	-

<b>Brzina vrtnje motora u praznom hodu</b>	$n_{min}$	1000	$\text{min}^{-1}$
<b>Satna potrošnja goriva u praznom hodu</b>	$m_{G,h}$	0,75	l/h
<b>Dimenzije guma</b>	195/55/R15	-	-
<b>Dinamički radijus kotača</b>	$r_d$	0,2888	m

Dinamički radijus kotača izračunat je prema jednadžbi (5):

$$r_d = 0,97 \cdot r = 0,97 \cdot (R + H_R) = 0,97 \cdot \left[ \left( \frac{15}{2} \cdot 0,0254 \right) + (0,55 \cdot 0,195) \right] = 0,2888m, \quad (5)$$

gdje je:  $r$  [m] – radijus neopterećene gume,  $R$  [m] – radijus naplatka, a  $H_R$  [m] – visina neopterećene gume.

Za provedbu voznog ciklusa potrebno je odrediti jednadžbu otpora vožnje. Prilikom kretanja vozilo nailazi na određene otpore. Motor svojim radom mora poništiti te otpore kako bi se vozilo nastavilo kretati. Ti otpori su [9]:

- otpor zraka,
- otpor kotrljanja,
- otpor uspona,
- otpor ubrzanja,
- ostali otpori (vožnja u zavoju, vuča prikolice...).

Za izračun jednadžbe otpora vožnje potrebni su otpor zraka, otpor kotrljanja i otpor ubrzanja.

### 5.2.1. Otpor zraka

Otpor zraka je posljedica gubitka energije koji nastaje uslijed gibanja vozila kroz zrak. Na iznos otpora zraka utječu [9]:

- oblik vozila,
- brzina vožnje,
- dimenzije vozila,
- gustoća zraka.

Vozilo prilikom vožnje odguruje zrak oko sebe (dinamički tlak zraka) i stvara vrtloge. Između prednje čeonje površine stvara se pretlak, a iza stražnje površine vozila stvara se podtlak. Zrak djelomično i klizi po površini vozila i stvara se trenje između zraka i vozila. Jedan dio zraka



mora proći kroz automobil (hladnjak motora, kočnice, sustav ventilacije...), a sve zajedno daje otpor zraka.

Sila potreba za savladavanje otpora zraka računa se prema izrazu [9]:

$$F_Z = 0,5 \cdot \rho_z \cdot v^2 \cdot C_w \cdot A = 0,5 \cdot 1,2 \cdot v^2 \cdot 0,32 \cdot 2,09 = 0,4013 \cdot v^2 \text{ N.} \quad (6)$$

Gdje su:  $v$  [m/s] – brzina vožnje,  $\rho_z = 1,2$  [kg/m<sup>3</sup>] – gustoća zraka,  $c_w$  [-] – faktor otpora zraka,  $A$  [m<sup>2</sup>] – čelona površina vozila

### 5.2.2. Otpor kotrljanja

Otpor kotrljanja je posljedica gubitaka energije koji nastaje uslijed deformiranja gume kotača prilikom kotrljanja po podlozi. Na iznos otpora kotrljanja utječu [9]:

- karakteristike gume,
- masa vozila,
- stanje površine kolnika,
- brzina vožnje,
- geometrija ovjesa,
- stanje kočnica
- trenje u ležajevima

Sila potrebna za savladavanje otpora kotrljanja računa se prema izrazu (7):

$$F_k = m_v \cdot f_k \cdot g \cdot \cos(\alpha) = 1077 \cdot 0,01 \cdot 9,81 \cdot \cos(0^\circ) = 105,65 \text{ N,} \quad (7)$$

gdje je:  $g=9,81$  [m/s<sup>2</sup>] – gravitacijska konstanta,  $\alpha=0$ [°] – kut uspona,  $f_k$  [-] – faktor otpora kotrljanja,  $m_v$  [kg] – masa vozila.

