

Matematički model zračne komore za regulaciju tlaka plina u isparivaču ukapljenog naftnog plina

Ivaniš, Hrvoje

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:235:730611>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Hrvoje Ivaniš

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Mislav Čehil, dipl. ing.

Student:

Hrvoje Ivaniš

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Mislavu Čehilu na uloženom vremenu i pruženim znanjima.

Također se zahvaljujem obitelji na cjelokupnoj potpori tijekom dosadašnjeg obrazovanja.

Posebna zahvala ide mojoj budućoj supruzi Aniti na razumijevanju i podršci koju mi je pružila tijekom studentskih dana.

Hrvoje Ivaniš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Hrvoje Ivaniš** JMBAG: **0035220225**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Matematički model zračne komore za regulaciju tlaka plina u isparivaču ukapljenog naftnog plina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mathematical model of the air chamber for gas pressure regulation in the liquefied petroleum gas vaporizer**

Opis zadatka:

Kod isparivača koji se ugrađuju u automobile, u slučaju pregradnje vozila na ukapljeni naftni plin, potrebno je održavati stalnu razliku tlaka između tlaka plina na izlazu iz isparivača i tlaka zraka u usisnoj grani motora. S obzirom da se tlak zraka u usisnoj grani izrazito naglo mijenja zbog naglih promjena snage motora, u slučaju naglog porasta snage motora uobičajeno dolazi do nemogućnosti održavanja zahtijevane konstantne razlike tlakova. Sustav za regulaciju tlaka plina se sastoji od komore s oprugom koja je povezana crijevom s usisnom granom motora te od gumene membrane koja dijeli plin u isparivaču od zraka iz usisne grane.

Kako bi se ispitalo kakav je utjecaj geometrijskih značajki zračne komore i spojne cijevi na tlak plina, u radu je potrebno:

1. Napraviti matematički model zračne komore za regulaciju tlaka ukapljenog naftnog plina.
2. Za različite geometrijske značajke komore i crijeva odrediti vremenske tijekove tlaka plina u slučaju naglih poremećaja tlaka u usisnoj grani motora.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

izv. prof. dr. sc. Mislav Čehil

Predsjednik Povjerenstva:

V Soldo
prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	V
POPIS SLIKA	VI
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. UKAPLJENI NAFTNI PLIN	2
2.1. Sastav i svojstva	2
2.2. Otkriće i povijest upotrebe UNP-a [6]	4
2.3. Suvremena upotreba UNP-a.....	5
2.4. Proizvodnja, transport i skladištenje	6
2.4.1. UNP – nusprodukt u proizvodnji prirodnog plina	6
2.4.2. Proizvodnja rafinacijom sirove nafte	7
2.4.3. Transport i skladištenje	7
3. UNP – GORIVO ZA POGON VOZILA	9
3.1. Ekološki razlozi upotrebe UNP-a.....	9
3.2. Ekonomski razlozi upotrebe UNP-a	10
4. PLINSKE INSTALACIJE U VOZILU	13
4.1. Spremnik plina	14
4.2. Armatura spremnika plina.....	15
4.3. Oprema za dovod plina u motor.....	16
5. ISPARIVAČ	18
5.1. Opće preporuke proizvođača pri ugradnji isparivača.....	22
6. MATEMATIČKI MODEL.....	24
6.1. Izračun volumena zračne komore	24
6.2. Osnovne pretpostavke modela	26
6.3. Postavljanje matematičkog modela.....	26
6.4. Simulink	29
6.5. Rezultati simulacije.....	29
6.5.1. Analiza utjecajnih parametara na odziv sustava	33
7. ZAKLJUČAK.....	37
LITERATURA.....	38

POPIS SLIKA

Slika 1. Povijesni porast potrošnje UNP-a u SAD-u, izrađeno prema [1]	4
Slika 2. Svjetska raspodjela potrošnje UNP-a po sektorima, izrađeno prema [2].....	5
Slika 3. Distribucija UNP-a od proizvođača do potrošača, adaptirano prema [11].....	8
Slika 4. Kretanje prosječnih godišnjih cijena benzina, dizela i UNP-a u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2009. – 2022., izrađeno prema [19].....	11
Slika 5. Najjepnica za vozilo s UNP-om kao pogonskim gorivom [21]	13
Slika 6. Glavne komponente UNP sustava u vozilu, adaptirano prema [22]	14
Slika 7. Višenamjenski ventil [24].....	16
Slika 8. Sklop isparivača	18
Slika 9. Izmjenjivačka površina na strani plina.....	20
Slika 10. Gumena membrana s kopčom.....	20
Slika 11. Zračna komora s oprugom.....	21
Slika 12. Krajnji položaji matice.....	22
Slika 13. Prazna zračna komora	24
Slika 14. Regulaijski vijak s maticom (lijevo), tlačna opruga (desno).....	26
Slika 15. Uvođenje naglog poremećaja tlaka u usisnoj grani	30
Slika 16. Odziv tlaka u komori.....	30
Slika 17. Brzina zraka u cijevi	31
Slika 18. Uvođenje naglog pada tlaka u usisnoj grani	32
Slika 19. Odziv tlaka u komori na nagli pad tlaka u usisnoj grani.....	32
Slika 20. Utjecaj duljine spojne cijevi na odziv tlaka u zračnoj komori	33
Slika 21. Utjecaj promjera spojne cijevi na odziv tlaka u zračnoj komori.....	34
Slika 22. Utjecaj volumena zračne komore na odziv tlaka u njoj	35
Slika 23. Uvođenje 3 različita skoka tlaka u usisnoj grani.....	36
Slika 24. Utjecaj intenziteta skoka tlaka u usisnoj grani na odziv tlaka u zračnoj komori	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva trgovačkog propana i butana, adaptirano prema [4]	3
Tablica 2. Usporedba emisija UNP prema benzinskim i dizelskim gorivima, adaptirano prema [14]	10
Tablica 3. Usporedba trenutnih cijena UNP-a i benzina u nekim europskim državama, adaptirano prema [18]	11
Tablica 4. Ulazni podaci za simulaciju.....	29

POPIS OZNAKA

Latinične oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
a	m	duljina stranice pravilnog šesterokuta
A_c	m ²	poprečni presjek spojne cijevi
d	m	promjer
d_c	m	promjer spojne cijevi
Δh_d	J/kg	specifična donja ogrjevna vrijednost goriva
h	m	visina
k	m	apsolutna hrapavost
l	m	duljina
L	m	duljina spojne cijevi
M_c	kg	masa zraka u spojnoj cijevi
m_i	kg/s	izlazni maseni protok iz zračne komore
M_k	kg	masa zraka u zračnoj komori
m_u	kg/s	ulazni maseni protok u zračnu komoru
n	-	broj zavoja opruge
p	Pa	tlak
p'	Pa	tlak zasićenja
p_k	Pa	tlak zraka u zračnoj komori
Δp_u	Pa	skok tlaka u usisnoj grani motora
p_u	Pa	tlak zraka u usisnoj grani motora
r	m	polumjer
R	J/(kg K)	plinska (individualna) konstanta
Re	-	Reynoldsova značajka
R_z	J/(kg K)	plinska (individualna) konstanta zraka
T	K	temperatura
t	s	vrijeme
V	m ³	volumen
V_k	m ³	volumen komore
w	m/s	brzina zraka u spojnoj cijevi

Grčke oznake

λ	-	faktor trenja
μ	Pa s	dinamička viskoznost
ρ	kg/m ³	gustoća
ρ_c	kg/m ³	gustoća zraka u spojnoj cijevi
ρ_k	kg/m ³	gustoća zraka u zračnoj komori

SAŽETAK

U prvom dijelu ovog završnog rada, opisana su svojstva ukapljenog naftnog plina (UNP-a). Obrazloženi su ekološki i ekonomski motivi primjene UNP-a kao pogonskog goriva vozila. Navedene su komponente UNP pogonskog sustava u vozilu. Detaljno je objašnjen princip rada plinskog isparivača. U drugom dijelu ovog rada izveden je matematički model zračne komore za regulaciju tlaka plina u isparivaču. Ispitani su utjecajni parametri na odziv tlaka u zračnoj komori. Rezultati simulacije provedene u Simulinku prikazani su grafički.

Ključne riječi: ukapljeni naftni plin, UNP, isparivač plina, regulacija tlaka plina, zračna komora, matematički model, vrijeme kašnjenja

SUMMARY

In the first part of this undergraduate thesis, liquefied petroleum gas (LPG) properties are described. Ecological and economic reasons for use of LPG as vehicle fuel are explained. The components of the LPG drive system in the vehicle are listed. The operating principle of the gas vaporizer is explained in detail. In the second part of this paper mathematical model of the air chamber for gas pressure regulation in the gas vaporizer is derived. The influential parameters on the pressure response in the air chamber are tested. The results of the simulation performed in Simulink are shown graphically.

Key words: liquefied petroleum gas, LPG, gas vaporizer, gas pressure regulation, air chamber, mathematical model, time delay

1. UVOD

Ukapljeni naftni plin (UNP), u međunarodnom prometu prepoznatljiv po kratici LPG koja dolazi od engleskog naziva liquefied petroleum gas, kroz godine se etablirao na energetskom tržištu. U svijetu se trenutno pokušava realizirati ideja energetske tranzicije na obnovljive izvore energije i smanjenja upotrebe fosilnih goriva. Iako je ukapljeni naftni plin također fosilno gorivo, njegova upotreba u tranzicijskom razdoblju se uvelike smatra opravdanom zbog čistog izgaranja i smanjenih štetnih emisija u odnosu na druge konvencionalne izvore energije.

Pri okolišnom tlaku i temperaturi zraka ukapljeni naftni plin se nalazi u plinovitom agregatnom stanju, međutim lako se prevodi u kapljevito stanje neznatnim povišenjem tlaka čime mu se volumen uvelike smanjuje. U tom je obliku izrazito povoljan za transport i skladištenje, a koristi se najčešće u plinovitom agregatnom stanju. Danas pronalazi široku primjenu u kućanstvu i različitim granama industrije zbog svoje fleksibilnosti i povoljnih svojstava.

2. UKAPLJENI NAFTNI PLIN

2.1. Sastav i svojstva

Ukapljeni naftni plin nastaje miješanjem struja trgovačkog propana i butana. To su laki zasićeni ugljikovodici, a njihov omjer pri miješanju ovisi o načinu proizvodnje i željenim svojstvima proizvedenog plina. Propan i butan u mješavini se pojavljuju u obliku svojih strukturnih izomera, spojeva istog kemijskog sastava, ali različitih karakteristika uslijed drugačijeg rasporeda atoma u molekuli. U smjesi UNP-a u manjim udjelima se pojavljuju i nezasićeni ugljikovodici iz reda alkena poput etena, propena, butena i njihovih izomera [1].

Opća formula alkana, zasićenih ugljikovodika u kojima atomi ugljika tvore lančaste strukture, jest C_nH_{2n+2} . Propan u svojoj molekularnoj strukturi sadrži tri ugljikova atoma pa njegova kemijska formula glasi C_3H_8 . Butan u svojoj molekularnoj strukturi ima jedan ugljikov atom više što ukupno čini četiri ugljikova atoma te je njegova kemijska formula C_4H_{10} .

Molarna masa propana iznosi 44,1 kg/kmol, a butana 58,12 kg/kmol [2] čime je ukapljeni naftni plin teži od zraka te se u slučaju curenja zadržava pri tlu. Time se razlikuje od metana, glavnog sastojka zemnog plina, koji je lakši od zraka i podiže se uslijed uzgonskih sila.

Propan i butan imaju niske točke vrelišta, -42°C i $-0,5^\circ\text{C}$ [2] pa se i mješavina koju čine, ukapljeni naftni plin, pri standardnim uvjetima (tlak $p = 101\,325\text{ Pa}$ i temperatura $v = 0^\circ\text{C}$) nalazi u plinovitom agregatnom stanju. U kapljevitom agregatnom stanju teorijski ga je moguće prevesti na dva načina: snižavanjem temperature ispod temperature vrelišta ili povišenjem tlaka iznad vrijednosti tlaka zasićenja za određenu temperaturu. U praksi se ukapljivanje vrši pri razmjerno niskim tlakovima od 1,7 do 7,5 bara [2]. Prevođenjem u kapljevitom agregatnom stanju volumen propana i butana smanji se oko 260 puta [3] što je razlog zašto se transport UNP-a vrši u ukapljenom stanju.

Ogrjevna vrijednost UNP-a iznosi ovisno o sastavu oko 46 MJ/kg ili 12.78 kWh/kg što je znatno više od npr. drveta (14-18 MJ/kg ili 3.89 - 5 kWh/kg, ovisno o vrsti drveta i količini sadržane vlage) i drvenog ugljena (27 - 33 MJ/kg ili 7.5 - 8.34 kWh/kg, ovisno o vrsti ugljena) [3].

Tablica 1. Svojstva trgovačkog propana i butana, adaptirano prema [2]

Svojstvo		Mjerna jedinica	Trgovački propan	Trgovački butan
Gustoća ρ pri $T = 293$ K		kg/m ³	≥ 502	≥ 559
Tlak zasićenja $p'(v)$	pri $v = 15^\circ\text{C}$	bar	7,5	1,7
	pri $v = 50^\circ\text{C}$		11,5 - 19,3	6,9
Donja ogrjevna vrijednost Δh_d	pri $v = 20^\circ\text{C}$	MJ/kg	46	45,6
		kWh/kg	12,79	12,66
Najviša temperatura plamena na zraku		$^\circ\text{C}$	1915	1920
Maseni udio sumpora, [%]			$\leq 0,005$	$\leq 0,005$
Volumni udio CO ₂ u dimnim plinovima pri potpunom izgaranju, [%]			13,7	14
Volumni udio dušika pri potpunom izgaranju, [%]			86,3	86

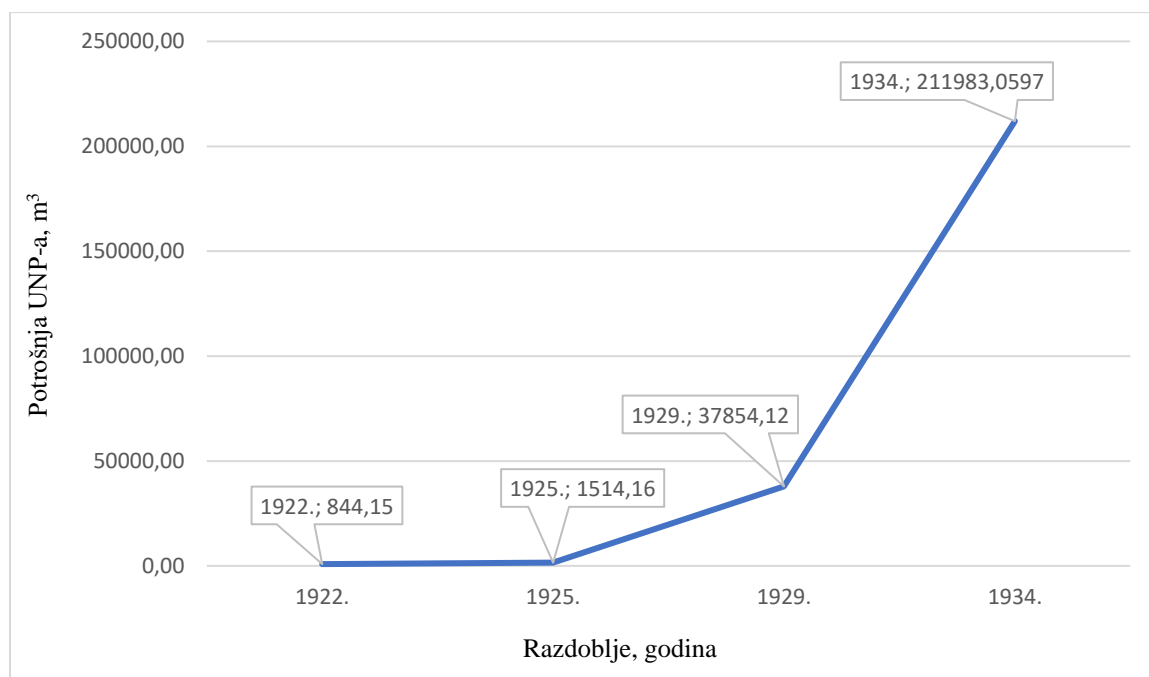
U sastavu UNP-a u manjim količinama mogu se pojaviti i određene nečistoće poput vode, amonijaka, kisika, dušika i sumpora [1]. Ove tvari u sastavu UNP-a mogu završiti kao posljedica proizvodnih uvjeta ili prilikom transporta i skladištenja. Voda pri niskim temperaturama kakve vladaju zimi može izazvati smrzavanje dijelova sustava u kojima se UNP nalazi. Kako bi se spriječila pojava smrzavanja, u UNP se dodaje 1-1,5 l/m³ metanola [2]. Voda može i kemijski reagirati sa ugljikovodicima tvoreći čvrste spojeve hidrate. Amonijak je nepoželjan zbog svog korozivnog djelovanja na dijelove opreme od bakrenih slitina. Sumpor s vodikom tvori spoj sumporovodik koji je agresivan za posude pod tlakom i onečišćuje okoliš. Prisutnost kisika i dušika nema štetnih utjecaja.

