

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Vencel

Zagreb, veljača 2013

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Darko Kozarac

Student:

Ivan Vencel

Zagreb, veljača 2013

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

Zahvaljujem se Doc. dr. sc. Darku Kozarcu na uputama i vodstvu tokom izrade ovog rada te kolegama mag. ing. Mladenu Božiću i mag. ing. Anti Vučetiću za pomoć oko laboratorijskog rada.

Zahvaljujem se i svim prijateljima sa faksa i izvan koji su mi bili od velike pomoći tokom studija.

Na kraju hvala mojoj obitelji, a posebno mojim roditeljima koji su mi omogućili školovanje i što su mi uzor u životu.

Ivan Vencel

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. Povijest sustava za ubrizgavanje goriva	2
3. Sustavi ubrizgavanja goriva.....	3
3.1 Osnovni zadaci, prednosti i vrste sustava za ubrizgavanje	3
3.2 Indirektno ubrizgavanje.....	5
3.2.1 Single Point Injection.....	5
3.2.2 Multi Point Injection	6
3.3 Direktno ubrizgavanje	8
3.4 Konstrukcija brizgaljki	11
3.4.1 Niskotlačne brizgaljke.....	11
3.4.2 Visokotlačne brizgaljke.....	12
3.5 Sustav upravljanja radom motora (ECU)	13
3.5.1 Signal za upravljanje brizgaljkom.....	15
4. Proračun upravljanja količinom ubrizganog goriva i frekvencijom ubrizgavanja	17
4.1 Frekvencija ubrizgavanja	17
4.2 Proračun protoka goriva za određenu radnu točku.....	18
4.3 Broj ciklusa ubrizgavanja.....	20
5. Sklop za ubrizgavanje goriva.....	22
5.1 Električni i elektronički sklopovi za upravljanje elektroničkom brizgaljkom	22
5.2 Sklop za mjerenje ubrizganog goriva.....	25
6. Mjerenje karakteristike brizgaljke	28
6.1 Mjerenje pri brzini vrtnje 1000min^{-1}	29
6.2 Mjerenja pri brzini vrtnje 3000min^{-1} i 6000min^{-1}	31
6.3 Usporedba rezultata mjerenja za različite brzine vrtnje	34
7. ZAKLJUČAK.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1. Usporedba snage i momenta na motoru s rasplinjačem i ubrizgavanjem goriva [2]. ...	3
Slika 2. Shema sustava ubrizgavanja za Ottov motor sa indirektnim MPI ubrizgavanjem [2].	5
Slika 3. Single Point Injection [2].	6
Slika 4. Multi Point Injection [2].	6
Slika 5. Shema vremenske raspodjele pojedinih procesa kod istodobnog ubrizgavanja [2].	7
Slika 6. Grupno ubrizgavanje [2].	7
Slika 7. Slijedno ubrizgavanje [2].	7
Slika 8. Ottov motor s direktnim ubrizgavanjem benzina (GDI) [2].	9
Slika 9. Ubrizgavanje kod djelomičnog opterećenja [2].	9
Slika 10. Ubrizgavanje kod punog opterećenja [2].	10
Slika 11. Dijelovi niskotlačne brizgaljke: 1. Filtar goriva, 2. Električni priključak, 3. Zavojnica, 4. Kućište brizgaljke, 5. Armatura, 6. Vodilica ventila, 7. Ventil [1].	11
Slika 12. Dijelovi visokotlačne brizgaljke: 1. Filtar goriva, 2. Električni priključak, 3. Spiralna opruga, 4. Zavojnica, 5. Kućište brizgaljke, 6. Ventil, 7. Vrh brizgaljke, 8. Mlaznica [3].	12
Slika 13. Blok dijagram ECU-a [1].	13
Slika 14. Prikaz izlaznog signala.	15
Slika 15. Blok dijagram programa u LabView-u.	15
Slika 16. Sučelje programa.	16
Slika 17. Shema električnog sklopa.	22
Slika 18. Prikaz električnog sklopa spojenog u laboratoriju.	23
Slika 19. NI9074 kontroler i modul NI9474.	24
Slika 20. Shema sklopa za ubrizgavanje [1].	25
Slika 21. Sklop za ubrizgavanje u laboratoriju.	26
Slika 22. Sklop u laboratoriju, detalj zajedničkog voda s brizgaljkama.	27
Slika 23. Detalj spojene brizgaljke sa menzurom.	27
Slika 24. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 1000min^{-1} .	30
Slika 25. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 1000min^{-1} .	30
Slika 26. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 3000min^{-1} .	31
Slika 27. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 3000min^{-1} .	32
Slika 28. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 6000min^{-1} .	33
Slika 29. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 6000min^{-1} .	33
Slika 30. Karakteristika brizgaljke s obzirom na volumen ubrizganog goriva po 1ms.	34
Slika 31. Karakteristika brizgaljke s obzirom na volumen ubrizganog goriva po 1 ciklusu.	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Specifikacija brizgaljke.....	22
Tablica 2. Karakteristične točke i broj zadanih ciklusa za brzinu vrtnje motora 1000min^{-1}	28
Tablica 3. Karakteristične točke i broj zadanih ciklusa za brzinu vrtnje motora 3000min^{-1}	28
Tablica 4. Karakteristične točke i broj zadanih ciklusa za brzinu vrtnje motora 6000min^{-1}	29
Tablica 5. Rezultati mjerenja pri brzini vrtnje motora od 1000min^{-1}	29
Tablica 6. Rezultati mjerenja pri brzini vrtnje motora od 3000min^{-1}	31
Tablica 7. Rezultati mjerenja pri brzini vrtnje motora od 6000min^{-1}	32

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
D	m	promjer cilindra
F	Hz	frekvencija
H	m	hod klipa
H_d	MJ/kg	donja ogrjevna vrijednost goriva
I	A	jakost struje
M	kg	masa
m_c	kg	masa u cilindru
m_g	kg	masa goriva
m_{ref}	kg	referentna masa u cilindru
N	min^{-1}	broj okretaja motora
n_c	/	broj ciklusa
P	W	snaga
P	Pa	tlak
p_l	Pa	tlak usisa
p_d	Pa	tlak okoliša
p_i	Pa	srednji indicirani tlak
Q	m^3/s	protok
R_c	J/kgK	plinska konstanta mase u cilindru
R_g	J/kgK	plinska konstanta goriva
R_{isp}	J/kgK	plinska konstanta ispušnih plinova
R_{zr}	J/kgK	plinska konstanta zraka
T	s	vrijeme
T	s	period
T_0	K	temperatura okoliša
T_l	K	temperatura usisa
T_i	s	korigirano trajanje ubrizgavanja
T_p	s	osnovno trajanje ubrizgavanje
U	V	napon
V	m^3	volumen
V_H	m^3	volumen cilindra
V_g	m^3	volumen goriva
x_g	/	maseni udio goriva
x_{isp}	/	maseni udio ispušnih plinova
x_{zr}	/	maseni udio zraka
Z_0	/	stehiometrijski omjer goriva i zraka

Γ	/	omjer produkata izgaranja
E	/	kompresijski omjer
η_i	/	indicirani stupanj djelovanja
A	/	faktor zraka
λ_{pu}	/	stupanj punjenja
ρ_g	kg/m ³	gustoća goriva

SAŽETAK

U sklopu završnog rada proučeni su sustavi ubrizgavanja goriva kod motora s unutarnjim izgaranjem i njihovo upravljanje, te su odabrani električni i elektronički sklopovi potrebni za upravljanje brizgaljkom. Obradene su teoretske osnove za proračun protoka goriva. Nakon uspješno uspostavljenog rada s brizgaljkom napravljeno je mjerenje ubrizganog goriva kako bi se utvrdila karakteristika brizgaljke pri različitim brzinama vrtnje motora.

Upravljanje brizgaljkom ostvareno je pomoću programskog paketa „LabView“ i izrađenog elektroničkog sklopa, te National Instruments CompactRIO platforme u Laboratoriju za motore i vozila FSB-a bez upotrebe računala motora (ECU).

Ključne riječi: Brizgaljka, CompactRIO, ECU, Labview, Upravljanje

SUMMARY

In this bachelor degree project I have studied fuel injection systems in internal combustion engines and their control. For the purpose of controlling an injector, injector driver was made. Also some theoretical basics of fuel injection calculation have been studied. After achieving successful control over the injector, measurements have been made to determine injector flow characteristics at various engine speeds.

Injection control was achieved without use of an ECU, based on „ LabView“ software and an injection driver assembly system with NI CompactRIO platform. The assembly was made at Faculty of Engineering and Naval Architecture Zagreb in the laboratory for engines and motor vehicles.

Key words: Injector, CompactRIO, ECU, Labview, Control

1. UVOD

Ubrizgavanje goriva je sustav za dobavu goriva motoru s unutrašnjim izgaranjem. Ubrizgavanje goriva postalo je glavni način dobave goriva u Ottovim motorima zamijenivši rasplinjače tijekom 80tih i 90tih godina 20. stoljeća. Više vrsta tih sustava postojalo je od samih početaka razvoja motora s unutrašnjim izgaranjem.

U Laboratoriju za motore i vozila FSB-a želi se u skoroj budućnosti izraditi sustav pomoću kojega bi se upravljalo motorom na motornoj kočnici. Da bi to bilo moguće potrebno je obraditi više sustava bitnih za regulaciju rada motora. U ovom završnom radu obrađen je sustav ubrizgavanja goriva.

Na početku rada proučeno je više konstrukcijskih izvedbi sustava za ubrizgavanje goriva, njihov način rada, prednosti i zadaci. Ključni dio ovoga rada su brizgaljka i njeno upravljanje. Proučena je konstrukcijska izvedba niskotlačnih i visokotlačnih brizgaljki i njihovo upravljanje pomoću ECU-a motora te signal kojim se ona upravlja.

Napravljen je izračun potrebnog volumena goriva po ciklusu za bilo koji Ottov motor, te frekvencija ubrizgavanja goriva.

Za potrebe upravljanja brizgaljkom izrađen je elektronički sklop koji je pobliže opisan u radu i program za upravljanje u programskom paketu „LabView“. Nakon postavljanja cijelog sustava za ubrizgavanje u Laboratoriju za motore i vozila FSB-a, provedeno je mjerenje čiji je cilj definicija karakteristike brizgaljke u realnim uvjetima. Mjerila se količina ubrizganog goriva u ovisnosti o trajanju ubrizgavanja i frekvenciji ubrizgavanja goriva. Zadatak mjerenja bio je pronaći koliko brizgaljka ubrizga goriva pri određenoj duljini trajanja ubrizgavanja i frekvenciji ubrizgavanja.

2. Povijest sustava za ubrizgavanje goriva

Prvu napravu sličnu sustavu za ubrizgavanje goriva napravio je Herber Akroyd Stuart pomoću pumpe za pripremu ulja pod visokim tlakom a koristila se kod motora s vrućom komorom¹ početkom 20. stoljeća. Ovaj sustav usavršio je Robert Bosch u suradnji sa Clessie Cumminsom za upotrebu na Dieslovim motorima, a samo ubrizgavanje goriva je ušlo u širu komercijalnu uporabu u Dieslovim motorima sredinom 20tih godina 19.st.

Uporaba ubrizgavanja goriva u Ottovim motorima se prvi puta pojavljuje 1925.g na Hesselmanovom motoru².

Prvi sustav s mehanički reguliranim ubrizgavanjem testirala je poznata talijanska tvornica automobila Alfa Romeo u svojem modelu Alfa Romeo 6C 2500, 1940.g na poznatoj utrci „Tisuću Milja“ koja se održavala u Italiji.

Za komercijalnu uporabu, ubrizgavanje goriva u Ottovim motorima je razvio i predstavio Bosch 1952.g u modelima Goliath GP700. Još jedan poznati mehanički sustav za ubrizgavanje goriva koji je napravio Bosch, nazvan Jetronic, koristila je većina europskih proizvođača automobila sredinom 70tih godina 20.stoljeća. Sustav Jetronic ubrizgavao je gorivo u usisni kanal iznad usisnog ventila.

Elektroničko ubrizgavanje goriva (EFI), za komercijalnu uporabu prva je razvila tvrtka Bendix Corporation 1957.g. Bosch je razvio elektroničko ubrizgavanje goriva naziva D-Jetronic, koji se prvi puta koristio na VW1600TL/E 1967.g. Iz tog sustava razvijeni su sustavi K-Jetronic i L-Jetronic.

Motorola je 1980.g predstavila prvi elektronički sustav za upravljanje radom motora (ECU – engine control unit³) EEC III, koji je integrirao regulaciju više podsustava motora kao što su ubrizgavanje goriva i paljenje tj. preskakanje iskre na svjećici. Danas je ECU s integriranom regulacijom ubrizgavanja goriva i paljenja standardan pristup svim proizvođačima pri proizvodnji automobila.