### 5.2.3. Otpor ubrzanja

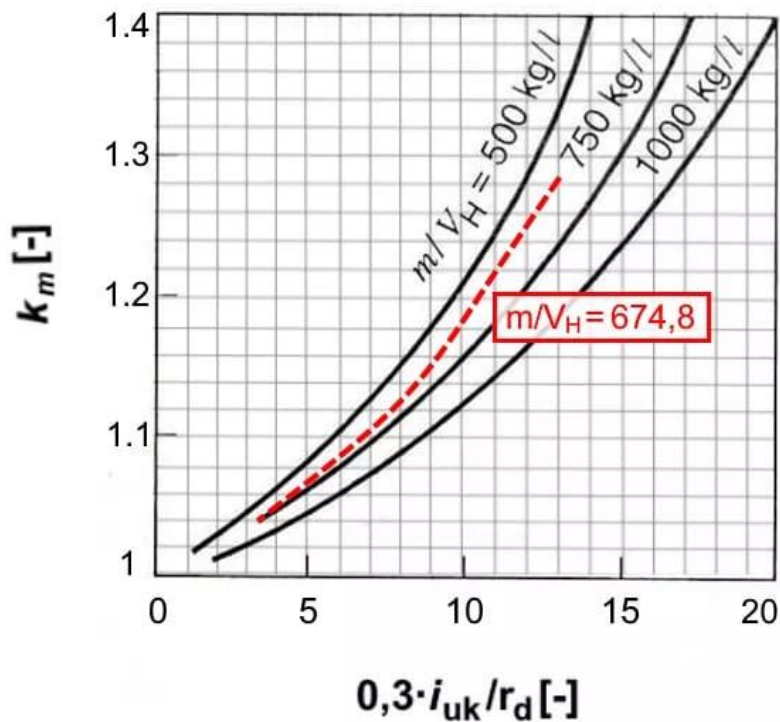
Ovaj otpor se javlja u nestacionarnim uvjetima vožnje, tj. posljedica je inercijskih sila kod ubrzanja. Prilikom ubrzanja pogon vozila mora translatorno ubrzati masu vozila i rotaciono ubrzati sve rotirajuće dijelove. Pojednostavljeni izraz za savladavanje otpora vožnje [9]:

$$F_a = m_v \cdot k_m \cdot a, \quad (8)$$

gdje je:  $a$  [m/s<sup>2</sup>] – ubrzanje vozila,  $k_m$  [-] – faktor rotirajućih masa vozila.

Faktor rotirajućih masa očitava se iz dijagrama na Slici 21. pojedino za svaki stupanj prijenosa. Za očitavanje nam je potreban omjer mase vozila i radnog volumena motora, te omjer ukupnog prijenosnog omjera i dinamičkog radijusa kotača.

$$\frac{m_v}{V_H} = \frac{1077}{1,596} = 674,8 \frac{\text{kg}}{\text{l}}. \quad (9)$$



Slika 21. Dijagram faktora rotirajućih masa[9]

Tablica 5. Vrijednosti faktora rotirajućih masa za pojedine stupnjeve prijenosa

i	1	2	3	4	5
$0,3 \cdot i_{uk} / r_d$	14,257	7,664	5,097	3,784	3,008
$k_{m,i}$	1,4	1,13	1,08	1,05	1,04