UNP je plin bez boje, okusa i mirisa. Neotrovan je plin, ali njegovo nekontrolirano istjecanje predstavlja potencijalnu opasnost za čovjekovu sigurnost zbog mogućnosti zapaljenja plina. Temperatura samozapaljenja varira u rasponu od 410 $^\circ\text{C}$ do 580 $^\circ\text{C}$ [4] ovisno o sastavu, a granice eksplozivnosti su uske, ali i niske. Donja i gornja granica eksplozivnosti su minimalna, odnosno maksimalna koncentracija plina koja u kontaktu sa zrakom može izazvati eksploziju. Donja i gornja granica eksplozivnosti propana su 2,1% i 9,5%, a butana 1,9% i 8,5% [5]. Pošto ga nije moguće detektirati osjetom njuha u njegov sastav dodaju se odoranti, aditivi specifična mirisa kako bi njegovu povišenu koncentraciju u okolini bilo moguće na vrijeme otkriti. Najčešće se dodaju etil-merkaptan u količini 12 g/m³ i tiofen u količini od 77 g/m³ [2].

2.2. Otkriće i povijest upotrebe UNP-a [6]

Za otkriće ukapljenog naftnog plina zaslužan je američki kemičar Walter Otheman Snelling. On je 1910. godine istraživao svojstva hlapljenja benzina, a za tu svrhu konstruirao je jednostavnu napravu, sačinjenu od savijenih cijevi, pomoću koje je odvajao plinovite frakcije od tekućih. Došao je do zaključka da hlapovi benzina sadrže propan, butan i druge ugljikovodike. Snelling je potom nastavio s razvojem uređaja za proizvodnju propana te je već 1913. godine omogućio njegovu industrijsku proizvodnju. Snellingov patent je iste godine otkupio Frank Philips, osnivač naftne kompanije ConocoPhilips.

U prvim godinama po otkriću UNP-a, razdoblje 1. svjetskog rata, nije bilo značajne potrošnje novootkrivenog plina. Podaci o prvoj praktičnoj upotrebi datiraju u 1918. godinu kada je UNP korišten u aparatima za rezanje metala i lemljenje. Tek u sljedećem desetljeću dolazi do sve šire primjene, a time i velikog skoka u potrošnji. Ulaskom u 4. desetljeće 20. stoljeća dolazi do još značajnijeg rasta prodaje UNP-a u Sjedinjenim Američkim Državama što je vidljivo sa slike 1. Slika 1 dolje, a započinje i upotreba u europskim zemljama.

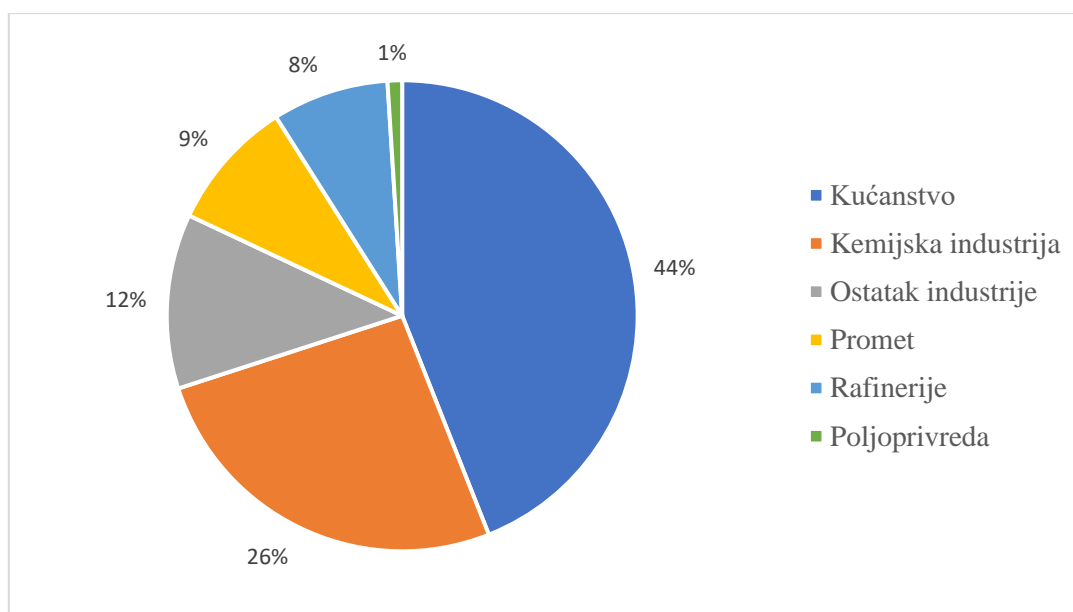


Slika 1. Povijesni porast potrošnje UNP-a u SAD-u, izrađeno prema [6]

U tom razdoblju izrazitu popularnost u zračnom prometu uživali su cepelini za čiji je pogon korišten *Blau gas*, plin po sastavu sličan propanu koji je jedan od sastojaka UNP-a. Međutim, 1937. godine tadašnji najveći cepelin Hindenburg iznenada se zapalio pri slijetanju. U nesreći je stradalo 36 osoba što je dovelo do prestanka upotrebe cepelina. Postupno se UNP sve više

koristio u kućanstvima za pripremu hrane i zagrijavanje vode. UNP je kao pogonsko gorivo ispitivan prvi put 1928. godine, a nakon Drugog svjetskog rata sve je više autobusa i taksi vozila koje pokreću motori s unutarnjim izgaranjem s UNP-om kao gorivom.

2.3. Suvremena upotreba UNP-a



Slika 2. Svjetska raspodjela potrošnje UNP-a po sektorima, izrađeno prema [7]

Slika 2. iznad prikazuje da se gotovo polovica proizvedenog UNP-a troši za potrebe u kućanstvu gdje se koristi kao izvor toplinske energije za grijanje, pripremu potrošne tople vode (PTV-a) te za pripremu hrane. Potiče se korištenje UNP-a za te svrhe u slabije razvijenim područjima kako bi se smanjila potrošnja ostalih fosilnih goriva štetnijeg djelovanja na okoliš. Dio UNP-a se spali u rafinerijama tijekom procesa proizvodnje nafte što je jedan od izazovnijih ekološko-energetskih problema s kojima se svijet danas suočava. UNP je sirovina i izvor toplinske energije potrebne za odvijanje kemijskih reakcija pri proizvodnji različitih proizvoda, a pogodan je za poljoprivredu jer sadrži zanemariv udio sumpora. Nema štetan utjecaj na ozonski omotač pa se primjenjuje umjesto freonskih plinova kao aerosol u raznim bocama pod tlakom. Uz još brojne druge primjene u različitim granama industrije, u kontekstu ovog rada bitno je naglasiti korištenje UNP-a kao goriva za motore s unutarnjim izgaranjem.

2.4. Proizvodnja, transport i skladištenje

Oko 60% proizvedenog ukapljenog naftnog plina dobiva se izdvajanjem njegovih sastojaka iz prirodnog plina dok se preostalih 40% dobiva u procesima koji se odvijaju u rafinerijama tijekom prerade sirove nafte [3].

2.4.1. UNP – nusprodukt u proizvodnji prirodnog plina

Procesi izdvajanja (ekstrakcije) viših ugljikovodika iz prirodnog plina mogu se podijeliti u dvije skupine:

- a) izdvajanje bez hlađenja ili s umjerenim hlađenjem:
 - apsorpcija na okolišnoj temperaturi
 - apsorpcija uz hlađenje
 - adsorpcija
 - kompresija
 - jednostupanjsko vanjsko hlađenje
- b) izdvajanje kriogenim postupcima:
 - višestupanjsko vanjsko hlađenje
 - ekspanzijski postupak s vanjskim hlađenjem
 - ekspanzijski postupak s hladnom komorom [2].

Prvu navedenu skupinu postupaka čine tehnološki stariji procesi. Do razvoja druge skupine postupaka došlo je razvojem niskotemperaturnih konstrukcijskih materijala čime je porastao iscrpак pojedinih ugljikovodika iz ulazne sirovine. Koji od navedenih postupaka će biti primijenjen pri obradi sirovog prirodnog plina ovisi o kvaliteti sirovine koja se crpi iz bušotine, tlaku, prioritetima među produktima te eventualnim uštedama na ulaganjima i pogonskim troškovima. Adsorpcijski procesi se koriste za obradu suhih (sadrže male količine viših ugljikovodika) i siromašnih plinova. Pri obradi plina sa srednjim i visokim udjelima teških ugljikovodika primjenjuju se procesi apsorpcije i kompresije. Ekspanzijski postupci su pogodni kad se sirovi plinovi nalaze pod visokim tlakom i sadrže relativno mali udio kondenzata [2].

Apsorpcija, adsorpcija, membranska metoda i hlađenja spadaju u dehidracijske metode kojima se uklanja voda iz plina. Apsorpcija podrazumijeva protusmjerno strujanje plina i otapala kroz apsorber. Pri izdvajanju vode kao otapalo se koristi glikol, za izdvajanje ugljikova dioksida i vodikova sulfida rabe se etanolamini, a kod izdvajanja težih ulja u upotrebi su apsorpcijska ulja.

U drugoj se fazi procesa zasićeno otapalo regenerira u desorberu gdje se oslobađa izdvojenih komponenti plina čime postaje spremno za ponovni prolazak kroz apsorber [8].

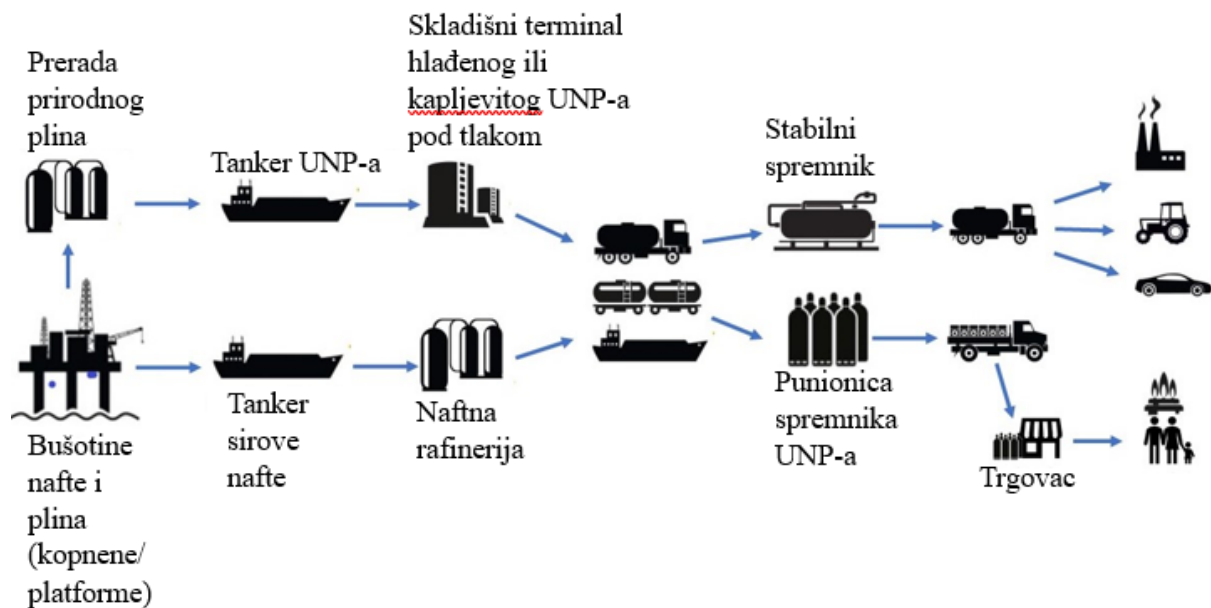
Fino pročišćavanje plina vrši se upotrebom krute tvari, adsorbenta, koja ima veliku specifičnu površinu putem koje selektivno upija određenog onečišćivača plina. Aktivirani aluminijev oksid, boksit i silika-gel najčešće su korišteni adsorbenti [8]. Oni se regeneriraju procesom desorpcije. Membranska metoda temelji se na zadržavanju metana uslijed velike permeabilnosti (propusnosti) membrane za vodu i kisele plinove. Procesom hlađenja dolazi do ukapljivanja određenih komponenti plina pa tako i UNP-a.

2.4.2. *Proizvodnja rafinacijom sirove nafte*

Prvi postupak pri obradi sirove nafte je frakcijska destilacija u kojoj se zagrijavanjem smjese različite frakcije odvajaju uslijed različite temperature njihovih vrelišta. UNP dobiven ovim postupkom obično ima visoku koncentraciju sumpora pa ga je potrebno dodatno obrađivati ili se spaljuje u rafinerijama u drugim procesima tijekom kojih je potrebno dovoditi toplinu. UNP koji se dalje obrađuje biva podvrgnut procesima krekiranja, hidriranja i reformiranja. Krekiranje označava postupak cijepanja dugačkih lanaca velikih molekula ugljikovodika pri povišenim temperaturama od 400°C do 500°C [9]. Reformiranje je srodan proces za koji su potrebne povišene temperature (450°C - 550°C) i tlakovi do 60 bara te prisutnost katalizatora [9]. Dodavanje vodika smjesi pod određenim tlakom naziva se hidriranje. Ono se vrši kako bi se spriječilo stvaranje olefina, katrana i koksa tijekom procesa prerade naftnih derivata [9].

