Proračun sastava radnog medija na početku visokotlačnog procesa temeljem sastava ispušnih plinova motora s unutarnjim izgaranjem

Mazurek, Alen

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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:235:376473

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Alen Mazurek

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac, dipl. ing. Alen Mazurek

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se profesoru Darku Kozarcu na pomoći tijekom izrade ovog završng rada.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci tijekom studiranja.

Alen Mazurek

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, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Alen Mazurek** Mat. br.: 0035197453

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Proračun sastava radnog medija na početku visokotlačnog procesa temeljem sastava ispušnih plinova motora s unutarnjim izgaranjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calculation of working fluid composition at the start of high pressure cycle of IC engine based on the exhaust gas composition**

Opis zadatka:

Suvremeni motori s unutarnjim izgaranjem u svom radu sve češće primjenjuju nekonvencionalne radne medije, od kojih je jedan mješavina zraka i produkata izgaranja. Produkti izgaranja u takvom radu dobivaju se tzv. povratom ispušnih plinova skraćeno nazvano EGR (engl. Exhaust Gas Recirculation). Utjecaj EGR-a na rad motora je višestruk i još uvijek je predmet istraživanja. Pri istraživanju utjecaja EGR-a važno je znati koliki je udio ispušnih plinova vraćen nazad u usis motora. Mjerenje protoka ispušnih plinova u povratnom vodu često je nepraktično pa se u tom slučaju prilikom određivanja udjela EGR-a primjenjuju proračuni temeljeni na balansu konstituenta usisa i ispuha, pri čemu se kao ulaz u proračun koriste rezultati mjerenja sastava ispušnih plinova te po mogućnosti rezultati mjerenja koncentracije CO_2 na usisu i/ili masenog protoka zraka i goriva na usisnoj strani.

U ovom radu potrebno je izraditi proračun stanja na početku visokotlačnog procesa motora s unutarnjim izgaranjem i iz njega proračun masenog udjela EGR-a na temelju rezultata mjerenja sastava ispušnih plinova te u jednoj varijanti rezultata mjerenja koncentracije CO_2 na usisu, a u drugoj varijanti masenog protoka zraka i goriva na usisnoj strani. Izvedeni proračun potrebno je pretvoriti u računalni program u jednom od programskih paketa (Excel, Matlab) te testirati na dostupnim eksperimentalnim podacima. U radu je stoga potrebno:

- prikazati proračune dostupne u literaturi,
- izvesti matematički model za slučaj mjerenja sastava ispuha i koncentracije CO_2 na usisu,
- izvesti matematički model za slučaj mjerenja sastava ispuha i masenih protoka na usisu,
- pretvoriti matematičke modele u računalni program,
- validirati modele s dostupnim eksperimentalnim podacima

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

Zadatak zadan:
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:
1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA III
POPIS OZNAKA IV
SAŽETAK V
1. UVOD 1
2. MJERENJE UDJELA PLINOVA 3
2.1. Mjerenje udjela CO i CO_2 3
2.2. Mjerenje udjela ugljikovodika 3
2.3. Mjerenje udjela NO 4
2.4. Mjerenje udjela O_2 4
3. IZRAČUN UDJELA EGR-a 5
3.1. Definicija EGR-a i opće jednadžbe 5
3.2. Proračun sastava ispuha i usisa temeljem zadanih rubnih uvjeta 8
3.2.1. Proračun sastava ispuha i usisa temeljem zadanih rubnih uvjeta uz siromašnu smjesu 9
3.2.1.1. Izračun sastava na ispuhu 9
3.2.1.2. Izračun sastava na usisu 10
3.2.2. Proračun sastava ispuha i usisa temeljem zadanih rubnih uvjeta uz bogatu smjesu 12
3.2.2.1. Izračun sastava na ispuhu 12
3.2.2.2. Izračun sastava na usisu 13
3.3. Proračun EGR uz koncentraciju CO_2 na usisu i koncentracijama na ispuhu 14
3.3.1. Određivanje koncentracija na ispuhu 14
3.3.2. Proračun EGR-a 17
3.3.3. Izbor najrobusnije jednadžbe za EGR 23
3.4. Proračun *EGR*-a uz masene protoke na usisu i koncentraciju CO_2 na usisu 25
3.5. Proračun EGR-a približnom formulom 26
3.6. Usporedba približne i točne formule za EGR s izračunatim koncentracijama plinova na ispuhu 27
3.7. Određivanje sastava goriva 28
3.8. Usporedba EGR-a dobivenih s mjerenim vrijednostima 30
4. ZAKLJUČAK 31
LITERATURA 32
PRILOZI 33

POPIS SLIKA

Slika 1. Princip rada NDIR analizatora [4] 3
Slika 2. Mjerenje kisika [2] 4
Slika 3. Skica postava za mjerenje EGR-a 6
Slika 4. Molni udio konstituenata na usisu 13

POPIS TABLICA

Tablica 1 Greške u postocima u odnosu na točno rješenje 24
Tablica 2. Rezultati s izračunatim vrijednostima 27
Tablica 3 Rezultati s izmjerenim vrijednostima.....30

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
n_i^r	$\left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right]$	količina reaktanta konstituenta po 1 mol goriva
n_i^r	$\left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right]$	količina produkta konstituenta po 1 mol goriva
EGR	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	udio recirkuliranih plinova
$\dot{m}_{\text{EGR}}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$	maseni protok recirkuliranih plinova
$\dot{m}_{\text{uk}}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$	maseni protok kroz cilindar
$n_{i,\text{zrak}}$	$\left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right]$	količina konstituenta *i* iz zraka po 1 mol goriva
K_i	$\left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right]$	količina konstituenta *i* iz zraka po 1 mol zraka
y_i^{zrak}	$\left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right]$	molni udio konstituenta *i* u zraku
y_i^p	$\left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right]$	molni molni udio konstituenta *i* u produktima
y_i^r	$\left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right]$	molni molni udio konstituenta *i* u reaktantima
M_i	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right]$	molarna masa konstituenta *i*
a_s	$\left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right]$	molni stehiometrijski omjer kisik/gorivo
λ	[-]	faktor pretička zraka

SAŽETAK

Povrat ispušnih plinova (engl. *Exhaust Gas Recirculation*-EGR) kod Diesel motora služi kako bi ostali u zakonski dozvoljenim okvirima štetnih emisija odnosno smanjili emisije NOx. Kod Ottovih motora EGR se primarno rabi da se smanje gubici pumpanja, a dodatno i smanjuje emisije NOx.

Da bi se bolje razumio utjecaj EGR-a na motor s unutarnjim izgaranjem, potrebno je imati model koji će točno odrediti EGR. Recirkulirani plinovi su vrući ispušni plinovi nepoznatog sastava, pa nije moguće pouzdano odrediti maseni protok kao kod zraka. Zato se određuje maseni udio EGR-a pomoću masenih protoka goriva i zraka i koncentracija plinova na usisu i ispuhu.

U ovom radu je izveden matematički model za izračun EGR-a uz poznate vrijednosti koncentracije CO_2 na usisu i koncentracija plinova na ispuhu, i matematički model za izračun EGR uz masene protoke goriva i zraka i koncentraciju CO_2 na usisu. Također, izveden je približni izraz za EGR koji se često koristi u praksi, te su uspoređeni rezultati matematičkih modela. Dokazano je da se EGR ne može izračunati samo iz masenih protoka goriva i zraka i poznatih koncentracija na ispuhu.

Ključne riječi: EGR, CO_2, usis

SUMMARY

Exhaust Gas Recirculation (EGR) is used in Diesel engines to keep emissions in allowed limit, respectively NOx limit. In Otto engines EGR is mainly used to reduce pumping losses, secondary it reduces NOx emissions.

To better understand influence of EGR on internal combustion engine, precise model for EGR is needed. Recilculated gases are hot and of unknown composition, so it isn't possible to messure mass flow precissely, like that of air. That is why EGR is determined from mass flow of fuel and air and concentrations of gases in intake and exhaust.

In this paper mathematical model for calculating EGR from CO_2 concentration in intake and concentrations on exhaust is derived. Mathematical model for calculating EGR from fuel and air mass flow and CO_2 concentration in intake is derived. Also, aproximate expression for EGR, which is often used in practice is derived. Results are compared. It is proven that EGR can not be calculated only from fuel and air mass flow and concentrations in exhaust.

Key words: EGR, CO_2, intake

1. UVOD

Motori s unutarnjim izgaranjem proizvode štetne kemijske spojeve. Jedni od štetnijih spojeva dobivenih izgaranjem su dušikovi oksidi (NO_x). Zadatak inženjera je smanjiti emisije NO_x. Jedan od često korištenih načina smanjivanja NO_x emisija je primjenom povrata ispušnih plinova (engl. *Exhaust Gas Recilculation*-EGR). Pogodni uvjeti za stvaranje NO_x su visoka temperatura i visoka koncentracija kisika i dušika. Ispušnim plinovima razrijeđena smjesa ima veći specifični toplinski kapacitet zbog vodene pare i ugljikova dioksida u ispuhu. Veći specifični toplinski kapacitet rezultira nižom temperaturom u cilindru jer za istu količinu primljene topline, smjesi u cilindru se temperatura manje poveća. Utjecaj smanjenja temperature se može dodatno povećati hlađenjem recirkuliranih plinova. Recirkuliranjem plinova se također smanjuje koncentracija kisika u smjesi, dok koncentracija dušika ostane približno ista.

EGR ima negativan utjecaj na druge emisije. EGR usporava proces izgaranja, što znači da će se povećati udio neizgorjelih ugljikovodika. Također, rastu emisije CO zbog disocijacije CO_2 iz recikliraranih ispušnih plinova. Ottovi motori mogu raditi s do 20% EGR-a, dok Diesel motori s 60%, razlog je što Diesel motori rade s siromašnijom smjesom pa je utjecaj EGR-a manji. Kod Ottovih motora EGR može povoljno utjecati na potrošnju na niskim opterećenjima jer je manji rad pumpanja zbog manjeg potlaka. EGR kod Ottovih motora može pomoći i kod smanjenja sklonosti detonantnom izgaranju.

Postoji vanjski i unutarnji EGR. Unutarnji EGR je posljedica zaostalih plinova u cilindru, a vanjski EGR se ostvaruje povezivanjem usisne i ispušne grane. Svaki četverotaktni motor bez nabijanja ima unutarnji EGR jer nije moguće izbaciti sve ispušne plinove. Dodatni unutarnji EGR se može postići razvodnim mehanizmom, ali se ne mogu hladiti plinovi kao kod vanjskog EGR-a. U ovom radu je izveden matematički model za vanjski EGR.