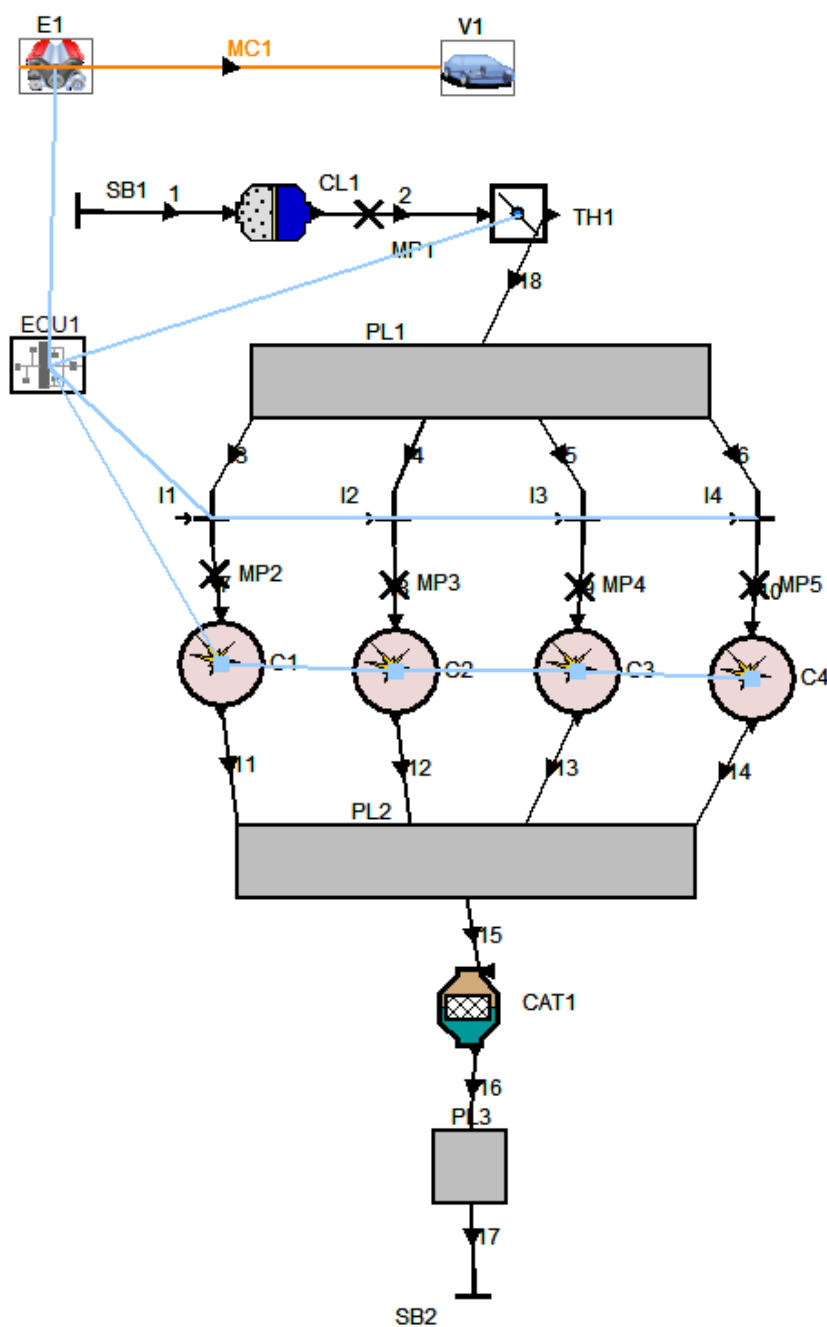
#### 5.2.4. Ukupni otpori vožnje

Ukupni otpori vožnje su zbroj prethodno navedenih otpora vožnje, a izračunati su u jednadžbi (10):

$$F_{uk} = F_k + F_z \cdot F_a = 0,4013 \cdot v^2 + 1077 \cdot k_m \cdot a + 105,65 \text{ N}. \quad (10)$$

### 5.3. Dodavanje elementa vozila u simulacijski model

Na slici 22. prikazan je simulacijski model s dodanim elementom vozila.