2.4.3. *Transport i skladištenje*

Distribucija ukapljenog naftnog plina od proizvođača do krajnjih korisnika odvija se u više koraka. Prekooceanski i morski transport vrši se pomoću brodova specijaliziranih za prijevoz tekućih tereta, tankera. Oni plove putem plovnih rijeka i do mnogih gradova koji se ne nalaze na morskoj obali. Daljnji prijevoz na kopnu odvija se u vagon-cisternama željeznicom ili kamionskim cisternama. Autocisterne imaju ključnu ulogu u distribuciji do krajnjih korisnika jer mogu pristupiti svim lokacijama do kojih postoje izgrađene prometnice. UNP se skladišti ili isporučuje potrošačima u spremnicima i bocama različitih veličina ovisno o namjeni.



Slika 3. Distribucija UNP-a od proizvođača do potrošača, adaptirano prema [10]

3. UNP – GORIVO ZA POGON VOZILA

Rastom broja vozila u prometu došlo je do sve veće upotrebe alternativnih goriva u 21. stoljeću. Njihovom integracijom pokušava se odmaknuti od ovisnosti o isključivo benzinskim i dizelskim gorivima kako bi se smanjio negativni utjecaj prometa na okoliš. U brojnim državama provode se i različite poticajne mjere sa svrhom ostvarenja nacionalnih politika o povećanju udjela alternativnih goriva u ukupnoj potrošnji.

U Republici Hrvatskoj trenutno su registrirana vozila koja su pogonjena električnom energijom, vodikom, stlačenim prirodnim plinom, ukapljenim naftnim plinom i biogorivima koja se miješaju sa benzinom ili dizelom dobivenima konvencionalnim putem. Od svih nabrojanih alternativnih goriva upravo se ukapljeni naftni plin ističe s brojkom od 63151 registriranim vozilom [11]. UNP se nametnuo na tržištu alternativnih goriva zbog svojih već spomenutih povoljnih svojstava, trenutne dostupnosti u svijetu, smanjenog štetnog utjecaja na okoliš i potencijalnih ušteda za korisnike. Na teritoriju Hrvatske nalaze se 334 punionice čime je zadovoljena minimalna mreža punionica potrebna za prometovanje vozila na UNP po hrvatskim prometnicama [12]. Procjenjuje se da je u svijetu otprilike 16 milijuna vozila pogonjeno UNP-om što ga čini ukupno trećim gorivom po zastupljenosti [13], odnosno najzastupljenijim alternativnim gorivom. Najveća tržišta autoplina su Turska, Južna Koreja, Poljska, Italija i Australija.

Omjer miješanja propana i butana u UNP-u razlikuje se među državama što je najčešće povezano sa klimatskim uvjetima koji prevladavaju u pojedinom području. Propan je zbog svojeg niskog vrelišta primjenjiviji od butana u hladnijim podnebljima.

3.1. Ekološki razlozi upotrebe UNP-a

UNP izgara bez dima, pepela, čađe i neugodna mirisa. Budući da sadrži izrazito male količine sumpora, njegovim izgaranjem nastaje minimalna količina sumporovog dioksida koji narušava čovjekovo zdravlje, a u daljnjim reakcijama s vodom iz atmosfere tvori kiseline koje štetno djeluju na čitav ekosustav. Dušikovi oksidi NO i NO₂ skupnog naziva NO_x slično reagiraju u vlažnoj atmosferi, a povezuje ih se i s drugim neželjenim pojavama poput razvoja kancerogenih oboljenja i prizemnog ozona. Nepotpunim izgaranjem fosilnih goriva među ispušnim plinovima pojavljuju se brojni ugljikovodični spojevi (HC) koji imaju štetan utjecaj na okoliš i čovjekovo zdravlje.

U tablici 2. prikazana je kvalitativna usporedba ispušnih plinova motora s unutarnjim izgaranjem koji koriste UNP naspram dizelskih i benzinskih goriva. Oznaka '-' predstavlja da je benzinsko ili dizelsko gorivo u slučaju određenog zagađivača lošije od UNP-a, a '0' označava podjednaku količinu emisija nastalih korištenjem UNP-a u usporedbi s dizelom ili benzinom.

Tablica 2. Usporedba emisija UNP-a prema benzinskim i dizelskim gorivima, adaptirano prema [13]

Komponente ispušnih plinova	Gorivo	
	Benzin	Dizel
CO	-	0
HC	-	0
NO _x	-	-
Krute čestice	0	-
SO ₂	-	-
Benzen	-	0
1,3 butadien	-	-
Formaldehidi	-	-

Provedena su brojna istraživanja koja utvrđuju koliko iznosi smanjenje štetnih emisija u ispušnim plinovima vozila pogonjenima UNP-om naspram dizela i benzina. U odnosu na benzin emisije neizgorenih ugljikovodika (HC) manje su za 40% [14], ugljikovog monoksida (CO) za 60% [14], a zbog većeg omjera molekula vodika prema ugljiku snižene su i emisije ugljikovog dioksida (CO₂) za 9-20% [15]. Primjenom UNP-a emitira se podjednako stakleničkog plina ugljikovog dioksida kao i uporabom dizela, pa čak i do 15% više zbog većeg termičkog stupnja djelovanja dizelskih motora koji rade s većim kompresijskim omjerima [15]. Međutim, UNP pokazuje značajne benefite naspram dizela po pitanju NO_x spojeva i krutih čestica. Sagorijevanjem plina nastaje do 90% manje dušikovih oksida [16].

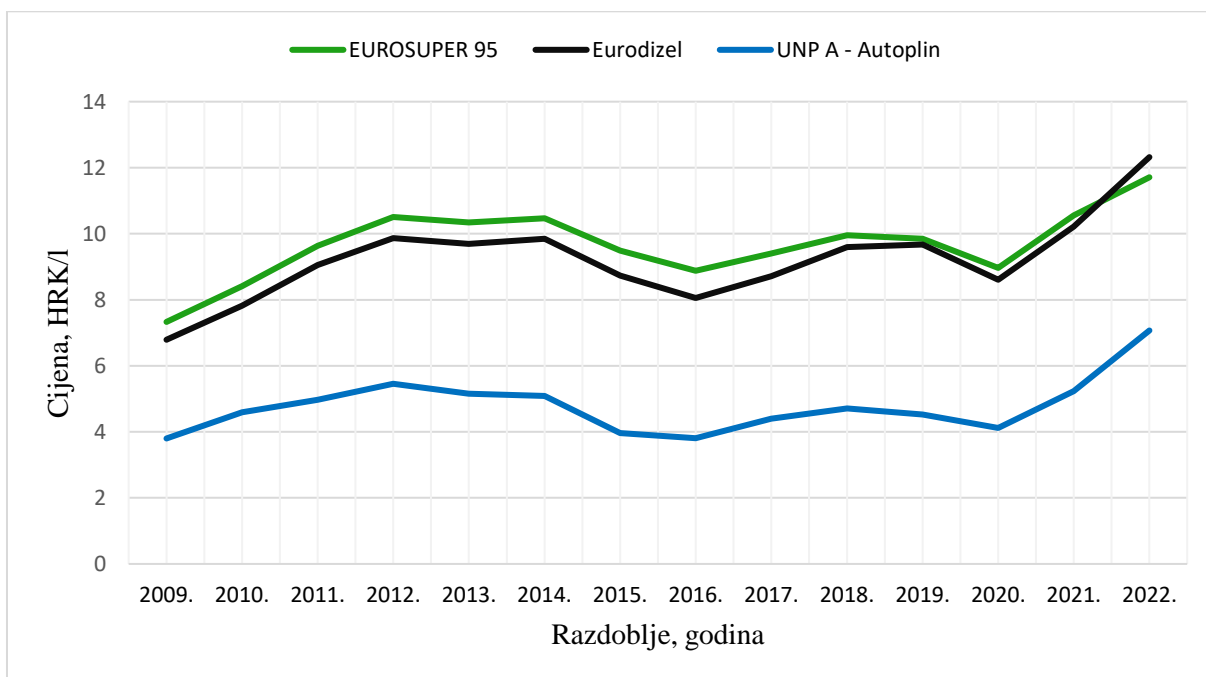
3.2. Ekonomski razlozi upotrebe UNP-a

Želja za smanjenjem troškova i uštedom novca glavni je motiv zbog kojeg se ljudi odlučuju na korištenje plina u svojim osobnim automobilima. Ugradnja dodatnih plinskih instalacija u vozilo koje se tvornički pogoni benzinom čest je slučaj. Situacija je ponešto drugačija kada su u pitanju dizelski motori čija je prilagodba plinskom gorivu složenija, a time i skuplja, no sve je više primjera gdje se primjenjuju i takva rješenja. Sve više svjetskih proizvođača automobila

u svojoj ponudi ima vozila s tvornički ugrađenim dvostrukim pogonom. Takvi automobili imaju dvostruko veću autonomiju vožnje jer ukoliko se isprazni spremnik UNP-a, vozilo se automatski prebacuje na benzinsko gorivo. Na taj način moguće je prevaliti gotovo dvostruko veće udaljenosti bez potrebe za punjenjem spremnika. Cijena UNP-a po litri kreće se oko polovice cijene benzina, ali pri izračunu uštede potrebno je uzeti u obzir da je volumna potrošnja plina oko 15-20% veća zbog njegove manje gustoće.

Tablica 3. Usporedba trenutnih cijena UNP-a i benzina u nekim europskim državama, adaptirano prema [17]

Država	UNP [€/l]	Benzin [€/l]	UNP/benzin
Poljska	0,63	1,38	46%
Ujedinjeno Kraljevstvo	0,85	1,52	56%
Italija	0,69	1,63	42%
Njemačka	0,72	1,46	49%
Španjolska	0,67	1,23	54%
Nizozemska	0,70	1,66	42%
Belgija	0,64	1,54	42%
Francuska	0,80	1,42	56%
Turska	0,88	1,81	49%
Rusija	0,32	0,66	48%
Ukrajina	0,55	0,95	58%



Slika 4. Kretanje prosječnih godišnjih cijena benzina, dizela i UNP-a u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2009. – 2022., izrađeno prema [18]

Napomena: HRK je kratica za valutu hrvatsku kunu koja je bila službeno sredstvo plaćanja u Republici Hrvatskoj do 31.12.2022. Prelazak na euro izvršen je prema fiksnom tečaju konverzije $1 \text{ €} = 7,5345 \text{ HRK}$. Međutim, treba imati na umu kako je tijekom razdoblja prikazanog na slici 4. odnos tih dviju valuta bio varijabilan.

Troškovima ugradnje plinskih instalacija u automobil potrebno je pribrojiti troškove atesta i održavanja plinske opreme. Ovisno o iznosu početnih ulaganja i godišnjem broju prijeđenih kilometara vozila, početnu je investiciju moguće otplatiti u roku od jedne do dvije godine, a potom korisnik ostvaruje konkretnu uštedu. Nadalje, u slučaju prodaje automobila njegova ukupna vrijednost je uvećana, a u većini ga slučajeva prisutnost ovog sustava za opskrbu motora jeftinijim alternativnim gorivom čini poželjnijim potencijalnim kupcima. Potencijalna mana pregradnje vozila na plinski pogon je što prema pravilnicima određenih proizvođača vlasnik gubi pravo na tvorničku garanciju.

Oktanski broj koji predstavlja otpornost goriva na detonantno izgaranje ponešto je viši kod UNP-a (104-112) u odnosu na prosječna benzinska goriva (87-92), stoga se upotrebom plina povećava trajnost motora [13]. Uslijed detonacija dolazi do oštećenja klipa, svjećice, ventila, klipnjače i koljenastog vratila. UNP u motor ulazi u plinovitoj fazi pa ne dolazi do ispiranja ulja sa stijenki cilindra tekućim gorivom zbog čega klipni prstenovi imaju dobro podmazivanje što ponekad rezultira i dvostruko većom trajnošću motora koji se pogoni UNP-om umjesto isključivo benzinom. S obzirom na bivalentnost pogona i čestu upotrebu plina pri vožnji, produljuje se vijek trajanja katalizatora čija je zadaća smanjenje udjela ugljikova monoksida, NO_x i HC spojeva u ispušnim plinovima. Motorno ulje dulje zadržava svoja svojstva jer se usporava njegova razgradnja benzinom pa je u konačnici period izmjene ulja i svjećica nešto duži. Korištenje autoplina doprinosi ugodnosti u vožnji jer je rad motora tiši i mirniji. Istraživanja su ustvrdila da je moguć mali gubitak maksimalne snage i brzine od oko 5% [13], što je u vožnji teško primjetno budući da se od vozila rijetko traži isporučivanje krajnje snage i brzine.

4. PLINSKE INSTALACIJE U VOZILU

Nadogradnja plinskih instalacija u vozilo smatra se preinakom vozila koju u Republici Hrvatskoj smiju izvoditi samo ovlaštene servisne radionice koje za to imaju odobrenje Ministarstva mora, prometa i infrastrukture. Dozvolu za rad mogu dobiti samo oni servisi koji posjeduju svu potrebnu opremu, čiji radni prostor udovoljava minimalnim propisanim zahtjevima i čiji su zaposlenici obučeni za instalaciju plinskih sustava. Prije ugradnje plinskog sustava potrebno je pažljivo pregledati postojeće stanje motora kako bi se utvrdile eventualne nepravilnosti koje bi naknadno mogle utjecati na ispravnost rada motora s plinskim gorivom. Proces nadogradnje plina sastoji se od mehaničkih, električarski te završnih radova. Po svršetku radova, serviser izdaje izjavu o izvršenim promjenama na vozilu koje je potom potrebno atestirati tehničkim pregledom u stanicama za tehnički pregled vozila. Svako vozilo koje se pogoni UNP-om mora na vjetrobranskom i stražnjem staklu imati naljepnicu s oznakom 'LPG' [19].