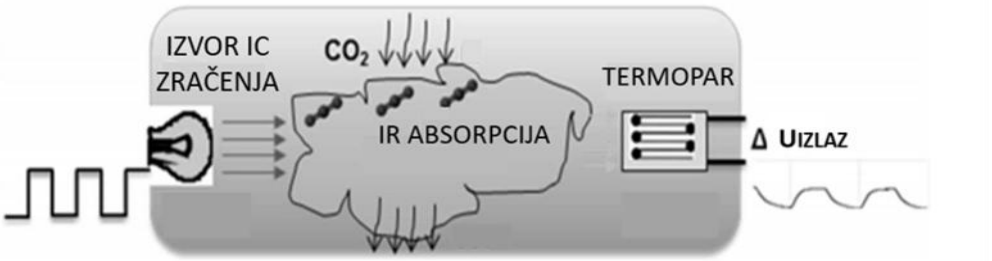
Bitno je znati koliki je udio EGR-a da bi se mogao istraživati utjecaj EGR-a. Maseni protok recirkuliranih plinova je nepraktično mjeriti direktno pomoću recimo vruće žice kao maseni protok zraka jer su temperature ispušnih plinova promjenjive, ispušni plinovi sadrže vodu, nije poznat točan sastav ispušnih plinova, taloženje čađe itd. Jedan mogući način mjerenja EGR-a je pomoću razlike tlakova na usisu i ispuhu. Takav sustav iziskuje i mjerenje/pretpostavku temperature, pretpostavku koeficijenta istjecanja, korekcijske faktore, površinu EGR ventila itd. [1].

U ovom radu obrađen je način mjerenja EGR-a pomoću koncentracije CO_2 na usisu i koncentracija plinova na ispuhu. Iako bi se na usisu mogla mjeriti koncentracija bilo kojeg plina koji se nalazi i u ispuhu za potrebu proračuna, najčešće se mjeri CO_2. Koncentracije ispušnih plinova je moguće precizno mjeriti ako se plinovi ohlade i osuše. Nedostatak metode određivanja EGR-a pomoću koncentracija plinova na usisu i ispuhu je što nije moguće dinamički promatrati promjenu EGR-a jer je vrijeme potrebno da se ispušni plin pripremi, odvede do analizatora i odredi sastav puno veće od trajanja takta motora.

2. MJERENJE UDJELA PLINOVA

2.1. Mjerenje udjela CO i CO_2

Koncentracija CO i CO_2 najčešće se mjeri NDIR (engl. *Non-Dispersive InfraRed)* analizatorom. Princip rada se zasniva na apsorbciji plinova u infracrvenom spektru. Infracrvenim zračenjem kroz uzorak ispušnog plina molekule apsorbiraju zrake određene valne duljine. CO apsorbira zrake valne duljine oko 4,6μm, a CO_2 4,26 μm. Pojasni filter na termoparu propušta samo mali dio infracrvenog spektra kojeg apsorbira plin kojem želimo izmjeriti koncentraciju. Ne apsorbirane zrake dolaze do termopara koji pretvara toplinu u napon. Koncentracija određenog plina određuje se razlikom predanog zračenja i apsorbiranog zračenja na termoparu.



Slika 1. Princip rada NDIR analizatora [4]

2.2. Mjerenje udjela ugljikovodika

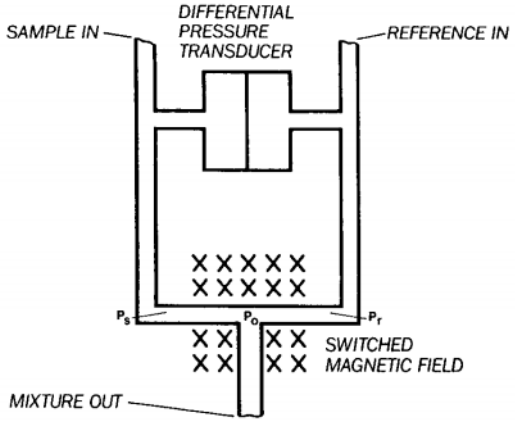
Udio ugljikovodika najčešće se mjeri FID (engl. *Flame Ionization Detection*) analizatorom. Smjesa plinova se uvodi u uređaj gdje ugljikovodici izgaraju u smjesi s vodikom i zrakom. Izgaranjem ugljikovodika stvaraju se ioni koji se otkrivaju pomoću elektroda. Prebrojani ioni su jednaki broju atoma ugljika. Ako znamo sastav goriva C_xH_y, može se pretpostaviti da mjereni ugljikovodici na ispuhu imaju sastav $C_1H_{y/x}$. Na mjernom instrumentu je udio ugljikovodika prikazan u ppm(*parts per million*) $\left[\frac{\mu mol}{mol}\right]$ što znači da bi vrijednost pretvorili u $\left[\frac{mol}{mol}\right]$,treba vrijednost podijeliti s milijun(10^6).

2.3. Mjerenje udjela NO

Udio dušikovih oksida najčešće se mjeri CLD (engl. *Chemiluminescence Detector*) analizatorom. Kemiluminiscencija je emisija svjetla kao rezultat kemijske reakcije. Uzorak plina su uvodi u instrument gdje se miješa s ozonom(O_3). Reakcijom NO i O_3 emitira se svjetlost. Emitirani fotoni su proporcionalni količini NO. Udio ostalih dušikovih oksida je zanemariv.

2.4. Mjerenje udjela O_2

Jedna od metoda mjerenja udjela kisika je paramagnetičnim analizatorima. Kisik je u odnosu na druge plinove vrlo magnetičan. Utjecajem 'on-off' magnetskog polja, stvara se razlika tlaka. Što je u smjesi više kisika, razlika tlaka će biti proporcionalno veća.



Slika 2. Mjerenje kisika [2]

3. IZRAČUN UDJELA EGR-a

3.1. Definicija EGR-a i opće jednadžbe

U najopćenitijem slučaju jednadžba izgaranja na lijevoj strani sadrži reaktante, a na desnoj produkte. Reaktanti ulaze u cilindar na usisu, a produkti izlaze iz cilindra na ispuhu. Iako se u reaktantima i produktima nalazi još puno više konstituenata, njihova količina je zanemariva u usporedbi s konstituentima navedenim u sljedećoj jednadžbi. Jednadžba je svedena na jedinicu količine goriva:

$$\begin{aligned} &C_x H_y O_z + n^r_{O_2} O_2 + n^r_{N_2} N_2 + n^r_{CO_2} CO_2 + n^r_{H_2O} H_2O + n^r_{CO} CO + \\ &+ n^r_{NO} NO + n^r_{C_aH_bO_c} C_a H_b O_c + n^r_{H_2} H_2 \rightarrow n^p_{O_2} O_2 + n^p_{N_2} N_2 + \\ &+ n^p_{CO_2} CO_2 + n^p_{H_2O} H_2O + n^p_{CO} CO + n^p_{NO} NO + n^p_{C_aH_bO_z} C_a H_b O_z + n^p_{H_2} H_2 . \end{aligned} \tag{1}$$

$n^r_i \left[\frac{\text{mol } i}{\text{mol goriva}} \right]$-količina reaktanta konstituenta *i* po 1 mol goriva,

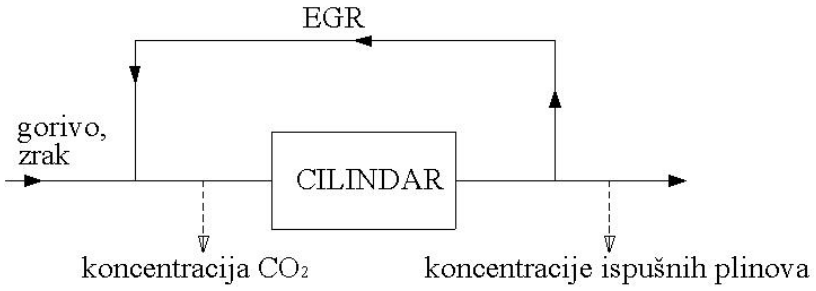
$n^p_i \left[\frac{\text{mol } i}{\text{mol goriva}} \right]$-količina produkta konstituenta *i* po 1 mol goriva.

EGR je definiran kao maseni udio recikliranih plinova u ukupnoj smjesi:

$$EGR = \frac{\dot{m}_{\text{EGR}}}{\dot{m}_{\text{uk}}}. \tag{2}$$

$\dot{m}_{\text{EGR}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$-maseni protok recirkuliranih plinova,

$\dot{m}_{\text{uk}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$-maseni protok kroz cilindar.



Slika 3. Skica postava za mjerenje EGR-a

Na slici 3 prikazana je skica postava za mjerenje EGR-a. Recirkulirani plinovi se miješaju s svježom smjesom zraka i goriva. Udio ugljičnog dioksida mjeri se dovoljno daleko od mješališta da se osigura dobro promješana smjesa. Na ispuhu se mjere koncentracije ispušnih plinova. Mjesto mjerenja koncentracija ispušnih plinova nije bitno, jer je sastav isti prije i poslje EGR grane.

Ako se EGR definira kao molni udio recikliranih plinova u ukupnim ispušnim plinovima, tako definirani EGR je ujedno i maseni udio recikliranih plinova u ukupnoj smjesi jer su ispušni plinovi i recirkulirani plinovi istog sastava odnosno molarne mase su im iste:

$$EGR = \frac{\dot{m}_{\mathrm{EGR}}}{\dot{m}_{\mathrm{uk}}} = \frac{\dot{n}_{\mathrm{EGR}} M_{\mathrm{EGR}}}{\dot{n}^p M_p} = \frac{n_{\mathrm{EGR}}}{n^p} \tag{3}$$

Lijeva strana jednadžbe (1) se može zapisati tako da se reaktanti grupiraju u gorivo, svježi zrak i recirkulirane plinove. Pretpostavka je da je svježi zrak suh.

$$\underbrace{C_x H_y O_z}_{\text{gorivo}} + \underbrace{n_{O_2,\mathrm{zrak}} O_2 + n_{N_2,\mathrm{zrak}} N_2 + n_{CO_2,\mathrm{zrak}} CO_2}_{\text{svježi zrak}} + \overbrace{EGR(\underbrace{n^p_{O_2} O_2 + \ldots + n^p_{H_2} H_2}_{\text{produkti, } n^p})}^{n_{\mathrm{EGR}}} \rightarrow$$
$$\rightarrow \underbrace{n^p_{O_2} O_2 + n^p_{N_2} N_2 + n^p_{CO_2} CO_2 + n^p_{H_2O} H_2O + n^p_{CO} CO + n^p_{NO} NO + n^p_{C_aH_bO_z} C_aH_bO_z + n^p_{H_2} H_2}_{\text{produkti, } n^p}. \tag{4}$$

$n_{i,\mathrm{zrak}} \left[\frac{\text{mol } i}{\text{mol goriva}} \right]$-količina konstituenta *i* iz zraka po molu goriva.