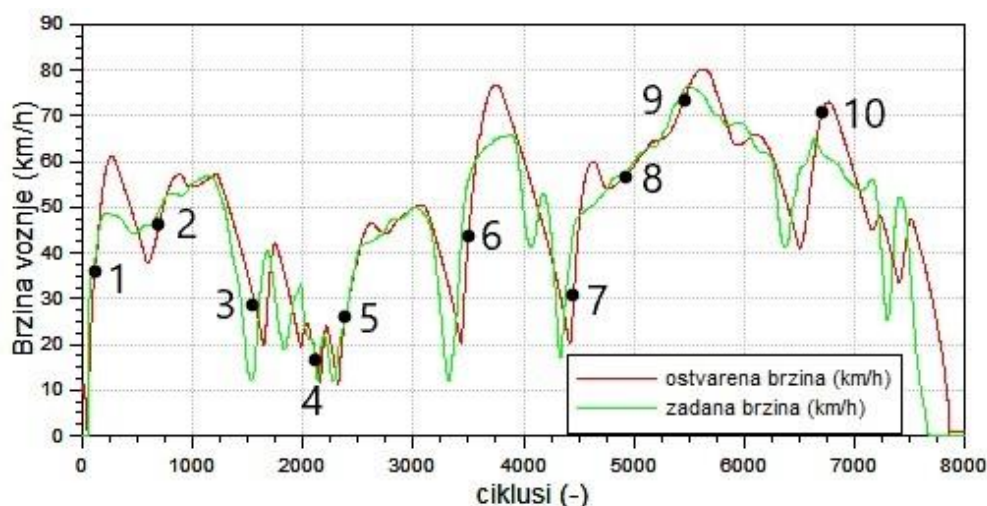


Slika 22. Simulacijski model sa dodanim elementom vozila

U simulacijski model unešeni su prethodno izračunati podaci o otporima vožnje izraženi u jednažbi (10), te značajke prikazane u tablici 4. Podaci o voznom ciklusu također su unešeni u simulacijski model.

## 6. Odstupanja značajki rada motora u nestacionarnom režimu u odnosu na stacionarne radne točke

Prilikom analize nestacionarnih uvjeta rada nailazimo na ograničenja simulacijskog modela. On vrlo loše simulira uvjete u kojima vozilo miruje i brzina vrtnje je jednaka brzini vrtnje praznog hoda. Srednji WLTP ciklus za vozila klase 3 je odabran jer ima vrlo mali udio u kojem je brzina vožnje jednaka nuli. Točnije samo u prvih i zadnjih par sekundi nailazimo na te režime rada. Ti režimi rada niti ne spadaju u nestacionarne režime, jer imaju konstantnu brzinu vožnje jednaku nuli, tako da ih možemo zanemariti. Na slici 23. prikazane su ostvarene i tražene brzine vožnje. Vidljivo je da simulacijski model prati zadanu brzinu uz određeno kašnjenje, te uz određeno odstupanje. Model ne može pratiti krivulju jer je za nagla usporavanja potrebna kočnica, a nju nije moguće definirati u modelu, te se kočenja obavljaju isključivo kočenjem motorom.



**Slika 23. Usporedba zadane brzine vožnje i ostvarene brzine vožnje**

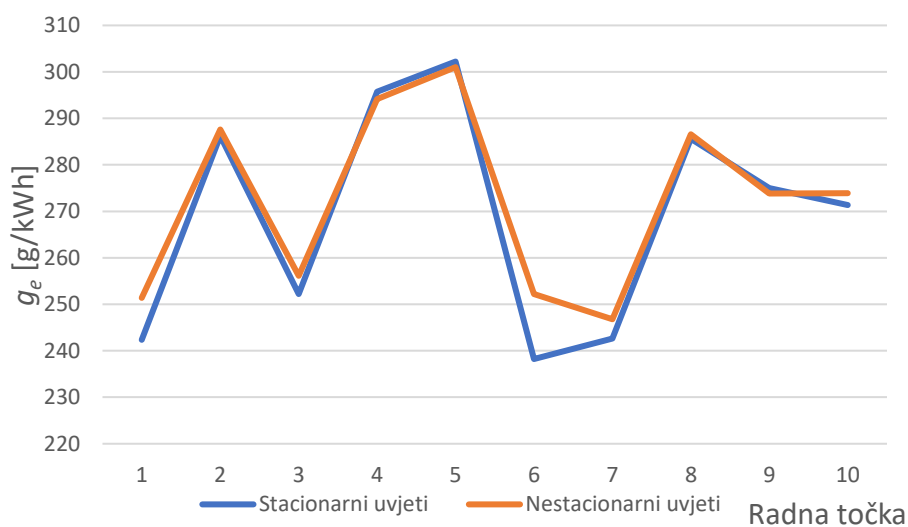
Za analizu nestacionarnih uvjeta vožnje odabrane su radne točke pri kojima vozilo ubrzava. Odabrane točke prikazane su u tablici 6. i na slikama 23. i 28. Za analizu odstupanja kreirane su te iste radne točke koristeći naredbu kontrola srednjeg efektivnog tlaka izgaranja (engl. BMEP Control) i provedene su simulacije u stacionarnim uvjetima. Za analizu odstupanja odabrani su parametri specifične efektivne potrošnje goriva, specifične indicirane potrošnje goriva, najveće temperature u cilindru, te vršnog tlaka u cilindru.