¹ Motor s vrućom komorom je vrsta MSUI kod kojega se gorivo zapaljuje uslijed kontakta sa usijanom metalnom podlogom u komori

² Hesselmanov motor je Ottov motor koji koristi paljenje smjese svjećicom ali se benzin koristi samo kao gorivo za pokretanje motora, a kasnije se prebacuje na dizel ili kerozin kao gorivo

³ ECU eng. Engine Control Unit – elektronički sustav za upravljanje radom motora

3. Sustavi ubrizgavanja goriva

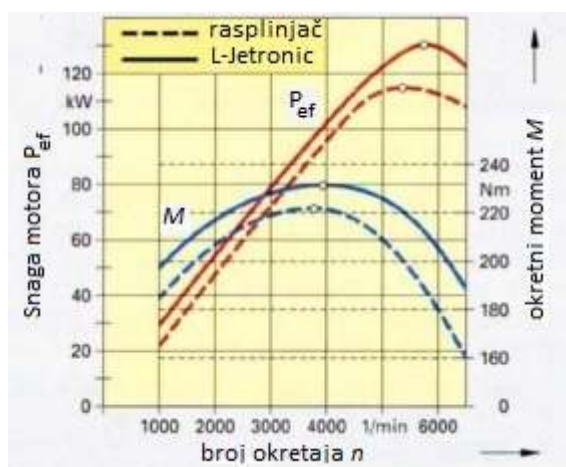
3.1 Osnovni zadaci, prednosti i vrste sustava za ubrizgavanje

Zadaci sustava za ubrizgavanje su:

- fino raspršiti gorivo u usisavani zrak i stvoriti što ravnomjerniju smjesu
- prilagoditi kvalitetu smjese trenutačnim potrebama motora

Prednosti sustava za ubrizgavanje goriva u odnosu na rasplinjače:

- točnije stvaranje smjese u svim pogonskim uvjetima rada motora,
- bolje punjenje zbog povoljnijeg oblikovanja usisnih kanala i boljeg unutarnjeg hlađenja
- veći okretni moment i veća specifična snaga po volumenu motora (Slika 1.)
- finije raspršivanje goriva i bolje izgaranje smjese
- brže isparavanje goriva i stvaranje homogene smjese zbog finijeg raspršivanja
- ujednačenost količine ubrizganog goriva između cilindara
- kraći put smjese do cilindara
- dobri prijelazi pri promjeni opterećenja i bolja elastičnost motora
- lakše i sigurnije upućivanje hladnog i toplog motora
- bolje ubrzanje i kočenje motorom zbog brže reakcije sustava ubrizgavanja
- manja specifična potrošnja goriva i emisija štetnih tvari



Slika 1. Usporedba snage i momenta na motoru s rasplinjačem i ubrizgavanjem goriva [2].

Sustavi za ubrizgavanje goriva mogu se podijeliti s obzirom na više kriterija:

Vrste ubrizgavanja s obzirom na mjesto ubrizgavanja:

- direktno (u cilindar)
- indirektno ubrizgavanje (u usisnu granu, SPI⁴ ili MPI⁵)

Vrste indirektnog ubrizgavanja:

- centralno (ispred prigušne zaklopke, SPI, TBI⁶),
- decentralizirano, pojedinačno (u usisne cijevi pojedinih cilindara, MPI)

Vrste ubrizgavanja s obzirom na način ubrizgavanja:

- kontinuirano ili neprekinuto,
- impulsno ili prekidno ubrizgavanje,

Vrste ubrizgavanja prema trenutku ubrizgavanja:

- kontinuirano
- grupno (npr. po dva cilindra istovremeno)
- sekvencijalno (za svaki cilindar posebno)

Kontinuirano ubrizgavanje može biti:

- mehaničko-hidrauličko s mjerenjem količine zraka (K-Jetronic)
- mehaničko-hidrauličko s dodatnom elektronikom za korekciju smjese (KE-Jetronic)

Impulsno ubrizgavanje uvijek je upravljano elektronikom i može biti:

- s mjerenjem volumnog protoka zraka (L-Jetronic)
- s mjerenjem masenog protoka zraka (LH-Jetronic)
- s mjerenjem tlaka zraka (D-Jetronic)

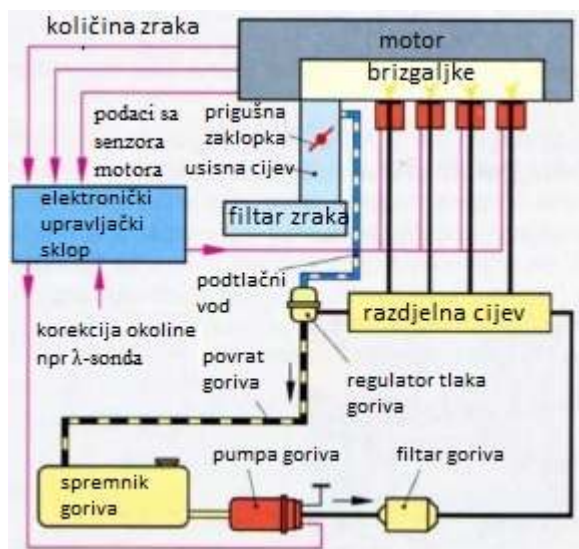
⁴ SPI- eng. Single Point Injection - ubrizgavanje u jednoj točki

⁵ MPI-eng. Multi Point Injection – ubrizgavanje u više točaka

⁶ TBI-eng. Throttle Body Injection – ubrizgavanje u kućište prigušne zaklopke

Sustavi ubrizgavanja s elektroničkim upravljanjem i regulacijom ubrizgavanja goriva imaju tri osnovna dijela (Slika 2.):

- usisni dio (filtar zraka, usisna cijev, prigušna zaklopka, usisna grana),
- sustav goriva (spremnik goriva, pumpa, filtar, regulator tlaka, brizgaljka),
- upravljački sklop (senzori, upravljačka jedinica).



Slika 2. Shema sustava ubrizgavanja za Ottov motor sa indirektnim MPI ubrizgavanjem [2].

3.2 Indirektno ubrizgavanje

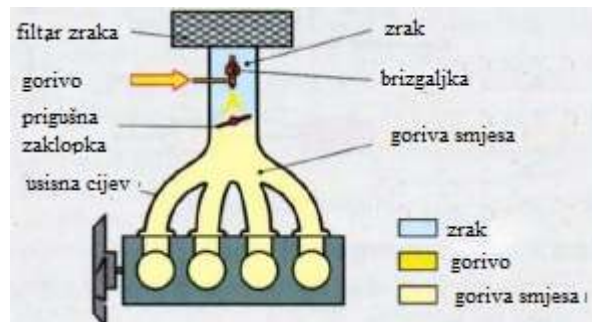
Gorivo se ubrizgava ispred usisnih ventila ili u kućište prigušne zaklopke. Radi se o vanjskom stvaranju smjese, a samo ubrizgavanje goriva može biti izvedeno u jednoj (SPI) ili više točaka (MPI).

3.2.1 Single Point Injection

Gorivo se ubrizgava u jednoj točki, u kućištu prigušne zaklopke, ispred leptira (tzv. Throttle Body Injection, TBI). Isparavanju goriva pridonose zagrijane stjenke usisne grane. Nedostatak SPI sustava (Slika 3.) je nejednolika raspodjela goriva po cilindrima zbog različite dužine usisnih grana i otpora strujanja (stvaranje vrtloga, hrapavosti stjenki i ostalih

aerodinamičkih otpora). Osim toga, na stjenkama usisne cijevi stvara se film goriva, pa cilindri dobivaju različitu kvalitetu smjese.

Dobra strana ovog sustava je znatno jednostavnija i jeftinija konstrukcija.



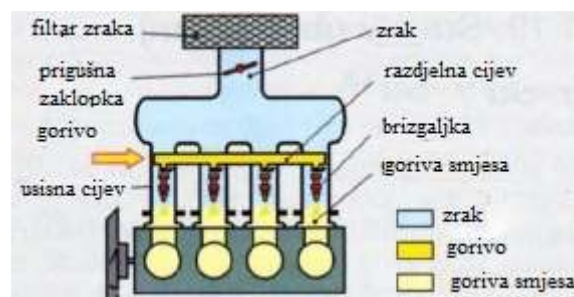
Slika 3. Single Point Injection [2].

3.2.2 Multi Point Injection

Svakom cilindru pridružena je po jedna brizgaljka, bilo u usisnim cijevima ili neposredno ispred usisnih ventila. Svaki cilindar dobiva jednako kvalitetnu smjesu.

Kod MPI sustava (Slika 4.) možemo razlikovati prema načinu ubrizgavanja:

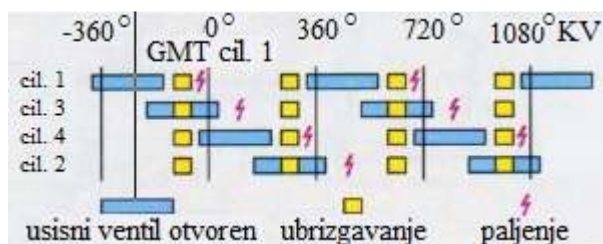
- istodobno ili simultano ubrizgavanje
- grupno ubrizgavanje
- slijedno ili sekvencijalno ubrizgavanje



Slika 4. Multi Point Injection [2].

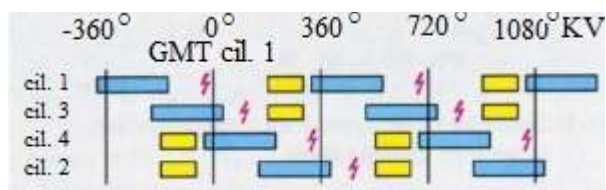
Kod istodobnog ubrizgavanja, sve se brizgaljke istodobno otvaraju bez obzira na odvijanje taktova u pojedinim cilindrima, pa su i vremena za stvaranje smjese vrlo različita (Slika 5.). Kako bi se unatoč tome stvorila smjesa više-manje podjednake kvalitete po svim cilindrima,

ukupna količina goriva ubrizgava se u dva navrata (za svaki okretaj koljenastog vratila pola količine).



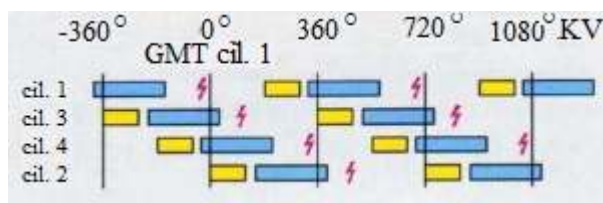
Slika 5. Shema vremenske raspodjele pojedinih procesa kod istodobnog ubrizgavanja [2].

Povoljnije je grupno ubrizgavanje, kod kojeg se brizgaljka 1. i 3., te 2. i 4. cilindra izmjenično otvaraju, tako da gorivo ubrizgavaju uvijek prije takta usisa. Ubrizgava se cijela količina goriva (Slika 6.). Vrijeme za stvaranje smjese različito je za različite cilindre.



Slika 6. Grupno ubrizgavanje [2].

Svaka se brizgaljka kod slijednog ubrizgavanja, aktivira neposredno prije početka takta usisa pojedinog cilindra (Slika 7.). Prednosti ovakvog načina ubrizgavanja su optimalna smjesa za sve cilindre i bolje unutarnje hlađenje cilindara. Vrijeme za stvaranje smjese jednako je za sve cilindre.



Slika 7. Slijedno ubrizgavanje [2].

3.3 Direktno ubrizgavanje

Gorivo se ubrizgava izravno u prostor izgaranja (eng. GDI-Gasoline Direct Injection, Slika 8.), u taktu usisa ili kompresije. Da bi izgaranje bilo što kvalitetnije, stupanj kompresije izrazito je visok ($\epsilon = 12 : 1$) što daje GDI-motoru veliku specifičnu snagu po volumenu.

Konstruktivske osobitosti GDI-motora:

- usisni kanali su gotovo okomiti kako bi se dobilo odgovarajuće strujanje
- pomoću visokotlačne pumpe gorivo se u cilindre ubrizgava pod tlakom od 80-100 bara
- koriste se visokotlačne brizgaljke s promjenljivim oblikom mlaza goriva
- koristi se klip s nosom i udubljenjem za oblikovanje strujanja u cilindru

Sustav dobave goriva dijeli se na:

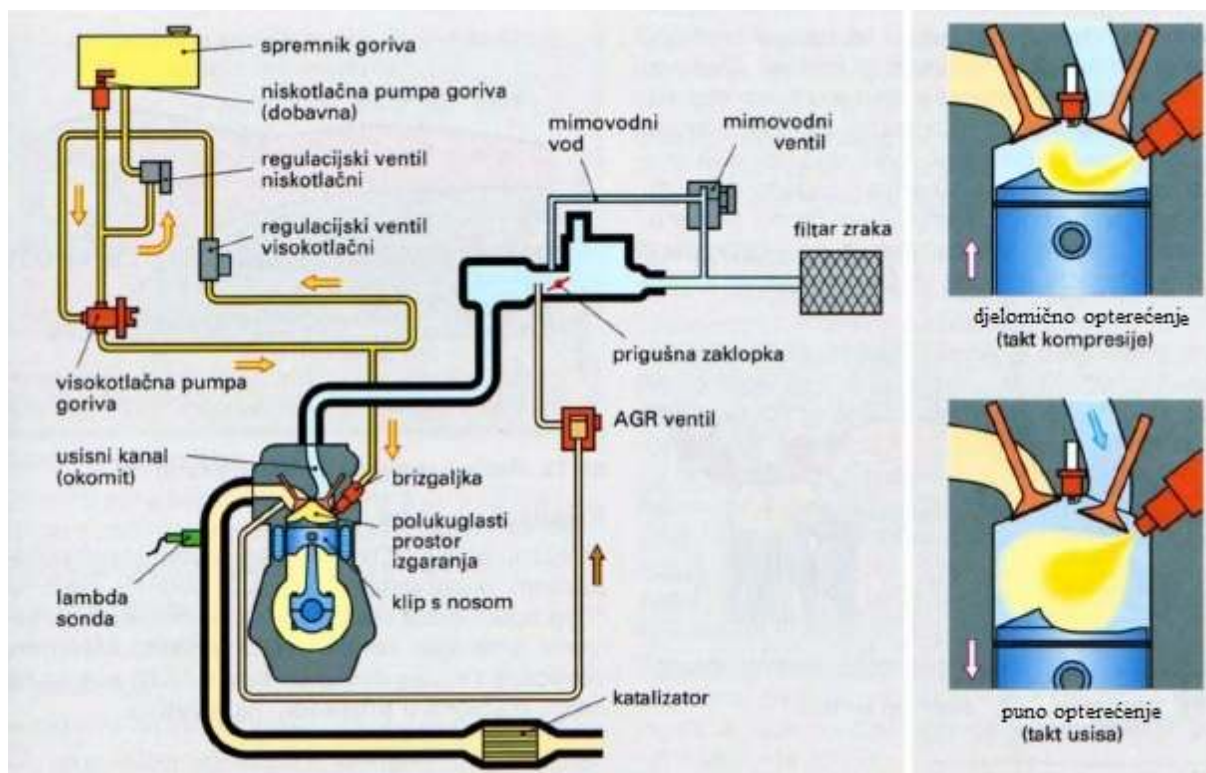
- niskotlačni (3,3 bara),
- visokotlačni dio (50 bara).