Definiramo pomoćne veličine K_{N_2} i K_{CO_2} koje predstavljaju omjer dušika odnosno ugljičnog dioksida po kisiku u zraku:

$$K_{N_2} = \frac{1 - y_{O_2}^{\text{zrak}} - y_{CO_2}^{\text{zrak}}}{y_{O_2}^{\text{zrak}}} \left[\left(\frac{\text{mol } N_2}{\text{mol } O_2} \right)_{\text{zrak}} \right], \tag{5}$$

$$K_{CO_2} = \frac{y_{CO_2}^{\text{zrak}}}{y_{O_2}^{\text{zrak}}} \left[\left(\frac{\text{mol } CO_2}{\text{mol } O_2} \right)_{\text{zrak}} \right], \tag{6}$$

$y_i^{\text{zrak}} \left[\frac{\text{mol } i}{\text{mol zraka}} \right]$ – udio konstituenta *i* u zraku.

Količina dušika u zraku izražena preko količine kisika iznosi:

$$n_{N_2,\text{zrak}} = K_{N_2} n_{O_2,\text{zrak}}. \tag{7}$$

Količina ugljičnog dioksida u zraku izražena preko količine kisika iznosi:

$$n_{CO_2,\text{zrak}} = K_{CO_2} n_{O_2,\text{zrak}}. \tag{8}$$

Zamjenom $n_{O_2,\text{zrak}}$ s *n'* i uvrštavanjem (7) i (8) u jednadžbu (4) dobivamo:

$$\begin{aligned} &\underbrace{C_x H_y O_z}_{\text{gorivo}} + \underbrace{n' \left(O_2 + K_{N_2} N_2 + K_{CO_2} CO_2 \right)}_{\text{svježi zrak}} + EGR(\underbrace{n_{O_2}^p O_2 + \ldots + n_{H_2}^p H_2}_{n^p}) \rightarrow \\ &\rightarrow \underbrace{n_{O_2}^p O_2 + n_{N_2}^p N_2 + n_{CO_2}^p CO_2 + n_{H_2O}^p H_2O + n_{CO}^p CO + n_{NO}^p NO + n_{CH}^p C_a H_b + n_{H_2}^p H_2}_{n^p}. \end{aligned} \tag{9}$$

3.2. Proračun sastava ispuha i usisa temeljem zadanih rubnih uvjeta

U ovom podpoglavlju izračunati će se sastav ispuha i usisa temeljem poznatog sastava goriva, faktora pretička zraka λ i EGR-a.

Pojednostavljena jednadžba izgaranja (9) za potpuno izgaranje (bez CO, NO i H_2) glasi:

$$\begin{aligned} &\underbrace{C_xH_yO_z}_{\text{gorivo}} + \underbrace{n'(O_2 + K_{N_2}N_2 + K_{CO_2}CO_2)}_{\text{svježi zrak}} + EGR(n^p_{CO_2}CO_2 + n^p_{H_2O}H_2O + \\ &+ n^p_{O_2}O_2 + n^p_{N_2}N_2 + n^p_{C_xH_yO_z}C_xH_yO_z) \rightarrow \\ &\rightarrow \underbrace{n^p_{CO_2}CO_2 + n^p_{H_2O}H_2O + n^p_{O_2}O_2 + n^p_{N_2}N_2 + n^p_{C_xH_yO_z}C_xH_yO_z}_{\text{produkti}}. \end{aligned} \tag{10}$$

U jednadžbi (10) unatoč potpunom izgaranju, na ispuhu se može nalaziti $n^p_{C_xH_yO_z}$ u slučaju bogate smjese.

Omjer kisik iz zraka/gorivo n' se može definirati pomoću stehiometrijskog omjera kisik/gorivo a_s i faktora pretička zraka λ.

$$\begin{aligned} &n' = \lambda \cdot a_s \rightarrow \lambda = \frac{n'}{a_s} \\ &n' > a_s \rightarrow \text{siromašna smjesa} \\ &n' < a_s \rightarrow \text{bogata smjesa} \end{aligned} \tag{11}$$

Stehiometrijski omjer kisik/gorivo a_s definiran je sastavom goriva:

$$a_s = x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}. \tag{12}$$

3.2.1. Proračun sastava ispuha i usisa temeljem zadanih rubnih uvjeta uz siromašnu smjesu

3.2.1.1. Izračun sastava na ispuhu

Za siromašnu smjesu vrijedi $n^p_{C_xH_yO_z} = 0$. Količine produkata na ispuhu dobiju se iz jednadžbe (10) postavljanjem ravnoteža atoma za pojedine elemente.

Ravnotežom atoma ugljika dobije se:

$$n^p_{CO_2} = K_{CO_2} a_s \lambda + x + EGR \cdot n^p_{CO_2} \rightarrow n^p_{CO_2} = \frac{K_{CO_2} a_s \lambda + x}{1 - EGR}. \tag{13}$$

Ravnotežom atoma vodika dobije se:

$$n^p_{H_2O} = \frac{y}{2} + EGR \cdot n^p_{H_2O} \rightarrow n^p_{H_2O} = \frac{y}{2(1 - EGR)}. \tag{14}$$

Ravnotežom atoma kisika dobije se:

$$n^p_{O_2} = a_s(1 - \lambda) + EGR \cdot n^p_{O_2} \rightarrow n^p_{O_2} = \frac{a_s(1 - \lambda)}{1 - EGR}. \tag{15}$$

Ravnotežom atoma dušika dobije se:

$$n^p_{N_2} = a_s \lambda K_{N_2} + EGR \cdot n^p_{N_2} \rightarrow n^p_{N_2} = \frac{a_s \lambda K_{N_2}}{1 - EGR}. \tag{16}$$

Ukupna količina na ispuhu je zbroj $n^p_{CO_2}$ (13), $n^p_{H_2O}$ (14), $n^p_{O_2}$ (15) i $n^p_{N_2}$ (16):

$$\sum n_i^p = n^p = \frac{1}{1 - EGR}\left(K_{CO_2} a_s \lambda + x + \frac{y}{2} + a_s(1 - \lambda) + a_s \lambda K_{N_2} \right). \tag{17}$$

Koncentracije produkata dobiju se dijeljenjem količine pojedinih produkata $n^p_{CO_2}$ (13), $n^p_{H_2O}$ (14), $n^p_{O_2}$ (15) ili $n^p_{N_2}$ (16) s ukupnom količinom produkata n^p (17):

$$y_i^p = \frac{n_i^p}{n^p} \tag{18}$$

Iz jednadžbi za količine na ispuhu (13), (14), (15) i (16) vidljivo je da imaju isti nazivnik $1-EGR$, što znači da član $1-EGR$ isčezne iz jednadžbi za koncentraciju na ispuhu. To je dokaz da koncentracije na ispuhu ne ovise o udjelu EGR-a. Posljedično, nije moguće odrediti EGR iz samo masenih protoka na usisu i koncentracija plinova na ispuhu.

Preuređenjem jednadžbe (10) na način da se kisik iz EGR-a pridruži svježem zraku dobiva se:

$$\begin{aligned} &C_xH_yO_z + \left(\overbrace{\underbrace{\lambda a_s}_{\text{mjereni}} + EGR \cdot n^p_{O_2}}^{\text{pravi omjer kisik-gorivo}} \right)(O_2 + K_{N_2}N_2 + K_{CO_2}CO_2) + \\ &+EGR\left[\left(n^p_{CO_2} - n^p_{O_2}K_{CO_2} \right)CO_2 + n^p_{H_2O}H_2O + \left(n^p_{N_2} - n^p_{O_2}K_{N_2} \right)N_2 + n^p_{C_xH_yO_z}C_xH_yO_z \right] \rightarrow \\ &\rightarrow n^p_{CO_2}CO_2 + n^p_{H_2O}H_2O + n^p_{O_2}O_2 + n^p_{N_2}N_2 + n^p_{C_xH_yO_z}C_xH_yO_z. \end{aligned} \tag{19}$$

Iz jednadžbe (19) je vidljivo da se u slučaju siromašne smjese smjesa dodatno osiromaši utjecajem EGR-a.

3.2.1.2. Izračun sastava na usisu

Količine reaktanata dobiju se iz jednadžbe (10) postavljanjem ravnoteža atoma za pojedine elemente.

Ravnotežom atoma ugljika dobije se:

$$n^r_{CO_2} = K_{CO_2}a_s\lambda + EGR \cdot n^p_{CO_2}. \tag{20}$$

Uvrštavanjem $n_{CO_2}^p$ iz jednadžbe (13) u $n_{CO_2}^r$ (20) slijedi:

$$n_{CO_2}^r = K_{CO_2} a_s \lambda + \left(K_{CO_2} a_s \lambda + x \right) \frac{EGR}{1 - EGR}. \tag{21}$$

Ravnotežom atoma vodika dobije se:

$$n_{H_2O}^r = EGR \cdot n_{H_2O}^p \tag{22}$$

Uvrštavanjem $n_{H_2O}^p$ iz jednadžbe (14) $n_{H_2O}^r$ (22) slijedi:

$$n_{H_2O}^r = \frac{y}{2} \frac{EGR}{\left(1 - EGR\right)} \tag{23}$$

Ravnotežom atoma kisika dobije se:

$$n_{O_2}^r = a_s \lambda + EGR \cdot n_{O_2}^p \tag{24}$$

Uvrštavanjem $n_{O_2}^p$ iz jednadžbe (15) u $n_{O_2}^r$ (24) slijedi:

$$n_{O_2}^r = a_s \lambda + a_s (1 - \lambda) \frac{EGR}{1 - EGR} \tag{25}$$

Ravnotežom atoma dušika dobije se:

$$n_{N_2}^r = a_s \lambda K_{N_2} + EGR \cdot n_{N_2}^p \tag{26}$$

Uvrštavanjem $n_{N_2}^p$ iz jednadžbe (16) u $n_{O_2}^r$ (26) slijedi:

$$n_{N_2}^r = a_s \lambda K_{N_2} + a_s \lambda K_{N_2} \frac{EGR}{1 - EGR} \tag{27}$$

$$n_{N_2}^r = a_s \lambda K_{N_2} \left(1 + \frac{EGR}{1 - EGR} \right) \tag{28}$$