Tablica 6. Radne točke odabrane za analizu odstupanja

Redni broj	Broj ciklusa	Ostvarena brzina vožnje [km/h]	Brzina vrtnje motora [ $\text{min}^{-1}$ ]	$p_e$ [bar]
1	108	35,925	4097,66	10,95
2	698	46,288	2877,33	4,835
3	1674	26,999	1678,25	8,045
4	2167	14,437	1646,69	4,364
5	2458	35,009	3993,3	4,359
6	3501	43,589	2709,53	10,966
7	4458	31,210	1940	10,304
8	4985	58,480	3635,17	2,368
9	5479	74,996	3055,11	5,609
10	6715	71,239	2902,04	5,744

### 6.1. Odstupanje specifične efektivne potrošnje goriva

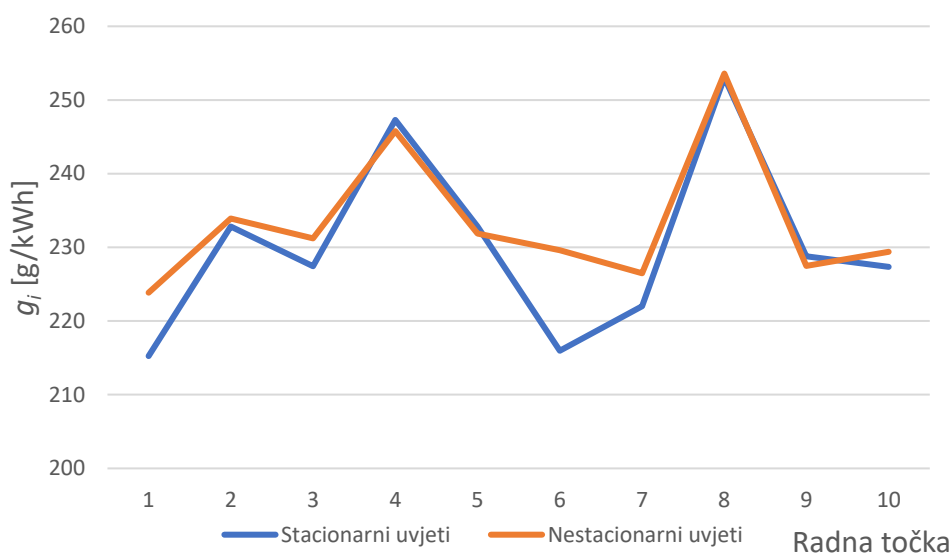
Odstupanja su prikazana na slici 24.



Slika 24. Usporedba specifične efektivne potrošnje goriva

Iz slike 28. vidljivo je da postoji vrlo mala razlika specifične efektivne potrošnje goriva između stacionarnih i promjenjivih radnih uvjeta. Ona je prosječno 1,323% viša u nestacionarnim uvjetima, a najveće odstupanje je primjećeno u radnoj točki 6, gdje je odstupanje 5,875%.