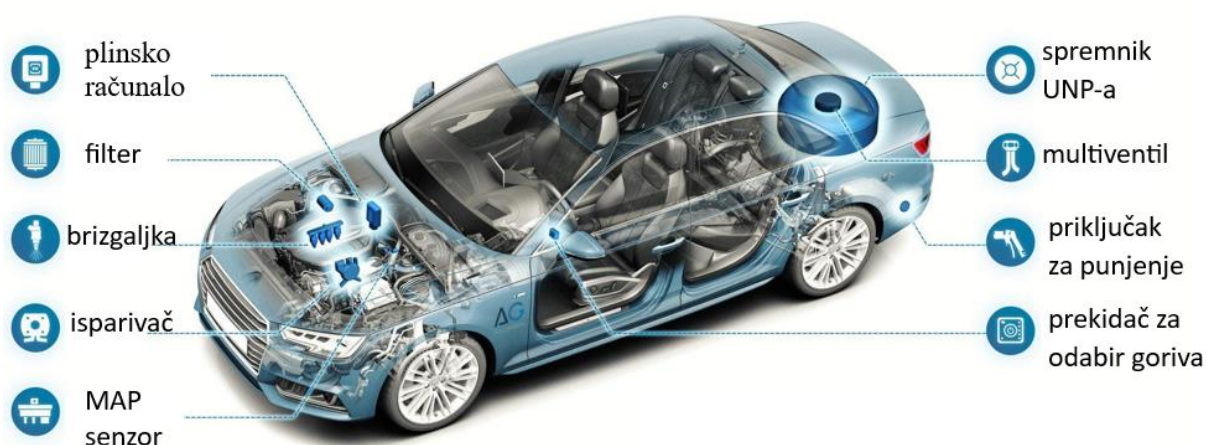
Slika 5. Naljepnica za vozilo s UNP-om kao pogonskim gorivom [20]

Uređaji i oprema koje je potrebno ugraditi pri adaptaciji vozila za korištenje UNP-a su sljedeći [19]:

- spremnik plina
- armatura spremnika plina
- pročišćivači (filteri) tekuće i plinske faze
- isparivač
- regulator tlaka
- plinski ventil
- ventil tekućeg goriva (benzina ili dizela)
- vodovi za plin visokog tlaka

- vodovi za plin niskog tlaka
- vodovi sredstva za grijanje
- električni uređaji i instalacije
- senzori tlaka i temperature
- uređaj za ubrizgavanje plina (brizgaljke)
- razdjelnik-distributor
- elektronska kontrolna jedinica (plinsko računalo)
- visokotlačna pumpa

Materijali od kojih su izrađene pojedine komponente sustava ne smiju stvarati zapaljive smjese niti imati utjecaja na kemijska svojstva plina, a i sami moraju biti otporni na njegovo djelovanje [20].



Slika 6. Glavne komponente UNP sustava u vozilu, adaptirano prema [21]

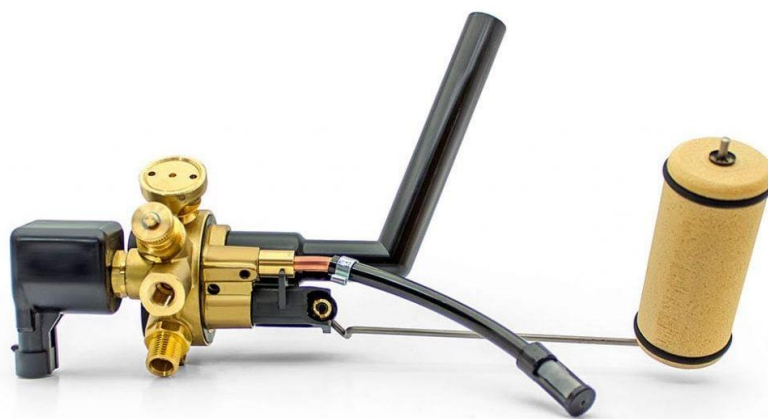
4.1. Spremnik plina

Spremnici plina smiju se puniti samo do 80% napunjenosti kako bi se ostavilo prostora za temperaturno širenje UNP-a u slučaju porasta vanjske temperature. Postoje dvije glavne izvedbe spremnika u koje se pohranjuje UNP u vozilu, a to su cilindrični i toroidalni čelični spremnici. Cilindrični spremnik se ugrađuje u prtljažni prostor zbog čega se posljedično smanjuje maksimalni raspoloživi kapacitet prtljažnika. Ukoliko vlasnik vozila želi zadržati maksimalni kapacitet prtljažnika, odlučuje se za nešto skuplju varijantu, a to je toroidalni spremnik koji se smješta u prostor predviđen za rezervni kotač ili ispod vozila. U potonjem slučaju potrebno je posebnu pažnju pridati zaštiti površine spremnika od vlage.

UNP se u spremniku nalazi u tekućem stanju pod tlakom do 10 bara [23] te je potrebno testirati njegovu nepropusnost. Visokotlačnom pumpom spojenom preko prirubnice spremnik se puni vodom i opterećuje na tlak od 30 bara minimalno 10 minuta. Ispravnost spremnika može se utvrditi ukoliko u tom periodu ne dođe do curenja vode i ne pojave se nikakve deformacije spremnika. Prije montaže u vozilo potrebno je eventualna manja oštećenja zaštititi antikorozivnim premazom. Spremnike s većim oštećenjima potrebno je odmah zamijeniti. Na samom spremniku moraju biti istaknuti podaci o proizvođaču, tvorničkom broju, godini proizvodnje, obujmu prazne posude, datumu posljednjeg izvršenog pregleda nadležne inspekcije za tlačne posude i najvećoj dopuštenoj masi punjenja [19].

4.2. Armatura spremnika plina

U armaturu spremnika ubrajamo sve ventile i uređaje koji omogućavaju siguran i ispravan rad sustava. Na spremniku su grupirani u jednu cjelinu koja se još naziva multifunkcionalni ventil, višenamjenski ventil ili skraćeno multiventil. Indikator razine goriva (plovak) preko posebnog senzora šalje informaciju o napunjenosti spremnika plinskom računalu, a ograničavač punjenja na 80% sprječava prepunjavanje iznad te vrijednosti. Punjenje se vrši putem priključka obično smještenog na donjem dijelu zadnjeg branika ili pored priključka tekućeg goriva (benzin ili dizel). Nepovratni ventil je osiguranje protiv natražnog strujanja prema priključku za punjenje. Sigurnosni ventil je zadužen za sprječavanje formiranja prekomjernog tlaka u spremniku i aktivira se pri tlaku od 30 bara [19]. Ako dođe do loma cijevi prema isparivaču, ograničavač protoka regulira protok plina koji istječe na vrijednost od najviše 10% najvećeg mogućeg protoka [19]. Sigurnosni uređaj u slučaju požara je uređaj protiv prekoračenja temperature koji se aktivira na oko 110°C tako da ispušta plin u atmosferu. Elektromagnetski sigurnosni ventil se otvara pri paljenju i zatvara pri gašenju automobila. Kada je potrebno izvršiti neku radnju na sustavu, npr. zamjenu filtera, zapornim ventilom se prekida dotok goriva iz spremnika. Armatura i spremnik su izvana zajedno zaštićeni od mehaničkog oštećenja plinotijesnim kućištem koje se prozračuje putem za to predviđenih cijevi.



Slika 7. Višenamjenski ventil [23]

4.3. Oprema za dovod plina u motor

U nastavku su ukratko opisane i ostale komponente plinskog sustava za pogon vozila.

Transport plina između pojedinih komponenti sustava vrši se visokotlačnim i niskotlačnim cjevovodima. Cijevi visokog tlaka su vodovi između vanjskog priključka za punjenje i spremnika te spremnika i isparivača. Visokotlačni cjevovodi mogu biti izrađeni od čelika, bakra ili kompozita, a spojni dijelovi od čelika ili mjedi [19]. Pri upotrebi bakrenih cijevi nerijetko su se pojavljivali lomovi pa se sve više pribjegava upotrebi plastičnih cijevi ispitanih na povišeni radni tlak. Cijevi niskog tlaka su vodovi koji povezuju isparivač s plinskim brizgaljkama, odnosno motorom.

UNP dolazi u motorni prostor putem vodova visokog tlaka u ukapljenom stanju. U isparivaču prelazi u plinovito agregatno stanje uz regulaciju tlaka i protoka prema plinskim brizgaljkama. Princip rada isparivača pobliže je pojašnjen u poglavlju 5.

Prije isparivača postavlja se još jedan elektromagnetski ventil iz sigurnosnih razloga. On se sastoji od klipa (igle) i izolirane bakrene zavojnice koja generira magnetsko polje kada njome teče struja. Zbog djelovanja magnetske privlačne sile, pomiče se klip čime je omogućen protok plina. Prestankom napajanja zavojnice (solenoida) gašenjem vozila, prestaje i djelovanje magnetske sile pa se klip vraća u prvobitni položaj i zaustavlja daljnji protok plina.

Na putu do brizgaljki plin prolazi kroz filter gdje se centrifugom odstranjuju sve nečistoće iz plinske faze. Zadatak plinskih brizgaljki ili injektora je isporučiti točno određenu količinu plina u zadanom vremenu kako bi se postigao zahtijevani omjer plina i zraka u smjesi koja izgara u

cilindrima motora. Radom plinskih injektora upravlja elektronska kontrolna jedinica (eng. ECU – engine control unit) ili plinsko računalo. Lambda sonda je uređaj koji mjeri podatak o postotku kisika u ispušnim plinovima te ga prenosi kontrolnoj jedinici. Kvalitetna plinska računala koriste izrazito brze procesore što im omogućava bržu obradu prikupljenih podataka i precizniju kontrolu rada brizgaljki.

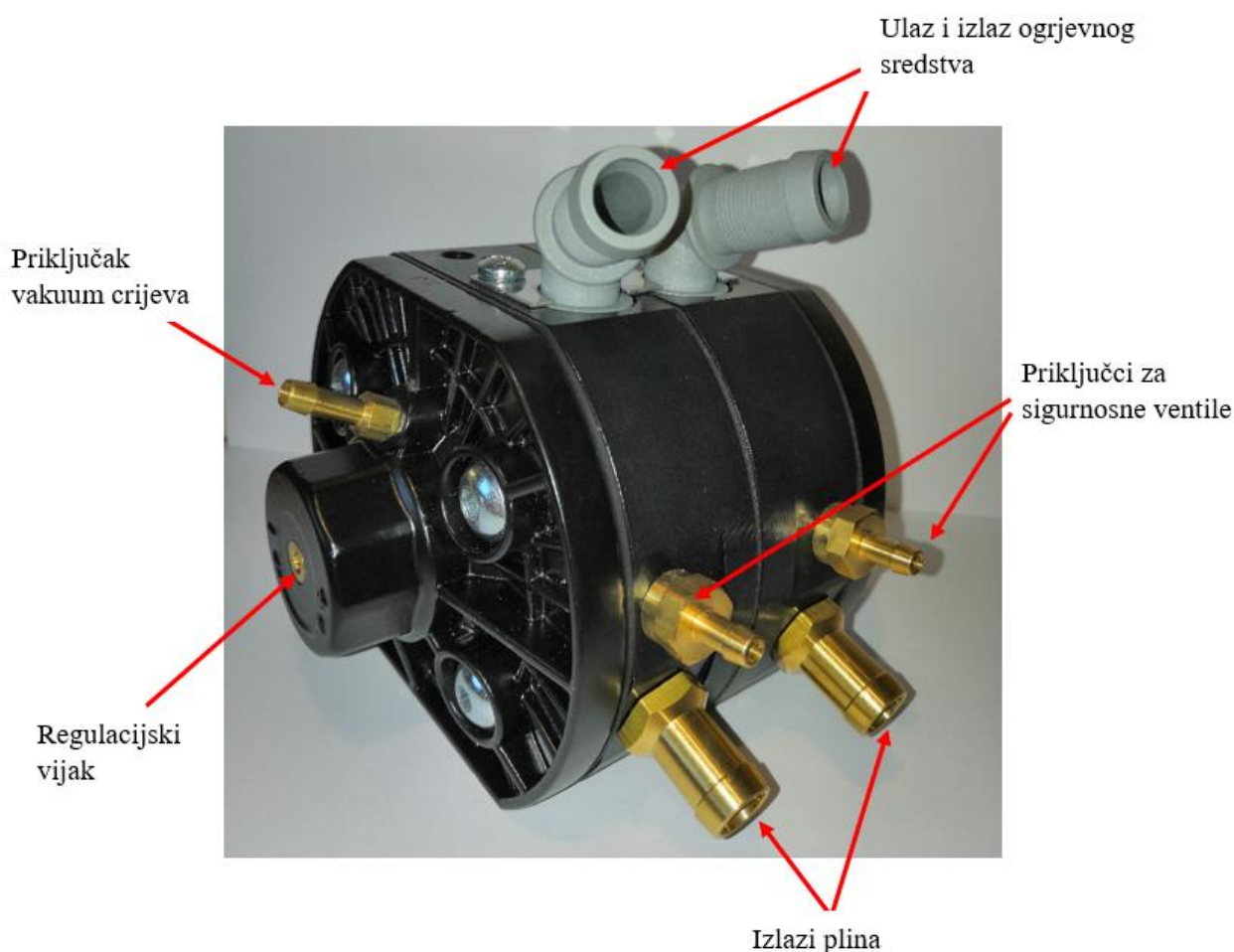
U unutrašnjost automobila potrebno je integrirati na ploču s instrumentima i prekidač putem kojeg vozač direktno upravlja izborom goriva za pogon vozila.

5. ISPARIVAČ

U ovom poglavlju na primjeru dostupnog isparivača bit će objašnjen princip njegovog rada, prikazana njegova unutrašnjost i komponente od kojih se sastoji.

Proizvođač tvrdi da je ovaj isparivač prikladan za motore do 290 kW ili 395 hp. Kratica 'hp' oznaka je mjerne jedinice 'konjska snaga'. Konjska snaga je prema njemačkoj normi DIN mjerna jedinica za snagu, a jedna konjska snaga definirana je kao snaga potrebna da se teret od 75 kilograma podigne na visinu od jednog metra u jednoj sekundi djelujući silom od 75 kiloponda. [24] Kilopond je mjerna jedinica iz starog tehničkog sustava jedinica, definirana kao težina tijela mase jedan kilogram pri gravitacijskom ubrzanju od $9,80665 \text{ m/s}^2$. [25]

Isparivač model 'TWIN Z V2' na slici, poljskog proizvođača 'KME' opreme za opskrbu automobila ukapljenim naftnim plinom ili stlačenim prirodnim plinom, zapravo je dvostruke izvedbe. Njegova lijeva i desna strana su simetrične, a konstruiran je na taj način kako bi mogao isporučivati dovoljno plina motorima vozila s većom snagom.