Ukupna količina na usisu je zbroj $n^r_{CO_2}$ (21), $n^r_{H_2O}$ (23), $n^r_{O_2}$ (25) i $n^r_{N_2}$ (28):

$$n^r = \sum n^r_i \tag{29}$$

Koncentracije reaktanata dobiju se dijeljenjem količine pojedinih reaktanata $n^r_{CO_2}$ (21), $n^r_{H_2O}$ (23), $n^r_{O_2}$ (25) ili $n^r_{N_2}$ (28) s ukupnom količinom reaktanata n^r (29):

$$y^r_i = \frac{n^r_i}{n^r} \tag{30}$$

3.2.2. Proračun sastava ispuha i usisa temeljem zadanih rubnih uvjeta uz bogatu smjesu

3.2.2.1. Izračun sastava na ispuhu

Za bogatu smjesu vrijedi $n^p_{O_2} = 0$. Količine produkata $n^p_{CO_2}, n^p_{H_2O}$ i $n^p_{N_2}$ su iste kao za siromašnu smjesu. Količina neizgorjelih ugljikovodika je:

$$n^p_{C_xH_yO_z} = (1-\lambda) + EGR \cdot n^p_{C_xH_yO_z} \rightarrow n^p_{C_xH_yO_z} = \frac{1-\lambda}{1-EGR}, \tag{31}$$

Ukupna količina na ispuhu je zbroj $n^p_{CO_2}$ (13), $n^p_{H_2O}$ (14), $n^p_{N_2}$ (16) i $n^p_{C_xH_yO_z}$ (31):

$$\sum n^p_i = n^p = \frac{1}{1-EGR}\left(K_{CO_2} a_s \lambda + x + \frac{y}{2} + a_s \lambda K_{N_2} + (1-\lambda) \right). \tag{32}$$

Koncentracije produkata dobiju se dijeljenjem količine pojedinih produkata $n^p_{CO_2}$ (13), $n^p_{H_2O}$ (14), $n^p_{N_2}$ (16) ili $n^p_{C_xH_yO_z}$ (31) s ukupnom količinom produkata n^p (32):

$$y^p_i = \frac{n^p_i}{n^p} \tag{33}$$

3.2.2.2. Izračun sastava na usisu

Količine reaktanata $n^p_{CO_2}$, $n^p_{H_2O}$ i $n^p_{N_2}$ su iste kao za siromašnu smjesu. Količina ugljikovodika (goriva) $n^p_{C_xH_yO_z}$ je:

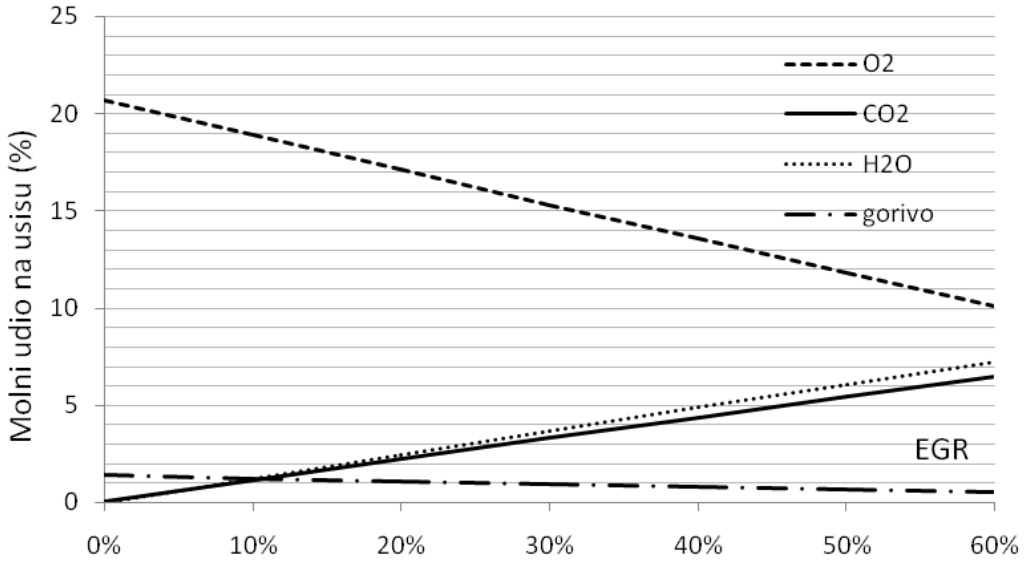
$$n^p_{C_xH_yO_z} = 1 + (1-\lambda)\frac{EGR}{1-EGR} \tag{34}$$

Ukupna količina na usisu je zbroj $n^r_{CO_2}$ (21), $n^r_{H_2O}$ (23), $n^r_{N_2}$ (28) i $n^p_{C_xH_yO_z}$ (34):

$$n^r = \sum n^r_i \tag{35}$$

Koncentracije reaktanata dobiju se dijeljenjem količine pojedinih reaktanata $n^r_{CO_2}$ (21), $n^r_{H_2O}$ (23), $n^r_{N_2}$ (28) ili $n^r_{C_xH_yO_z}$ (34) s ukupnom količinom reaktanata n^r (35):

$$y^r_i = \frac{n^r_i}{n^r} \tag{36}$$



Slika 4 Molni udio konstituenata na usisu

Na slici 4 prikazan je molni udio konstituenata na usisu s gorivom C_8H_{18} i faktorom pretička zraka λ=1. Udio kisika bez EGR je oko 21% i linearno pada prema nuli u EGR=100%. Udio goriva bez EGR je oko 1,5% i pada prema nuli, slično kao pravac za udio kisika, jer je

λ=konst. Udio ugljičnog dioksida i vode raste linearno od nule do vrijednosti koja je na ispuhu. Udio vode ima veći rast jer je ima više na ispuhu.

3.3. Proračun EGR uz koncentraciju CO_2 na usisu i koncentracijama na ispuhu

3.3.1. Određivanje koncentracija na ispuhu

Na ispuhu, većina mjerenih koncentracije je u suhim dimnim plinovima (osim ugljikovodika), pa je potrebno odrediti udio vode pomoću poznatog sastava goriva i ostalih mjerenih koncentracija na ispuhu.

Postavljanjem jedadžbe za ravnotežu ugljika iz jednadžbe (9) slijedi:

$$x + n' K_{CO_2} + EGR(n^p_{CO_2} + n^p_{CO} + a \cdot n^p_{CH}) = n^p_{CO_2} + n^p_{CO} + a \cdot n^p_{C_aH_bO_z}. \tag{37}$$

Postavljanjem jednadžbe za ravnotežu vodika iz jednadžbe (9) slijedi:

$$y + EGR(2n^p_{H_2O} + b \cdot n^p_{C_aH_bO_z} + 2n^p_{H_2}) = (2n^p_{H_2O} + b \cdot n^p_{C_aH_bO_z} + 2n^p_{H_2}). \tag{38}$$

Uz pojednostavljenje da je $K_{CO_2} \cong 0$ jednadžba (37) glasi:

$$x = (1 - EGR)\left(n^p_{CO_2} + n^p_{CO} + a \cdot n^p_{C_aH_bO_z}\right),\ K_{CO_2} \cong 0. \tag{39}$$

Dijeljenjam jednadžbe za ravnotežu atoma ugljika (39) s jednadžbom za ravnotežu vodika (38) slijedi:

$$\frac{x}{y} = \frac{n^p_{CO_2} + n^p_{CO} + a \cdot n^p_{C_aH_bO_z}}{2n^p_{H_2O} + b \cdot n^p_{C_aH_bO_z} + 2n^p_{H_2}}. \tag{40}$$

Uz pretpostavku da je omjer ugljika i vodika u neizgorjelom ugljikovodiku na ispuhu jednak kao u gorivu slijedi:

$$\frac{a}{b} = \frac{x}{y} \rightarrow a = \frac{x}{y} b. \tag{41}$$

Uvrštavanjem (41) u (40), količina ugljikovodika isčezava:

$$2n_{H_2O}^{p}\frac{x}{y}=n_{CO_2}^{p}+n_{CO}^{p}+\frac{x}{y}b\cdot n_{C_aH_bO_z}^{p}-\frac{x}{y}b\cdot n_{C_aH_bO_z}^{p}-\frac{x}{y}2n_{H_2}^{p}. \tag{42}$$

Sređivanjem jednadžbe (42), dobivamo jednadžbu za količinu vode na ispuhu:

$$n_{H_2O}^{p}=\frac{1}{2}\frac{y}{x}\left(n_{CO_2}^{p}+n_{CO}^{p}\right)-n_{H_2}^{p}. \tag{43}$$

Dijeljenjem jednadžbe (43) s ukupnom količinom suhih produkata n_{suhi}^{p} dobivamo:

$$y_{H_2O,\text{ suhi}}^{p}=\frac{1}{2}\frac{y}{x}\left(y_{CO_2,\text{suhi}}^{p}+y_{CO,\text{suhi}}^{p}\right)-y_{H_2,\text{suhi}}^{p}. \tag{44}$$

Mjerenje koncentracije vodika nije dostupno pa se računa promoću empirijske jednadžbe [5]:

$$y_{H_2}=\frac{y_{CO}y_{H_2O}}{3,5\cdot y_{CO_2}}\rightarrow y_{H_2,\text{suhi}}^{p}=\frac{y_{CO,\text{suhi}}^{p}\cdot y_{H_2O,\text{suhi}}^{p}}{3,5\cdot y_{CO_2,\text{suhi}}^{p}}. \tag{45}$$

Uvrštavanjem (45) u (44) te sređivanjem dobije se konačna jednadžba za koncentraciju vode u ispušnim plinovima na suhoj bazi:

$$y_{H_2O,\text{ suhi}}^{p}=\frac{\frac{1}{2}\frac{y}{x}\left(y_{CO_2,\text{suhi}}^{p}+y_{CO,\text{suhi}}^{p}\right)}{1+\frac{y_{CO,\text{suhi}}^{p}}{3,5\cdot y_{CO_2,\text{suhi}}^{p}}}. \tag{46}$$

Proračun za EGR je izveden s udjelima na mokroj bazi, pa se sada mogu pretvoriti udjeli na suhoj bazi u udjele na mokroj bazi kad je poznat udio vode.