## 6.2. Odstupanje specifične indicirane potrošnje goriva

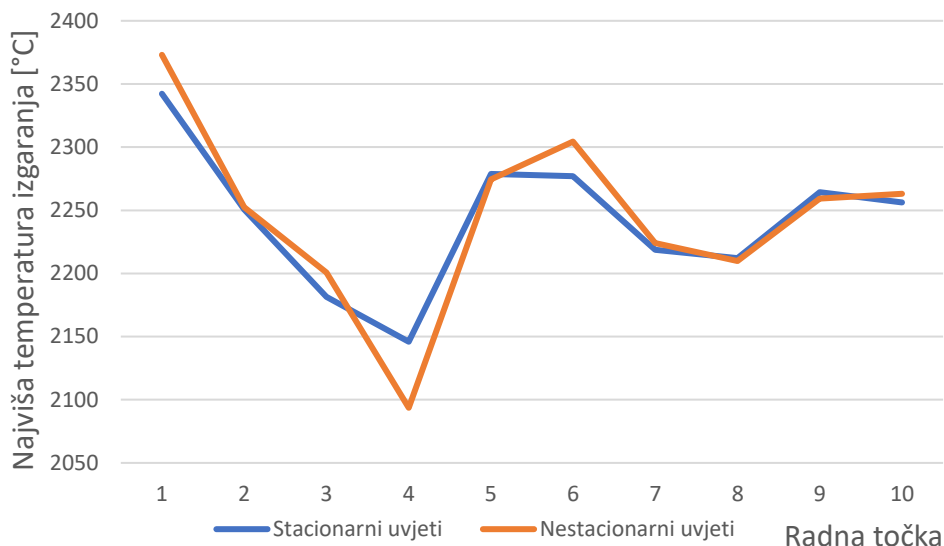


Slika 25. Usporedba specifične indicirane potrošnje goriva

Iz slike 25. vidljiva je slična razlika kao i na slici 24. Specifična indicirana potrošnja je prosječno 1,397% viša u nestacionarnim uvjetima, a najveće odstupanje primjećeno je u radnoj točki 6, gdje je odstupanje 6,33%.

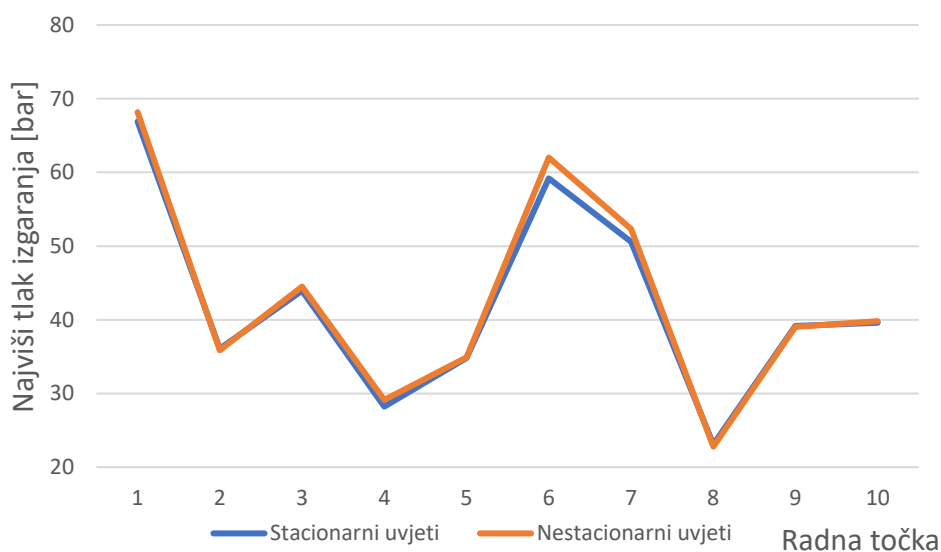
## 6.3. Odstupanje najviše temperature izgaranja

Iz slike 26. vidljive su najviše temperature izgaranja. Najveće odstupanje primjećeno je u radnoj točki 4, u kojoj je najviša temperatura izgaranja za 52,29°C viša u stacionarnim radnim uvjetima, što je odstupanje apsolutne temperature od 2,161%. Ova značajka rada najmanje je odstupala u nestacionarnom režimu rada. Ona je prosječno samo 0,109% viša u nestacionarnim režimima u odnosu na stacionarne radne točke.