Visoki tlak stvara se jednocilindričnom klipnom pumpom koju preko međuvratila pogoni usisno bregasto vratilo (hod klipa je 1 mm). Elementi pumpe podmazuju se samim gorivom. Niskotlačna pumpa dobavlja gorivo visokotlačnoj pod tlakom od 3,3 bara. Regulacijski ventili sprječavaju pojavu previsokih tlakova u oba kruga. Omjer zraka i goriva ovisi o radnoj točki motora (opterećenje, brzina vrtnje, temperatura motora):

- djelomično opterećenje - gorivo se ubrizgava u taktu kompresije
- puno opterećenje - gorivo se ubrizgava u usisnom taktu

Prednosti GDI-motora su :

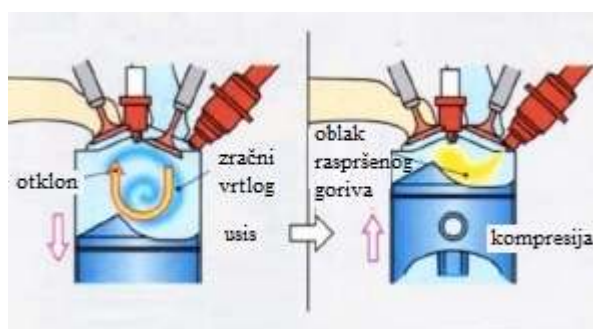
- manja potrošnja goriva i do 20 posto (prema podacima tvornice Mitsubishi i do 35 posto)
- veća snaga i okretni moment u gotovo cijelom radnom području za 10%, u odnosu na klasično ubrizgavanje
- veća specifična snaga po volumenu
- manja emisija CO₂ i do 20 posto (prema podacima tvornice Mitsubishi i do 35 posto)



Slika 8. Ottov motor s direktnim ubrizgavanjem benzina (GDI) [2].

Djelomično opterećenje

Kod djelomičnog opterećenja, cilindri usisavaju čisti zrak, a sam motor radi s vrlo siromašnom smjesom, $\lambda = 2,7$ do 3.4 . S tim se ostvaruje veći stupanj korisnog djelovanja, tj. manja potrošnja. Pred kraj kompresije ubrizga se mala količina goriva koju zakrivljeni nos klipa gura izravno na svjećicu. To omogućava lokalno mali faktor λ u blizini svjećice i olakšava zapaljenje smjese, dok je okolni faktor λ veći. Na takav se način s relativno malom količinom goriva postiže stabilno izgaranje. Da bi se osiguralo povoljno ustrujavanje zraka u cilindre, usisni je kanal smješten između bregastih vratila i gotovo se okomito priključuje na cilindar.



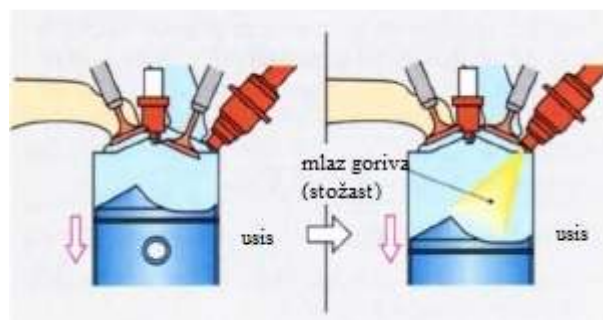
Slika 9. Ubrizgavanje kod djelomičnog opterećenja [2].

Puno opterećenje

S porastom opterećenja (otvaranjem prigušne zaklopke) višak zraka reducira se do $\lambda = 1$ odnosno $\lambda < 1$ pri ubrzavanju. Gorivo se sada ubrizgava u taktu usisa, u širokom mlazu. Pojavljuje se izrazito unutarnje hlađenje. Prelazeći u plinovito stanje, gorivo uzima energiju iz smjese te ju hladi. Pothlađivanjem povećava se gustoća smjese i olakšava punjenje, jer u cilindre može ustrujati veća masa zraka i goriva.

Istodobno se smanjuje i opasnost od pojave detonacije, te je moguće imati stupanj kompresije 12 : 1.

U taktu kompresije klip tlači homogenu smjesu prema svjećici. Elektroničkom regulacijom kod GDI motora postignut je prijelaz iz djelomičnog opterećenja sa slojevitim punjenjem u puno opterećenje uz $\lambda = 1$ do $\lambda < 1$ bez izostajanja paljenja.

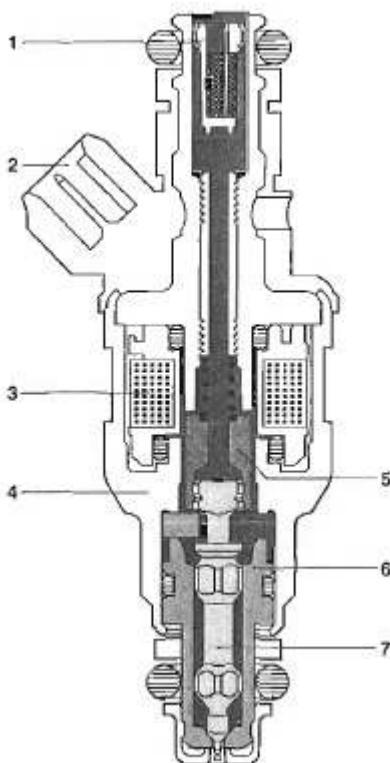


Slika 10. Ubrizgavanje kod punog opterećenja [2].

3.4 Konstrukcija brizgaljki

3.4.1 Niskotlačne brizgaljke

Niskotlačne brizgaljke se upotrebljavaju za tlakove ubrizgavanja do ~ 3 bar. Elektronički upravljanje brizgaljke ubrizgavaju precizno izmjerenu količinu goriva u usis ispred usisnih ventila. Brizgaljku otvara elektromagnet preko električnih impulsa koje daje ECU.



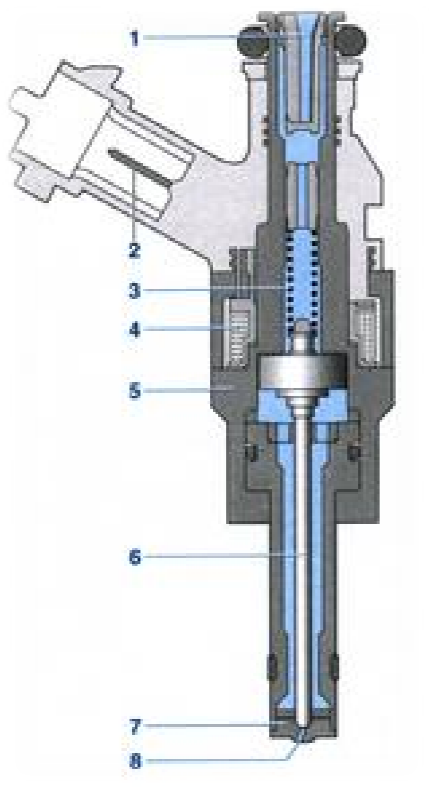
Slika 11. Dijelovi niskotlačne brizgaljke: 1. Filtar goriva, 2. Električni priključak, 3. Zavojnica, 4. Kućište brizgaljke, 5. Armatura, 6. Vodilica ventila, 7. Ventil [1].

Sama brizgaljka (Slika 11.) sastoji se od kućišta brizgaljke (4), ventila u obliku igle (7) te armature elektromagneta (5). Kućište brizgaljke sadrži namotaje elektromagneta (3) i vodilicu ventila (6). Kada struja ne teče kroz namotaje elektromagneta ventil je pritisnut preko spiralne opruge na svoje ležište na izlazu iz brizgaljke. Kada struja poteče kroz namotaje, ventil se podiže za otprilike 0,1mm. i gorivo može poteći kroz mlaznicu. Mlaznica je posebno konstruirana za bolje raspršivanje goriva. Zakašnjenje otvaranja ventila je u rasponu od 1-1.5ms. Udaljenost postavljene brizgaljke od usisnog ventila i kut postavljene brizgaljke određuju se posebno za pojedini motor na kojem se koriste. Brizgaljke su postavljene preko

gumenih ili silikonskih brtvi (o-ring) u posebno kućište na usisu i razdjelnoj cijevi dovoda goriva. Gumene brtve sprječavaju prijenos vibracija sa motora na brizgaljke. Izolacija od topline je izvedena pomoću plastičnog kućišta te je bitna da ne bi došlo do nepoželjne pojave parnih mjehura goriva.

3.4.2 Visokotlačne brizgaljke

Visokotlačne brizgaljke (Slika 12.) koriste se kod GDI motora. One rade sa većim tlakovima ubrizgavanja koji trenutno iznose do ~120bar. Konstrukcijski zahtjevi za visokotlačne brizgaljke su stroži nego za niskotlačne brizgaljke zbog većeg tlaka pri kojemu radi brizgaljka. Neki od njih su: otpornost na veće temperature rada, otpornost dijelova na veće tlakove, mogućnost raspršivanja goriva u manje kapljice, otpornost na stvaranje naslaga produkata izgaranja na vrh brizgaljke itd.. Princip rada brizgaljke je isti kao i kod niskotlačne brizgaljke, ali u ovom slučaju imamo mogućnost ubrizgavanja veće količine goriva u kraćem vremenskom periodu zbog većih radnih tlakova.

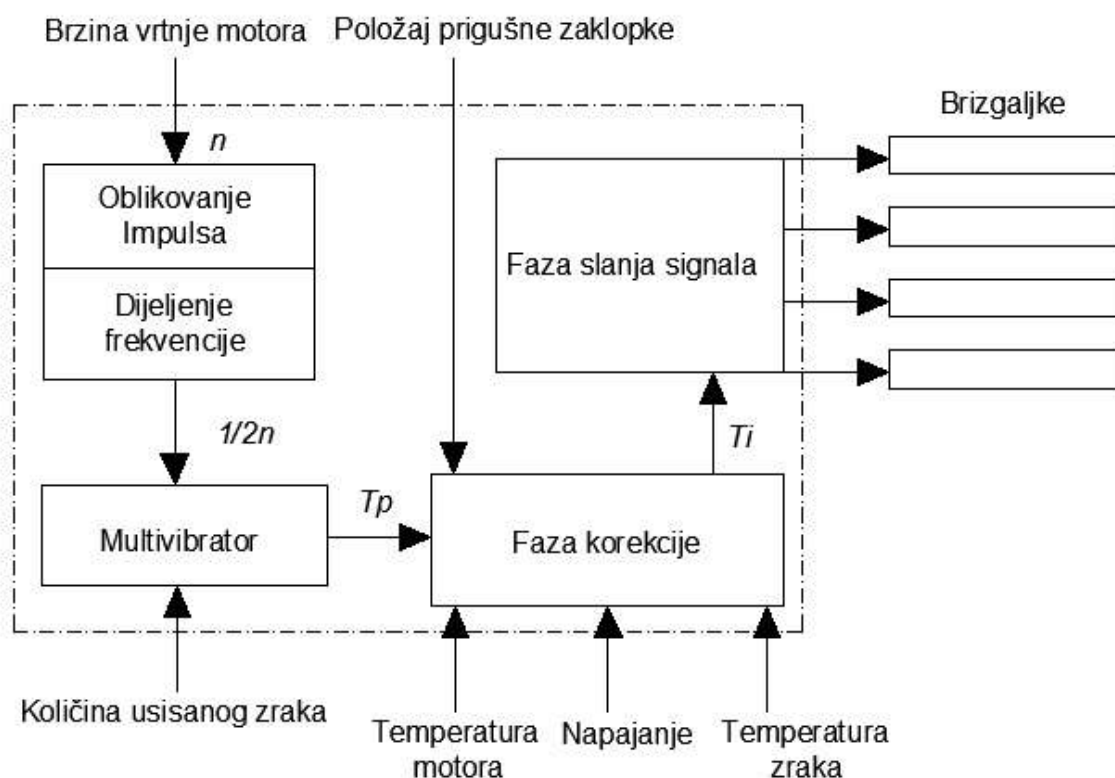


Slika 12. Dijelovi visokotlačne brizgaljke: 1. Filtar goriva, 2. Električni priključak, 3. Spiralna opruga, 4. Zavojnica, 5. Kućište brizgaljke, 6. Ventil, 7. Vrh brizgaljke, 8. Mlaznica [3].

3.5 Sustav upravljanja radom motora (ECU)

ECU pomoću podataka dobivenih od senzora procjenjuje koliko je potrebno ubrizgati goriva. Zatim šalje upravljačke impulse na brizgaljku. Količina ubrizganog goriva određuje se duljinom trajanja impulsa poslanog na brizgaljku. Količina usisanog zraka određuje osnovnu duljinu ubrizgavanja T_p , a frekvencija ubrizgavanja je određena brzinom vrtnje motora.

T_p - osnovno trajanje impulsa, T_i - ispravljeno trajanje impulsa, n - brzina vrtnje



Slika 13. Blok dijagram ECU-a [1].