Veza mokrih i suhih količina plinova:

$$n_{\text{suhi}}^{p}=n_{\text{mokri}}^{p}-n_{H_2O}^{p}. \tag{47}$$

Dijeljenjem obje strane jednadžbe (47) s $n^p_{H_2O}$ dobivamo:

$$\frac{n^p_{\text{suhi}}}{n^p_{H_2O}} = \frac{n^p_{\text{mokri}}}{n^p_{H_2O}} - 1. \tag{48}$$

Jednadžba (48) zapisana preko udjela:

$$\frac{1}{y^p_{H_2O,\text{suhi}}} = \frac{1}{y^p_{H_2O,\text{mokri}}} - 1. \tag{49}$$

Sređivanjem jednadžbe (49) dobivamo:

$$y^p_{H_2O,\text{mokri}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{y^p_{H_2O,\text{suhi}}} + 1\right)}. \tag{50}$$

Izračun ostalih dimnih plinova iz suhih u mokre:

$$n^p_i = \underbrace{\frac{n^p_i}{n^p_{\text{suhi}}}}_{y^p_{i,\text{ suhi}}} n^p_{\text{suhi}}. \tag{51}$$

Jednadžba (47) se može zapisati:

$$n^p_{\text{suhi}} = n^p_{\text{mokri}} - \underbrace{\frac{n^p_{H_2O}}{n^p_{\text{mokri}}}}_{y^p_{H_2O,\text{ mokri}}} n^p_{\text{mokri}}. \tag{52}$$

Sređivanjem jednadžbe (52) dobivamo:

$$n^p_{\text{suhi}} = n^p_{\text{mokri}} \left(1 - y^p_{H_2O,\text{mokri}}\right). \tag{53}$$

Uvrštavanjem jednadžbe (53) u (51) dobije se jednadžba za preračun koncentracije bilo kojeg suhog udjela ispušnog plina u mokri:

$$\frac{n_i^p}{n_{\text{mokri}}^p} = \frac{n_i^p}{n_{\text{suhi}}^p}\left(1 - y_{H_2O,\text{mokri}}^p\right), \tag{54}$$

$$y_{i,\text{mokri}}^p = y_{i,\text{suhi}}^p\left(1 - y_{H_2O,\text{mokri}}^p\right). \tag{55}$$

U ispuhu se obično mjere koncentracije CO, CO_2, NO, O_2 i CH, dok se koncentracije vode, vodika i dušika obično ne mjere. Voda se dobije pomoću jednadžbe (46), vodik (45), a dušik sljedećom jednadžbom:

$$y_{N_2}^p = 1 - \left(y_{O_2}^p + y_{H_2O}^p + y_{CO_2}^p + y_{CO}^p + y_{NO}^p + y_{CH}^p + y_{H_2}^p\right) \tag{56}$$

3.3.2. Proračun EGR-a

Iz jednadžbe (9) izvodimo jednadžbe za ravnoteže atoma za ugljik, vodik, kisik i dušik.

Ravnoteža atoma ugljika:

$$x + n' K_{CO_2} + EGR(n_{CO_2}^p + n_{CO}^p + a \cdot n_{CH}^p) = n_{CO_2}^p + n_{CO}^p + a \cdot n_{C_aH_bO_z}^p. \tag{57}$$

Ukupnu količinu pojedinog produkta možemo zapisati preko koncentracije y_i^p i ukupne količine n^p:

$$n_i^p = y_i^p n^p. \tag{58}$$

Uvrštavanjem jednadžbe (58) u (57) slijedi:

$$x + n' \cdot K_{CO_2} = (1 - EGR)\left(y_{CO_2}^p + y_{CO}^p + a \cdot y_{C_aH_bO_z}^p\right) n^p. \tag{59}$$

Zbog pojednostavljenja uvodimo substituciju *A*:

$$A = y_{CO_2}^p + y_{CO}^p + a \cdot y_{C_aH_bO_z}^p. \tag{60}$$

Uvrštavanjem (60) u (59) slijedi kraće zapisana jednadžba (59):

$$x + n' \cdot K_{CO_2} = (1 - EGR) A \cdot n^p. \tag{61}$$

Preuređenjem jednadžbe (61) slijedi:

$$(1 - EGR) n^p = \frac{x + n' \cdot K_{CO_2}}{A}, \tag{62}$$

$$n^p = n^p EGR + \frac{x + n' \cdot K_{CO_2}}{A}. \tag{63}$$

Ravnoteža atoma vodika:

$$y + EGR(2n^p_{H_2O} + b \cdot n^p_{C_aH_bO_z} + 2n^p_{H_2}) = (2n^p_{H_2O} + b \cdot n^p_{C_aH_bO_z} + 2n^p_{H_2}). \tag{64}$$

Uvrštavanjem jednadžbe (58) u (64) slijedi:

$$y = n^p (1 - EGR)(2y^p_{H_2O} + b \cdot y^p_{C_aH_bO_z} + 2y^p_{H_2}). \tag{65}$$

Zbog pojednostavljenja uvodimo substituciju *B*:

$$B = 2y^p_{H_2O} + b \cdot y^p_{C_aH_bO_z} + 2y^p_{H_2}. \tag{66}$$

Uvrštavanjem (66) u (65) te preuređivanjem slijede jednadžbe:

$$n^p (1 - EGR) = \frac{y}{B}, \tag{67}$$

$$n^p = \frac{y}{B} + n^p EGR. \tag{68}$$

Ravnoteža atoma kisika:

$$z + n'(2 + 2K_{CO_2}) + EGR(2n^p_{O_2} + 2n^p_{CO_2} + n^p_{H_2O} + n^p_{CO} + n^p_{NO} + z \cdot n^p_{C_aH_bO_z}) = \\ = 2n^p_{O_2} + 2n^p_{CO_2} + n^p_{H_2O} + n^p_{CO} + n^p_{NO} + z \cdot n^p_{C_aH_bO_z}. \quad (69)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (58) u (64) slijedi:

$$z + n'(2 + 2K_{CO_2}) = (1 - EGR)(2y^p_{O_2} + 2y^p_{CO_2} + y^p_{H_2O} + y^p_{CO} + y^p_{NO} + z \cdot y^p_{C_aH_bO_z})n^p. \quad (70)$$

Zbog pojednostavljenja uvodimo substituciju *C*:

$$C = 2y^p_{O_2} + 2y^p_{CO_2} + y^p_{H_2O} + y^p_{CO} + y^p_{NO} + z \cdot y^p_{C_aH_bO_z}. \quad (71)$$

Uvrštavanjem (71) u (70) te preuređivanjem slijede jednadžbe:

$$n^p(1 - EGR) = \frac{z + n'(2 + 2K_{CO_2})}{C}, \quad (72)$$

$$n^p = n^p EGR + \frac{z + n'(2 + 2K_{CO_2})}{C}. \quad (73)$$

Ravnoteža atoma dušika:

$$2n' \cdot K_{N_2} + EGR(2n^p_{N_2} + n^p_{NO}) = 2n^p_{N_2} + n^p_{NO}. \quad (74)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (58) u (74) slijedi:

$$2n' \cdot K_{N_2} = (1 - EGR)\left(2y^p_{N_2} + y^p_{NO}\right)n^p. \quad (75)$$

Zbog pojednostavljenja uvodimo substituciju *D*:

$$D = 2y^p_{N_2} + y^p_{NO}. \quad (76)$$

Uvrštavanjem (76) u (75) te preuređivanjem slijede jednadžbe:

$$n^p(1-EGR)=\frac{2n'\cdot K_{N_2}}{D}, \tag{77}$$

$$n^p=n^pEGR+\frac{2n'\cdot K_{N_2}}{D}. \tag{78}$$

Omjer kisik/gorivo n' se može dobiti na šest načina kombinacijom jednadžbi za ravnotežu atoma ugljika, vodika, kisika i dušika.

Kombiniranjem jednadžbi za balans ugljika (62) i vodika (67) dobije se jednadžba za omjer kisik/gorivo n':

$$\frac{x+n'\cdot K_{CO_2}}{A}=\frac{y}{B}, \tag{79}$$

$$n'=\frac{1}{K_{CO_2}}\left(\frac{y}{B}A-x\right) \tag{80}$$

Kombiniranjem jednadžbi za balans ugljika (62) i kisika (72):

$$\frac{x+n'\cdot K_{CO_2}}{A}=\frac{z+n'(2+2K_{CO_2})}{C}, \tag{81}$$

$$n'=\frac{x\cdot C-z\cdot A}{K_{CO_2}\left(2A-C\right)+2A}. \tag{82}$$

Kombiniranjem jednadžbi za balans ugljika (62) i dušika (77):

$$\frac{x+n'\cdot K_{CO_2}}{A}=\frac{2n'\cdot K_{N_2}}{D}, \tag{83}$$

$$n'=\frac{x\cdot D}{2K_{N_2}A-K_{CO_2}D}. \tag{84}$$

Kombiniranjem jednadžbi za balans vodika (67) i kisika (72):

$$\frac{y}{B}=\frac{z+n'(2+2K_{CO_2})}{C}, \tag{85}$$

$$n'=\frac{1}{2\left(1+K_{CO_2}\right)}\left(y\frac{C}{B}-z\right). \tag{86}$$

Kombiniranjem jednadžbi za balans vodika (67) i dušika (77):

$$\frac{y}{B}=\frac{2n'\cdot K_{N_2}}{D}, \tag{87}$$

$$n'=\frac{y\cdot D}{2\cdot B\cdot K_{N_2}}. \tag{88}$$

Kombiniranjem jednadžbi za balans kisika (72) i dušika (77):

$$\frac{z+n'(2+2K_{CO_2})}{C}=\frac{2n'\cdot K_{N_2}}{D}, \tag{89}$$

$$n'=\frac{z\cdot D}{2K_{N_2}\cdot C-2D(1+K_{CO_2})}. \tag{90}$$

Na usisu se mjeri udio CO_2 u suhim plinovima. Ukupna količina suhih reaktanata je:

$$n^r_{suhi}=n^r-n^r_{H_2O}, \tag{91}$$

$$n^r_{suhi}=n^r_{O_2}+n^r_{N_2}+n^r_{CO_2}+n^r_{CO}+n^r_{NO}+n^r_{CH}+n^r_{H_2}. \tag{92}$$

Udio ugljičnog dioksida na usisu je:

$$y^r_{CO_2,\text{suhi}}=\frac{n^r_{CO_2}}{n^r_{\text{suhi}}}\rightarrow n^r_{CO_2}=n^r_{\text{suhi}}y^r_{CO_2,\text{suhi}}. \tag{93}$$

Iz jednadžbe (9) ukupna količina suhih reaktanata na usisu je:

$$n^r_{\text{suhi}} = \underbrace{k}_{\text{gorivo}} + \underbrace{n'(1+K_{N_2}+K_{CO_2})}_{\text{zrak}} + EGR\underbrace{(n^p_{O_2}+n^p_{N_2}+n^p_{CO_2}+n^p_{CO}+n^p_{NO}+n^p_{CH}+n^p_{H_2})}_{\text{produkti bez vode}}. \tag{94}$$

$k=1 \rightarrow$ ubrizgavanje goriva prije mjesta mjerenja $y^r_{CO_2,\text{suhi}}$,

$k=0 \rightarrow$ ubrizgavanje goriva poslje mjesta mjerenja $y^r_{CO_2,\text{suhi}}$.

Uvrštavanjem jednadžbe (58) u (94) slijedi:

$$n^r_{\text{suhi}} = k + n'(1+K_{N_2}+K_{CO_2}) + EGR\cdot n^p \underbrace{(y^p_{O_2}+y^p_{N_2}+y^p_{CO_2}+y^p_{CO}+y^p_{NO}+y^p_{CH}+y^p_{H_2})}_{1-y^p_{H_2O}}. \tag{95}$$

Ugljični dioksid na usisu dolazi iz svježeg zraka i recikliranih plinova:

$$n^r_{CO_2} = n'K_{CO_2} + n^p_{CO_2}EGR. \tag{96}$$

Uvrštavanjem jednadžbe (58) u (96) slijedi:

$$n^r_{CO_2} = n'K_{CO_2} + y^p_{CO_2}n^pEGR. \tag{97}$$

Uvrštavanjem jednadžbe (95) u jednadžbu (93):

$$n^r_{CO_2} = y^r_{CO_2,\text{suhi}}\left[k + n'(1+K_{N_2}+K_{CO_2}) + EGR\cdot n^p\left(1-y^p_{H_2O}\right)\right]. \tag{98}$$

Uvrštavanjem jednadžbe (97) u (98):

$$n'K_{CO_2} + y^p_{CO_2}n^pEGR = y^r_{CO_2,\text{suhi}}\left[k + n'(1+K_{N_2}+K_{CO_2}) + EGR\cdot n^p\left(1-y^p_{H_2O}\right)\right]. \tag{99}$$

Sređivanjem jednadžbe (99) slijedi:

$$n^p EGR = \frac{y^r_{CO_2,\text{suhi}} \left[k + n'(1 + K_{N_2} + K_{CO_2}) \right] - n' K_{CO_2}}{y^p_{CO_2} - y^r_{CO_2,\text{suhi}} \left(1 - y^p_{H_2O}\right)}. \tag{100}$$

Konačno, jednadžba za EGR glasi:

$$EGR = \frac{n^p EGR}{n^p}. \tag{101}$$

Uvrštavanjem n' iz (80), (82), (84), (86), (88) ili (90) u $n^p EGR$ iz (100), te uvrštavanjem $n^p EGR$ iz (100) i n^p iz (63), (68), (73) ili (78) u EGR iz (101) dobiju se dvadeset i četiri moguće jednadžbe za EGR.

3.3.3. Izbor najrobusnije jednadžbe za EGR

Cilj je pronaći koja od dvadeset i četiri formule za EGR je najrobusnija, tj. koja je najmanje osjetljiva na greške mjerenja. Za tu potrebu koristi će se koncentracije na ispuhu dobivene u prethodnom podpoglavlju i zadati će se proizvoljna koncentracija CO_2 na usisu. Uvrštavanjem vrijednosti za gorivo C_8H_{18} i faktora pretička zraka λ dobivene su koncentracije na ispuhu. S tim dobivenim koncentracijama na ispuhu ulazi se u jednadžbe *A* (60), *B* (66), *C* (71) i *D* (76). koje uvrštavanjem dalje u proračun rezultiraju s EGR. Rezultati za EGR su isti za sve jednadžbe, što je ujedno i provjera ispravnosti jednadžbi.

Robusnost je ispitana zadavanjem krivih vrijednosti, tj. množenjem koncentracija CO_2, H_2O, O_2 i C_8H_{18} s nasumičnim faktorom k od 0,94 do 1,06 (mjerna pogrška iznosi do 6%). Koncentracije. CO_2 i H_2O su množene s približno istim faktorom jer prema jednadžbi (46) udio vode je proporcionalno ovisan o udjelu CO_2 u odsutnosi CO i H_2. Na taj način dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatom koji je dobiven s točno uvrštenim udjelima ispuha. Dvije formule za omjer kisik iz zraka/gorivo n'(80) i (90) su pokazale velika odstupanja od ostalih formula, zbog toga otpada osam formula za EGR.

Tablica 1 Greške u postocima u odnosu na točno rješenje

Jednadžba		1	2	3	4	5	6	7	8
k_{CO2}=1,06 k_{O2}=0,94	λ=1	0,60	7,53	0,16	7,10	1,04	7,96	0,60	7,53
	λ=3	7,28	5,45	6,88	5,06	7,68	5,85	7,28	5,45
k_{CO2}=0,95 k_{O2}=1,06	λ=1	-0,25	-7,17	-0,74	-7,67	0,24	-6,67	-0,25	-7,17
	λ=3	-7,19	-5,00	-7,56	-5,39	-6,81	-4,61	-7,19	-5,00
k_{CO2}=0,95 k_{O2}=0,94	λ=1	-0,25	-7,17	-0,74	-7,67	0,24	-6,67	-0,25	-7,17
	λ=3	-0,61	-6,73	-1,03	-7,11	-0,19	-6,35	-0,61	-6,73
k_{CO2}=1,06 k_{O2}=1,06	λ=1	0,60	7,53	0,16	7,10	1,04	7,96	0,60	7,53
	λ=3	1,31	7,06	0,94	6,66	1,68	7,46	1,31	7,06
Zbroj kvadrata greški		107,56	366,26	107,63	368,36	110,44	367,10	107,56	366,26
Jednadžba		9	10	11	12	13	14	15	16
k_{CO2}=1,06 k_{O2}=0,94	λ=1	0,60	0,60	0,60	0,60	7,53	7,53	7,53	7,53
	λ=3	7,28	7,28	7,28	7,28	5,45	5,45	5,45	5,45
k_{CO2}=0,95 k_{O2}=1,06	λ=1	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-7,17	-7,17	-7,17	-7,17
	λ=3	-7,19	-7,19	-7,19	-7,19	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00
k_{CO2}=0,95 k_{O2}=0,94	λ=1	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-7,17	-7,17	-7,17	-7,17
	λ=3	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-6,73	-6,73	-6,73	-6,73
k_{CO2}=1,06 k_{O2}=1,06	λ=1	0,60	0,60	0,60	0,60	7,53	7,53	7,53	7,53
	λ=3	1,31	1,31	1,31	1,31	7,06	7,06	7,06	7,06
Zbroj kvadrata greški		107,56	107,56	107,56	107,56	366,26	366,26	366,26	366,26

Brojevi jednadžbi u tablici odnose se na EGR dobiven pomoću jednadžbi:

- jednadžba 1↔(82) i (63).
- jednadžba 2↔(84) i (63).
- jednadžba 3↔(86) i (63).
- jednadžba 4↔(88) i (63).
- jednadžba 5↔(82) i (68).
- jednadžba 6↔(82) i (68).
- ....

Iz tablice 1 odabrana je jednadžba 1 jer je zbroj kvadrata greški najmanji, tj. ta formula ima prosječno najmanja odstupanja u odnosu na druge formule.

3.4. Proračun *EGR*-a uz masene protoke na usisu i koncentraciju CO_2 na usisu

Uz poznati omjer zrak/gorivo i molarne mase zraka i goriva možemo izračunati molni omjer zrak gorivo:

$$\frac{\dot{m}_{\text{zrak}}}{\dot{m}_{\text{g}}} = \frac{\dot{n}_{\text{zrak}}}{\dot{n}_{\text{g}}} \frac{M_{\text{zrak}}}{M_{\text{g}}} \rightarrow \frac{n_{\text{zrak}}}{n_{\text{g}}} = \frac{\dot{m}_{\text{zrak}}}{\dot{m}_{\text{g}}} \frac{M_{\text{g}}}{M_{\text{zrak}}}. \tag{102}$$

$\dot{m}_{\text{zrak}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$-maseni protok zraka,

$\dot{m}_{\text{g}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$-maseni protok goriva,

$\frac{n_{\text{zrak}}}{n_{\text{g}}} \left[\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} \right]$-molni omjer zrak gorivo.

Jedan mol zraka se sastoji od $0,21$ mola kisika:

$$n_{O_2}^{\text{zrak}} = y_{O_2}^{\text{zrak}} n_{\text{zrak}} = 0,21 \cdot n_{\text{zrak}}. \tag{103}$$

Uvrštavanjem (103) u (102) slijedi:

$$n' = \frac{n_{O_2}^{\text{zrak}}}{n_{\text{g}}} = 0,21 \frac{\dot{m}_{\text{zrak}}}{\dot{m}_{\text{g}}} \frac{M_{\text{g}}}{M_{\text{zrak}}}. \tag{104}$$

S poznatim omjerom kisik/gorivo n' iz jednadžbe (104) i s poznatim sastavom goriva (za izračunavanje a_s) možemo odrediti λ iz jednadžbe (11). Sad možemo odrediti sastav ispuha opisan u podpodpoglavlju 3.2.1.1 i 3.2.2.1. S određenim sastavom ispuha i n' određujemo n^p iz jednadžbi (63), (68), (73) ili (78). $n^p EGR$ određujemo iz jednadžbe (99). Konačno, možemo dobiti *EGR* iz jednadžbe (101).

3.5. Proračun EGR-a približnom formulom

U nastavku će se izvesti približna formula za *EGR* koja se često upotrebljava u praksi jer je jednostavna i relativno točna.

Ugljični dioksid na usisu $n^r_{CO_2}$ sastoji se od onog koji dolazi u zraku $n^{\text{zrak}}_{CO_2}$ i iz recikliranih plinova $EGR \cdot n^p_{CO_2}$.

$$n^r_{CO_2} = EGR \cdot n^p_{CO_2} + n^{zrak}_{CO_2} \rightarrow EGR = \frac{n^r_{CO_2} - n^{zrak}_{CO_2}}{n^p_{CO_2}} \tag{105}$$

Uvodimo pretpostavku da je količina suhih reaktanata na usisu n^r_{suhi} jednaka količini suhih produkata na ispuhu n^p_{suhi}, što u općem slučaju nije točno.

Reaktanti na usisu se sastoje od zraka n_{zrak}, goriva n_{g} i recikliranih plinova $EGR \cdot n^p_{\text{suhi}}$:

$$n^r_{\text{suhi}} = n_{\text{zrak}} + n_{\text{g}} + \overbrace{EGR \cdot n^p_{\text{suhi}}}^{n_{EGR,\text{suhi}}}, \tag{106}$$

Preuređivanjem jednadžbe (106), tako da na jednu stranu jednadžbe dobijemo n^r_{suhi} dobivamo:

$$n^r_{\text{suhi}} = n^p_{\text{suhi}} = \frac{n_{\text{zrak}} + n_{\text{gorivo}}}{1 - EGR} \tag{107}$$

Dijeljenjem brojnika i nazivnika u jednadžbi (105) s jednadžbom (107) dobivamo:

$$EGR = \frac{n^r_{CO_2} - n^{\text{zrak}}_{CO_2} / : n^r_{\text{suhi}}}{n^p_{CO_2} / : n^r_{\text{suhi}}} = \frac{y^r_{CO_2,\text{suhi}} - \overbrace{\frac{n^{\text{zrak}}_{CO_2}}{n_{\text{zrak}} + n_{\text{g}}}}^{y^r_{CO_2,\text{suhi, bez EGR-a}} \cong y^{\text{zrak}}_{CO_2}} \left(1 - EGR\right)}{y^p_{CO_2,\text{suhi}}} \tag{108}$$

Sređivanjem jednadžbe (108) slijedi:

$$EGR = \frac{y^r_{CO_2,\text{suhi}} - y^r_{CO_2,\text{suhi, bez EGR-a}}}{y^p_{CO_2,\text{suhi}} - y^r_{CO_2,\text{suhi, bez EGR-a}}} \tag{109}$$

Jednadžba (109) se može izraziti preko udjela CO_2 $y_{CO_2}^{\text{zrak}}$ u zraku jer jer količina goriva zanemariva u odnosu na količinu zraka. Za stehiometrijsko izgaranje goriva C_8H_{18} količina goriva iznosi $1/12,5$ količine zraka.

$$EGR = \frac{y_{CO_2,\text{suhi}}^{r} - y_{CO_2}^{\text{zrak}}}{y_{CO_2,\text{suhi}}^{p} - y_{CO_2}^{\text{zrak}}}. \tag{110}$$

3.6. Usporedba približne i točne formule za EGR s izračunatim koncentracijama plinova na ispuhu

U sljedećoj tablici uspoređen je EGR dobiven točnom formulom s EGR-om dobivenim približnom formulom. Koncentracije plinova na ispuhu ovise samo o sastavu goriva i faktoru pretička zraka λ kao što je prikazano u proračunu u podpoglavlju 3.2. Zadano je gorivo C_8H_{18}, te vrijednosti λ od 0,8, 1, 1,5 i 2,5. S tim ulaznim podacima izračunate su koncentracije plinova na ispuhu za četiri točke, odnosno vrijednosti λ. Koncentracija CO_2 na usisu je proizvoljno zadana, koncentracije na ispuhu ne ovise o njoj. Ulazni podaci (koncentracije plinova na ispuhu i koncentracija CO_2 na usisu) su isti za točnu i približnu formulu. Približno rješenje dobije se uvrštavanjem proizvoljno zadane koncentracije CO_2 i izračunate koncentracije CO_2 na ispuhu (pretvorene na suhu bazu) u formulu (110). Točno rješenje dobije se postupkom opisanim na kraju podpoglavlja 3.4.

Tablica 2. Rezultati s izračunatim vrijednostima

$y_{CO_2,\text{suhi}}^{r}$ (%)		0,1				1			
λ		0,8	1	1,5	2,5	0,8	1	1,5	2,5
EGR(%)	**točno**	0,43	0,43	0,64	1,07	6,81	6,81	10,21	17,01
	približno	0,40	0,40	0,61	1,04	6,39	6,36	9,78	16,62
Greška(%)		-6,55	-6,94	-4,61	-2,76	-6,16	-6,52	-4,19	-2,32
$y_{CO_2,\text{suhi}}^{r}$ (%)		2				5			
λ		0,8	1	1,5	2,5	0,8	1	1,5	2,5
EGR(%)	**točno**	13,83	13,83	20,74	34,57	34,53	34,48	51,72	86,20
	približno	13,04	12,99	19,97	33,93	33,01	32,87	50,53	85,86
Greška(%)		-5,72	-6,06	-3,72	-1,84	-4,41	-4,67	-2,30	-0,39

Iz tablice 2 se može zaključiti da približna jednadžba za EGR daje manji udio EGR-a u odnosu na točno rješenje i da je greška veća kod manjih vrijednosti faktora pretička zraka λ i manjeg udjela EGR-a. Manje greške mogu se objasniti sličnijim sastavom smjese na usisu i ispuhu, što je u skladu s pretpostavkom kod izvođenja približne formule (110) da je količina suhih reaktanata i produkata ista. Ako bi udio EGR-a bio 100% i/ili faktor pretička zraka λ teži u beskonačnost , greška bi bila 0.

3.7. Određivanje sastava goriva

U sljedećem podpoglavlju će se izračunati EGR iz realnih, izmjerenih podataka. Sastav goriva nije poznat, pa je potrebno pronaći relaciju za izračun sastava goriva da bi mogli izračunati EGR na način opisan u podpoglavljima 3.3 i 3.4.

Iz mjerenja su dostupni podaci o masenim protocima goriva i zraka iz čega slijedi omjer zrak/gorivo. Također, može se pretpostaviti da motor radi s stehiometrijskom smjesom jer je udio kisika na ispuhu nizak (oko 0,05%). Iz jednadžbe (104) slijedi:

$$\frac{\dot{m}_{\text{zrak}}}{\dot{m}_{\text{g}}} = a_s \frac{M_{\text{zrak}}}{M_{\text{g}}} \frac{1}{0,21} \tag{111}$$

Molarna masa zraka M_{zrak} je poznata, a molarna masa goriva M_{g} je:

$$\begin{aligned} M_{\text{g}} &= M_{C_x H_y O_z} = x \cdot M_C + y \cdot M_H + z \cdot M_O \\ M_{\text{g}} &= x \cdot 12,01 + y \cdot 1,008 + z \cdot 16 \end{aligned} \tag{112}$$

M_C, M_H , $M_O \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$-atomske mase ugljika, vodika i kisika.

Uvrštavanjem a_s (12) i M_{g} (112) u $\frac{\dot{m}_{\text{zrak}}}{\dot{m}_{\text{g}}}$ (111) dobije se jednadžba:

$$\frac{\dot{m}_{\text{zrak}}}{\dot{m}_{\text{g}}} = \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right) \frac{M_{\text{zrak}}}{x \cdot M_C + y \cdot M_H + z \cdot M_O} \frac{1}{0,21}. \tag{113}$$

Pretpostavka je da u gorivu nema kisika , z=0:

$$\frac{\dot{m}_{\text{zrak}}}{\dot{m}_{\text{g}}} = \left(x + \frac{y}{4} \right) \frac{M_{\text{zrak}}}{x \cdot M_C + y \cdot M_H} \frac{1}{0,21} \tag{114}$$

U jednadžbi (114) postoje dvije nepoznanice: *x* i *y*. Nepoznanica *y* se može pretpostaviti bilo koji broj jer veličina molekule nije bitna u proračunu. Veličina molekule nije bitna jer koncentracije na ispuhu ne ovise o veličini molekule. Konačno rješenje za *x*:

$$x = \frac{y\left(\frac{1}{4}\frac{M_{\text{zrak}}}{0,21} - \frac{\dot{m}_{\text{zrak}}}{\dot{m}_{\text{g}}} M_H\right)}{\frac{\dot{m}_{\text{zrak}}}{\dot{m}_{\text{g}}} M_C - \frac{M_{\text{zrak}}}{0,21}} \tag{115}$$

Iz tablice 3 je izračunat prosječni $\frac{\dot{m}_{\text{zrak}}}{\dot{m}_{\text{g}}}$ iz osam radnih točki, te je *y* pretpostavljen 18.

Rezultirajući sastav goriva je $C_{9,0708}H_{18}$

3.8. Usporedba EGR-a dobivenih s mjerenim vrijednostima

U ovom zadnjem podpoglavlju poglavlja 3 usporediti će se rezultati za EGR dobiveni proračunima iz podpoglavlja 3.3, 3.4 i 3.5. Iz mjerenja imamo zabilježenih osam radnih točaka.

Tablica 3 Rezultati s izmjerenim vrijednostima

Broj točke	$\dot{m}_{\text{zrak}}$	$\dot{m}_g$	$y^p_{O_2,\text{ suhi}}$	$y^p_{CO,\text{ suhi}}$	$y^p_{CO_2,\text{ suhi}}$	$y^p_{NO,\text{ suhi}}$	$y^p_{C_1H_{y/x}}$
	kg/h	**kg/h**	**% vol.**	**% vol.**	**% vol.**	**ppm**	**ppm**
1	22,52	1,51	0,05	0,38	14,62	2264	1173
2	22,60	1,52	0,05	0,38	14,59	2902	1304
3	22,11	1,50	0,05	0,51	14,31	704	1943
4	22,34	1,53	0,05	0,41	14,65	740	1267
5	22,45	1,52	0,05	0,47	14,45	266	2184
6	21,58	1,48	0,05	0,45	14,45	265	1899
7	22,34	1,51	0,05	0,45	14,62	647	1620
8	22,34	1,53	0,05	0,41	14,65	740	1267

Broj točke	$y^r_{CO_2,\text{ suhi}}$	**EGR1(CO_2 i konc. na ispuhu)**	**EGR2(masen i protoci i CO_2 na usisu)**	**EGR3(približna formula)**	**Greska EGR2 u odnosu na EGR1**	**Greska EGR3 u odnosu na EGR1**
	%	**%**	**%**	**%**	**%**	**%**
1	0,05	0,00	0,00	0,00	-	-
2	0,05	0,00	0,00	0,00	-	-
3	2,22	15,76	15,30	15,22	-2,87	-3,38
4	2,26	15,95	15,57	15,16	-2,41	-4,94
5	2,26	15,99	15,61	15,36	-2,40	-3,97
6	2,26	15,99	15,56	15,36	-2,64	-3,89
7	2,26	15,95	15,64	15,17	-1,94	-4,89
8	2,26	15,95	15,57	15,16	-2,41	-4,94

U tablici 3 su uspoređeni rezultati za EGR dobiveni s mjerenim veličinama. EGR1 je izračunat pomoću koncentracija na ispuhu i koncentracije CO_2 na usisu (podpoglavlje 3.3) i smatra se točnim rješenjem. EGR2 je izračunat pomoću masenih protoka na usisu i koncentracije CO_2 na usisu (podpoglavlje 3.4). EGR3 je izračunat približnom formulom koja je izvedena u podpoglavlju 3.5. U radnim točkama 1 i 2 koncentracija CO_2 $y^r_{CO_2,\text{ suhi}} = 0,05\%$, što je jednako udjelu CO_2 u zraku, pa je EGR=0. Usporedbom rezultata vidi se da je metoda EGR2 preciznija od EGR3. Usporedbom rezultata za EGR3 s rezultatima za EGR iz tablice 2 vidi se da stvaraju sličnu grešku u odnosu na točno rješenje.

4. ZAKLJUČAK

Izvedena su tri izraza za određivanje EGR-a, te su međusobno uspoređeni. Zaključeno je da da je formula za određivanje EGR-a uz masene protoke na usisu i koncentraciju CO_2 na usisu preciznija od približne formule za EGR, koja se često koristi u praksi.

Za određivanje EGR-a pomoću koncentracija CO_2 na usisu i koncentracija na ispuhu odabrana je formula koje se pokazala najrobusnijom. Najrobusnija ne znači nužno i najtočnija u zadanim uvjetima.

Usporedbom rezultata dobivenih za EGR pomoću različitih formula pokazano je da ne postoje relativno velike razlike u rezultatima. Točnost rezultata ne može se potvrditi jer nije poznat točan sastav goriva (udio kisika nije poznat). Ostale greške proizlaze iz formule za udio vodene pare i vodika i greške mjernih instrumenata.

Pokazano je da nije moguće odrediti udio EGR ako su poznate samo koncentracije na ispuhu i maseni protoci na usisu. Moguće je odrediti udio EGR-a masenim protocima na usisu s kojima možemo dobiti približan sastav ispuha i koncentracijom CO_2 na usisu.Tako određeni EGR ne ovisi o formuli koja je odabrana jer su sve jednadžbe za EGR i koncentracije na ispuhu izvedene iz istih jednadžbi za ravnoteže atoma pojedninih elemenata.

Prosječna greška za EGR-a određen uz masene protoke na usisu i koncentraciju CO_2 na usisu u odnosu na najtočniji rezultat, odnosno EGR-a određen uz koncentracije plinova na ispuhu i koncentraciju CO_2 na usisu iznosi -2,44%, dok prosječna greška za EGR određen približnom formulom u odnosu na EGR-a određen uz koncentracije plinova na ispuhu i koncentraciju CO_2 na usisu iznosi -4,34%.

LITERATURA

[1] Prashant M. Patane, Sudesh Powar and Shailesh Deshmukh:
A Physics based Model for Estimation of EGR Mass Flow Rate,
http://inpressco.com/category/ijcet

[2] Meriläinen, P.T. J Clin Monit Comput (1988) 5: 187.
https://doi.org/10.1007/BF02933716

[3] Mahalec, Lulić, Kozarac: *Motori s unutarnjim izgaranjem*, Sveučilište u Zagrebu, 2013

[4] Jason Seitz & Chenan Tong, Application Report.
http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/snaa207/snaa207.pdf.

[5] Ferguson, Colin R: *Internal combustion engines-applied thermodynamics*/Colin R. Ferguson, Allan T. Kirkpatrick, 2nd-ed, str. 118

PRILOZI

I. Matlab kod (Tablica 2)

```
clc; clear all
x=9.07053; y=18; z=0; a=1; b=y/x; c=z;
as=x+y/4-z/2;
y_CO=0; y_NO=0; y_CH=0; y_O2=0;
y_CO2_r=[0.001, 0.01, 0.02, 0.05];
y_CO2_zrak=0.04/100;
y_O2_zrak=0.21;
y_N2_zrak=1-y_O2_zrak-y_CO2_zrak;
K_N2=y_N2_zrak/y_O2_zrak;
K_CO2=y_CO2_zrak/y_O2_zrak;
lambda=[0.8 1 1.5 2.5];
for j=1:4
for i=1:4
if lambda(i)>=1;
   y_O2=as*(lambda(i)-
1)/(K_CO2*lambda(i)*as+x+0.5*y+K_N2*lambda(i)*as+as*(lambda(i)-1));
else
   y_CH=(1-
lambda(i))/(K_CO2*lambda(i)*as+lambda(i)*x+0.5*lambda(i)*y+K_N2*lambda(i)*as+(1-
lambda(i)))*1;
end
y_CO2=(K_CO2*lambda(i)*as+x)/(K_CO2*lambda(i)*as+x+0.5*y+K_N2*lambda(i)*as+as
*(lambda(i)-1));
y_H2O=0.5*y/(K_CO2*lambda(i)*as+x+0.5*y+K_N2*lambda(i)*as+as*(lambda(i)-1));
y_H2=y_CO*y_H2O/(3.5*y_CO2);
y_N2=1-y_H2O-y_H2-y_CO-y_CO2-y_NO-y_CH-y_O2;
A=y_CO2+y_CO+a*y_CH;
B=2*y_H2O+b*y_CH+2*y_H2;
C=2*y_O2+2*y_CO2+y_H2O+y_CO+y_NO+c*y_CH;
D=2*y_N2+y_NO;
n=(A*z-C*x)/(K_CO2*(C-2*A)-2*A);
k=0;
npEGR=(y_CO2_r(j)*(k+n*(1+K_CO2+K_N2))-n*K_CO2)/(y_CO2-y_CO2_r(j)*(1-
y_H2O));
np=npEGR+(x+n*K_CO2)/A;
EGR(j, i)=100*npEGR/np;
EGRpriblizno(j, i)=100*(y_CO2_r(j)-y_CO2_zrak)/(y_CO2/(1-y_H2O)-y_CO2_zrak);
end
end
EGR=reshape(reshape(EGR.',[],1), 1,16);
EGRpriblizno=reshape(reshape(EGRpriblizno.',[],1), 1,16);
greska=100*(EGRpriblizno-EGR)./EGR;
tablica=vertcat(EGR, EGRpriblizno, greska);
```

Matlab kod (Tablica 3, EGR2)

```
clearvars -except data
x=9.07053; y=18; z=0; a=1; b=y/x; c=z;
as=x+y/4-z/2;
Mg=x*12.01+y*1.008;
Mzrak=28.96;
EGR2=zeros(8, 1);
for i=1:8
y_CO=0; y_NO=0; y_CH=0; y_O2=0;
y_CO2_r=data(i, 9)/100;
y_CO2_zrak=0.05/100;
y_O2_zrak=0.21;
y_N2_zrak=1-y_O2_zrak-y_CO2_zrak;
K_N2=y_N2_zrak/y_O2_zrak;
K_CO2=y_CO2_zrak/y_O2_zrak;
lambda=Mg/Mzrak*0.21*data(i, 2)/data(i, 3)/as;
if lambda>=1;
    y_O2=as*(lambda-1)/(K_CO2*lambda*as+x+0.5*y+K_N2*lambda*as+as*(lambda-1));
else
    y_CH=(1-lambda)/(K_CO2*lambda*as+lambda*x+0.5*lambda*y+K_N2*lambda*as+(1-
lambda))*1;
end
y_CO2=(K_CO2*lambda*as+x)/(K_CO2*lambda*as+x+0.5*y+K_N2*lambda*as+as*(lamb
da-1));
y_H2O=0.5*y/(K_CO2*lambda*as+x+0.5*y+K_N2*lambda*as+as*(lambda-1));
y_H2=y_CO*y_H2O/(3.5*y_CO2);
y_N2=1-y_H2O-y_H2-y_CO-y_CO2-y_NO-y_CH-y_O2;
A=y_CO2+y_CO+a*y_CH;
B=2*y_H2O+b*y_CH+2*y_H2;
C=2*y_O2+2*y_CO2+y_H2O+y_CO+y_NO+c*y_CH;
D=2*y_N2+y_NO;
n=(A*z-C*x)/(K_CO2*(C-2*A)-2*A);
k=0;
npEGR=(y_CO2_r*(k+n*(1+K_CO2+K_N2))-n*K_CO2)/(y_CO2-y_CO2_r*(1-y_H2O));
np=npEGR+(x+n*K_CO2)/A;
EGR2(i, :)=100*npEGR/np;
end
```

Matlab kod (Tablica 3, EGR1 i EGR3)

```
clearvars -except data EGR2% učitava se 'data' iz excel-a, izvodi se program EGR2_tablica3
%
x=9.07084; y=18; z=0; a=1; b=y/x; c=0;
y_CO2_zrak=0.05/100;
y_O2_zrak=0.21;
y_N2_zrak=1-y_O2_zrak-y_CO2_zrak;
K_N2=y_N2_zrak/y_O2_zrak;
K_CO2=y_CO2_zrak/y_O2_zrak;
EGR=zeros(8, 1);
for i=1:8;
   y_O2=data(i, 4)/100;
   y_CO=data(i, 5)/100;
   y_CO2=data(i, 6)/100;
   y_NO=data(i, 7)/10^6;
   y_CH=data(i, 8)/10^6;%jedini mjeren mokri%
   y_H2O=1/2*y/x*(y_CO2+y_CO)/(1+y_CO/3.5/y_CO2);
   y_H2=y_CO*y_H2O/(3.5*y_CO2);
   y_H2O=1/(1/y_H2O+1);%pretvorba na mokru bazu%
   y_O2=y_O2*(1-y_H2O);
   y_CO=y_CO*(1-y_H2O);
   y_CO2=y_CO2*(1-y_H2O);
   y_NO=y_NO*(1-y_H2O);
   y_H2=y_H2*(1-y_H2O);
   y_N2=1-y_H2O-y_H2-y_CO-y_CO2-y_NO-y_CH-y_O2;
   y_CO2_r=data(i, 9)/100;
A=y_CO2+y_CO+a*y_CH;
B=2*y_H2O+b*y_CH+2*y_H2;
C=2*y_O2+2*y_CO2+y_H2O+y_CO+y_NO+c*y_CH;
D=2*y_N2+y_NO;
n=[(A*z-C*x)/(K_CO2*(C-2*A)-2*A)] ;
k=0;%mjestoo ubrizgavanja%
npEGR=(y_CO2_r*(k+n*(1+K_CO2+K_N2))-n*K_CO2)/(y_CO2-y_CO2_r*(1-y_H2O));
np=[npEGR+(x+n*K_CO2)/A];
EGR(i, :)=100*[npEGR./np] ;
EGRpriblizno(i, :)=100*(y_CO2_r-y_CO2_zrak)/(data(i, 6)/100-y_CO2_zrak);
end
EGR=horzcat(EGR, EGRpriblizno);
EGR=[EGR(:,1:1) EGR2 EGR(:, 2:2)]
```