Slika 26. Usporedba najviše temperature izgaranja

#### 6.4. Odstupanje najvišeg tlaka izgaranja



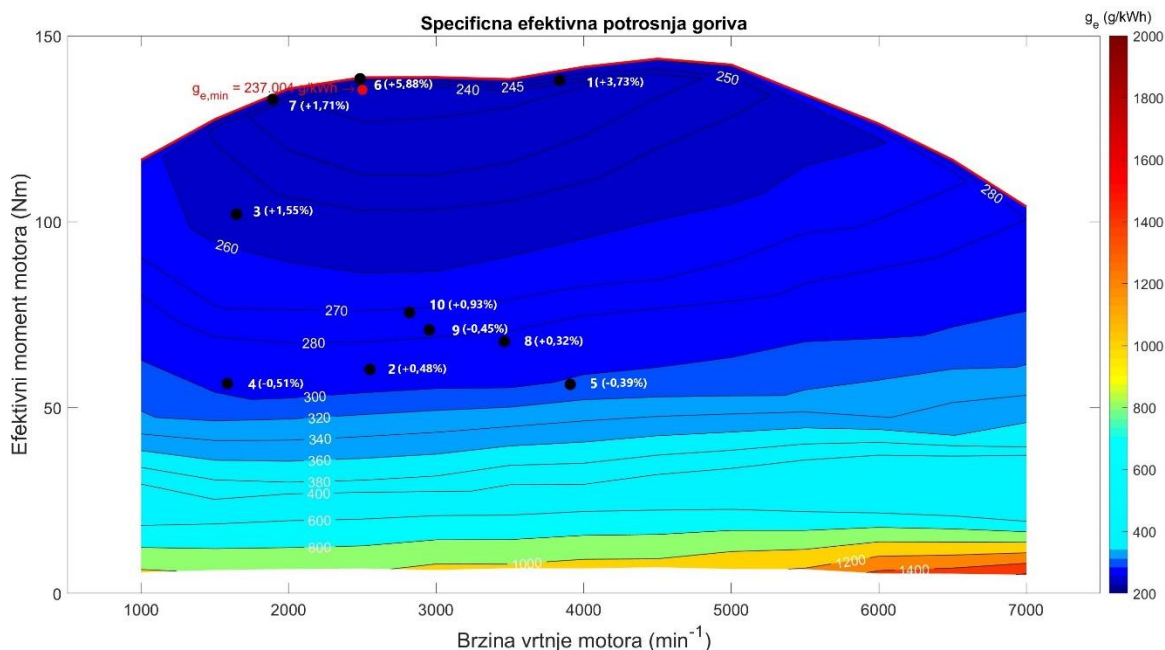
Slika 27. Usporedba najvišeg tlaka izgaranja

Na slici 27. vidljivi su najviši tlakovi izgaranja za odabrane radne točke. Ova karakteristika rada prosječno je bila 1,308% viša u nestacionarnim radnim uvjetima, a najveće odstupanje primjećeno je u radnoj točki 6, gdje je najviši tlak 4,75% viši u promjenjivim radnim uvjetima.