Na blok dijagramu (Slika 13.) vide se ulazni podaci s lijeve strane. To su brzina vrtnje motora i količina zraka koji ulazi u motor. Brzina vrtnje motora određuje frekvenciju ubrizgavanja a frekvencija također ovisi i o vrsti ubrizgavanja. Ubrizgavanje se može odvijati svaki okretaj koljenastog vratila ili svaki drugi okretaj koljenastog vratila, ovisno da li je ubrizgavanje kontinuirano, grupno ili sekvencijalno. Nakon obrade ovih podataka dobije se osnovno trajanje impulsa T_p . Trajanje impulsa T_p se korigira pomoću dodatnih podataka od senzora kao što su temperatura zraka, temperatura motora, položaj prigušne zaklopke vozila i

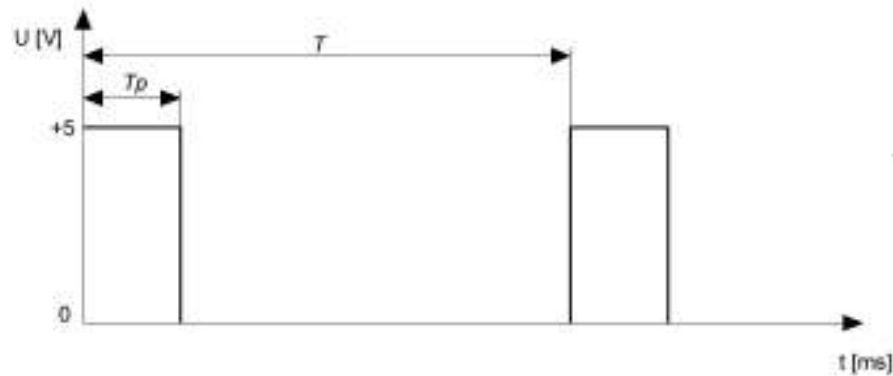
njihove usporedbe sa korekcijskim tablicama zapisanim u memoriju ECU-a. Kada je signal korigiran i spreman za upravljanje šalje se električni impuls korigiranog trajanja T_i .

Za potrebu ovog završnog rada i upravljanja brizgaljkom korišten je princip slijednog ubrizgavanja goriva za 1 cilindar koje se može proširiti za primjenu kod više cilindara. Kod slijednog ubrizgavanja za svaka dva okretaja koljenastog vratila jednom se ubrizgava cijela količina potrebnog goriva. Otvaranjem usisnog ventila gorivo ulazi u cilindar i miješa se sa zrakom.

U blok dijagramu (Slika 13.) vidi se kako ECU dobiva podatak o brzini vrtnje motora. Signal brzine vrtnje motora ulazi u generator impulsa koji je dio ECU-a i on stvara digitalne impulse odgovarajuće amplitude. Impulsi nakon toga dolaze u drugi dio ECU-a, djelitelj frekvencije koji određuje frekvenciju ubrizgavanja. Kada ima frekvenciju, oblik i amplitudu impulsa treba odrediti trajanje impulsa. Osnovo trajanje ubrizgavanja T_p određuje se u dijelu ECU-a, multivibratoru⁷. Preko signala količine usisanog zraka multivibrator određuje potrebnu količinu goriva te preračunava pomoću poznatog protoka trajanje impulsa. Trajanje impulsa iznosi nekoliko milisekundi. Osnovno trajanje ubrizgavanja korigira se pomoću podataka od senzora i njihovom usporedbom s korekcijskim tablicama. Dobiveno korigirano vrijeme trajanja impulsa je zapravo gotov upravljački signal koji se šalje na brizgaljku.

U ovom završnom radu, rad ECU-a simuliran je preko programskog paketa Labview. U programu je izrađen model za upravljanje elektroničkom brizgaljkom preko elektroničkog sklopa koji omogućuje stvaranje signala potrebnog za upravljanje radom brizgaljke. Prikaz izlaznog signala vidi se na slici 14.

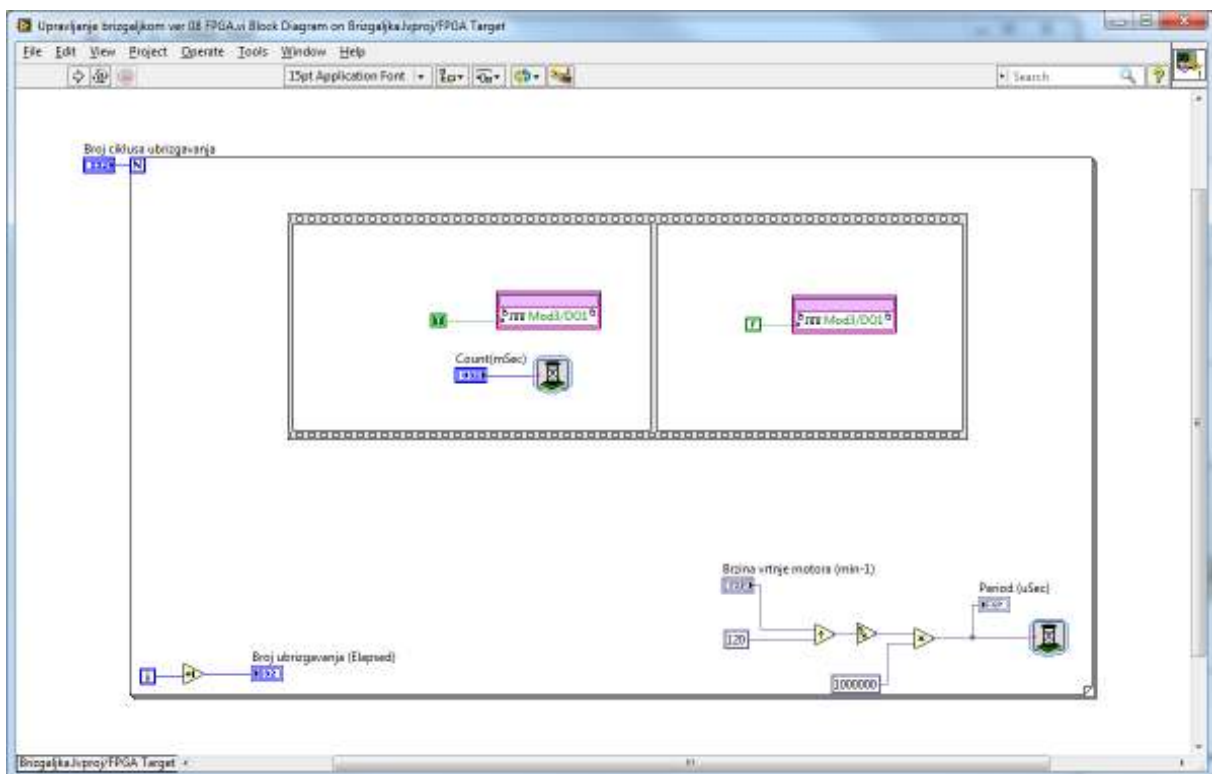
⁷ Multivibratori su elektronički impulsní sklopovi koji imaju dva stanja. Sklop nastaje međusobnim povezivanjem dvije tranzistorske sklopke. Stabilno stanje je stanje u kojem sklop može biti trajno, sve do nailaska vanjske pobude, kad se prebacuje u drugo stanje. Kvazistabilno ili nestabilno stanje je stanje u kojem se sklop zadržava točno određeno vrijeme, nakon čega se prebacuje u drugo stanje. Trajanje kvazistabilnog stanja određeno je kapacitetom kondenzatora i otporom kroz kojeg se kondenzator prazni



Slika 14. Prikaz izlaznog signala.

3.5.1 Signal za upravljanje brizgaljkom

Za oblikovanje signala koristi se program napravljen u programskom paketu „Labview“. Signal koji program preko modula šalje na brizgaljku je digitalan i ima svoju amplitudu, duljinu i frekvenciju. Duljina i frekvencija signala zadaju se u programu. Duljina signala ovisi o trajanju ubrizgavanja T_p , jer u ovom slučaju za ispitivanje karakteristike brizgaljke neće se koristiti podaci sa senzora i ispravljeno trajanje ubrizgavanja T_i . Frekvencija signala ovisi o zadanoj brzini vrtnje motora.



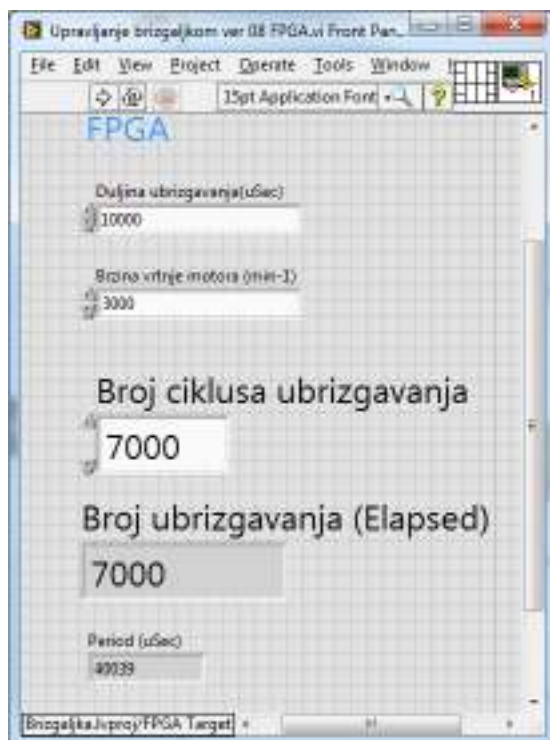
Slika 15. Blok dijagram programa u LabView-u.

U blok dijagramu (Slika 15.) vidi se glavna petlja programa. *For* petlja ponavlja se za zadani broj ciklusa. Trajanje jednog ciklusa je period T , a period ovisi o brzini vrtnje motora koju zadajemo u programu prije početka mjerenja. Period T je ovisan o frekvenciji f (1), a određivanje frekvencije je prikazano u poglavlju 4. :

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Za svako trajanje tog perioda, program vrti *flatsequence* petlju. *Flatsequence* petlja funkcionira tako da u jednom periodu odradi zadani sljed postupaka (*frameov-a*). U ovom slučaju postoje dva *frame-a*. Prvi *frame* prikazuje kada se signal šalje na brizgaljku i ima vrijednost *true* za zadano vrijeme u milisekundama. Nakon što program odvrti prvi *frame* prelazi na drugi i tamo ima vrijednost *false*. U tom slučaju se signal ne šalje na brizgaljku te se drugi dio *flatsequence* petlje provodi sve do završetka trajanja perioda glavne petlje. *Flatsequence* petlja se ponavlja za zadani broj ciklusa.

Sučelje programa (Slika 16.) jednostavno je za korištenje a traženi podaci upisuju se kao konstantni za traženo mjerenje. To znači da ih tijekom jednog mjerenja koje ima zadani broj ciklusa ne možemo mijenjati.



Slika 16. Sučelje programa.

Duljina ubrizgavanja T_p zadaje se u mikrosekundama. Brzina vrtnje zadaje se u okretajima u minuti, a broj ciklusa ubrizgavanja kao bezdimenzijska vrijednost.

4. Proračun upravljanja količinom ubrizganog goriva i frekvencijom ubrizgavanja

Sustavom za ubrizgavanje goriva upravlja se preko programskog paketa Labview u kojemu treba pravilno programirati reguliranje frekvencije i trajanje impulsa za upravljanje brizgaljkom. Frekvencija f je funkcija brzine vrtnje, a trajanje ubrizgavanja tj. trajanje impulsa upisuje se direktno u programu. Za potrebe mjerenja karakteristike brizgaljke zadovoljavajuće je takvo rješenje. U slučaju upravljanja brizgaljkom na motoru, taj dio programa mora se izmijeniti jer je trajanje ubrizgavanja određeno količinom zraka koja ulazi u motor. Određivanje frekvencije f , osnovnog trajanja impulsa T_p i broja ciklusa ubrizgavanja n_c prikazano je u sljedećim podpoglavljima.

4.1 Frekvencija ubrizgavanja

Sustav će raditi na principu slijednog ubrizgavanja, to znači da se brizgaljka otvara posebno za svaki cilindar prije takta usisa, točnije svakih 720° okretaja koljenastog vratila.

Brzina vrtnje motora n zadaje se u broju okretaja po minuti [min^{-1}]. Taj broj mora se pretvoriti u okretaje po sekundi da bi se dobila frekvencija i podijeliti s 2 jer se ubrizgavanje odvija svakih 720° okretaja koljenastog vratila:

$$f = \frac{n}{2 \cdot 60} \quad [Hz] \quad (2)$$

Radni ciklus predstavlja udio trajanja ubrizgavanja u trajanju jednog perioda. Vrijednost radnog ciklusa ne smije premašiti 100% jer bi trajanje ubrizgavanja premašilo duljinu trajanja jednog perioda :

$$radni\ ciklus = \frac{T_p}{T} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Gdje su: T [s] period, trajanje jednog okretaja radilice; T_p [s] osnovno trajanje ubrizgavanja.

4.2 Proračun protoka goriva za određenu radnu točku

Kao početne varijable unose se promjer cilindra d [mm] i hod klipa H [mm]. Potrebno je izračunati volumen cilindra V_H [m³]:

$$V_H = \frac{\left(\frac{d}{1000}\right)^2 \cdot \pi}{4} \cdot \left(\frac{H}{1000}\right) \quad (4)$$

Referentna masa u cilindru m_{ref} [kg] (5):

$$m_{ref} = \frac{p_o \cdot V_H}{R_c \cdot T_o} \quad (5)$$

Gdje su: p_o [Pa] tlak okoliša; T_o [K] temperatura okoliša; R_c [J/kgK] plinska konstanta mase u cilindru.

Plinska konstanta mase u cilindru R_c računa se preko izraza (6):

$$R_c = x_g \cdot R_g + x_{zr} \cdot R_{zr} + x_{isp} \cdot R_{isp} \quad (6)$$

Maseni udjeli goriva x_g [-], zraka x_{zr} [-], i ispušnih plinova x_{isp} [-] računaju se pomoću izraza (7), (8) i (9):

$$x_g = \frac{1}{1+\gamma} \frac{1}{1+\lambda Z_o} \quad (7)$$

$$x_{zr} = \frac{1}{1+\gamma} \frac{\lambda Z_o}{1+\lambda Z_o} \quad (8)$$

$$x_{isp} = \frac{\gamma}{1+\gamma} \quad (9)$$

Gdje su: γ omjer produkata izgaranja (2-5%); Z_o stehiometrijski omjer goriva i zraka (Benzin=14.7, Etanol=8.98). Plinska konstanta ispušnih plinova uzima se otprilike jednakom plinskom konstantom zraka $R_{isp} \approx R_{zr} = 287.08$ [J/kgK], a plinska konstanta goriva $R_g = 110-115$ [J/kgK] (Benzin) i $R_g = 180.74$ [J/kgK] (Etanol). λ [-] je faktor pretička zraka ($\lambda=1$).

Stupanj punjenja λ_{pu} [-] iskazuje napunjenost cilindra svježom radnom tvari, a jednak je omjeru mase svježe radne tvari koja ostane u cilindru (m_c) nakon zatvaranja usisnog ventila, i referentne mase (m_{ref}) tj. mase svježe radne tvari koja bi stala u radni volumen cilindra (V_H) kod stanja okolne atmosfere (p_o, T_o). Može se približno izračunati prema izrazu (10):

$$\lambda_{pu} \approx \frac{1}{1+\gamma} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \cdot \frac{T_o}{p_o} \cdot \frac{p_1}{T_1} \quad (10)$$

Gdje su: p_1 [Pa] tlak usisa; T_1 [K] temperatura usisa; ε [-] stupanj kompresije.

Masu u cilindru m_c [kg] računa se prema izrazu (11):

$$m_c = \lambda_{pu} \cdot m_{ref} \quad (11)$$

Masa goriva m_g [kg] prema izrazu (12) jednaka je:

$$m_g = x_g \cdot m_c \quad (12)$$

Potreban volumen goriva V_g [m³] računa se prema izrazu (13):

$$V_g = \frac{m_g}{\rho_g} \quad (13)$$

Gdje je ρ_g [kg/m³] gustoća goriva; a za benzin iznosi ≈ 720 kg/m³, a za etanol ≈ 790 kg/m³

Naposljetku dobiva se trajanje impulsa brizgaljke tj. osnovno trajanje ubrizgavanja, ono ovisi o volumenu goriva koje je potrebno ubrizgati i protoku kroz brizgaljku (14):

$$T_p = \frac{V_g}{Q} \quad (14)$$

Q je protok brizgaljke. Svaka brizgaljka ima na svojoj specifikaciji protok koji je deklariran u [cm³/min] tj. [ml/min].

Referentna masa u cilindru može se izračunati i preko procijenjenog indiciranog tlaka i učinkovitosti (15):

$$m_{ref} = \frac{p_i \cdot \lambda \cdot Z_o \cdot V_H}{\eta_i \cdot \lambda_{pu} \cdot H_d} \quad (15)$$

Gdje su: p_i [Pa] srednji indicirani tlak u cilindru; η_i [-] indicirani stupanj djelovanja; H_d [MJ/kg] donja ogrjevna vrijednost goriva (Benzin 43MJ/kg, Etanol 26.8MJ/kg).

Sada su poznate frekvencija ubrizgavanja f i trajanje ubrizgavanja T_p i direktno se unose u programu za potrebe mjerenja karakteristike brizgaljke. Varijable s kojima radi ECU motora su:

- broj okretaja motora
- temperatura i količina usisanog zraka
- položaj koljenastog vratila
- temperatura motora
- opterećenje motora

Količinu usisanog zraka mjeri MAF⁸ senzor, opterećenje motora mjeri senzor položaja prigušne zaklopke, senzori temperatura motora i okolnog zraka a podatak o brzini vrtnje motora dobiva sa paljenja motora. Za rad brizgaljke na motoru potrebno je prilagoditi program radu s senzorima.

4.3 Broj ciklusa ubrizgavanja

Broj ciklusa ubrizgavanja mora se prethodno izračunati tako da gorivo koje se ubrizga u menzuru dosegne minimalnu količinu mjerenja (50ml), ili da se ne izlije iz menzure u slučaju prevelikog broja ciklusa. Menzura je prikazana na slici 23. Cilj je zadržati se u rasponu od 50-250ml kako bi se dobila vrijednost koja se može izmjeriti. Potreban broj ciklusa za zadano

⁸ MAF senzor – eng. hot wire mass airflow sensor – je senzor za mjerenje protoka zraka koji radi na principu mjerenja otpora zagrijane žice. Žici se povećava otpor s porastom temperature, a kada zrak počne strujati smanjuje se temperatura žice i sami otpor. Smanjenje otpora je proporcionalno količini zraka koja ulazi u motor.

trajanje ubrizgavanja i frekvenciju može se pretpostaviti iz tvorničkog podatka za protok brizgaljke (16):

$$n_c = \frac{V}{Q \cdot T_p} \quad (16)$$

Gdje su: n_c [-] broj ciklusa ubrizgavanja; V [m³] željeni ukupni ubrizgani volumen u menzuru; Q [m³/s] tvornički podatak protoka brizgaljke.

Pretpostavka je da karakteristika brizgaljke nije linearna već se mijenja s obzirom na trajanje ubrizgavanja. U slučaju manjih trajanja ubrizgavanja u prethodnoj formuli koristi se faktor sigurnosti S da bi bili sigurni kako će se menzura napuniti dovoljno da bi mogli izmjeriti volumen goriva (17) :

$$n_c = \frac{V}{Q \cdot T_p} \cdot S \quad (17)$$

Faktor sigurnosti S uzima se 2-3 za trajanja ubrizgavanja do 3ms jer se pretpostavlja da će kod malih trajanja ubrizgavanja biti uvelike smanjen pretpostavljeni protok goriva.

5. Sklop za ubrizgavanje goriva

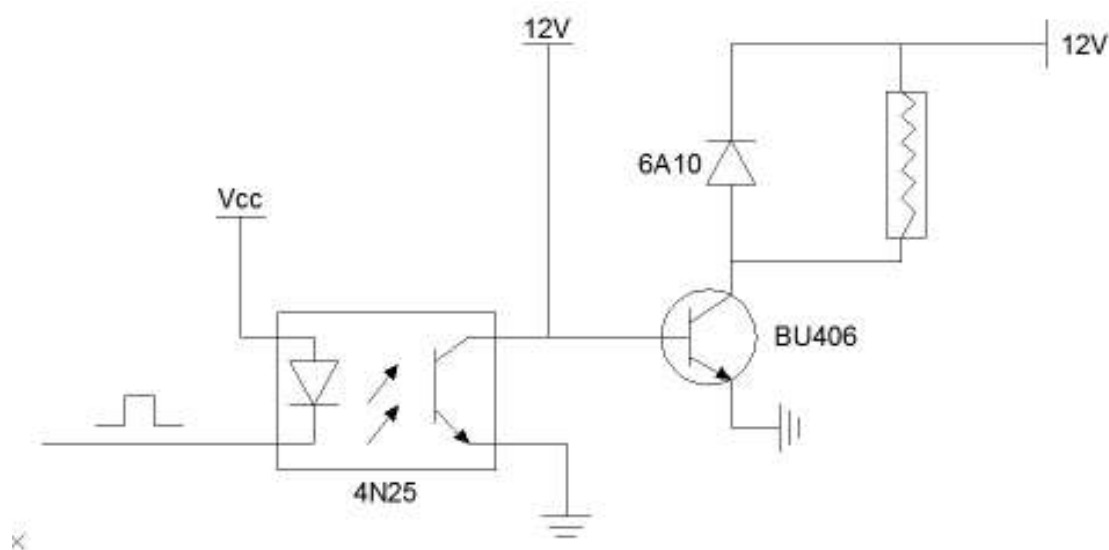
5.1 Električni i elektronički sklopovi za upravljanje elektroničkom brizgaljkom

Brizgaljka koja se koristi u eksperimentu oznake HMC D 35310-23010 tvornička je ugradnja u KIA/Hyundai motorima zapremnine 1.8 dm³. Tvornički podaci :

Tablica 1. Specifikacija brizgaljke.

Model broj:	35310-23010
Gorivo:	Benzin
Materijal tijela brizgaljke:	Čelik
Vrsta ubrizgavanja:	MPI
Komponenta:	Naprava za ubrizgavanje
Taktnost:	4T
Protok:	196ml/min

Upravljanje brizgaljkom provodi se putem električnog sklopa čija je shema prikazana na slici 17. Brizgaljkom se upravlja električnim impulsima. Brizgaljka je spojena na 12V napajanje s baterije, a prekida joj se uzemljenje tako da se impulsima zatvara strujni krug. Impulsi koji zatvaraju strujni krug preko tranzistora i optosprežnika dolaze preko modula NI 9474 spojenog na platformu cRIO 9074 i imaju napon od 5V. Signal koji se šalje je digitalan.



Slika 17. Shema električnog sklopa.

Optosprežnik se koristi jer je malih dimenzija, bez mehaničkih dijelova i stoga ima veliku brzinu rada te ulazni i izlazni dio nisu fizički povezani. Zbog toga nemoguće je bilo kakvo protjecanje struje između njih i moguće oštećenja našeg modula. Optosprežnik koji se koristi je oznake 4N25, s tvorničkim podacima:

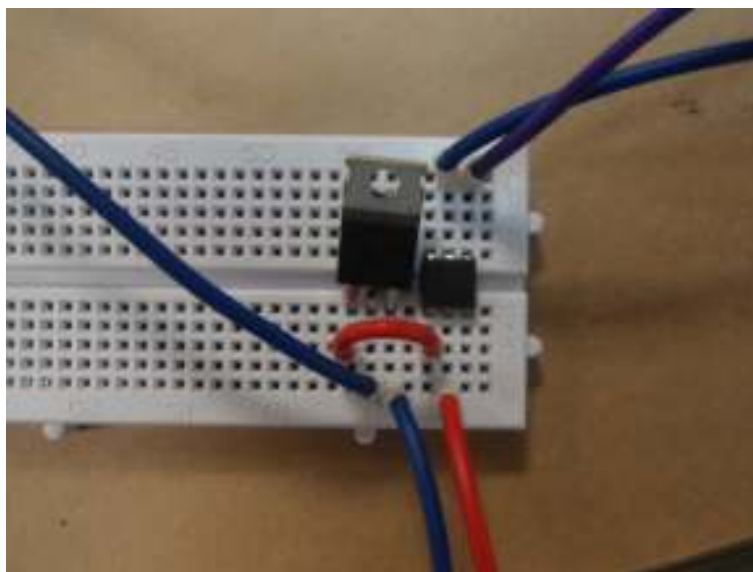
- > maksimalna ulazna jakost struje $I_F=60\text{mA}$
- > maksimalni ulazni napon struje $V_R=6\text{V}$
- > disipacija snage LED diode (pri 25°C) $P_D=120\text{mW}$
- > ukupna disipacija snage (pri 25°C) $P_D=250\text{mW}$
- > minimalni probojni napon kolektor-emiter $V_{CEO}=30\text{V}$
- > izolacijski napon ulaz-izlaz $V_{ISO}=5300\text{V}$

Tranzistor koji se koristi je oznake BU406, s tvorničkim podacima:

- > maksimalni napon emiter-baza $V_{EB}=6\text{V}$
- > minimalni probojni napon kolektor-emiter $V_{CEO(BR)}=120\text{V}$
- > maksimalna stalna struja na kolektoru $I_C=7\text{A}$
- > maksimalna struja na kolektoru ($t_p<10\text{ms}$) $I_{CM}=15\text{A}$
- > maksimalna stalna struja na bazi $I_B=4\text{A}$

Dioda koja se koristi je oznake 6A10, s tvorničkim podacima:

- > Maksimalni iznos povratnog napona $V_{RRM}=1000\text{V}$
- > Maksimalni iznos ulaznog napona $V_{RMS}=700\text{V}$



Slika 18. Prikaz električnog sklopa spojenog u laboratoriju.

Hardware koji se primjenjuje (Slika 19.) kao sustav za upravljanje brizgaljkom je modularni programabilni kontroler CompactRIO proizvođača „National Instruments“. CompactRIO je kontroler koji omogućuje rad u realnom vremena preko I/O modula i FPGA⁹ čipa. Sustav se sastoji od real-time kontrolera NI9074 koji ima 400Mhz procesor koji je dovoljan za potrebu real-time aplikacije. Također sadrži 64MB DRAM memorije i 128MB stalne memorije. Modul preko kojeg se povezuje na elektronički sklop za upravljanje brizgaljkom je modul oznake NI9474. Modul sadrži 8 kanala s mogućnošću opterećenja jednog kanala do 5A ili do 1.2A ako se svi kanali koriste. Moguće je korištenje napona od 5V do 30V a odziv je 1 μ s. Software „LabView“ i hardware kontroler NI 9074 povezani su i komuniciraju preko računala putem TCP/IP veze.

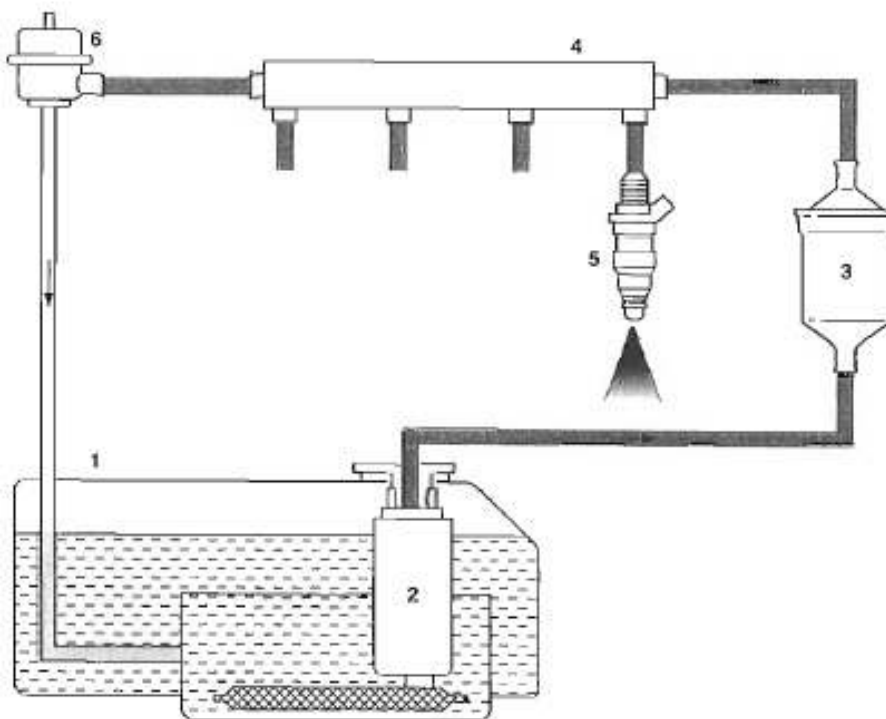


Slika 19. NI9074 kontroler i modul NI9474.

⁹ FPGA – eng. field-programmable gate array – je integrirani krug konstruiran za mogućnost konfiguriranja od strane korisnika i omogućuje velike brzine obrade podataka u realnom vremenu.

5.2 Sklop za mjerenje ubrizganog goriva

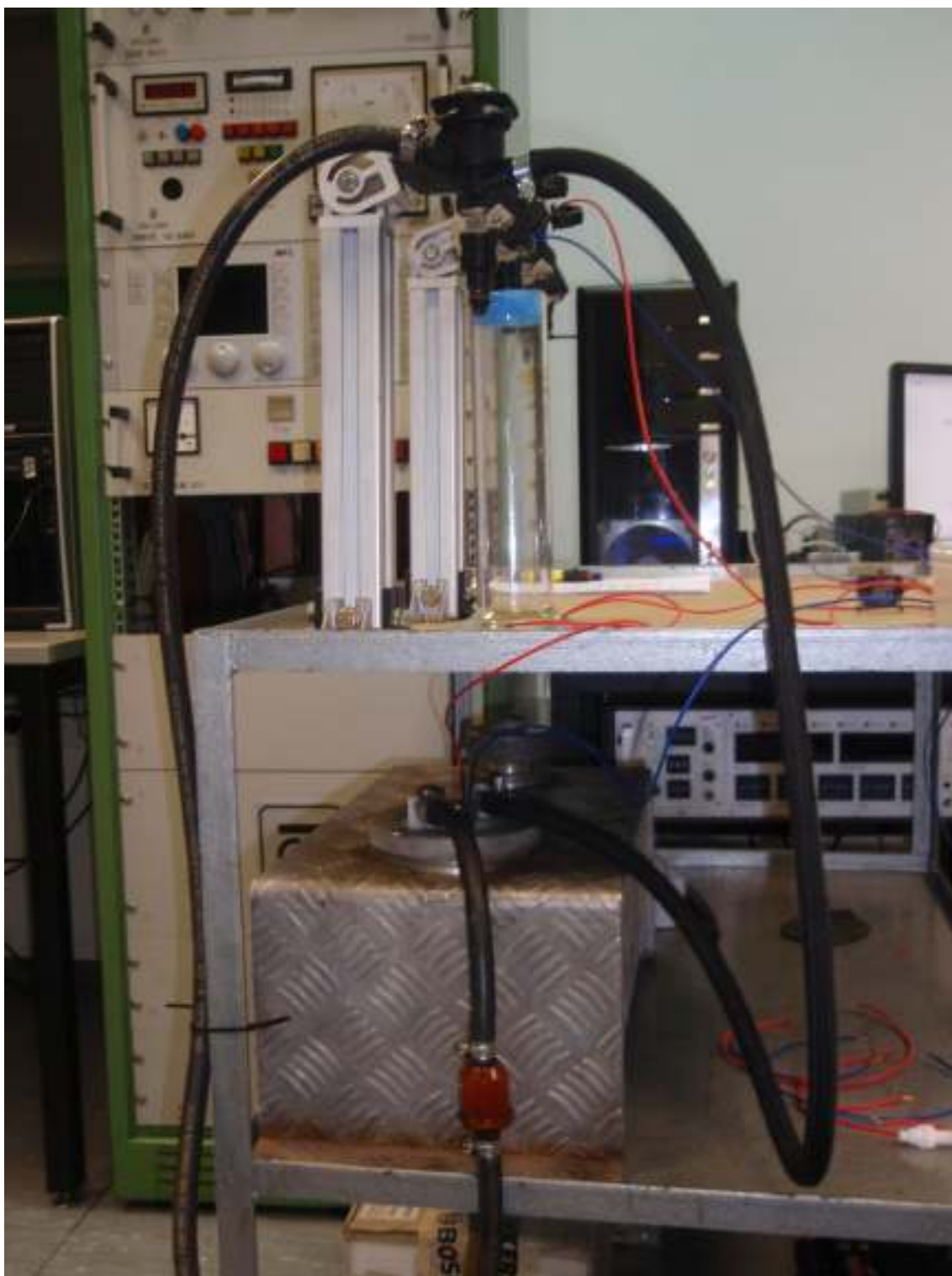
Sklop za mjerenje ubrizgavanja napravljen je u Laboratoriju za motore i vozila (Slika 21. , Slika 22.) prema shemi prikazanoj na slici 20.:



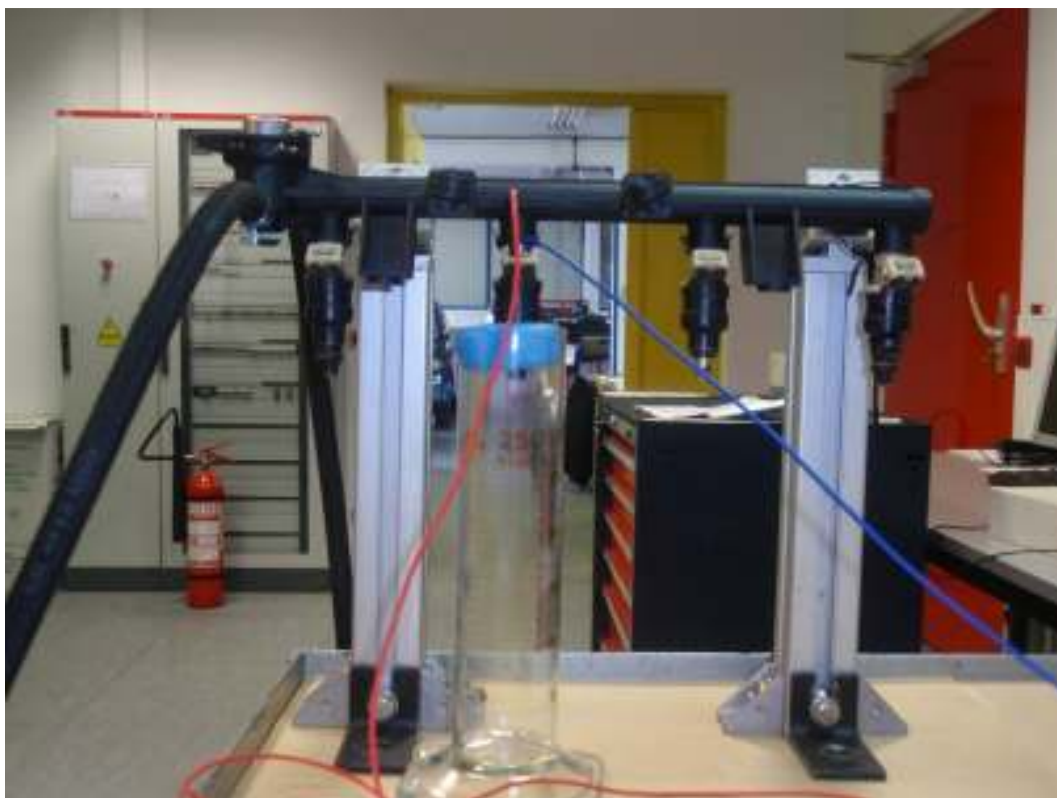
Slika 20. Shema sklopa za ubrizgavanje [1].

- Dijelovi sklopa:
1. Spremnik goriva;
 2. Pumpa goriva;
 3. Filtar goriva;
 4. Zajednički vod niskog tlaka;
 5. Brizgaljka;
 6. Regulator tlaka goriva;

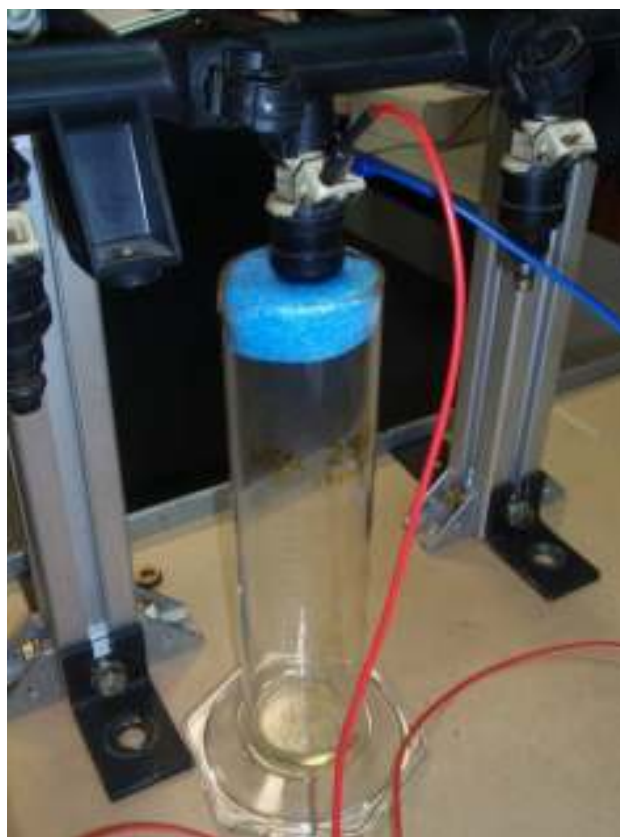
Pumpa niskog tlaka nalazi se u spremniku i doprema gorivo sustavu preko filtera goriva i regulatora tlaka goriva. Gorivo koje se dobavlja zajedničkom vodu je pod tlakom od 3bar. Napajanje pumpe goriva dolazi preko automobilske baterije. Na zajednički vod spojene su četiri brizgaljke, a mjerenje se izvodi samo na jednoj (Slika 20.).



Slika 21. Sklop za ubrizgavanje u laboratoriju.



Slika 22. Sklop u laboratoriju, detalj zajedničkog voda s brizgaljkama.



Slika 23. Detalj spojene brizgaljke sa menzurom.

6. Mjerenje karakteristike brizgaljke

Mjerenje karakteristike brizgaljke radi se kako bi se utvrdilo kako se mijenja količina ubrizganog goriva u ovisnosti o trajanju ubrizgavanja i brzini vrtnje motora.

Za potrebe mjerenja koristi se menzura kalibrirana za mjerenje volumena od 50-250ml s rezolucijom mjerenja +/- 5 ml (Slika 23.). Pri mjerenju simulira se rad motora s brzinom vrtnje od 1000 min⁻¹, 3000 min⁻¹, 6000 min⁻¹.

Za svaku brzinu vrtnje izmjereno je 7 karakterističnih točaka. Točke se odnose na trajanje ubrizgavanja redom: 2 ms, 3 ms, 4 ms, 5 ms, 6 ms, 8 ms, 10 ms. U tablicama 2. 3. i 4. prikazane su konstante mjerenja za različite brzine vrtnje motora Nakon svih odrađenih ciklusa ubrizgavanja mjeri se ukupni volumen goriva koji se nalazi u menzuri.

Tablica 2. Karakteristične točke i broj zadanih ciklusa za brzinu vrtnje motora 1000min⁻¹.

Trajanje ubrizgavanja[ms]	Brzina vrtnje	Period[ms]	Broj ciklusa
2	1000	120	35000
3	1000	120	28000
4	1000	120	14000
5	1000	120	7000
6	1000	120	7000
8	1000	120	7000
10	1000	120	7000

Tablica 3. Karakteristične točke i broj zadanih ciklusa za brzinu vrtnje motora 3000min⁻¹.

Trajanje ubrizgavanja[ms]	Brzina vrtnje	Period[ms]	Broj ciklusa
2	3000	40	35000
3	3000	40	14000
4	3000	40	7000
5	3000	40	7000
6	3000	40	7000
8	3000	40	7000
10	3000	40	7000

Tablica 4. Karakteristične točke i broj zadanih ciklusa za brzinu vrtnje motora 6000min^{-1} .

Trajanje ubrizgavanja[ms]	Brzina vrtnje	Period[ms]	Broj ciklusa
2	6000	20	35000
3	6000	20	35000
4	6000	20	7000
5	6000	20	7000
6	6000	20	7000
8	6000	20	7000
10	6000	20	7000

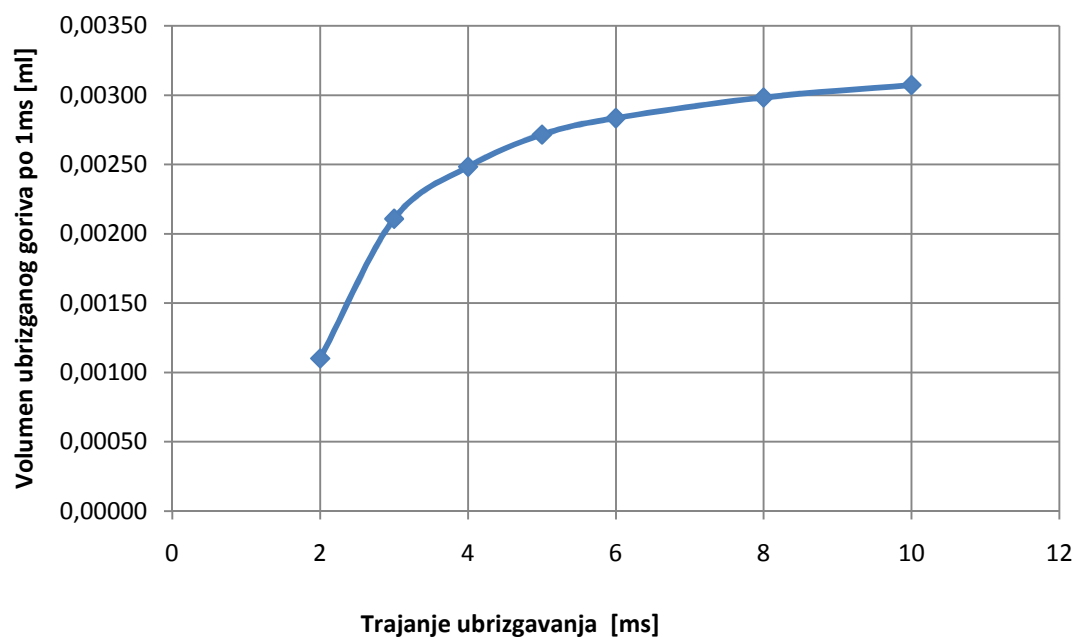
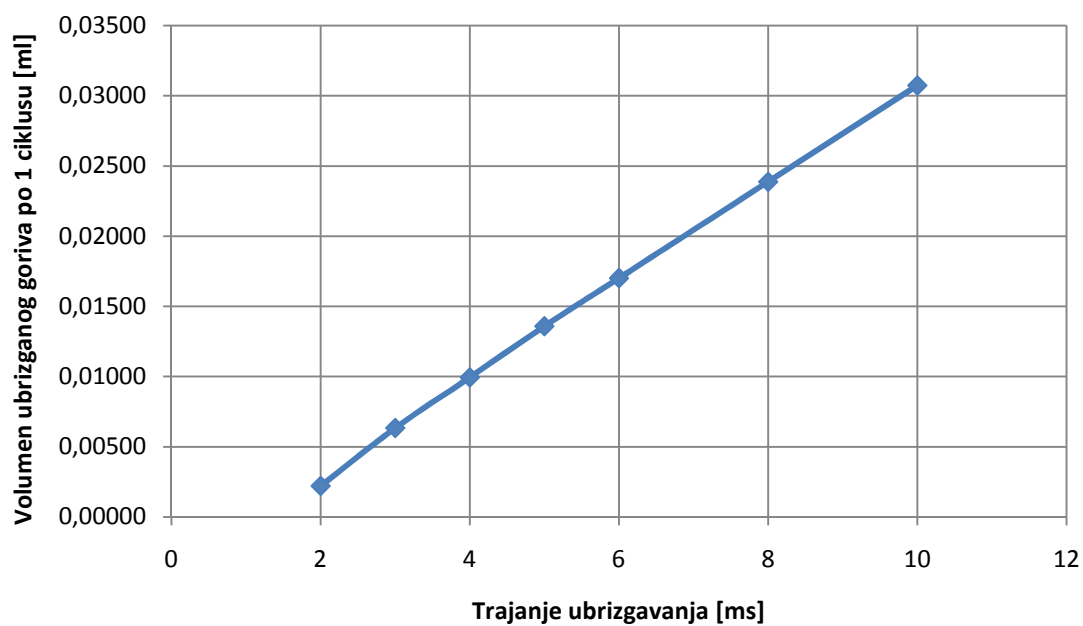
6.1 Mjerenje pri brzini vrtnje 1000min^{-1}

Nakon obavljenog mjerenja za sve karakteristične točke pri brzini vrtnje od 1000min^{-1} dobiveni su rezultati :

Tablica 5. Rezultati mjerenja pri brzini vrtnje motora od 1000min^{-1} .

Trajanje ubrizgavanja[ms]	Ubrizgani volumen[ml]	Volumen po 1 ciklusu[ml]	Volumen po 1 ms[ml]	Trajanje mjerenja [min]
2	77	0,002200	0,001100	70
3	177	0,006321	0,002107	56
4	139	0,009929	0,002482	28
5	95	0,013571	0,002714	14
6	119	0,017000	0,002833	14
8	167	0,023857	0,002982	14
10	215	0,030714	0,003071	14

Na slici 24. prikazana je promjena ubrizganog goriva po 1ms za prije spomenute točke kod brzine vrtnje od 1000min^{-1} . Zakrivljena linija u dijagramu konvergira u vrijednost između 0,0030 i 0,0035 [ml/ms]. Na slici 25. prikazana je promjena ubrizganog goriva po 1 ciklusu. Ovdje se vidi da promjena ubrizganog goriva po ciklusu raste otprilike linearno uz zanemariva odstupanja kod kraćih vremena ubrizgavanja.

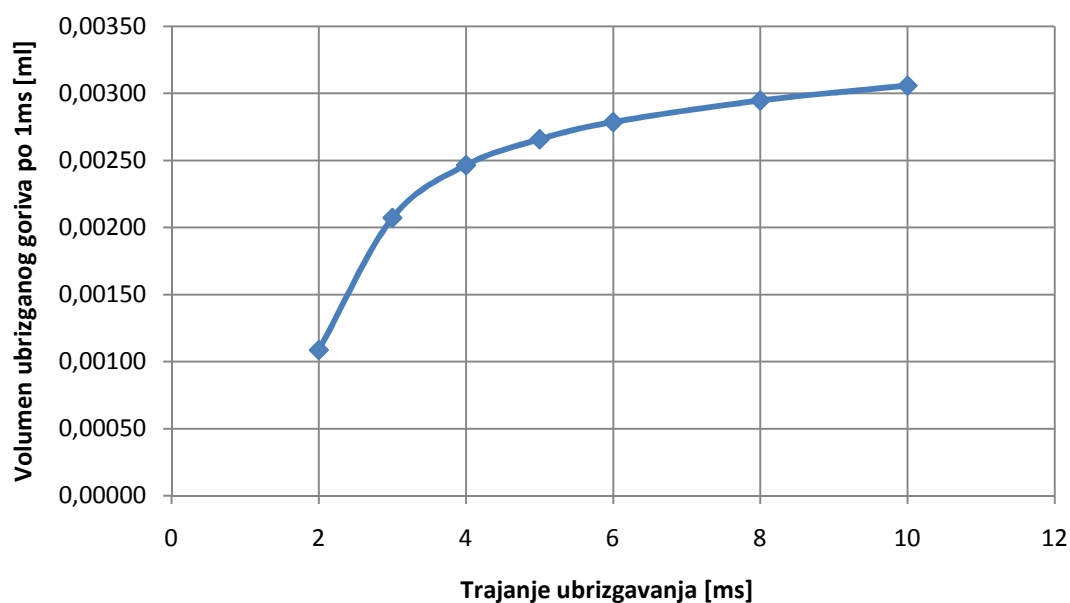
Slika 24. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 1000min^{-1} .Slika 25. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 1000min^{-1} .

6.2 Mjerenja pri brzini vrtnje 3000min^{-1} i 6000min^{-1}

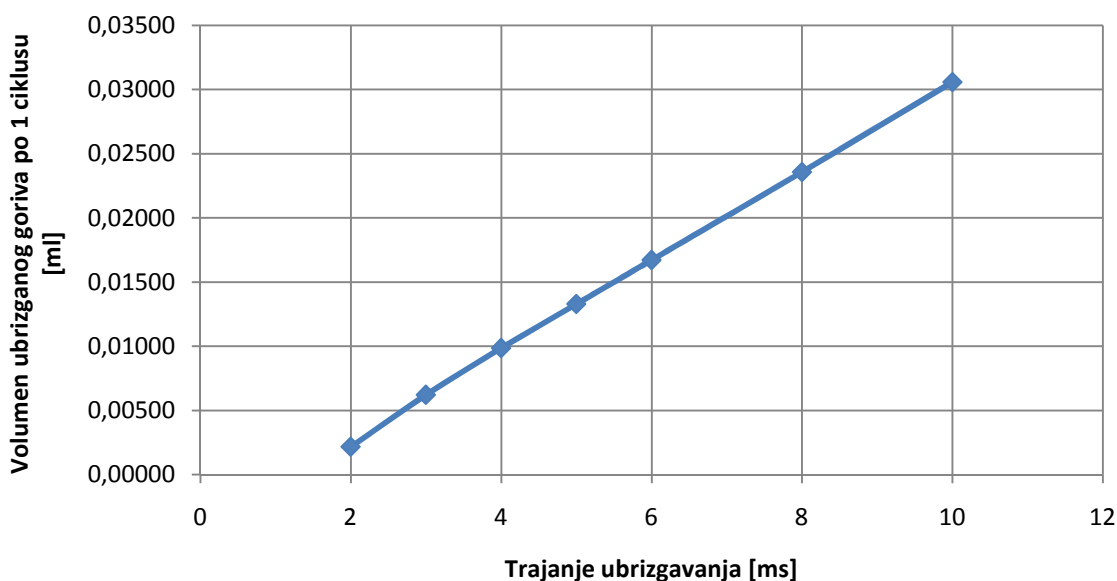
Nakon obavljenog mjerenja za sve karakteristične točke pri brzini vrtnje od 3000min^{-1} dobiveni su rezultati :

Tablica 6. Rezultati mjerenja pri brzini vrtnje motora od 3000min^{-1} .

Trajanje ubrizgavanja[ms]	Ubrizgani volumen[ml]	Volumen po 1 ciklusu[ml]	Volumen po 1 ms[ml]	Trajanje mjerenja [min]
2	76	0,002171	0,001086	23,3
3	87	0,006214	0,002071	9,3
4	69	0,009857	0,002464	4,7
5	93	0,013286	0,002657	4,7
6	117	0,016714	0,002786	4,7
8	165	0,023571	0,002946	4,7
10	214	0,030571	0,003057	4,7



Slika 26. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 3000min^{-1} .

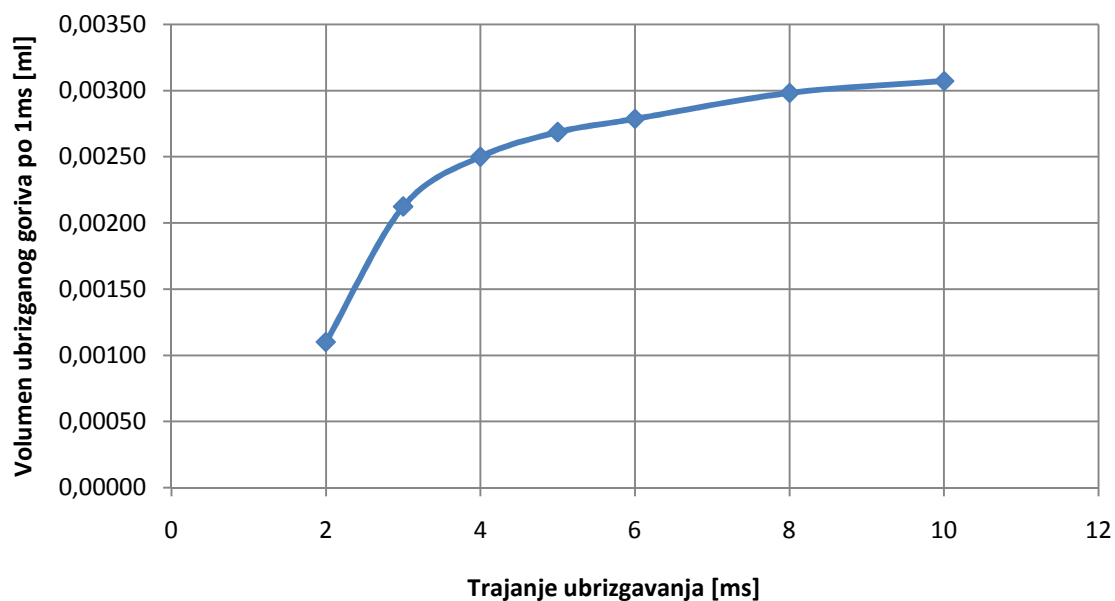
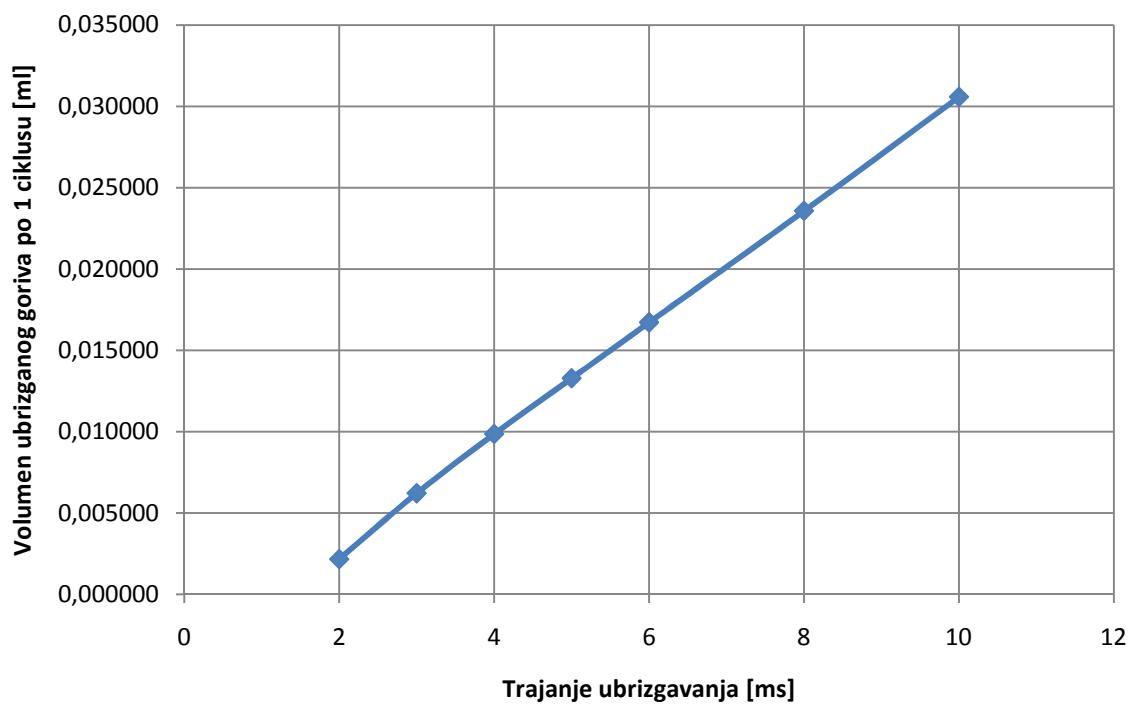
Slika 27. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 3000min^{-1} .

Nakon obavljenog mjerenja za sve karakteristične točke pri brzini vrtnje od 6000min^{-1} dobiveni su rezultati :

Tablica 7. Rezultati mjerenja pri brzini vrtnje motora od 6000min^{-1} .

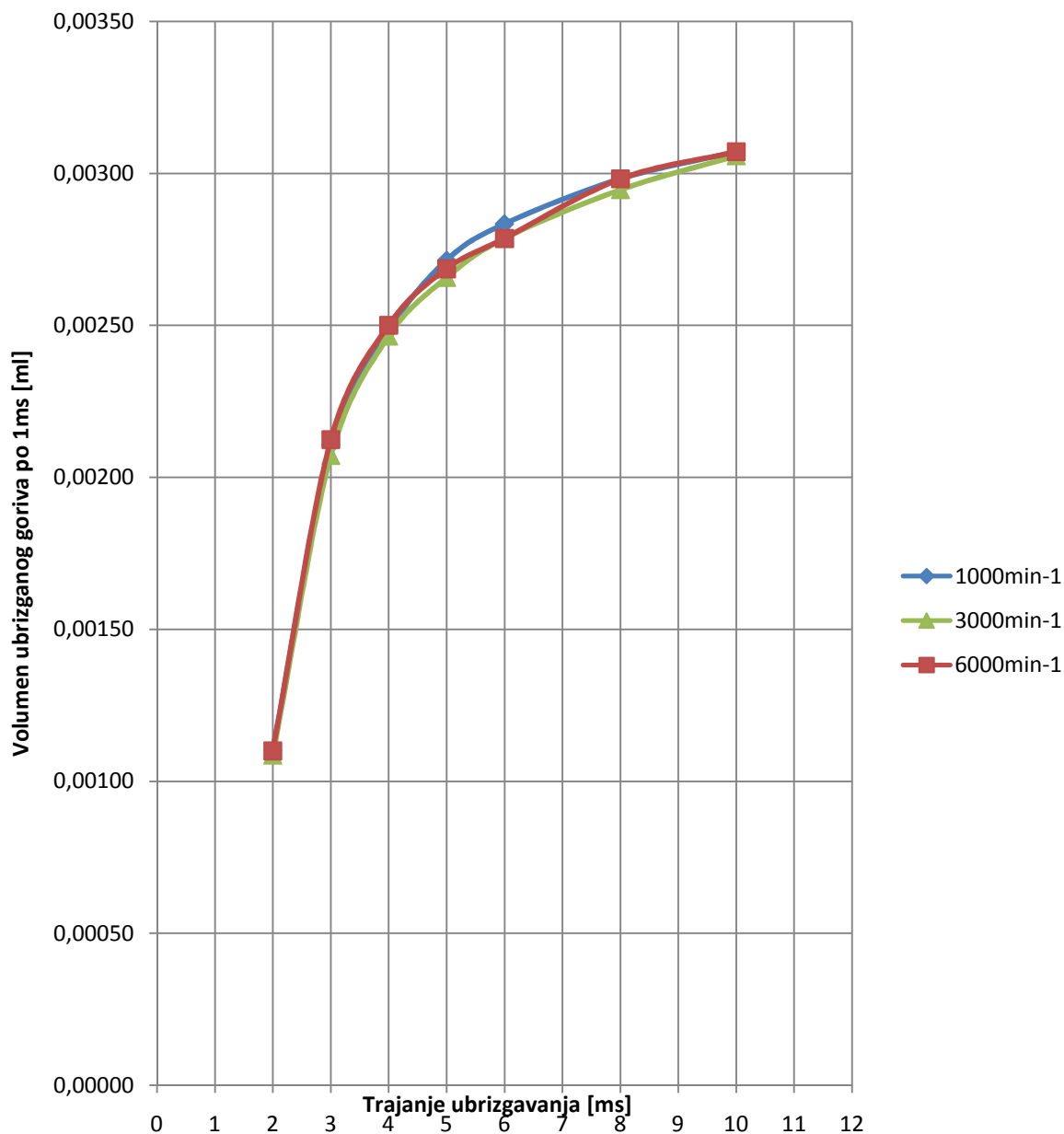
Trajanje ubrizgavanja[ms]	Ubrizgani volumen[ml]	Volumen po 1 ciklusu[ml]	Volumen po 1 ms[ml]	Trajanje mjerenja [min]
2	77	0,00220	0,00110	11,7
3	223	0,00637	0,00212	11,7
4	70	0,01000	0,00250	2,3
5	94	0,01343	0,00269	2,3
6	117	0,01671	0,00279	2,3
8	167	0,02386	0,00298	2,3
10	215	0,03071	0,00307	2,3

U tablicama 6. i 7., te na dijagramima (Slika 26., 27., 28. I 29.) uočava se ponavljanje rezultata kao kod brzine vrtnje od 1000min^{-1} s manjim odstupanjima. S obzirom na potreban volumen goriva u motoru za jedan ciklus, iz dobivenih rezultata za ubrizgani volumen po ciklusu može se izvući potrebno trajanje ubrizgavanja iz tablice.

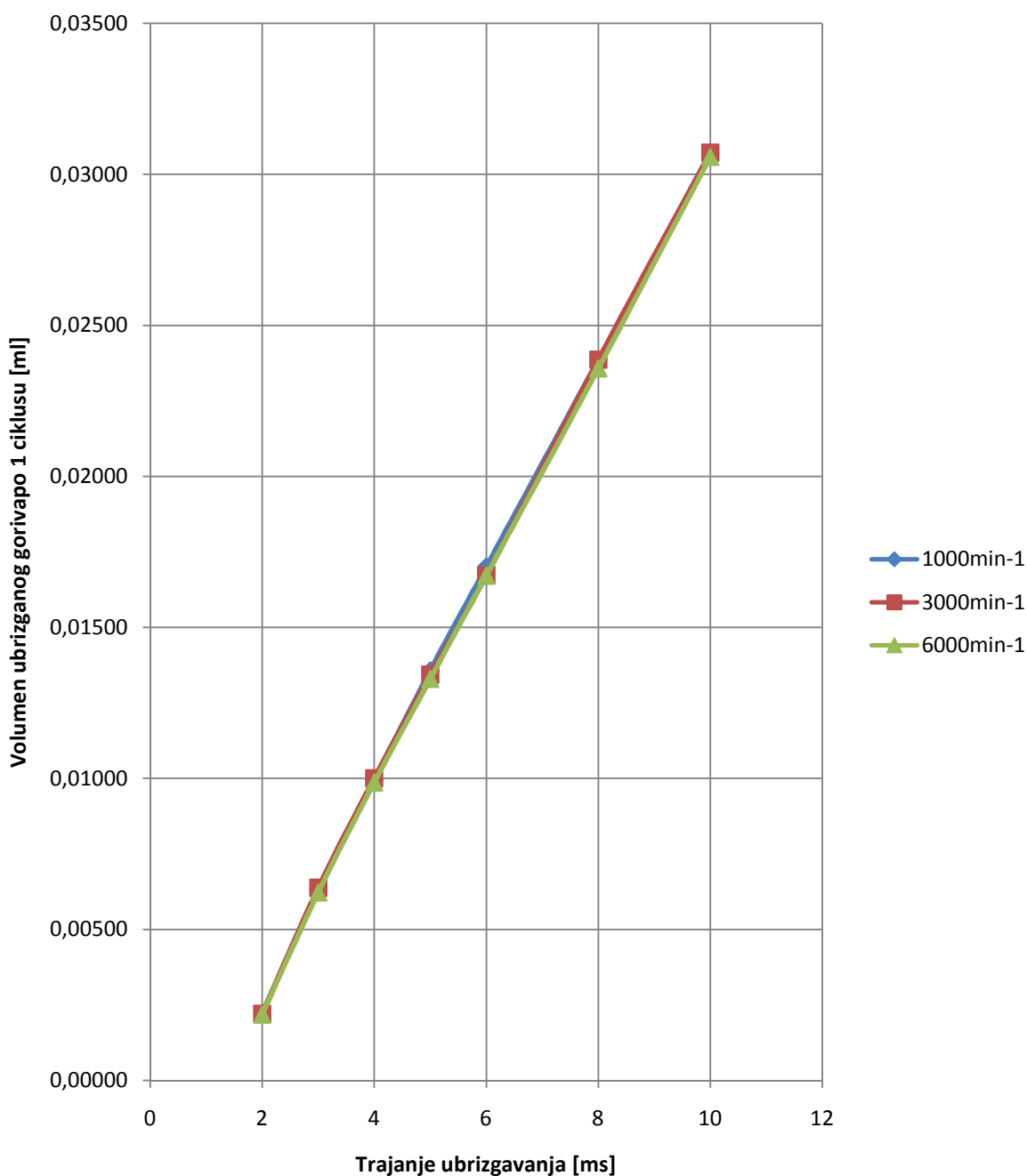
Slika 28. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 6000min^{-1} .Slika 29. Karakteristika brizgaljke pri brzini vrtnje 6000min^{-1} .

6.3 Usporedba rezultata mjerenja za različite brzine vrtnje

Nakon obavljenih mjerenja za sve brzine vrtnje napravljeni su dijagrami preklapanja rezultata kako bi se vidjelo da li postoji utjecaj brzine vrtnje (frekvencije ubrizgavanja) na rezultate protoka kroz brizgaljku.



Slika 30. Karakteristika brizgaljke s obzirom na volumen ubrizganog goriva po 1ms.



Slika 31. Karakteristika brizgaljke s obzirom na volumen ubrizganog goriva po 1 ciklusu.

Usporedbom rezultata dolazimo do zaključka da promjenom frekvencije ubrizgavanja ne dolazi do bitnih promjena u količini ubrizganog goriva po 1 ciklusu. Mjerenja se ponavljaju s jako malim odstupanjima na sve tri ispitivane frekvencije ubrizgavanja. Također možemo zaključiti da srednja vrijednost količine ubrizganog goriva po 1ms ovisi o duljini otvorenosti brizgaljke, te se od kraćih prema duljim vremenima ubrizgavanja asimptotski približava vrijednosti koju je specificirao proizvođač.

7. ZAKLJUČAK

Zadatak rada bio je uspostaviti sustav ubrizgavanja upravljan računalom te zatim primijeniti taj sustav za mjerenje karakteristike brizgaljke.

Kako bi se definirao način upravljanja brizgaljkom napravljen je pregled elemenata potrebnih da bi sustav funkcionirao. U Laboratoriju za motore i vozila FSB-a sastavljen je elektronički sklop kojim je moguće poslati signal za otvaranje i zatvaranje brizgaljke. U programskom paketu „LabView“ izrađen je program za slanje signala kojim se pogoni elektronički sklop. Nakon uspješno uspostavljenog rada s brizgaljkom obavljeno je mjerenje karakteristike brizgaljke kako bi se točno definirala ovisnost ubrizganog goriva o trajanju ubrizgavanja.

Rezultati mjerenja pokazali su da promjenom frekvencije ubrizgavanja ne dolazi do bitnih promjena u količini ubrizganog goriva po ciklusu za isto trajanje ubrizgavanja. Dobiveni rezultati za ubrizgani volumena goriva po ciklusu mogu poslužiti kao orijentacijska vrijednost za određivanje trajanja ubrizgavanja kod primjene te brizgaljke na motoru.

LITERATURA

- [1] Bauer H., BOSCH: Gasoline Engine Management, Robert Bosch GMBH, Stuttgart, 1999.
- [2] Tehnika motornih vozila, Pučko otvoreno učilište, Zagreb, 2004
- [3] <http://www.autospeed.com/cms/article.html?&title=Direct-Petrol-Injection&A=107830>
- [4] Heywood J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw - Hill, New York, 1988.
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_injection
- [6] Bonnick A.: Automotive Computer Controlled Systems, Butterworth – Heinemann, Oxford, 2001.
- [7] Zhao F., Lai M.-C., Harrington D.L.: Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines, Elsevier Science Ltd., Oxford, 1999.
- [8] Mahalec Ivan, Lulić Zoran, Kozarac Darko: Motori s unutarnjim izgaranjem - skripta, Zagreb, 2012.