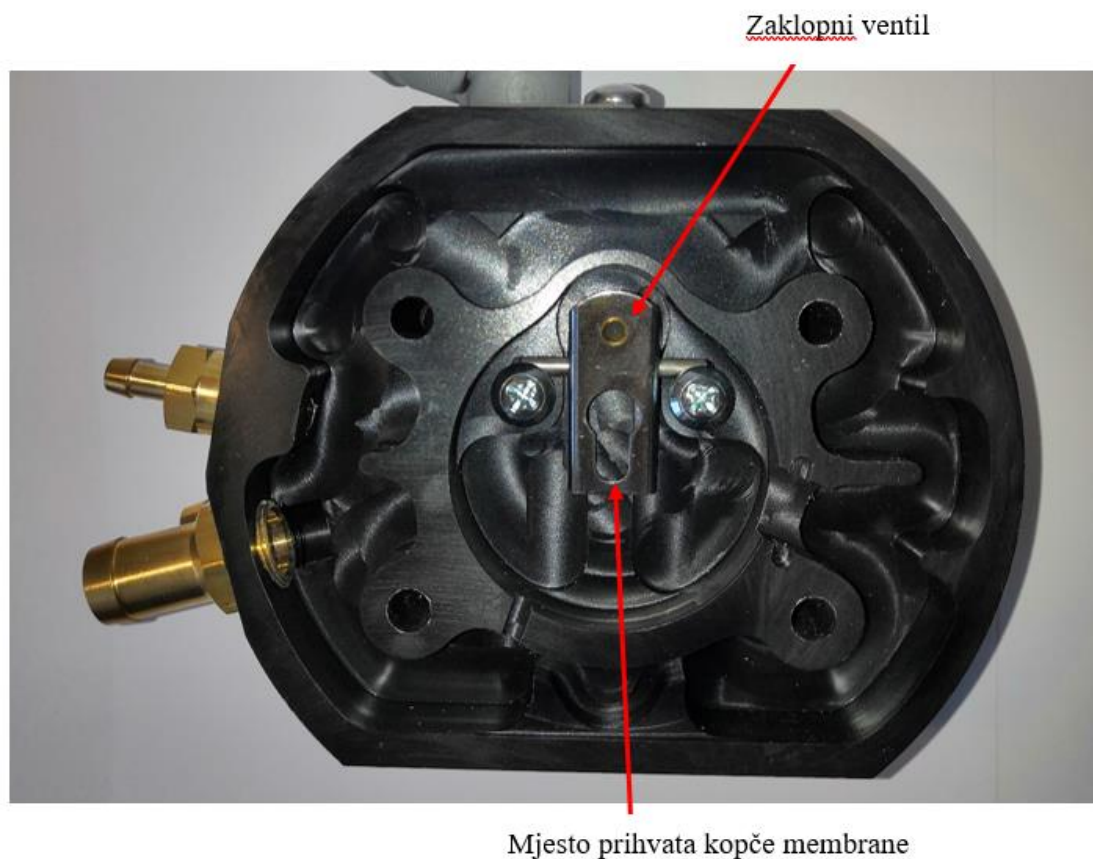


Slika 8. Sklop isparivača

Napomena: ulazni otvori UNP-a u isparivač nalaze se s donje strane te nisu vidljivi na priloženoj slici.

Isparivač je komponenta sustava za opskrbu motora vozila ukapljenim naftnim plinom u kojoj se UNP-u iz spremnika reducira tlak na vrijednosti oko 1,5 bar pri čemu se odvija pretvorba iz tekućeg u plinovito agregatno stanje što je popraćeno naglim padom temperature plina. Kako bi se spriječilo moguće smrzavanje isparivača i plinskih vodova te osigurala potrebna temperatura plina, u isparivač se ugrađuje izmjenjivač topline. Ogrjevni medij najčešće je vodom razrijeđeni antifriz, rashladna tekućina motora zadužena za održavanje njegove temperature u rasponu pri kojem pogonska jedinica doseže odgovarajuće radne parametre. Antifriz je kemijski dodatak koji snižava ledište i povisuje vrelište tekućina na bazi vode, a ima i antikorozivna svojstva zahvaljujući kojima štiti metalne dijelove komponenti kojima protječe.

Ogrjevni medij u isparivaču predaje toplinu UNP-u preko izmjenjivačke površine. UNP u isparivač stiže u tekućem stanju putem crijeva iz spremnika te uz redukciju tlaka i primanje topline od ogrjevnog medija prelazi u plinovito stanje i postiže odgovarajuću temperaturu i tlak. Veliku pažnju pri izradi isparivača pridaje se upravo izmjenjivačkoj površini kako bi se pospješio prijelaz topline s ogrjevnog medija na plin. Međutim, puno kanala i skretanja toka plina uzrokuje veće lokalne i linijske padove tlaka koji rastu s brzinom strujanja plina. Plin struji brže pri većim protocima, a to je u slučajevima potrebe za većom snagom motora koji onda potražuje više goriva.



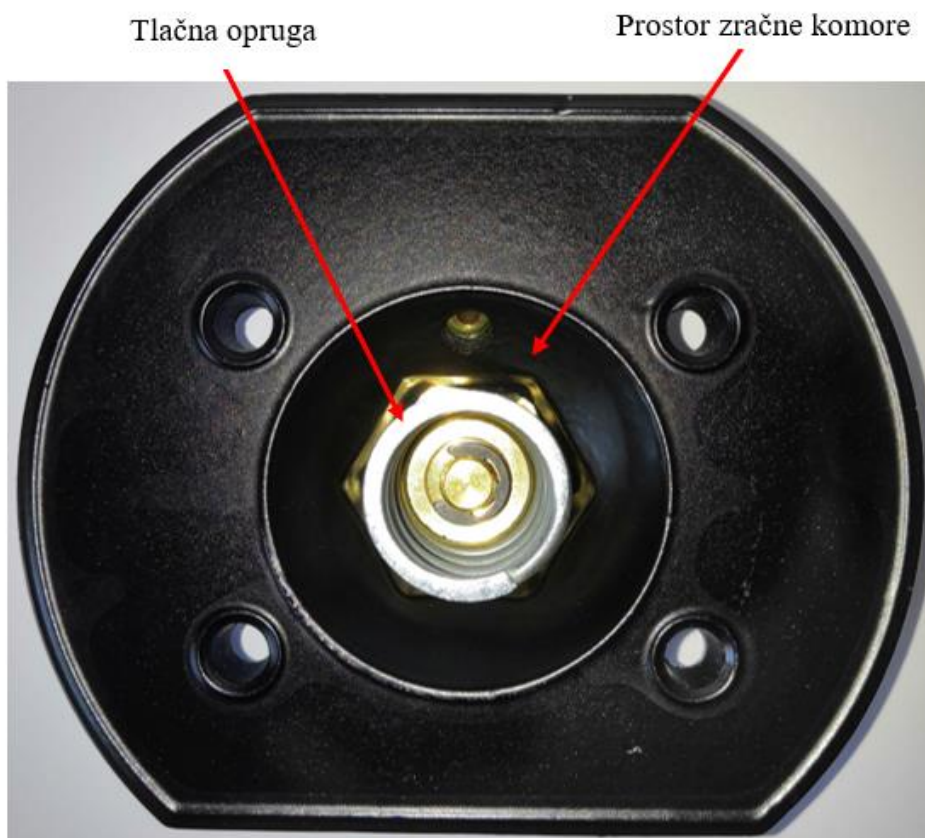
Slika 9. Izmjenjivačka površina na strani plina

Na slici 4. vidljiv je i zaklopni regulacijski ventil kojim se regulira protok plina kroz isparivač prema plinskim injektorima. Na ovaj se ventil pomoću zato predviđene kopče zakači gumena membrana koja upravlja njegovom otvorenošću na principu klackalice. Gumena membrana je fleksibilna pregrada između plinske faze u isparivaču i zračne komore.



Slika 10. Gumena membrana s kopčom

Zračna komora dio je isparivača koji je vakuum crijevom spojen s usisnom granom motora čime se ostvaruje jednakost njihovih tlakova. U zračnoj komori nalazi se tlačna opruga. Njena je zadaća da se zajedno sa zrakom sadržanim u komori suprotstavlja tlaku plina s druge strane membrane.



Slika 11. Zračna komora s oprugom

Sabijenost opruge moguće je podešavati putem regulacijskog vijka koji se ponaša poput navojnog vretena. Odvijanjem ili zavijanjem vijka njegovo se rotacijsko gibanje pretvara u pravocrtno gibanje (translaciju) matice na čiji se prošireni dio naslanja opruga jednim svojim krajem. Drugi kraj opruge se naslanja na gumenu membranu. Budući da se ovisno o položaju matice mijenja sabijenost opruge, na taj se način namješta željena razlika tlaka plina na izlazu iz isparivača i tlaka zraka u usisnoj grani motora. Osiguravanje odgovarajuće razlike tlakova ključno je za ispravan rad motora. Ova se regulacija vrši prilikom praznog hoda vozila uz dijagnostičko praćenje parametara rada motora kako bi se postigao sastav smjese plina i zraka u cilindru za optimalan proces izgaranja.

Na slici 7. prikazani su krajnji mogući položaji matice. Za slučaj prikazan na slici lijevo, opruga će biti najmanje sabijena i vršit će minimalni pritisak na gumenu membranu, dok će za slučaj

prikazan desno sabijenost opruge biti najveća pa time i sila kojom pritišće membranu. Pri samom kraju navoja regulacijskog vijka umetnut je 'seger' osigurač kako bi se spriječilo prekomjerno odvijanje i u konačnici odvajanje matice od vijka.



Slika 12. Krajnji položaji matice

Za vrijeme obavljanja nekog rada od strane vozila, pritiskom papučice gasa raste tlak zraka u usisnoj grani motora. Cilj je preko vakuum crijeva tu promjenu tlaka što brže registrirati i u zračnoj komori isparivača gdje sila tlaka akumuliranog zraka uz unaprijed podešenu silu sabijene opruge tlači gumenu membranu. Membrana se elastično deformira i s druge strane putem integrirane kopče djeluje na zaklopni regulacijski ventil čijim se dodatnim otvaranjem povećava tlak i protok plina na izlazu iz isparivača. Uspostavom ravnoteže sila s dvije strane membrane održava se zahtijevana konstantna razlika tlakova.

5.1. Opće preporuke proizvođača pri ugradnji isparivača

Proizvođač korištenog isparivača navodi sljedeće preporuke [26] pri ugradnji isparivača u motorni prostor vozila:

- uzeta je u obzir rezerva snage isparivača u odnosu na snagu motora
- isparivač treba montirati ispod razine ekspanzijske posude rashladne tekućine vozila
- mjesto ugradnje isparivača ne bi trebalo biti izloženo značajnim promjenama temperature tijekom vožnje
- isparivač ne smije utjecati na rad drugih uređaja u motornom prostoru
- mjesto ugradnje bi trebalo omogućavati lagan pristup tlačnom regulacijskom vijku i mogućnost lagane zamjene filtera kapljevite faze

- isparivač se ugrađuje na način da nije izložen prekomjernim vibracijama tijekom vožnje
- zbog dizajna isparivača smjer toka ogrjevnog medija (rashladne tekućine motora) nije bitan
- svi spojevi gumenih crijeva moraju biti osigurani (pritegnuti) pomoću kablskih vezica
- isprašiti (propuhati) isparivač nakon ugradnje kako bi se uklonile eventualne čestice nečistoće iz njegove unutrašnjosti

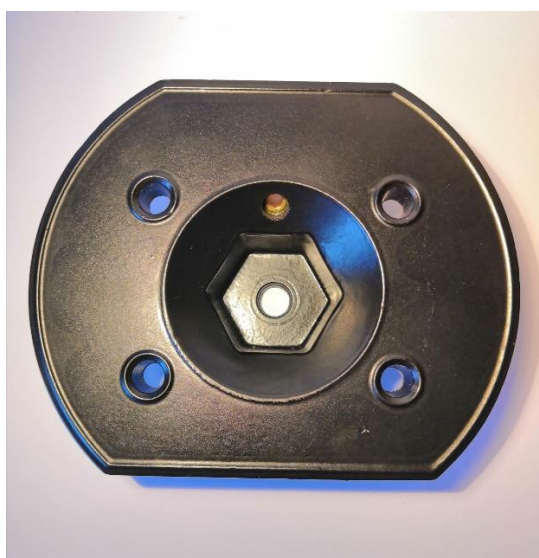
6. MATEMATIČKI MODEL

Zadaća je isparivača, koji se ugrađuje u automobile pri nadogradnji vozila na pogon UNP-om, održavanje približno stalne razlike tlaka plina na izlazu iz isparivača i tlaka u usisnoj grani motora. Tlak u usisnoj grani podložen je naglim promjenama vrijednosti uslijed naglih promjena potražnje snage motora tijekom vožnje. Brzina uspostave novog tlaka u zračnoj komori za regulaciju tlaka plina ključna je za ispravan i miran rad motora na plinskom gorivu. Do uspostave novog tlaka u zračnoj komori dolazi akumulacijom čestica zraka u slučaju povišenja tlaka na usisu, odnosno istjecanjem dijela zraka iz komore u slučaju pada tlaka na usisu. Ovim su modelom opisani zračna komora i vakuum crijevo putem kojeg zrak putuje između usisne grane i komore.

6.1. Izračun volumena zračne komore

Kako bi se procijenio približni volumen zračne komore dostupnog isparivača, bilo ga je potrebno rastaviti te približno izmjeriti sve relevantne dimenzije komore. Prvo je izračunat približni volumen prazne komore, a zatim su od njega oduzeti volumeni regulacijskog vijka i matice te tlačne opruge.

Pri izračunu približnog volumena zračne komore, njena je unutrašnjost podijeljena na dva dijela. Prvi je dio aproksimiran volumenom pravilne šesterostrane prizme uz zanemarenje radijusa zaobljenja bridova. Drugi je dio izračunat kao volumen krnjeg stošca.



Slika 13. Prazna zračna komora

Volumen pravilne šesterostrane prizme V_1 računa se prema izrazu:

$$V_1 = P_1 h_1 \quad (1)$$

gdje je h_1 visina uspravne prizme, a P_1 površina šesterokuta duljine stranice a .

$$P_1 = \frac{6\sqrt{3}}{4} a^2 \quad (2)$$

Volumen krnjeg stošca V_2 računa se prema izrazu:

$$V_2 = \frac{1}{3} \pi (r_v^2 h_v - r_m^2 h_m) \quad (3)$$

gdje je r_v radijus veće baze, a r_m radijus manje baze krnjeg stošca. Oznake h_v i h_m predstavljaju visine zamišljenih stožaca mjerene od veće, odnosno manje baze.

Volumeni regulacijske matice i vijka su aproksimirani s volumenima dvaju valjaka.

Volumen matice V_3 :

$$V_3 = r_3^2 \pi h_3 \quad (4)$$

gdje su r_3 radijus matice i h_3 visina valjkastog tijela matice.

Pri računanju volumena koji zauzima vijak uzet je samo dio vijka koji je van kontakta s maticom jer je volumen matice također aproksimiran volumenom punog, a ne šupljeg valjka.

Volumen tijela vijka V_4 približnog polumjera baze r_4 i duljine l_4 iznosi:

$$V_4 = r_4^2 \pi l_4 \quad (5)$$

Volumen tlačne opruge V_5 polumjera zavojnice r_5 :

$$V_5 = l_z r_5^2 \pi \quad (6)$$

Duljina zavojnice l_z računa se prema izrazu:

$$l_z = \frac{d_u + d_v}{2} \pi n \quad (7)$$

gdje je d_u unutarnji promjer opruge, d_v vanjski promjer opruge, a n broj zavoja opruge.

Konačno volumen komore ispunjen zrakom, u daljnjem tekstu V_k :

$$V_k = V_1 + V_2 - (V_3 + V_4 + V_5) \quad (8)$$



Slika 14. Regulacijski vijak s maticom (lijevo), tlačna opruga (desno)

6.2. Osnovne pretpostavke modela

Prilikom izrade modela uvedene su sljedeće pretpostavke i pojednostavljenja:

- zrak se tretira kao idealni plin
- strujanje zraka kroz vakuum crijevo je nestlačivo ($M < 0,3$)
- radi se sa srednjom brzinom strujanja zraka u crijevu i faktor trenja se računa prema njoj
- zanemarena je akumulacija mase zraka u vakuum crijevu
- zanemaruje se promjena volumena zračne komore uslijed elastičnih deformacija membrane
- temperature zraka u zračnoj komori i vakuum crijevu su jednake po iznosu i stacionarne

6.3. Postavljanje matematičkog modela

U matematičkom modelu postavljene su jednačba očuvanja mase za zračnu komoru i jednačba očuvanja količine gibanja za vakuum crijevo. Odnosi među pojedinim veličinama stanja zraka u određenom trenutku opisani su jednačbom stanja idealnog plina.

Bilanca mase zraka u komori:

$$\frac{dM_k}{dt} = m_u - m_i \quad (9)$$

$$\frac{dM_k}{dt} = \rho_c w A_c - \rho_k w A_c \quad (10)$$

Ako se zanemari akumulacija mase u spremniku, može se pisati:

$$V_k \frac{d\rho_k}{dt} = \rho_c w A_c - \rho_k w A_c \quad (11)$$

Za gustoću kao veličinu stanja može se općenito pisati:

$$\rho = \rho(p, T) \quad (12)$$

pa se njena derivacija u vremenu može zapisati kao:

$$\frac{d\rho_k}{dt} = \frac{d\rho_k}{dp_k} \frac{dp_k}{dt} + \frac{d\rho_k}{dT_k} \frac{dT_k}{dt} \quad (13)$$

Uključivanjem pretpostavke o stacionarnosti temperature drugi član na desnoj strani gornje jednadžbe poprima vrijednost 0.

Veza između gustoće i tlaka izvedena je pomoću jednadžbe stanja idealnog plina:

$$\rho = \frac{p}{RT} / \frac{\partial}{\partial p} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{1}{RT} \quad (15)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (13) i (15) u jednadžbu (11) uz provedeno sređivanje dolazi se iz bilance mase do konačnog izraza vremenske promjene tlaka u komori:

$$\frac{dp_k}{dt} = \frac{R_z T_k}{V_k} (\rho_c w A_c - \rho_k w A_c) \quad (16)$$

Bilanca količine gibanja za vakuum crijevo:

$$\frac{d(M_c w)}{dt} = p_u \frac{d_c^2 \pi}{4} - p_k \frac{d_c^2 \pi}{4} - \lambda \frac{L}{d_c} \frac{\rho_c w^2}{2} \frac{d_c^2 \pi}{4} \quad (17)$$

Uz pretpostavku o stacionarnosti mase zraka u crijevu može se pisati:

$$M_c \frac{dw}{dt} = p_u \frac{d_c^2 \pi}{4} - p_k \frac{d_c^2 \pi}{4} - \lambda \frac{L}{d_c} \frac{\rho_c w^2}{2} \frac{d_c^2 \pi}{4} \quad (18)$$

Masa zraka u crijevu može se izraziti preko gustoće zraka i volumena crijeva:

$$M_c = \rho_c \frac{d_c^2 \pi}{4} L \quad (19)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (19) u jednadžbu (18) uz naknadno sređivanje dolazi se do izraza za vremensku promjenu brzine zraka u crijevu:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{\rho_c L} \left(p_u - p_k - \lambda \frac{L}{d_c} \frac{\rho_c w^2}{2} \right) \quad (20)$$

U jednadžbi količine gibanja za crijevo uzeti su u obzir gubitci uslijed trenja, a faktor trenja λ računa se za laminarno i turbulentno strujanje. Za granicu između laminarnog i turbulentnog strujanja uzima se vrijednost Reynoldsovog broja $Re = 2300$ [27].

Reynoldsov broj računa se prema izrazu:

$$Re = \frac{\rho_c w d_c}{\mu} \quad (21)$$

Ovisnost faktora trenja λ o Reynoldsovom broju u laminarnom području može se aproksimirati izrazom:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (22)$$

U turbulentnom strujanju faktor trenja λ računa se pomoću Swamee-Jain formule:

$$\lambda = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{k}{3,7d_c} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (23)$$

6.4. Simulink

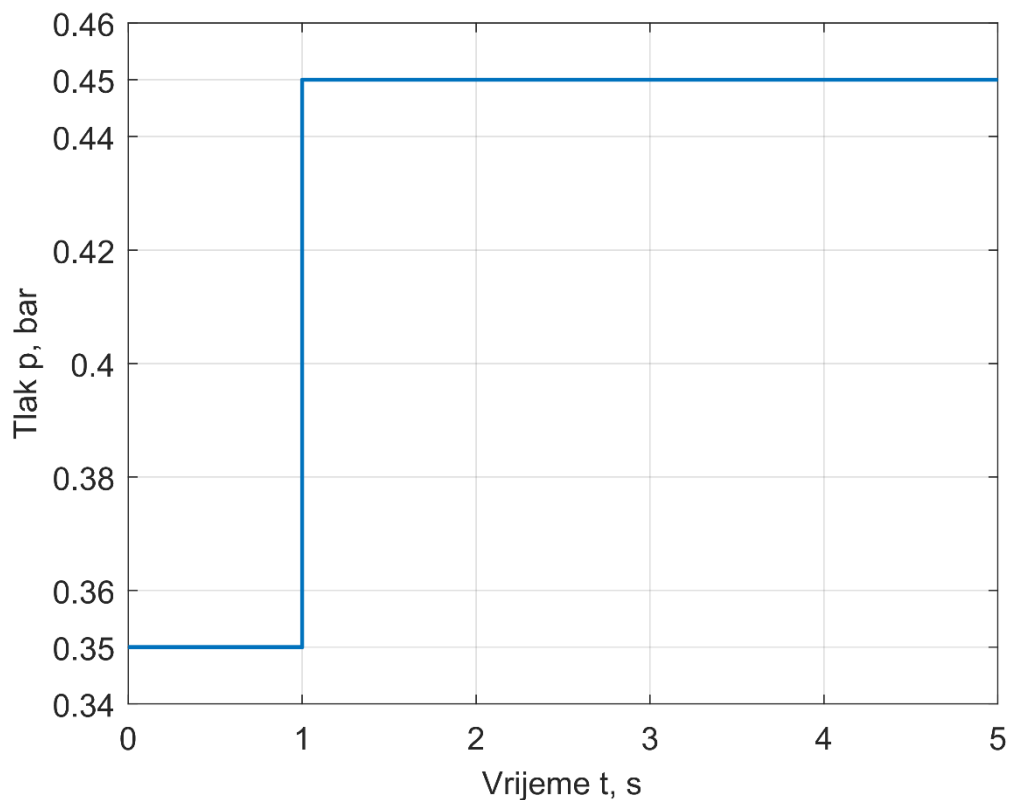
Kako bi se odredili vremenski tijekovi tlaka zraka u komori u ovisnosti o promjenama tlaka u usisnoj grani, provedena je simulacija u programskom jeziku MATLAB. Prikazani sustav jednadžbi unesen je u MATLAB-ov dodatak Simulink u obliku blok sheme. Trajanje provedenih simulacija je svega par sekundi jer se radi o izrazito brzim promjenama u sustavu. Nakon uvođenja naglog poremećaja tlaka na usisu u vremenskom periodu manjem od jedne sekunde dolazi do uspostave novog tlaka u zračnoj komori. Vrijeme kašnjenja ili brzina odziva je vrijeme potrebno da tlak u zračnoj komori postigne novu vrijednost jednaku tlaku u usisnoj grani. Za ispravan rad plinskog sustava u vozilu, poželjno je imati što bržu regulaciju tlaka u zračnoj komori, odnosno da je kašnjenje minimalno.

Tablica 4. Ulazni podaci za simulaciju

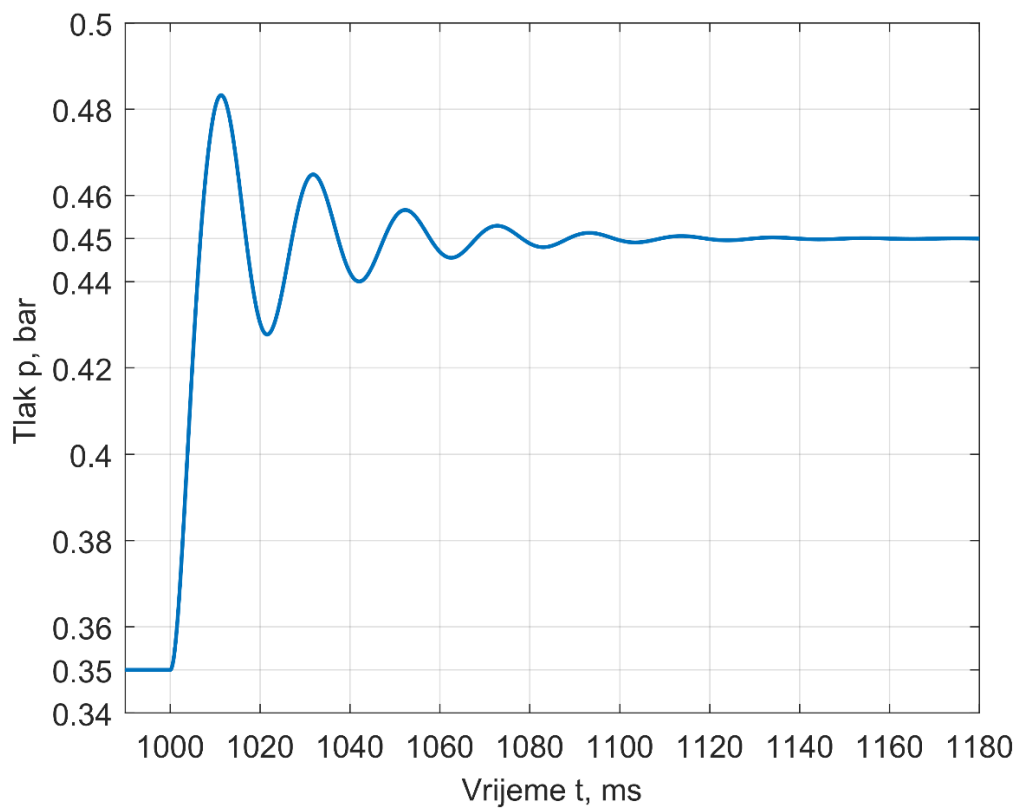
Veličina	Mjerna jedinica	Vrijednost
Individualna plinska konstanta zraka, R_z	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	287
Temperatura zraka, T	K	353,15
Izračunati volumen komore, V_k	m^3	20785.62×10^{-9}
Početni tlak u zračnoj komori, p_k	bar	0,35
Početni tlak u usisnoj grani, p_u	bar	0,35
Duljina spojne cijevi, L	m	1
Promjer spojne cijevi, d_c	m	0,005
Dinamička viskoznost zraka, μ ($T = 353.15 \text{ K}$) [27]	Pa s	2.12090×10^{-5}
Apsolutna hrapavost cijevi, k	m	2×10^{-5}

6.5. Rezultati simulacije

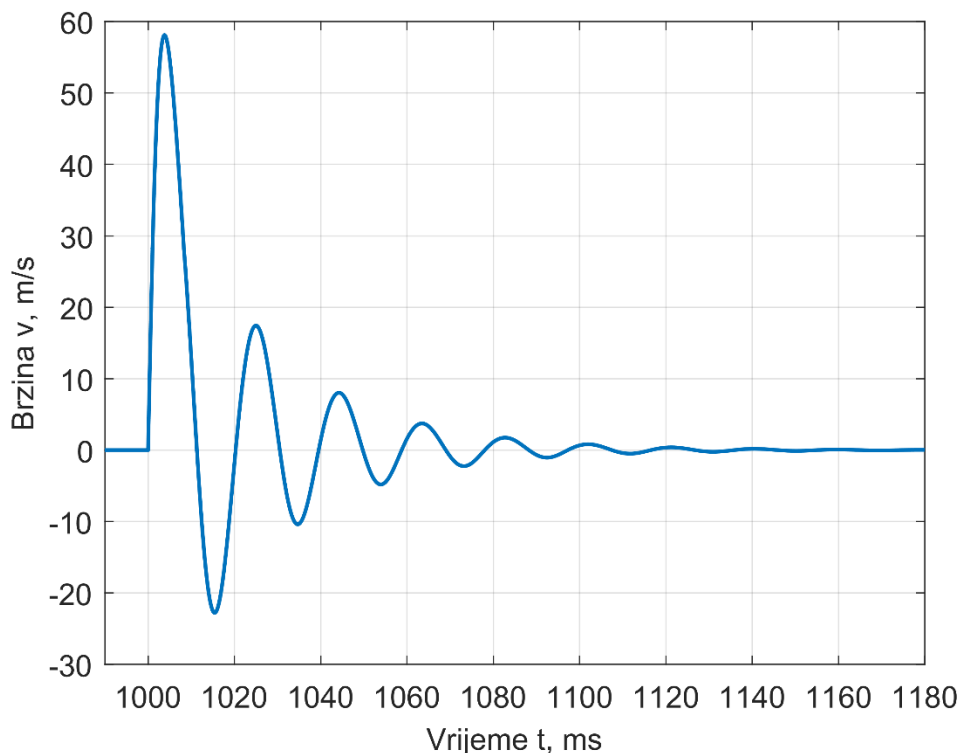
Početna simulacija je izvedena uvođenjem naglog skoka tlaka u usisnoj grani vrijednosti $\Delta p_u = 0,1$ bar u trenutku $t = 1$ s čime su dobiveni rezultati prikazani u nastavku. Početna vrijednost tlaka u usisnoj grani $p_u(t = 0 \text{ s})$ iznosi 0,35 bar i odgovara približnom tlaku koji vlada u usisnoj grani kada vozilo radi u praznom hodu. Rastom opterećenja motora, raste i vrijednost tlaka u usisnoj grani motora.



Slika 15. Uvođenje naglog poremećaja tlaka u usisnoj grani



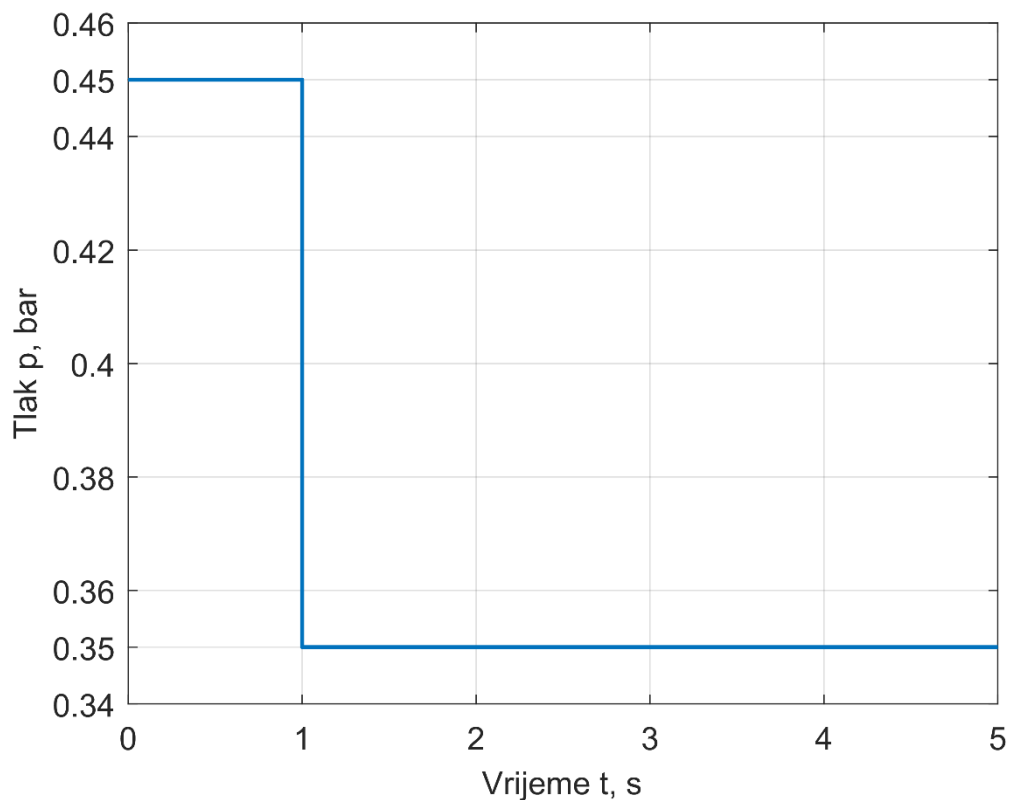
Slika 16. Odziv tlaka u komori



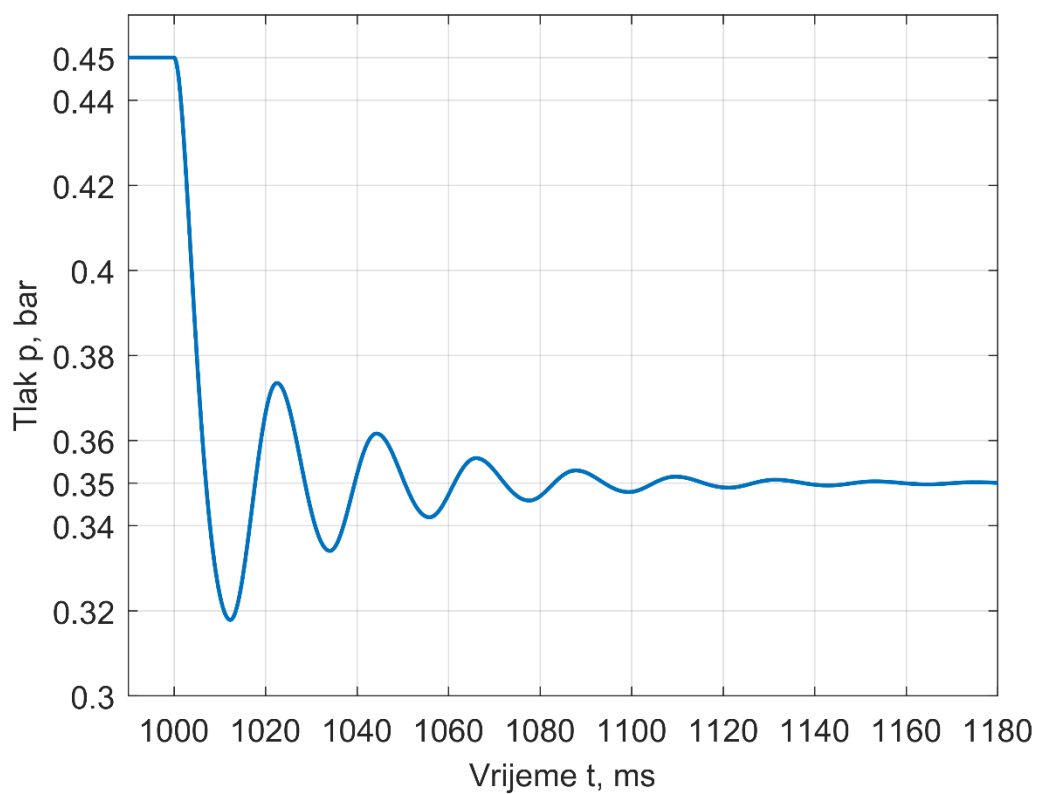
Slika 17. Brzina zraka u cijevi

Na slici 16. je vidljivo da se novi tlak, koji je narinut u usisnoj grani, u zračnoj komori uspostavlja s vremenskim kašnjenjem od otprilike 6,7 milisekundi (ms). Kako je već spomenuto, radi se o izrazito brzim promjenama pa je pri grafičkom prikazivanju rezultata na x-osi prikazan vremenski segment koji započinje 10 ms prije uvođenja tlačnog poremećaja u sustav i završava 180 ms kasnije kada je vidljivo da su fizikalne veličine poprimile nove stacionarne vrijednosti. Trenutni skok tlaka u usisnoj grani daje veliki impuls sile masi zraka. Oscilatorno ponašanje modeliranog sustava tijekom tranzijentnih pojava ne može se smatrati u potpunosti točnim. Očekuje se da bi amplitude oscilacija u stvarnom isparivaču bile manje i da bi sustav brže istiravao zbog elastične gumene membrane, čijim se deformiranjem mijenja volumen komore za neki mali iznos, i gumenog crijeva koje sigurno barem djelomično uspijeva amortizirati te oscilacije.

Kako bi se utvrdila ispravnost funkcioniranja danog modela i u slučaju naglog pada tlaka tlaka u usisnoj grani, u nastavku je izvedena takva simulacija. U trenutku $t = 1$ s sada se uvodi trenutni poremećaj tlaka iznosa $\Delta p_u = -0,1$ bar. Rezultati prikazani na slici 19. u nastavku su osnosimetrična preslika onih dobivenih za slučaj $\Delta p_u = 0,1$ bar te se zaključuje da je dani model primjenjiv dvosmjerno.



Slika 18. Uvođenje naglog pada tlaka u usisnoj grani

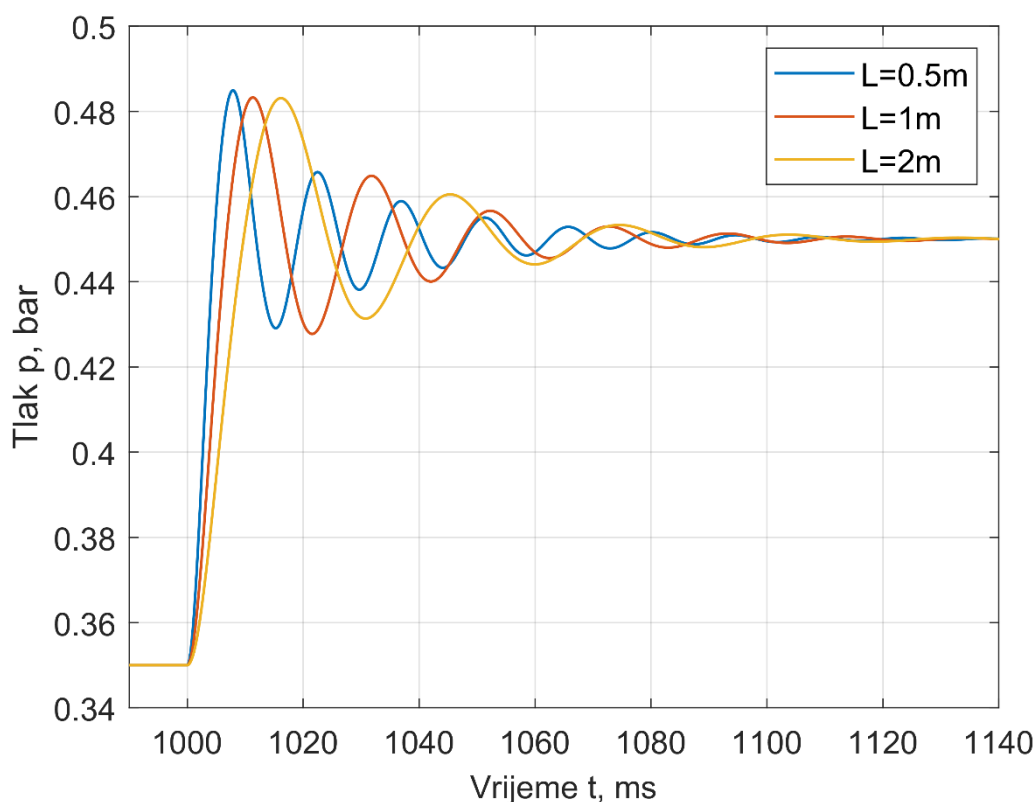


Slika 19. Odziv tlaka u komori na nagli pad tlaka u usisnoj grani

6.5.1. Analiza utjecajnih parametara na odziv sustava

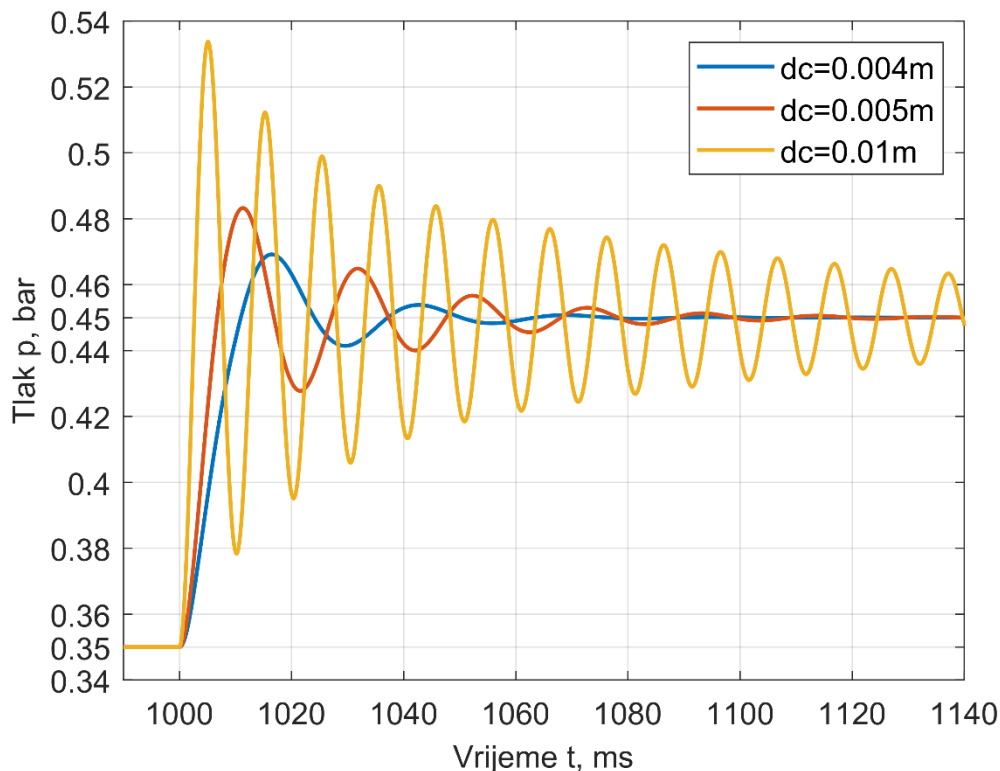
S ciljem da se ispituju utjecaji geometrijskih značajki komore i spojne cijevi te iznosa skoka tlaka na usisu na odziv tlaka u zračnoj komori, mijenjaju se sljedeći parametri:

- duljina spojne cijevi
- promjer spojne cijevi
- volumen zračne komore
- nagli porast tlaka u usisnoj grani Δp_u



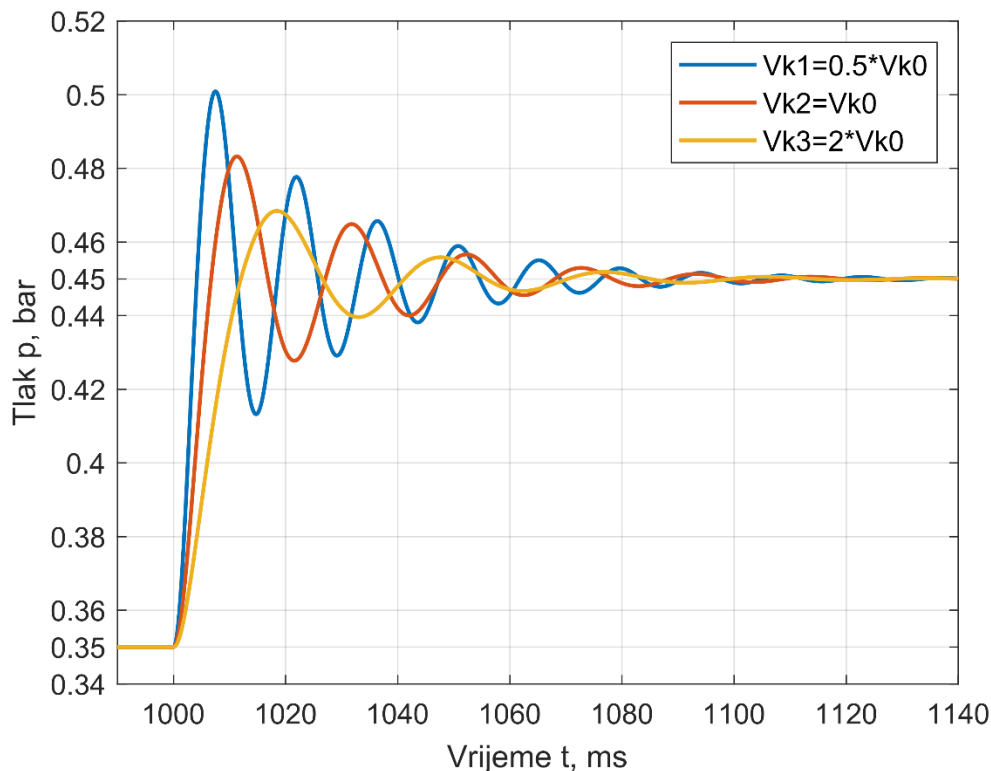
Slika 20. Utjecaj duljine spojne cijevi na odziv tlaka u zračnoj komori

Slika 20. iznad pokazuje rezultate simulacije za tri različite duljine spojne vakuum cijevi uz isti narinuti skok tlaka u usisnoj grani. Uz prvobitnu duljinu $L = 1$ m, u drugom je slučaju cijev skraćena za 0,5 m, a u trećem produljena za 1 m. Uočljivo je da sustav regulacije tlaka plina u isparivaču najbrži u slučaju kada je cijev najkraća. Produljenjem cijevi raste iznos linijskih gubitaka uslijed trenja pa je manja brzina strujanja zraka kroz cijev unatoč jednakoj početnoj razlici tlakova. U stvarnosti bi se vremena kašnjenja mogla još više razlikovati zbog utjecaja stlačivosti zraka u cijevi. Pri uporabi dulje cijevi, proteklo bi više vremena dok bi se informacija o skoku tlaka prenijela na drugi kraj cijevi i time započelo ustrujavanje zraka u komoru.



Slika 21. Utjecaj promjera spojne cijevi na odziv tlaka u zračnoj komori

Slika 21. iznad pokazuje rezultate simulacije za tri spojne cijevi različitih promjera uz isti narinuti skok tlaka u usisnoj grani. Uz prvobitnu cijev unutarnjeg promjera $d_c = 0,005\text{ m}$, u drugom je slučaju korištena cijev 1 milimetar (mm) manjeg promjera, a u trećem 5 mm šira cijev. Iako sustav koristeći cijev najvećeg promjera $d_c = 0,01\text{ m}$ ima najmanje vrijeme kašnjenja, regulacija koju on vrši nije zadovoljavajuća jer sustav dugo zadržava iznimno oscilatorno ponašanje pa tlak u komori ne postiže novu stacionarnu vrijednost u promatranom vremenskom intervalu. Velike oscilacije tlaka moguće je objasniti povećanom masom zraka koja u određenom trenutku ulazi ili napušta komoru jer je poprečni presjek ulaznog (izlaznog) otvora veći. S druge strane, u slučaju smanjenja promjera cijevi na vrijednost $d_c = 0,004\text{ m}$, sustav počinje više kasniti jer ne uspijeva dovoljna masa zraka ući u komoru kako bi se povećanjem broja čestica zraka u komori povećala gustoća, a time i tlak.

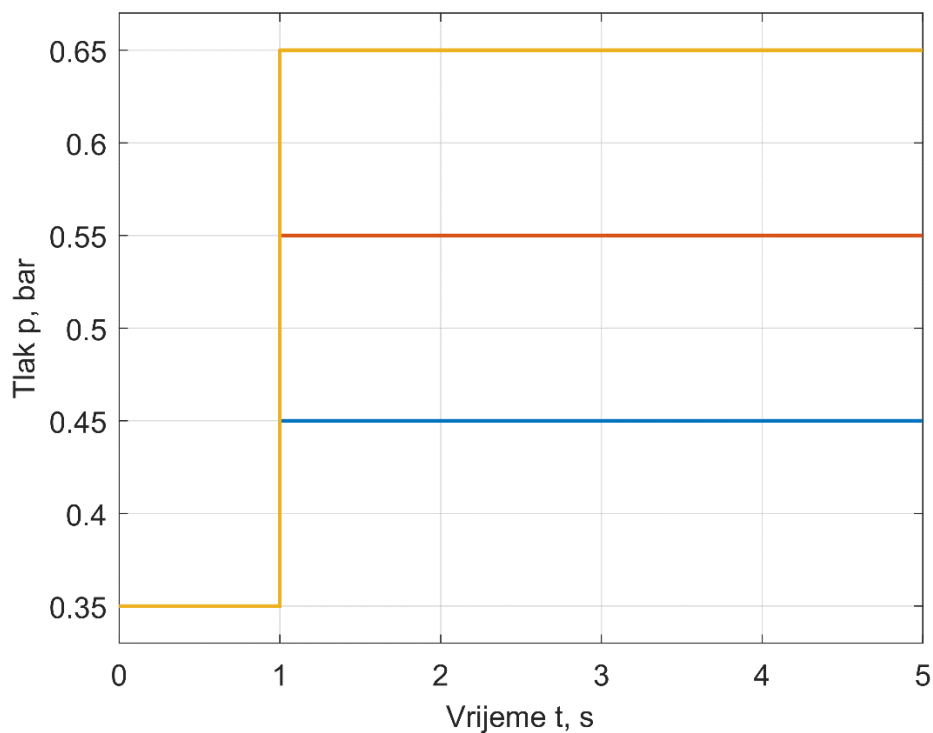


Slika 22. Utjecaj volumena zračne komore na odziv tlaka u njoj

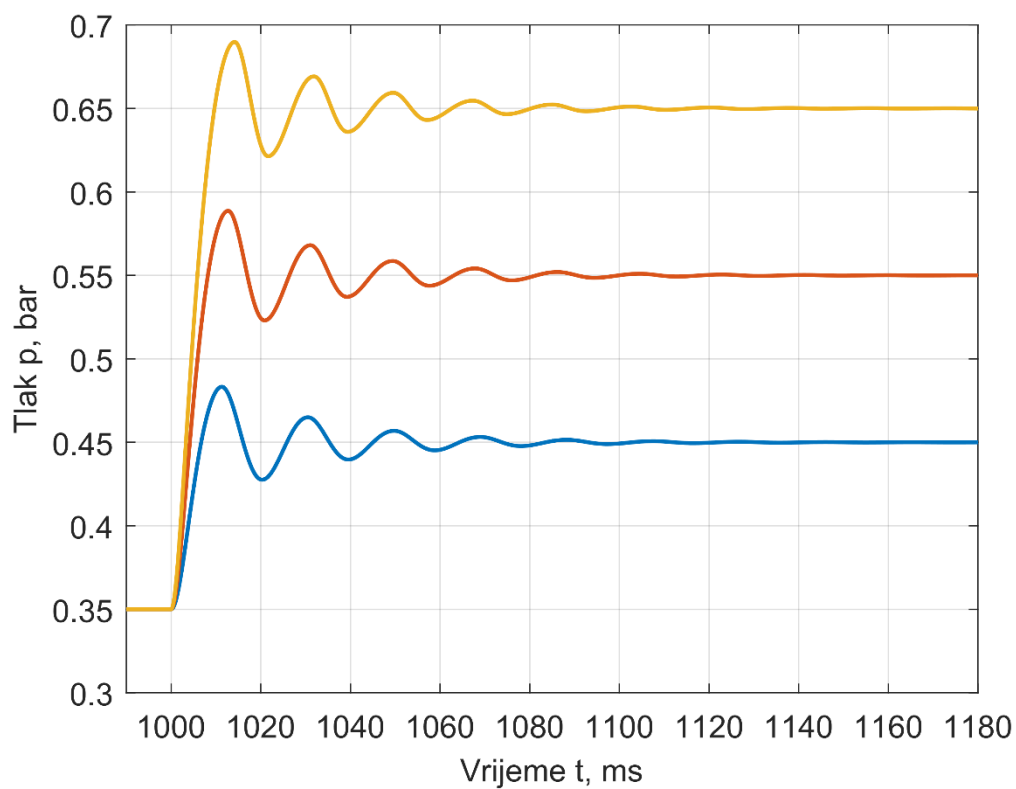
Kako bi se ispitaio utjecaj veličine isparivača, odnosno njegove zračne komore na regulaciju tlaka plina u isparivaču provodi se simulacija za tri različita volumena zračne komore. U zračnoj su komori upola manjeg volumena naspram prvobitnog veće amplitude oscilacija tlaka pa sustav sporije dostiže novo stacionarno stanje. Ista masa zraka koja uđe u komoru, u slučaju njenog manjeg volumena, izaziva veći porast gustoće i tlaka. Posljedično, kašnjenje sustava je manje u slučaju smanjenja volumena zračne komore, ali za konačnu ocjenu rada ovog sustava u stvarnosti bilo bi potrebno znati koliko su značajne oscilacije tlaka. Kod sustava sa većim volumenom komore, vrijeme kašnjenja je veće jer je potrebna veća akumulacija mase da bi se tlak povisio na novu željenu vrijednost. U ovom se sustavu pojavljuju najmanje oscilacije, a kada bi se uzelo u obzir realno ponašanje gumene membrane, moguće da ih ne bi niti bilo ili bi bile minimizirane.

U nastavku je analiziran odziv sustava na tri različite skokovite promjene tlaka u usisnoj grani (slika 23.). U sva tri slučaja početna vrijednost tlaka u usisnoj grani i zračnoj komori iznosi $p = 0,35$ bara. U prvom slučaju skok tlaka u usisnoj grani iznosi $\Delta p_u = 0,1$ bar, u drugom $\Delta p_u = 0,2$ bar, a u trećem $\Delta p_u = 0,3$ bar. Zbog najveće generirane brzine uslijed najveće razlike tlakova, treći sustav uspijeva imati sličan odziv tlaka sustavima s manjom nametnutom razlikom tlakova, tek je neznatno sporiji. Međutim, ovaj model zanemaruje stlačivost zraka, a pri velikim

brzinama koje se razvijaju uslijed veće razlike tlakova, utjecaj stlačivosti je veći pa time i greška napravljena primjenom ovog modela.



Slika 23. Uvođenje 3 različita skoka tlaka u usisnoj grani



Slika 24. Utjecaj intenziteta skoka tlaka u usisnoj grani na odziv tlaka u zračnoj komori

7. ZAKLJUČAK

Ukapljeni naftni plin pronalazi široku primjenu u današnjem svijetu zbog svojih povoljnih svojstava. U posljednje se vrijeme sve više stavlja fokus na čistu i obnovljivu energiju ne bi li se ostvario cilj o klimatskoj neutralnosti. Nove je tehnologije potrebno poticati i razvijati te ih uključivati u sustav tamo gdje je njihova primjena razumna i s ekonomskog stajališta. Nemoguće je provesti cjelovitu energetska tranziciju dok nove i čišće tehnologije ne postanu konkurentnije od konvencionalnih izvora energije. Iako ga u kontekstu potpunog prelaska na obnovljive izvore energije ne možemo smatrati dugoročnim rješenjem, UNP će se zasigurno još određeno vrijeme koristiti kao gorivo za pogon motornih vozila jer zbog svog čišćeg izgaranja predstavlja zadovoljavajuće tranzicijsko rješenje koje smanjuje štetne emisije. Nadalje, trenutna je prednost UNP-a nad ostalim alternativnim gorivima razvijena mreža punionica u većem dijelu svijeta. Proizvođači plinskih instalacija za pogon vozila kontinuirano unaprjeđuju komponente koje proizvode. Plinska je oprema došla do svoje pete generacije, a uključuje sustave s ubrizgavanjem plina u usisnu granu u kapljevitoj fazi čime se gubi potreba za isparavanjem plina u isparivaču i radom vozila s benzinskom gorivom prilikom pokretanja.

U šestom je poglavlju matematičkim modelom opisan sustav za regulaciju tlaka plina na izlazu iz isparivača. Iako se zbog uvedenih pretpostavki i pojednostavljenja rezultati brzine odziva tlaka u zračnoj komori ne mogu smatrati potpuno točnima, oni daju indikativne podatke o utjecaju pojedinih geometrijskih značajki na ponašanje regulacijskog sustava. Određenom konstrukcijskom izvedbom isparivača direktno se utječe na uspješnost regulacije tlaka plina jer su volumen komore i promjer spojne cijevi utjecajni parametri. Prilikom ugradnje isparivača treba ga, uz poštivanje svih sigurnosnih mjera navedenih u petom poglavlju, postaviti što bliže usisnoj grani kako bi se smanjila duljina vakuum crijeva koje ih povezuje. Rezultati simulacije su pokazali da se primjenom duže cijevi vrijeme kašnjenja sustava povećava. Provjera utjecaja promjera spojne cijevi na brzinu odziva sustava, ukazuje da se optimalna vrijednost promjera cijevi nalazi negdje između krajnjih vrijednosti ispitanih modelom, otprilike $d_c = 5$ mm. Optimiranjem utjecajnih parametara bi se došlo do kombinacije ulaznih podataka koji daju najbrži odziv sustava. Izvedeni matematički model ne daje podatke o raspodjeli brzine zraka duž cijevi, već radi s njenom srednjom vrijednošću. Primjenom metode diskretizacije na spojnu cijev moglo bi se doći do rezultata raspodjele tlaka i brzine u pojedinim poprečnim presjecima cijevi uz određenu razinu točnosti.

LITERATURA

- [1] Diplomski rad;
<https://www.unirepository.svkri.uniri.hr/islandora/object/riteh%3A3080/datastream/PDF/view>
- [2] Skupina autora : Plinarski priručnik; Energetika Marketing d.o.o., 7. izdanje, Zagreb 2014.
- [3] [https://energypedia.info/wiki/Liquefied_Petroleum_Gas_\(LPG\)#Supply_and_Demand](https://energypedia.info/wiki/Liquefied_Petroleum_Gas_(LPG)#Supply_and_Demand), pristupano 22.01.2024.
- [4] <https://thepetrosolutions.com/properties-lpg-liquified-petroleum-gas/>, pristupano 22.01.2024.
- [5] <https://www.osha.gov/chemicaldata/484>, pristupano 22.01.2024.
- [6] <https://gazeo.com/up-to-date/news/2013/History-of-LPG-the-first-100-years,news.6662.html>, pristupano 21.01.2024.
- [7] <https://www.statista.com/statistics/658785/lpg-global-consumption-distribution-by-sector/>, pristupano 20.01.2024.
- [8] Tehnički leksikon; <https://tehnicki.lzmk.hr/>
- [9] K. Vukušić, "Tehnike korištenja ukapljenog naftnog plina (UNP)", Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2023. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:143795>
- [10] <https://energypedia.info/index.php?curid=20555>
- [11] https://mmpi.gov.hr/UserDocsImages/arhiva/Prilog%204%20%20NOP%20ver30-05-2015%2014-7_15.pdf
- [12] <https://mmpi.gov.hr/infrastruktura/dokumenti-136/nacionalni-okvir-politike/17813>, pristupano 05.02.2024.
- [13] Sethiya A.: LPG as an Alternative fuel in Automobile: A comparative analysis, 2015.
- [14] Price P., Guo S., Hirschmann M.: Performance of an evaporator for a LPG powered vehicle, Applied Thermal Engineering, 2004.
- [15] Bellin T et al.: Determination of Euro 6 LPG passenger car emission factors through laboratory and on-road tests: Effect on nation-wide emissions assessment for Italy, Atmospheric Environment: X, 2022.
- [16] <https://autoplin-misic.hr/25-2/>, pristupano 09.01.2024.
- [17] <https://gazeo.com/>, pristupano 09.02.2024.
- [18] Godišnji energetske pregled, 2022. https://eihp.hr/wp-content/uploads/2024/01/Energija-u-HR-22_WEB-novo.pdf
- [19] <https://narodne-novine.nn.hr/eli/sluzbeni/2009/102/2640>, pristupano 02.02.2024.

- [20] <https://spadix.com.hr/products/copy-of-reflektirajuca-naljepnica-za-ogranicenje-brzine-110km?variant=34457535676553>, pristupano 02.02.2024.
- [21] <https://en.agcentrum.pl/installation-lpg-in-your-car>, pristupano 22.12.2023.
- [22] [wytyczne montazuen_0.pdf \(stag.gr\)](#)
- [23] <https://alexlpg.com/en/how-do-car-gas-systems-work/>, pristupano 15.11.2023.
- [24] https://hr.wikipedia.org/wiki/Konjska_snaga, pristupano 17.01.2024.
- [25] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kilopond>, pristupano 17.01.2024.
- [26] https://kme.eu/kme/wp-content/uploads/2020/10/INSTRUKCJA_RED_TWIN_ZV2_EN.pdf
- [27] Virag Z., Šavar M., Džijan I.: Mehanika fluida I, FSB, 2021.
- [28] <https://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.php>, pristupano 20.11.2023.