## 6.5. Razlozi odstupanja nestacionarnih radnih točaka

Prosječno su svi promatrani parametri bili za 1,03% viši u nestacionarnim radnim uvjetima u odnosu na stacionarne radne točke. Brzina vrtnje i opterećenje motora, kut početka izgaranja, početak i duljina ubrizgavanja bili su isti u nestacionarnim u odnosu na stacionarne radne uvjete. Razlika se je rezultat toga što programski paket AVL BOOST™ prikazuje rezultate spomenutih parametara u određenom broju decimala. Daljnjom obradom rezultata u programskom paketu Microsoft Excel, ti rezultati su zaokruženi na 4 znamenke, koji su nakon toga „vraćeni“ u programski paket AVL BOOST™ na provođenje stacionarnih radnih točaka. Zanimljivo je da 6. radnu točku, prosječno su svi promatrani parametri bili za 0,618% viši u nestacionarnim radnim uvjetima u odnosu na stacionarne radne uvjete. Vrijednosti oktanskog broja nisu odstupale, te ne postoji opasnost od detonantnog izgaranja.

U radnoj točki 6 dobivena su najveća odstupanja promatranih parametara, čije su vrijednosti bile 4,74% više u nestacionarnim radnim uvjetima. Za razliku od ostalih promatranih točaka, jedino radna točka 6 radi približno u punom opterećenju, točnije radi u 99,5% opterećenju. U toj točki primjećeno je i odstupanje faktora pretička zraka koji je u stacionarnim radnim uvjetima iznosio 0,91%, dok je u nestacionarnim radnim uvjetima iznosio 0,898%. Na slici 28. prikazan je topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva sa ucrtanim promatranim radnim točkama i odstupanjima specifične efektivne potrošnje goriva.



Slika 28. Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva sa ucrtanim promatranim radnim točkama i odstupanjima



---

## 7. ZAKLJUČAK

U završnom radu provedena je parametrizacija rada upravljačke jedinice motora s unutarnjim izgaranjem. Razmatrani parametri su: početak izgaranja, te duljina trajanja i početak ubrizgavanja goriva. Pokazan je utjecaj detonantnog izgaranja na odabir karakteristika radnih točaka. Mape upravljačke jedinice motora generirane su koristeći stacionarne radne točke, te je podešena s ciljem ostvarivanja minimalne potrošnje goriva. Za vozni ciklus je odabran srednji dio WLTP voznog ciklusa. Iz rezultata je vidljivo da upravljačka jedinica vrlo dobro prati radne točke definirane mapom. Prosječno odstupanje svih promatranih značajki rada u svim odabranim radnim točkama iznosilo je 0,103 %. Najveće odstupanje značajki rada uočeno je kod specifične indicirane potrošnje. U radnoj točki 6 ono je bilo 6,33% više u promjenjivim uvjetima rada. Iako simulacijski model ima određena ograničenja, te su pri analizi brzine vožnje uočena određena odstupanja, možemo zaključiti da je primjenom simulacije radnog ciklusa moguće vrlo dobro odrediti parametre upravljačke jedinice, te simulirati performanse vozila prilikom vožnje u promjenjivim režimima. Time je moguće značajno poboljšati i skratiti proces razvoja motora s unutarnjim izgaranjem, uočiti potencijalne greške prilikom razvoja, te razvoj učiniti jeftinijim.

---

**LITERATURA**

- [1] Mahalec, Lulić, Kozarac: *Motori s unutarnjim izgaranjem*
- [2] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/ignition-timing>
- [3] [https://www.automobile-catalog.com/car/1998/955580/ford\\_focus\\_5-dr\\_1\\_6\\_16v\\_zetec.html](https://www.automobile-catalog.com/car/1998/955580/ford_focus_5-dr_1_6_16v_zetec.html).
- [4] BOOST™ version 2013.2., *Users Guide and Theory*
- [5] <https://www.ecutesting.com/categories/ecu-explained/>
- [6] <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/gasoline-direct-injection/electronic-engine-control-unit/>
- [7] *Tehnika motornih vozila*, Centar za vozila Hrvatske, Pučko otvoreno učilište Zagreb, 2015
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide\\_Harmonised\\_Light\\_Vehicles\\_Test\\_Procedure](https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure)
- [9] Lulic, Ormuž, Šagi: *Motorna vozila – skripta iz predavanja*, FSB Zagreb, 2019/2020.

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc