Optimiranje regulacijskih krugova procesa atmosferske destilacije

Dorić, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:168262

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Hrvoje Dorić

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, srpanj 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Hrvoje Dorić

OPTIMIRANJE REGULACIJSKIH KRUGOVA PROCESA ATMOSFERSKE DESTILACIJE

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Nenad Bolf

Članovi ispitnog povjerenstva: izv. prof. dr. sc. Nenad Bolf
dr. sc. Željka Ujević Andrijić
doc. dr. sc. Igor Dejanović

Zagreb, srpanj 2015.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za mjerenja i automatsko vođenje procesa Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu.

Zahvaljujem svom mentoru izv. prof. dr. sc. Nenadu Bolfu na vodstvu, strpljenju te brojnim savjetima tokom pisanja rada. Nadalje, zahvaljujem asistentu dr. sc. Ivanu Mohleru na velikoj pomoći oko eksperimentalnog dijela rada te na znanjima koja mi je prenio.

Također, zahvaljujem inženjerima iz Rafinerije nafte Sisak što su bili na raspolaganju, na podacima koji su služili za izradu rada te na stručnim objašnjenjima procesa.

Posebno se zahvaljujem kolegama, prijateljima i roditeljima na savjetima i moralnoj podršci tokom studiranja, ali i na vremenu koje smo proveli skupa „zanemarujući" studiranje.

Dorić Hrvoje

SAŽETAK

Ovaj rad obrađuje optimiranje regulacijskih krugova rafinerijskog procesa atmosferske destilacije nafte.

U teorijskom dijelu rada opisan je proces i metode vođenja atmosferske destilacije, a zatim su prikazane metode optimiranja vođenja i razvoja empirijskih modela procesa.

Eksperimentalni dio obuhvatio je analizu i optimiranje regulacije razine stripera teškog benzina i stabilizatora primarnog benzina.

Na temelju podataka s postrojenja simulirano je dinamičko vladanje regulacijskih krugova, a optimirani parametri regulatora primijenjeni su na postrojenju. Djelovanje regulacijskih krugova prije i poslije optimiranja uspoređeno je kriterijima kvalitete regulacije i statističkim pokazateljima.

Ključne riječi:
Atmosferska destilacija, vođenje procesa, regulacijski krug, empirijski modeli, optimiranje procesa

ABSTRACT

This paper describes optimisation of control loops in crude distillation unit in oil refineries.

Theoretical part contains description of processes and process control in crude distillation unit, methods for optimization of process control and development of empirical models.

Experimental part includes analysis and optimisation of controller parameters for level control in processes of naphtha stripping and naphtha stabilization.

Data from crude distillation unit was used to simulate dynamics of control loops. Optimized controller parameters were applied on crude distillation unit. Operation of control loops before and after optimization was compared using control quality criteria and statistical indicators.

Keywords:
Crude distillation unit, process control, control loop, empirical models, process optimisation

SADRŽAJ:

1. UVOD 1

2. TEORIJSKI DIO 2

2.1. Destilacija i primjena pri preradi nafte 2

2.1.1. Amosferska destilacija nafte 3

2.1.2. Bilanca tvari destilacijske kolone 7

2.1.3. Bilanca topline destilacijske kolone 12

2.2. Regulacija i vođenje destilacijske kolone 15

2.2.1. Projektiranje sustava za vođenje 16

2.2.2. Relativne statičke karakteristike 17

2.2.3. Regulacija tlaka 22

2.2.4. Regulacija temperature 23

2.2.5. Odabir načina vođenja destilacijskih kolona 25

2.3. Empirijski modeli procesa 28

2.3.1. Procesi prvog reda 28

2.3.2. Procesi drugog reda 29

2.3.3. Integrirajući procesi 30

3. EKSPERIMENTALNI DIO 32

3.1. Opis procesa atmosferske destilacije 32

3.1.1. Opis procesa stripiranja teškog benzina 34

3.1.2. Opis procesa u stabilizatoru primarnog benzina 35

3.2. Dijagnostika procesa i regulacijskih krugova 36

3.3. Identificiranje empirijskih modela procesa 40

3.4. Ugađanje parametara regulatora 41

4. REZULTATI I RASPRAVA 44

4.1. Striper teškog benzina (LIC-6102) 44

4.2. Stabilizator primarnog benzina (LIC-6108) 52

5. ZAKLJUČAK 58

6. POPIS SIMBOLA 59

7. LITERATURA 61

8. ŽIVOTOPIS 62

1. UVOD

Postrojenje za atmosfersku destilaciju nafte je primarno postrojenju u procesu prerade nafte. Sva nafta koja se prerađuje u rafineriji prvo se obrađuje u postrojenju za atmosfersku destilaciju što znači da kapacitet postrojenja za atmosfersku destilaciju određuje kapacitet čitave rafinerije. Produkti postrojenja za atmosfersku destilaciju su frakcije nafte koje idu na daljnju obradu u slijedeća postrojenja. Kvaliteta i količina pojedine frakcije koja se izdvaja u koloni za atmosfersku destilaciju ovise o radnim uvjetima.

Kako bi se ostvarili zadani prinosi i kvaliteta pojedinih frakcija, te na taj način ostvarilo maksimalnu ekonomsku dobit potrebna je kvalitetna regulacija procesa atmosferske destilacije. U regulacijske krugove na postrojenju atmosferske destilacije ubrajaju se regulacijski krugovi razine, protoka, tlaka i temperature kolone za atmosfersku destilaciju te krugovi koji utječu i vezani su na atmosfersku kolonu.

Vođenje postrojenja za atmosfersku destilaciju veoma je zahtjevno zbog složenosti postrojenja. Postrojenje radi kontinuirano, a dijelovi postrojenja su međusobno povezani pa se poremećaj iz jednog dijela prenosi u slijedeći. Osim toga, zbog velikog broja procesnih tokova i povezanosti pojedinih procesa nije lako odrediti koji tok predstavlja poremećaj bez promatranja šire slike, odnosno procesa koji prethode procesu koji se analizira.

Optimizacija regulacijskih krugova bitna je kako bi se proces vodio na željeni način i kako bi se potisnuo utjecaj poremećaja. Dobra regulacija u konačnici će dovesti do veće djelotvornosti procesa što znači i veću ekonomsku dobit. Osim toga, procesne veličine će se održavati u određenim granicama što znači da će rad postrojenja biti sigurniji.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Destilacija i primjena pri preradi nafte

Destilacija je fizikalni separacijski postupak koji služi za razdvajanje višekomponentnih smjesa. Temelji se na razlici tlakova para i vrelišta pojedinih komponenti smjese. Sastoji se od procesa isparavanja i ukapljivanja. Do isparavanja određene komponente dolazi kada se tlak para te komponente izjednači sa vanjskim tlakom. Temperatura pri kojoj dolazi do isparavanja zove se vrelište. Do ukapljivanja će doći kada je tlak para komponente niži od vanjskog tlaka para. Temperatura pri kojoj dolazi do ukapljivanja naziva se kapljište. Tlak para komponente raste s povišenjem temperature.

Nafta je kompleksna smjesa ugljikovodika, od kojih svaki ima svoje vrelište i tlak para. Vrelište i tlak para ovise o molekulskoj masi ugljikovodika, što je on lakši vrelište je niže, a tlak para veći. Najlakši spoj u nafti je metan, a najteži spojevi su asfaltne tvari. Atmosferska destilacija je proces razdvajanja ugljikovodičnih spojeva na osnovu različitih vrelišta. Dobivaju se frakcije, odnosno grupe ugljikovodika u određenim destilacijskim granicama koje su određene temperaturama vrelišta. Čistoća pojedinih frakcija ovisi o razlikama u vrelištima, što su razlike manje teže je postići zadovoljavajuću čistoću. Destilacija nafte provodi se u destilacijskoj koloni.

Za destilaciju nafte koristi se rektifikacijska kolona, odnosno postupak rektifikacijske destilacije. Taj postupak podrazumijeva kontakt parne faze sa kondenziranom parom, a rezultat je izmjena tvari i energije pri čemu parna faza postaje bogatija lako hlapjivim komponentama, a kapljevita faza teže hlapljivim komponentama. Kada se postigne stacionarno stanje, rektifikacija je niz neprekidnih procesa isparavanja i ukapljivanja koji se odvijaju na pliticama kolone.[1]

2.1.1. Amosferska destilacija nafte

Postrojenje za atmosfersku destilaciju nafte primarno je postrojenje u svakoj rafineriji. Sva nafta koja dođe u rafineriju mora se preraditi na tom postrojenju, pa se prema kapacitetu postrojenja atmosferske destilacije procjenjuje kapacitet prerade čitave rafinerije. Zadatak atmosferske destilacije je pri atmosferskom tlaku i temperaturi oko 355°C, ovisno o vrsti nafte, frakcionirati naftu na pojedine proizvode, odnosno destilate koji se kasnije na drugim postrojenjima prerađuju ili dorađuju s ciljem dobivanja proizvoda tražene kakvoće.

Budući se proizvodi atmosferske destilacije (tekući naftni plin, lagani benzin, benzin, petrolej, plinsko ulje, teško plinsko ulje i atmosferski ostatak) dorađuju na sekundarnim postrojenjima, proces atmosferske destilacije mora se voditi na optimalan način, tj. da se uz minimalan utrošak energije dobije tražena količina i kakvoća proizvoda kao što je krivulja destilacije, boja, viskoznost, temperatura tečenja, temperatura zapaljenja, itd. [2]

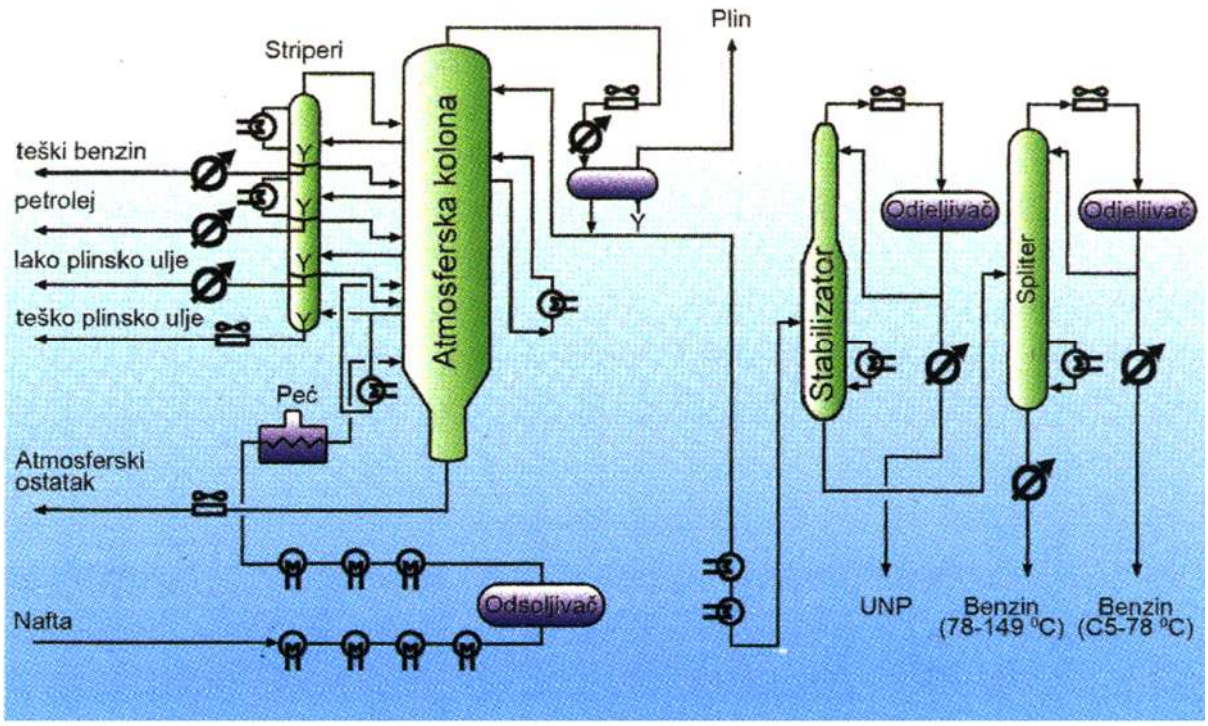
Svaka destilacijska kolona sastoji se od stripirajućeg i rektificirajućeg dijela. Stripirajući dio je donji dio kolone u koji se dodaje vodena para radi uklanjanja lako vrjućih komponenata iz proizvoda dna, t.j. ostatka. Rektificirajući dio obuhvaća dio kolone iznad mjesta pojenja nafte u kolonu, u njemu se odvija frakcionacija.

Cilj je postići što veću čistoću pojedinih frakcija nafte. Na čistoću frakcija utječu čimbenici:

- broj plitica, odnosno visina kolone
- količina refluksa
- efikasnost kontakta parne i kapljevite faze
- brzina strujanja parne faze

Radi povećanja oštrine frakcionacije, dodaje se refluks na vrhu kolone i dva cirkulacijska refluksa. Gornji cirkulacijski refluks nalazi se u visini frakcije petroleja, a donji cirkulacijski refluks u visini frakcije teškog plinskog ulja. Prednost cirkulacijskih refluksa su bolje iskorištenje topline, budući da se cirkulacijski refluks, s velikim sadržajem topline (entalpija), koristi za zagrijavanje nafte prije ulaska u peć. Druga prednost cirkulacijskih refluksa je smanjenje volumena para na vrhu kolone, jer se

smanjuje prijelaz tekuće faze u plinovitu fazu, pa je potrebna manja površina kondenzatora za hlađenje vršnog produkta.



Slika 2.1. *Postrojenje atmosferske destilacije*

Postrojenje atmosferske destilacije, prikazano na slici 2.1., može se podijeliti na sljedeće sekcije:

- Sekcija pripreme nafte za preradu
- Sekcija predgrijavanja nafte
- Sekcija frakcionacije
- Sekcija stabilizacije
- Sekcija razdvajanja benzina (spliter)

Sekcija pripreme nafte za preradu

Prilikom dolaska u rafineriju, nafta se odvodi u prihvatne spremnike. U tim spremnicima nafta treba odstajati nekoliko dana da se voda koja je teža od nafte i sedimenti istalože na dnu spremnika, te se ispuštaju u sistem kanalizacije. Na taj način uklanja se velik dio vode i sedimenata iz nafte.

Voda i sedimenti sadržani u nafti u obliku emulzija ne mogu se razbiti stajanjem nafte u spremniku, pa se koriste drugi postupci. Najčešće se koristi dodavanje deemulgatora i razbijanje emulzija pomoću električne struje u električnim odsoljivačima.

Sekcija predgrijavanja nafte

Ova sekcija sasoji se od serije izmjenjivača topline, sa ili bez flash kolone i peći. Zadaća ove sekcije je zagrijavanje nafte na temperaturu potrebnu za destilaciju nafte. Izmjenjivači topline su protustrujni, tako da kroz cijevi izmjenjivača protječe nafta koju treba zagrijati, a kroz plašt teče medij kojeg treba ohladiti.

Sekcija frakcionacije

Ova sekcija sastoji se od atmosferske kolone, kolona za stripiranje frakcija, sustava cirkulacijskih refluksa i sabirnika vršnog proizvoda (destilata). U atmosferskoj koloni odvija se rektifikacijska destilacija nafte.

Nafta zagrijana u peći na temperature 345° - 375°C uvodi se pri dnu atmosferske kolone u zonu isparavanja („flash zona“). Zagrijana nafta je smjesa parne i kapljevite faze koja zbog razlike tlaka u peći (12 bar) i atmosferske kolone (1,5 bar) naglo isparava u zoni isparavanja. Pare odlaze prema vrhu kolone preko niza tavana na kojima dolazi do kondenzacije teže hlapljivih komponenata, koje se zatim vraćaju prema dnu kolone, pri ćemu se na svakom pojedinom tavanu uspostavlja dinamička ravnoteža između parne i tekuće faze.

Da bi se poboljšala oštrina frakcionacije i regulirala temperatura vrha kolone, na vrh kolone dodaje se suhi vrući refluks radi smanjenja korozijskog djelovanja procesnih tokova u vrhu atmosferske kolone i sustavu za kondenzaciju.

U visini dobivanja frakcije petroleja nalazi se gornji cirkulacijski refluks, a u visini frakcije lakog plinskog ulja donji cirkulacijski refluks. Pomoću vršnog refluksa, dvaju cirkulacijskih refluksa te pomoću količina dobivenih frakcija regulira se toplinska bilanca atmosferske kolone.

Na dnu kolone, u stripirajući dio kolone (ispod zone isparavanja) dodaje se pregrijana vodena para da bi se iz atmosferskog ostatka uklonile niskovrijuće frakcije.

Iz atmosferske destilacije dobivaju se sljedeće frakcije:

- Vršna frakcija (plinovi, benzin) s krajem destilacije 190°C
- Petrolej, 190° – 230°C
- Lako plinsko ulje, 230° - 350°C
- Teško plinsko ulje, 350° - 370°C
- Atmosferski ostatak (proizvod dna kolone), >370°C

Krajevi destilacije ovih frakcija mogu se mijenjati ovisno o vrsti nafte i tražene kvalitete proizvoda.

Sekcija stabilizacije

Ova sekcija služi za odvajanje ukapljenog naftnog plina (smjesa propana i butana) iz vršne frakcije atmosferske destilacije. Sekcija se sastoji od kolone, ispunjene tavanima s ventilima, zračnih hladnjaka, sakupljača, isparivača za zagrijavanje dna kolone pomoću atmosferskog ostatka te izmjenjivača topline. Ukapljeni naftni plin (C_3, C_4) dobiva se na vrhu stabilizatorske kolone, a proizvod dna (C_5 – 185°C) odlazi u sekciju razdvajanja benzina (splitter).

Sekcija razdvajanja benzina (spliter)

Ova sekcija služi za odvajanje laganog benzina (C_5 – 85°C) iz frakcije (C_5 – 185°C). Sastoji se od izmjenjivača topline, kolone ispunjene tavanima s ventilima, zračnih hladnjaka, sakupljača i isparivača za zagrijavanje dna kolone pomoću atmosferskog ostatka. Na vrhu splitera dobiva se lagani benzin C_5 – 85°C, a na dnu benzin C_5 – 190°C. Obje frakcije odvode se u spremnike ili izravno na daljnju doradu.

Kakvoću svih proizvoda dobivenih na postrojenju atmosferske destilacije treba podešavati tako da nakon daljnje prerade ili dorade zadovolje traženu kakvoću. [2]

2.1.2. Bilanca tvari destilacijske kolone

Za projektiranje regulacije destilacijske kolone najčešće se koristi pojednostavljen model na temelju bilance tvari. Osnovna korelacija eksterne bilance za kolonu s jednim pojenjem i dva produkta je:

$$F = D + B \tag{1}$$

gdje je *F* protok pojenja*, D* protok destilata*,* a *B* protok produkta dna.

Ako bilancu proširimo s udjelom hlapljivije komponente (lake ključne komponente) dobivamo sljedeći izraz:

$$F \cdot z = D \cdot y + B \cdot x \tag{2}$$

gdje je *z* množinski udio hlapljivije komponente u pojenju, *y* u destilatu, a *x* u produktu dna.

Sa stanovišta regulacije *F* i *z* su nezavisne varijable, *x* i *y* su regulirane varijable, a protoci *D* i *B* se mogu koristiti kao upravljačke varijable za regulaciju *x* ili *y.* U tom slučaju protok preostalog produkta je ovisan o *F*:

$$B = F - D$$

$$D = F - B$$

Ako se koristi regulacija unaprednom vezom potrebno je izračunati vrijednost upravljačke varijable koja će održati bilancu tvari procesa. Kada se radi o separaciji binarne smjese izrazi su:

$$D = F \cdot \left(\frac{z - x}{y - x} \right)$$

$$B = F \cdot \left(\frac{y - z}{y - x} \right)$$

Faktor separacije također se primjenjuje kod regulacije sastava produkata. Za binarnu smjesu definiran je kao omjer množinskog udjela lakše hlapljive komponente i teže hlapljive komponente u destilatu podijeljen s istim omjerom u produktu dna:

$$S = \frac{\left(\frac{y}{1 - y} \right)_D}{\left(\frac{x}{1 - x} \right)_B} \tag{3}$$

Maksimum faktora separacije postiže se kod totalnog refluksa i iznosi:

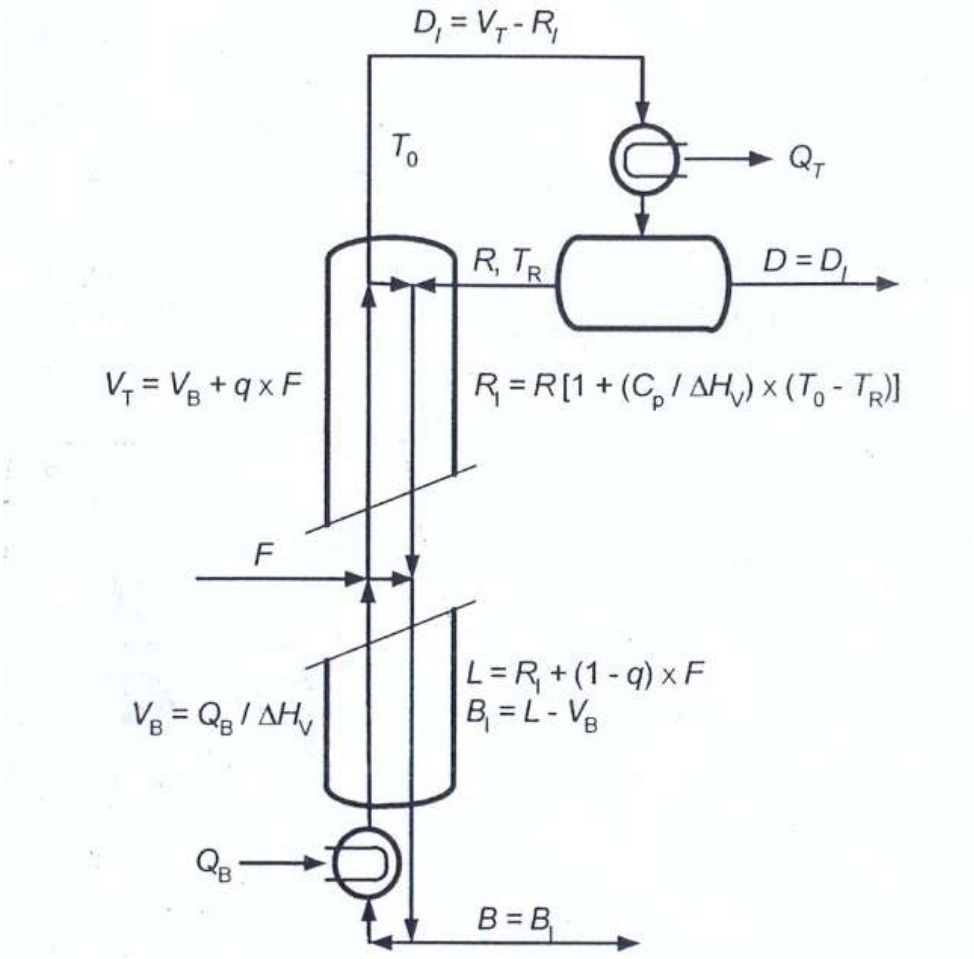
$$S_{\max} = \left(\overline{\alpha}\right)^N$$

gdje je $\overline{\alpha}$ prosječna relativna hlapivost, a *N* broj idealnih plitica.

Ako je separacija konstantna, tada je regulacija *y* istodobno i regulacija *x* i obratno. Sastav nereguliranog produkta se dakle računa iz:

$$y = \frac{S \cdot x}{1 + x \cdot (S-1)}$$
$$x = \frac{y}{S - y \cdot (S-1)} \qquad (4)$$

Točniji način računanja bilance tvari je preko internih refluksa. Na slici 2.2. dan je model bilance tvari preko internih refluksa pri stacionarnom stanju destilacijske kolone s jednim pojenjem i dva produkta.



Slika 2.2. *Bilanca tvari stacionarnog stanja internih tokova destilacijske kolone*

Model obuhvaća sljedeće bilančne jednadžbe:

- *količina isparavanja*, V_B jednaka je toplini dovedenoj u isparivač podijeljenoj s toplinom isparavanja:

$$V_B = \frac{Q_B}{\Delta H_V} \tag{5}$$

gdje je Q_B toplina dovedena u isparivač, ΔH_V toplina isparavanja smjese u isparivaču. Uz pretpostavku ekvimolarnih protoka u koloni, količina isparavanja jednaka je protoku para u sekciji ispod pojenja.

- *Protok para iznad pojne plitice*, V_T jednak je sumi količine isparavanja i para koje u kolonu ulaze kao dio pojenja:

$$V_T = V_B + F \cdot q \tag{6}$$

gdje je *q* toplinsko stanje pojenja izraženo kao množinski udio pare u pojenju

- *Protok internog refluksa*, R_I jednak je sumi vanjskog refluksa i para koje se ukapljuju, kako bi se vanjski refluks zagrijao na temperaturu vrelišta:

$$R_I = R \cdot \left[1 + \left(\frac{C_{p,R}}{\Delta H_V} \right) \cdot (T_0 - T_R) \right] \tag{7}$$

Protok internog refluksa jednak je protoku kapljevine u sekciji kolone iznad pojenja.

- *Protok kapljevine ispod pojne plitice*, *L* je suma protoka internog refluksa i protoka kapljevine u pojenju:

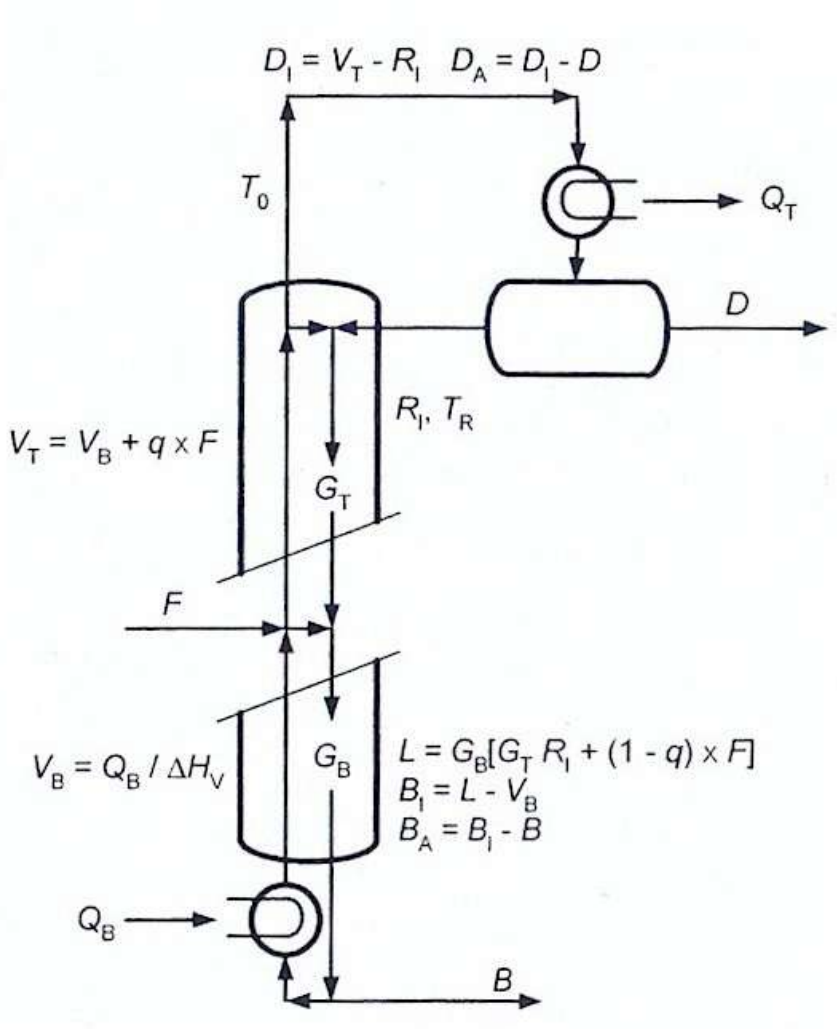
$$L = R_I + (1 - q) \cdot F \tag{8}$$

- *Protok destilata*, *D* je razlika protoka para iznad pojne plitice i protoka internog refluksa:

$$D = V_T - R_I \tag{9}$$

- *Protok produkta dna*, *B* jednak je razlici protoka kapljevine ispod pojne plitice i količine isparavanja:

$$B = L - V_B \tag{10}$$



Slika 2.3. *Dinamički model bilance tvari internih protoka u destilacijskoj koloni*

Dinamički model bilance tvari, prikazan na slici 2.3., u obzir uzima sljedeće pretpostavke:

Učinak promjene protoka refluksa na isparivaču je vidljiv tek nakon nekoliko minuta zbog toga što kapljevina mora proći put kroz cijelu kolonu. Vrijeme kašnjenja ovisi o dimenzijama kolone, broju plitica i drugim parametrima. Zbog toga se u dinamički model uvrštavaju *vremensko kašnjenje u gornjem dijelu kolone iznad pojne plitice*, G_T i *vremensko kašnjenje u donjem dijelu kolone ispod pojne plitice*, G_B.

Promjene u količini isparavanja vidljive su u kondenzatoru nakon nekoliko sekundi, pa nije potrebno u model uvoditi dinamičke članove koji bi to kašnjenje uzeli u obzir.

Sadržaj kapljevine u prihvatnoj posudi destilata (ili u kondenzatoru ako nema prihvatne posude) uz konstantni protok destilata i refluksa mijenjat će se. Akumulacija u prihvatnoj posudi je:

$$D_A = D_I - D \tag{11}$$

gdje je D_A akumulacija, a D_I i D su interni i vanjski protok destilata.

Akumulacija se očituje kao promjena razine u sabirniku (ili kondenzatoru). Prema tome vanjski protok destilata u prijelaznom vremenu nije jednak internom protoku destilata, $D \neq D_I$:

$$D_I = V_T - R_I \tag{12}$$

Količina kapljevine u dnu kolone također je promjenjiva, pa su interni protok produkta dna i akumulacija u dnu kolone:

$$B_I = L - V_B \; ; \qquad B_A = B_I - B \tag{13, 14}$$

Ako kolona radi u stacionarnom stanju, sastavi proizvoda vrha i dna destilacijske kolone određeni su protocima proizvoda vrha i dna. Promjenom protoka vrha ili dna mijenja se i sastav. Važno je da sastav produkata destilacijskih kolona ovisi o internim protocima, a ne o vanjskim. Ako kolona radi uz konstantnu razinu u prihvatnoj posudi vršnog proizvoda i konstantnu razinu dna kolone, tada su interni protoci destilata i produkta dna jednaki vanjskim protocima. U slučaju kada se tijekom rada razina u prihvatnoj posudi vršnog proizvoda i/ili razina dna kolone mijenja tada interni protoci proizvoda nisu jednaki vanjskim protocima i postaju bitne varijable za regulaciju. Iz prikaza dinamičkog modela na slici 2.3., vidi se da promjena internog protoka para, V_T, utječe na interni protok D_I i akumulaciju D_A gotovo trenuačno. Zbog dinamičkih svojstava kolone postoji značajno kašnjenje odziva internog protoka produkta dna na promjenu protoka internog refluksa kapljevine. Radi ovoga je primjena protoka para pri regulaciji internih protoka produkata ima prednost. Ovo svojstvo do više dolazi do izražaja s povećanjem visine kolone, te s povećanjem omjera refluksa i pojenja.

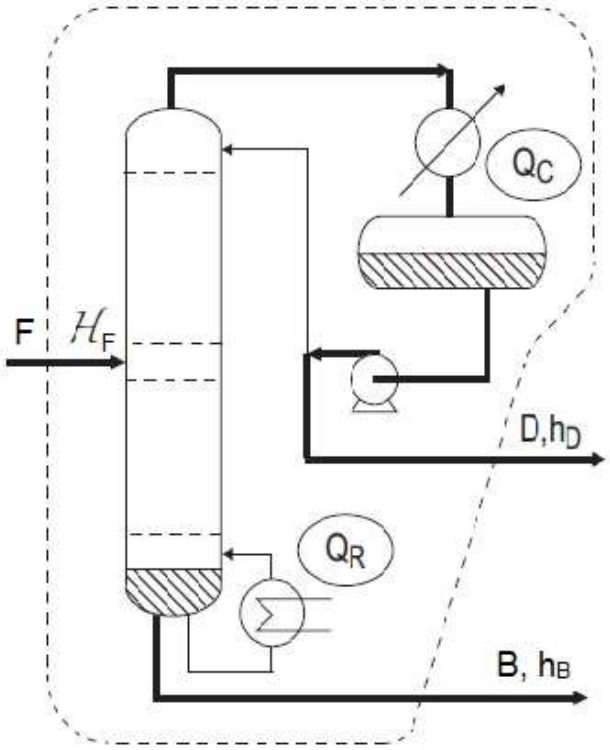
Jednadžba koja povezuje faktor separacije s količinom isparavanja je:

$$\frac{V_B}{F} = a \cdot \ln(S) \tag{15}$$

gdje je *a* karakteristični faktor kolone koji obuhvaća broj plitica, njihovu djelotvornost i relativnu hlapljivost ključnih komponenata. Određuje se za pojedinačnu kolonu pri poznatom faktoru separacije, protoku pojenja i količine isparavanja.[1]

2.1.3. Bilanca topline destilacijske kolone

Bilanca topline destilacijske kolone sastoji se od ulaza i izlaza topline iz kolone. Na slici 2.4. prikazana je shema kolone sa svim ulazima i izlazima topline.



Slika 2.4. *Bilanca energije destilacijske kolone*

Na slici simboli imaju sljedeća značenja:

F, D, B	molarni ili maseni protoci
H_F, h_D, h_B	molarne ili masene entalpije pojenja, kapljevitog destilata ili produkta dna
Q_C	toplinska dužnost kondenzatora
Q_R	toplinska dužnost isparivača

Zanemarujući gubitke bilanca topline destilacijske kolone ima sljedeći oblik:

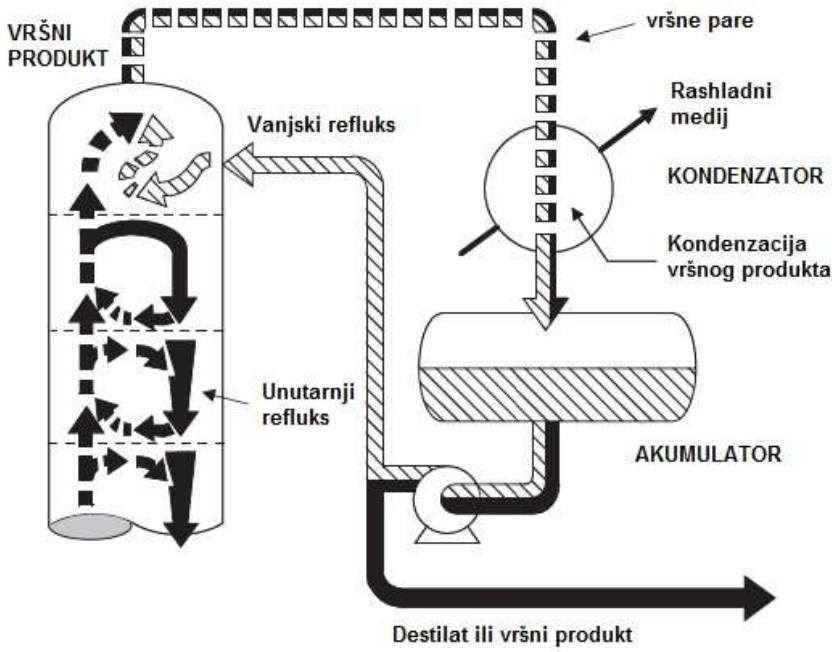
$$F \cdot H_F + Q_R = D \cdot h_D + B \cdot h_B + Q_C \qquad (16)$$

Ulaz topline Izlaz topline

Toplina se u sustav unosi u pojenju i putem ogrjevnog medija u isparivaču. Iz sustava toplina izlazi u destilatu, produktu dna, ili putem rashladnog medija u kondenzatoru.

Uloga kondenzatora je ukapljivanje destilata, odnosno vršnog produkta. Kondenzacija može biti potpuna ili djelomična. Potpuna kondenzacija podrazumijeva ukapljivanje svog destilata, dok kod djelomične kondenzacije dio destilata je ukapljen, a dio ostaje u parnoj fazi. Nakon kondenzatora ukapljeni destilat ili smjesa parne i kapljevite faze destilata odlazi u sabirnik kapljevine. Iz sabirnika kapljevine dio destilata odvodi se kao produkt, a dio se vraća na vrh kolone. Ukapljeni dio destilata koji se vraća u kolonu naziva se refluks.

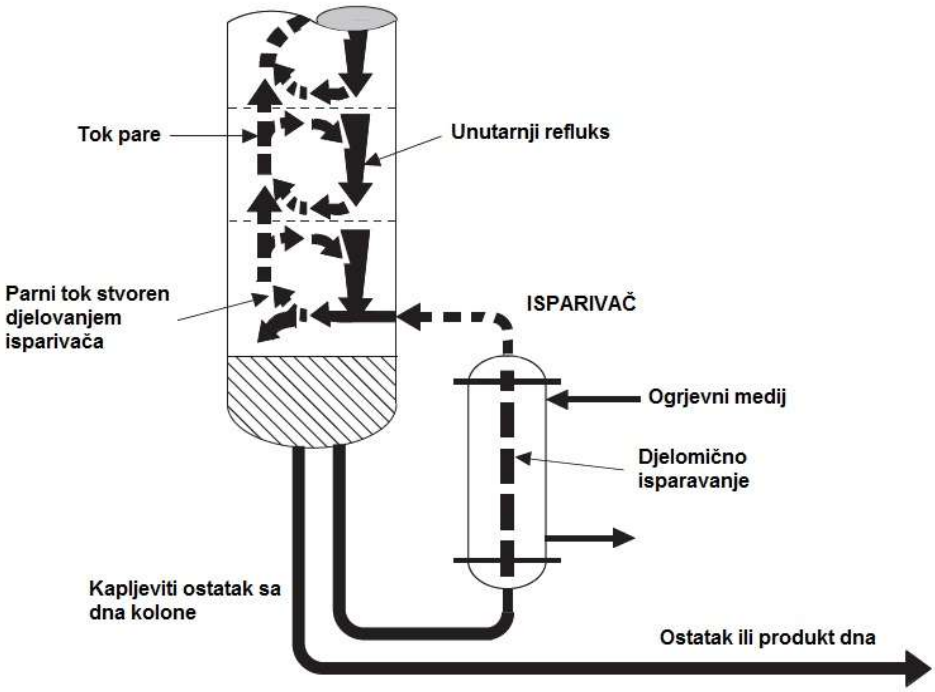
Refluks koji se vraća u kolonu na najvišu pliticu je u kapljevitom stanju. Zbog uvjeta koji vladaju na najvišoj plitici, refluks preuzima količinu topline potrebnu za njegovo isparavanje iz sustava. Ispareni refluks s destilatom napušta kolonu, hladi se u kondenzatoru te na taj način iznosi dio topline iz kolone. Zbog preuzete topline dio para na najvišoj plitici će se ukapljiti i slijevati na niže tavane. Ta kapljevina naziva se unutarnji refluks. Isparavanje i ukapljivanje nastavljaju se na svakom slijedećem tavanu prema dnu kolone.



Slika 2.5. *Uloga refluksa*

Uloga isparivača je isparavanje dijela produkta dna koji se vraća u kolonu, odnosno dovođenje određene količine topline u kolonu. Ispareni produkt dna ulazi u kolonu na najnižu pliticu. Na najnižu pliticu sa viših plitica dotječe kapljeviti unutrarnji refluks. Dolazi do prijenosa topline s isparenog produkta dna na kapljeviti unutarnji refluks. Posljedica toga je ukapljivanje uvedene parne faze i isparavanje dijela

kapljevitog refluksa. Stvorena parna faza struji prema višim pliticama pa se proces ukapljivanja i isparavanja ponavlja.



Slika 2.6. *Uloga isparivača*

Destilacijske kolone mogu biti opremljene različitim vrstama isparivača. Neke od vrsta su termosifonski isparivač, Kettle isparivač, isparivač s jednim prolazom, industrijska peć.

2.2. Regulacija i vođenje destilacijske kolone

Svrha vođenja destilacijske kolone je:

- rad destilacijske kolone na način kako je predviđeno projektom
- kompenzacija poremećaja i održavanje procesnih varijabli na njihovoj projektnoj vrijednosti unatoč poremećajima
- optimizacija rada kolone uz minimalne troškove i maksimalni iscrpak.

Sustav za vođenje, uz održavanje procesnih parametara, pridonosi proizvodnosti i ekonomičnosti procesa. Postignuta ekonomičnost može se promatrati sa stanovišta same regulacije i optimizacije. Regulacija podrazumijeva održavanje procesnih varijabli što je moguće bliže zadanim vrijednostima, dok je cilj optimizacije nalaženje i održavanje vrijednosti procesnih varijabli kod kojih će proces ostvarivati maksimalnu dobit. Dobra regulacija prethodi postupku optimizacije jer nije moguće optimirati proces ako prije toga nije osigurana regulacija koja će održavati procesne varijable na željenim vrijednostima.

Svaki proizvod treba biti unutar zadane specifikacije da bi se mogao prodati na tržištu. Proizvod lošije kvalitete ne može se prodati ili se prodaje ispod tržišne cijene, dok proizvod s kvalitetom boljom od tražene može postići cijenu višu od prodajne, ali su troškovi proizvodnje veći pa je tako ostvarena dobit manja. Zadatak regulacije je održavanje varijacija kvalitete proizvoda u što užim granicama i sa što manjom razlikom vrijednosti od tražene specifikacije. [1]

Poboljšana regulacija i optimizacija donose uštede u potrošnji energije, s tim da je uz povećanje radnog omjera refluksa kolone moguće ostvariti i veće uštede. Uštede kod kolona u radu mogu se dobro procijeniti. Prvo se analizira rad kolone i sustava za vođenje, zatim slijedi ispitivanje prirode poremećaja i koliko dobro regulacija svladava poremećaje. Kada je postignut stabilan rad kolone, prelazi se na optimizaciju. Ako je proces što se zbiva u koloni dio postrojenja pri optimizaciji se ne promatra zasebno već se optimizira rad cijelog postrojenja.

2.2.1. Projektiranje sustava za vođenje

Projektiranje sustava za vođenje provodi se u sedam koraka (Beer):

- definiranje i davanje prioriteta ciljevima vođenja
- identifikacija ulaznih i izlaznih varijabli sustava
- identifikacija poremećajnih varijabli u sustavu
- izbor metode za vođenje kolone
- određivanje točaka regulacije osjetljivih na sastav
- usporedba alternativnih regulacijskih shema
- ocjena dinamičkog vladanja sustava na očekivane poremećaje

Osnovni cilj regulacije najčešće je održavanje sastava proizvoda unutar specificiranih vrijednosti, ali za projektiranje regulacije potrebno je znati i sastav najvažnijeg produkta koji se mora zadržati unatoč poremećaju, prihvatljive varijacije u sustavu za svaki od produkata, relativne vrijednosti produkata i energije koja se koristi za separaciju. Za razvoj strategije optimizacije procesa potrebni su podaci o cijeni produkata i energije.

Identifikacija ulaznih i izlaznih varijabli prvi je korak pri postavljanju regulacijske sheme. Varijable bilance tvari su protok pojenja, produkta vrha i dna, volumena dna i sabirnika refluksa te zadrška kapljevine na pliticama. Varijable bilance topline su entalpija pojenja, dovod topline u isparivač i odvod topline iz kondenzatora.

U osnovna mjerenja spadaju mjerenje razine dna kolone i sabirnika refluksa. Njihova važnost vezana je uz održavanje parametara bilance tvari. Zbog promjenjive zadrške kapljevine na pliticama i nemogućnosti izravnog mjerenja internog protoka kapljevine, promjene razina su indikacija promjene internih protoka i zadrške kapljevine na pliticama. Jedna od razina uvijek je u regulaciji jer bilanca tvari nije samoregulirajuća.

Tlak kolone je pri dimenzioniranju obično postavljen kao konstanta ovisna o fizičkim svojstvima komponenata i smjesa (pojenje, produkt vrh i dna). Regulacija tlaka obično je dio regulacije bilance topline zbog toga što se tlak najčešće regulira

preko dovoda topline u grijač ili odvoda topline iz kondenzatora. Za kolonu u radu uvijek postoji optimalni tlak koji se najčešće razlikuje od projektnog tlaka.

Temperatura i bilanca topline su samoregulirajući veličine zato jer je gustoća toplinskog toka funkcija razlike temperature. Uz veću razliku temperatura u isparivaču ili kondenzatoru potrebna je manja površina izmjene topline. S obzirom da je površina izmjene topline u isparivaču ili kondenzatoru konstantna, mjerenje temperatura u koloni može se iskoristiti za regulaciju dovoda topline odnosno održavanje željene temperature u koloni.

Refluks je glavni povratni tok u procesu. Njime se regulira interni protok kapljevine u koloni. Dovod topline u isparivač koristi se za regulaciju internog protoka pare. Obično se te dvije regulacije u regulacijskoj shemi povezuju u održavanje konstantnog omjera *V/L.*[1]

2.2.2. Relativne statičke karakteristike

U tablici 2.1. prikazana je matrica mjerenih veličina i bilančnih veličina te njihova međusobna povezanost. Znak „+“ označava da povećanjem jedne varijable raste i druga, znak „- “ označava da porastom jedne varijable druga opada, a znak „0“ znači da nema međudjelovanja među varijablama.

Tablica 2.1. *Matrica varijabli destilacijske kolone*

	Entalpija pojenja	Protok pojenja	Protok refluksa	Protok destilata	Protok produkta dna	Toplina u isparivač	Toplina iz kondenzatora
Razina (dno)	-	+	+	0	-	-	-
Razina (sabirnik destilata)	+	-	-	-	0	+	+
Temperatura	+	-	-	0	0	+	0
Tlak	+	-	-	0	0	+	-

Namjena sustava za vođenje destilacijske kolone je minimaliziranje utjecaja poremećaja na čistoću produkata. Poremećaji u procesu se javljaju putem slijedećih varijabli:

- protok pojenja,
- sastav pojenja,
- entalpija pojenja,
- temperatura rashladnog medija,
- tlak pare za grijanje ili temperatura vrućeg ulja,
- okolni uvjeti.

Prilikom odabira i sinteze sustava za vođenje treba riješiti problem interakcije regulacijskih krugova, odnosno odabrati načina vođenja s najmanje interakcija. Interakcija je uzrok oscilacija procesu. Povećanje refluksa s ciljem korekcije sastava destilata uz konstantnu količinu isparavanja imat će utjecaj i na sastav produkta i obrnuto. Povećanje količine isparavanja uz konstantan refluks pored utjecaja na sastav produkta dna imat će utjecaj i na sastav destilata. Kod kolona s istodobnom regulacijom sastava destilata i produkta dna, kolona s više bočnih produkata i toplinski integriranih kolona takve su interakcije neizbježne jer i količina isparavanja i refluks služe kao upravljačke varijable u regulacijskim krugovima. Pri sintezi regulacijskih krugova znatno pomaže kvantifikacija interakcija. Jedan od postupaka je kvantifikacija interakcija primjenom relativne statičke karakteristike.

Svaki otvoreni regulacijski krug (ručno vođen) može se karakterizirati putem statičke karakteristike otvorenog kruga. Relativna statička karakteristika (kr. RSK) predstavlja odziv odabrane vođene varijable c_i na promjenu odabrane upravljačke varijable, m_i. Ako u procesu djeluju regulacijski krugovi, statička karakteristika promatranog otvorenog kruga može biti pod utjecajem drugih regulacijskih krugova. Relativna statička karakteristika je omjer statičke karakteristike promatranog kruga kada su ostali regulacijski krugovi također otvoreni i statičke karakteristike otvorenog regulacijskog kruga dobivene kada ostali regulacijski krugovi rade automatski:

$$\lambda_{ij} = \frac{\left.\frac{\partial c_i}{\partial m_j}\right|_{m=k}}{\left.\frac{\partial c_i}{\partial m_j}\right|_{c=k}} \tag{17}$$

pri čemu su c_i vođena varijabla, m_i upravljačka varijabla, a λ_{ij} relativna statička karakteristika. U brojniku je promjena promatrane regulirane varijable kao posljedica promjene njoj pridružene upravljačke varijable kada nema promjena ostalih upravljačkih varijabli (m=k). Nazivnik predstavlja promjenu regulirane varijable kada su sve ostale regulirane varijable održavane na svojim postavnim vrijednostima pomoću upravljačkih varijabli (c=k). U tablici 2.2. prikazano je značenje različitih vrijednosti relativne statičke karakteristike.

Tablica 2.2. *Značenje relativne statičke karakteristike*

λ_{ij}	**Značenje**
<0	uvjetno stabilan krug – mora biti otvoren
0	regulacija ovisi o drugim krugovima
0 - 1	interakcija povećava statičku karakteristiku
1,0	nema interakcije s ostalim krugovima
>1	interakcija smanjuje djelotvornost regulacije
∞	regulacijski krugovi su potpuno ovisni

Relativna statička karakteristika može se odrediti eksperimentalno, ali obično se određuje računski.

Za destilaciju binarne smjese za koju vrijede sljedeće bilančne jednadžbe:

$$\frac{D}{F} = \frac{z_i - x_i}{y_i - x_i}$$

$$\frac{D}{V} = \frac{1}{\frac{L}{D} + 1}$$

$$\frac{B}{F} = 1 - \frac{D}{F}$$

$$S = \frac{y \cdot (1-y)}{x \cdot (1-x)}$$

relativna statička karakteristika računa se jednadžbom.

$$\lambda_{12} = \left(1,0 - \frac{\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_i}{\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_y} \right)^{-1} \tag{18}$$

Članovi $\partial y / \partial x\big|_i$ i $\partial y / \partial x\big|_j$ su nagibi radnih linija neovisnih varijabli (*S*, *D/F*, *L/F*, *V/F*, *L/B*, *V/B*) i za binarne smjese računaju se iz sljedećih jednadžbi:

$$a = \frac{N \cdot y \cdot (1-y)}{2 \cdot \left(1 + \frac{z \cdot L}{D}\right)(y-x)}$$

$$\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_S = \sigma = \frac{y \cdot (1-y)}{x \cdot (1-x)}$$

$$\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{D/F} = \delta = -\frac{y-z}{z-x}$$

$$\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{L/F} = \frac{\sigma - \delta \cdot a}{1-\varepsilon}$$

$$\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{V/F} = \frac{\sigma - \delta \cdot a \cdot \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)\right]}{1 - a \cdot \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)\right]}$$

$$\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{L/B} = \frac{\sigma - \delta \cdot a \cdot \left(\frac{F}{B}\right)}{1 - a \cdot \left(\frac{F}{B}\right)} \qquad (19, 20, 21, 22, 23, 24, 25)$$

$$\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{V/B} = \frac{\sigma - \delta \cdot a \cdot \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)\right] \cdot (\delta - 1)}{1 - a \cdot \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)\right] \cdot \left(\frac{\delta - 1}{\delta}\right)}$$

a je karakteristični faktor kolone koji sadrži osnovne parametre kolone, kao što su broj idealnih plitica, radni omjer pretoka i sastave pojenja, destilata i produkta dna. Odabir najbolje metode za regulaciju provodi se prema tablici 2.3.

Tablica 2.3. *Parovi relativnih statičkih karakteristika kod destilacije binarne smjese*

<table>
<tr><th>regulacija y s →
regulacija x s ↓</th><th>D</th><th>L</th><th>L/D</th><th>D/V</th><th>D/L</th></tr>
<tr><td>D</td><td rowspan="2">/</td><td rowspan="2">λ_{LB}</td><td rowspan="2">λ_{SB}</td><td colspan="2">/</td></tr>
<tr><td>B</td><td colspan="2">λ_{SB}</td></tr>
<tr><td>V</td><td>λ_{DV}</td><td>λ_{LV}</td><td colspan="3">λ_{SV}</td></tr>
<tr><td>L/B</td><td>$\lambda_{DL/B}$</td><td>$\lambda_{LL/B}$</td><td colspan="3">$\lambda_{SL/B}$</td></tr>
<tr><td>V/B</td><td>$\lambda_{DV/B}$</td><td>$\lambda_{LV/B}$</td><td colspan="3">$\lambda_{SV/B}$</td></tr>
<tr><td>V/D</td><td rowspan="2">λ_{SB}</td><td colspan="4" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>V/L</td></tr>
</table>

Lijevi stupac predstavlja listu mogućih nezavisnih varijabli za regulaciju sastava dna, *x*. Gornji red je lista mogućih varijabli za regulaciju sastava vrha, *y*. Iz liste varijabli za regulaciju sastava destilata izostavljeni su *B* i *V* i njihov omjer jer će uvijek brže djelovati na sastav dna nego na sastav destilata, pa time stvaraju neželjene dinamičke interakcije (vrijedi samo kod istodobne regulacije sastava destilata i dna!). Mjesta na kojima je znak „ / “ predstavljaju neprovedive ili nepoželjne kombinacije. Protok destilata *D* ne može se istodobno primjeniti za regulaciju *x* i *y,* niti se mogu protoci *D* i *B* istodobno primjeniti. Područja u gornjem desnom kutu isključuju primjenu omjera *D* i *B* jer su dinamički nepovoljni za regulaciju *y* ako se *x* regulira s *D*, iako regulacija *x* s *B* ili *V* pod tim uvjetima može biti zadovoljavajuća. Isto tako, polja u donjem desnom kutu su izostavljena jer se separacija ne može primjeniti istodobno za regulaciju *x* i *y.*

Za kolonu poznatih radnih parametara se izračunavaju vrijednosti relativne statičke karakteristike i popunjava tablica. Vrijednosti RSK koje su blizu jedinice odgovaraju krugovima u kojima ima najmanje interakcija.

Proračun RSK načinjen je za veliki broj destilacijskih kolona i iskustveno je poznato da za destilacijske kolone s malim omjerom refluksa (*L/D*<1,0) konvencionalna *V/L* shema obično pokazuje najmanje interakcija (sastav destilata regulira se protokom refluksa, a sastav produkta dna količinom isparavanja. Za srednje omjere refluksa (1<*L/D*<5) obično je najbolja *S-V/B* shema (sastav destilata regulira se omjerom refluksa, sastav produkta dna omjerom količine isparavanja i

protoka produkta dna). Za velike omjere refluksa (*L/D*>5) obično je najbolja *D/V* shema (sastav destilata regulira se protokom destilata, a sastav produkta dna dovodom topline u isparivač).

Određivanje relativnih statičkih karakteristika je korisno, ali je njeno ograničenje što se ne obuhvaća dinamičko vladanje sustava. U daljnjoj analizi potrebno je definirati i dinamičko vladanje sustava. [1]

2.2.3. Regulacija tlaka

Tlak je za destilaciju veoma bitna varijabla. Destilacija se temelji na ravnoteži pare i kapljevine, pa je tlak procesna varijabla koja određuje radnu temperaturu destilacije. Osim toga tlak je i varijabla optimizacije, jer je relativna hlapivost ovisna o tlaku, što nadalje utječe na broj idealnih destilacijskih plitica i omjer refluksa za željenu separaciju.

Regulacija tlaka ovisi o vrsti destilacije, radnom tlaku (vakuum, atmosferska, pod tlakom), faznom stanju destilata, mogućnosti promjene radnog tlaka, načinu rada kondenzatora i drugim karakteristikama procesa destilacije. Loša regulacija tlaka dovodi do pojave poremećaja u sustavu zbog toga što su para i kapljevina u ravnoteži na temperaturi rosišta, odnosno vrelišta. Ukoliko dođe do pada tlaka, kapljevina će djelomično ispariti, što dovodi do povećanog protoka para. Posljedica povećanog protoka para je veći udio teže faze na višim pliticama kolone, a u slučaju većeg pada tlak može doći do plavljenja kolone.

Za kolone koje rade pod vakuumom, upravljačka varijabla najčešće je odvod para i/ili plinova, a regulacijski ventil smješten je na odušnom vodu iz kondenzatora, ili sabirne posude destilata koji vodi prema uređaju za održavanje vakuuma. Ovakva regulacija tlaka odgovarajuća je kada u sustavu ima nekondenzirajućih plinova. Kada u sustavu nema nekondenzirajućih plinova ili ih ima malo, u odušni vod prema vakuumu prije regulacijskog ventila uvode se inerti.

Za kolone koje rade pri povišenom tlaku i destilat je u parnom stanju upravljana varijabla je obično protok destilata. Ako je destilat kapljevina, regulaciju tlaka moguće je provesti tako da se dio vršnih para zaobilaznim vodom uvodi u prihvatnu posudu refluksa i tako održava željeni tlak, ili se regulacijski ventil postavi na odvodu kondenzata iz kondenzatora. Ako dođe do pada tlaka, regulacijski ventil

prigušuje protok kondenzata, što dovodi do plavljenja dijela cijevi u kondenzator i smanjenja površine izmjene topline. Kondenzacija se smanjuje i tlak raste.

Kod kolona koje rade pri visokom tlaku i s lakim komponentama regulator tlaka održava bilancu tvari. Zbog male razlike u gustoći pare i kapljevine, oduzimanje topline neće dovoljno smanjiti obujam tvari u sustavu, pa upravljačka varijabla za regulaciju tlaka treba biti protok produkta.

Kada je upravljačka varijabla regulatora tlaka odvod topline u kondenzator, tlak se mjeri na vrhu kolone ili na vodu vršnih para. Kada je upravljačka varijabla dovod topline u kolonu tlak se mjeri ispod najniže plitice kolone, uz osiguranje da porast razine u dnu kolone ne dosegne mjerno mjesto tlaka. [1]

2.2.4. Regulacija temperature

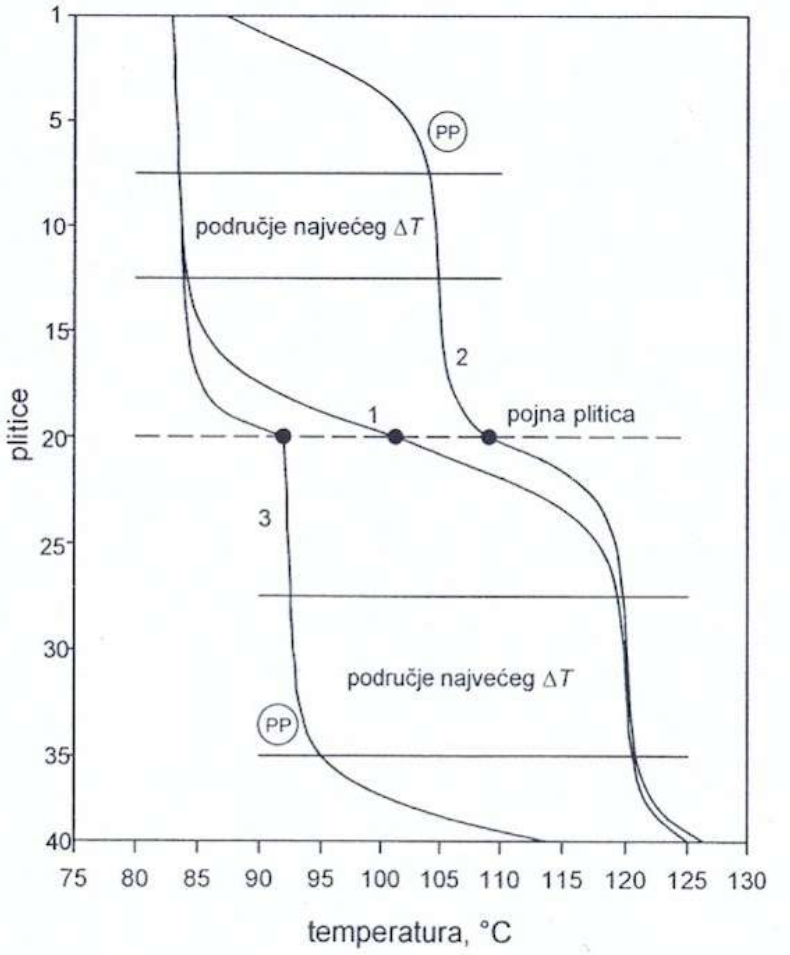
Regulacija temperature bitna je pri destilaciji jer je temperatura procesna varijabla koja je funkcija sastava produkata. To omogućava da se pomoću temperature procjeni sastav produkata bez izravnog mjerenja, odnosno upotrebe skupih analizatora. Promatrajući temperaturni profil kolone mogu se naći dovoljno osjetljiva područja promjene temperature, koja uz dobru regulaciju tlaka i unutrašnjih protoka (L/V) dovoljno dobro odražavaju sastav produkta vrha ili dna.

Uz dobro odabrano mjesto mjerenja temperature i odgovarajući omjer refluksa zatvorena je bilanca tvari i dobiven određeni sastav produkta dna. Sastav produkta vrha određen je bilancom i sastavom produkta dna. Destilat je preostali dio ukapljenih vršnih para koje se se ne vraćaju u kolonu kao refluks.

Položaj mjernog osjetila temperature određuje se simulacijom kolone u stacionarnom radu. Potrebno je pronaći mjesto na kojem je promjena temperaturnog profila kolone najosjetljivija na promjenu upravljanje varijable u regulacijskom krugu temperature. Uz to je poželjno da iznos promjene temperature bude jednak i kod povećanja i kod smanjenja upravljačke varijable. Postupak se može proširiti tako da se odredi osjetljivost temperaturnog profila i na promjene drugih upravljanih i poremećajnih varijabli. Kao mjerno mjesto bira se tavan kolone na kojem je promjena temperature osjetljiva na promjene svih odabranih varijabli.

Jedan od načina regulacije sastava pomoću temperature predložio je Boyd. Metoda se temelji na mjerenju razlika temperature u dva dijela temperaturnog profila

kolone, iznad i ispod pojne plitice. Na slici 2.7. prikazane su karakteristične krivulje temperaturnih profila kolone.



Slika 2.7. *Temperaturni profili u koloni*

Temperaturni profili prikazani na slici 2.7. dobivaju se pri konstantnom broju plitica kolone, omjeru refluksa, mjestu pojne plitice i sastavu pojenja. Temperaturni profil kojeg prikazuje krivulja 1 odgovara maksimalnoj separaciji i maksimalnoj čistoći oba produkta. Krivulja 2 prikazuje rad kolone kada je čistoća vrha manja jer produkt vrha sadrži više težih komponenti. Posljedica toga je viša temperatura vrha i znatno brža promjena temperature od vrha kolone prema dnu, te postizanje točke PP, u kojoj je sastav blizak sastavu pojenja, iznad pojne plitice. Kada se promatraju krivulje 1 i 2 od pojne plitice prema dnu temperature su približno iste uz malo veću razliku na dnu kolone koja je posljedica čišćeg produkta dna. Krivulja 3 prikazuje slučaj kada je produkt dna manje čistoće. Temperatura dna je niža nego na krivulji 1 te polazeći od dna znatno brže pada. Točka PP u ovom slučaju nalazi se ispod pojne plitice. Iznad pojne plitice temperatura brzo dostiže temperaturu vrha i postiže se ista čistoća

produkta vrha kao i za krivulju 1. U odnosu na standardnu temperaturnu krivulju 1, kod krivulja 2 i 3 iznad i ispod pojne plitice dolazi do velike razlike temperatura što ukazuje da su te promjene uzrokovane sastavom produkta vrha i dna.

Uvjet za dobru regulaciju sastava pomoću temperature je dobra regulacija tlaka. Ako je tlak promjenjiv ili se očekuju poremećaji potrebno je provesti kompenzaciju na tlak. [1]

2.2.5. Odabir načina vođenja destilacijskih kolona

Nema načina da se odmah definira koja regulacijska shema je najbolja za određeni destilacijski sustav, pa se primjenjuje evolucijski pristup. Svaka destilacija je specifična pa tako treba pristupiti i vođenju.

U nastavku je opisano nekoliko destilacijskih sustava koji se razlikuju od standardne destilacije s jednim pojenjem i dva produkta:

1. *Rafinerijske destilacije, produkti s velikim brojem komponenata.* Temperaturni profili su manje osjetljivi i bilanca tvari je znatno manje kritična za održavanje. Regulacijske sheme s regulacijom odvoda produkata iz kolone (ili regulacijom omjera protoka produkta prema protoku pojenja), i mogućnosti održavanja protoka refluksa bolje su od shema temeljenih na održavanju temperaturnog profila kolone. Za rafinerijske destilacije najvažnija je minimalizacija potrošnje energije.

2. *Komponente s bliskim vrelišem, teška separacija.* Pad tlaka u koloni utječe na temperaturni profil kolone, a promjene u sastavu produkata nisu uočljive. Mjerenje temperature tada nije dovoljno, pa se regulacija treba temeljiti na povezanim mjerenjima temperature i tlaka, ili na mjerenju sastava analizatorom. Ako se tlak mjeri zajedno s temperaturom uz pomoć mikroprocesora, može se načiniti korekcija temperature i dobiti signal iz regulatora koji je funkcija sastava. U takvim kolonama bolje je primjeniti mjerenje tlaka para nego temperaturu. Mjerilo sadrži kapljevinu sastava kakav bi trebao biti u toj točki kolone. Tada je razlika tlaka kolone i izmjerenog tlaka para kapljevine u mjerilu, mjera odstupanja od zahtijevanog sastava.

3. *Protok destilata ili produkta dna je neproporcionalno mali.* Mali protoci najčešće se ne primjenjuju kao upravljačke varijable, jer je njihov utjecaj na sustav

polagan i neadekvatan. Ako se postavlja regulacijska shema za kolonu u kojoj ima malih protoka, temeljna regulacija, npr. bilanca tvari, ne smije se temeljiti na upravljanju malim protokom.

4. *Samo je kvaliteta jednog produkta važna.* To je prilika da se postavi regulacijska shema prikladnija za održavanje konstantne kvalitete jednog produkta na račun kvalitete drugog. Teorijski, napuštanje jednog ograničenja daje mogućnost *on-line* optimizacije uz minimaliziranje proizvodnih troškova. To uključuje nalaženje ekonomski optimalnog sastava za nespecificirani tok.

5. *Vršni produkt je u parnom stanju.* Jako hlapive komponente koje se ne mogu kondenzirati na radnim uvjetima vrha kolone izdvajaju se kao produkt vrha, a kondenzira se samo refluks. U tom slučaju nije potrebna regulacija dokle god je na raspolaganju dovoljna količina rashladnog sredstva kojim se održava zadana temperatura.

Kada je potrebno da je vršni produkt para, vršni produkt se oduzima u parnom stanju radije nego da se troši dodatna energija i uvodi dodatna oprema za ponovno isparavanje. U tom slučaju kondenzator kondenzira samo refluks (parcijalni kondenzator). Takav sustav je veoma ovisan o regulaciji i postoji ovisnost između tlaka i količine vršnog produkta, što čini poteškoće jer treba regulirati protok rashladnog sredstva koji je sustav s polaganim odzivom i tlak koji ima brzi odziv.

Tlak se regulira odvodom vršnih para kao upravljanom varijablom, refluks u kolonu tako da se održi zadani omjer refluksa, a za razinu sabirnika pretoka upravljačka varijabla je protok rashladnog sredstva.

6. *Zahtjev za minimalnim protokom rashladnog sredstva.* U slučaju sustava s recirkulacijom rashladnog sredstva njegov protok nije bio ograničavajući, ali kod sustava s rashladnim sredstvom bez recirkulacije i visokom cijenom postoji mogućnost znatne uštede smanjenjem protoka rashladnog sredstva i održanjem maksimalno dozvoljenog porasta temperature rashladnog sredstva. Sa stanovišta regulacije to može biti problem. Odnos između protoka rashladnog sredstva i izmjenjene topline jako je nelinearan i zahtijeva veliko radno područje regulacijskog ventila i fiksnu maksimalnu temperaturu rashladnog sredstva. Regulaciju protoka rashladnog sredstva treba razmatrati samo ako je sigurno da postoje značajne uštede smanjenjem protoka rashladnog sredstva.

7. *Maksimaliziranje kapaciteta kolone.* Maksimalni kapacitet kolone usko je vezan uz opterećenje parom (interni protok para). Ako je kolona usko grlo procesa i

treba raditi na maksimalnom kapacitetu, blizu točke plavljenja, tada se protok para ne može koristiti za regulaciju temperature jer to zahtijeva rad ispod maksimalnog kapaciteta. U tom slučaju protok para može se regulirati na maksimum, a ostatak regulacijske sheme postavi se na temelju te regulacije. [1]

2.3. Empirijski modeli procesa

Matematički model procesa je niz jednadžbi, uključujući ulazne podatke potrebne za njihovo rješavanje, koje omogućuju predviđanje vladanja kemijskog procesnog sustava.

Modeliranje uključuje identificiranje i izbor bitnih svojstava realnog fizičkog sustava uz matematički opis tih svojstava, analizu i procjenu značajki sustava i modela, razmatranje točnosti i ograničenja modela te upotrebu samog modela i njegovu nadogradnju.

Empirijski matematički modeli identificiraju se na temelju podataka iz procesa. Prednosti empirijskih modela su što su jednostavniji za razvoj od teorijskih modela te su identificirani na temelju podataka iz realnog sustava. Nedostatak je što su mogući problemi kod ekstrapolacije jer je područje modela obično malo u usporedbi s cijelim radnim područjem. Karakteristični empirijski modeli industrijskih procesa mogu biti modeli procesa prvog reda, drugog reda ili integrirajući procesi. Veličine kojima se karakteriziraju industrijski procesi su vremenska konstanta (τ), statička osjetljivost (k) i mrtvo vrijeme (θ). [6]

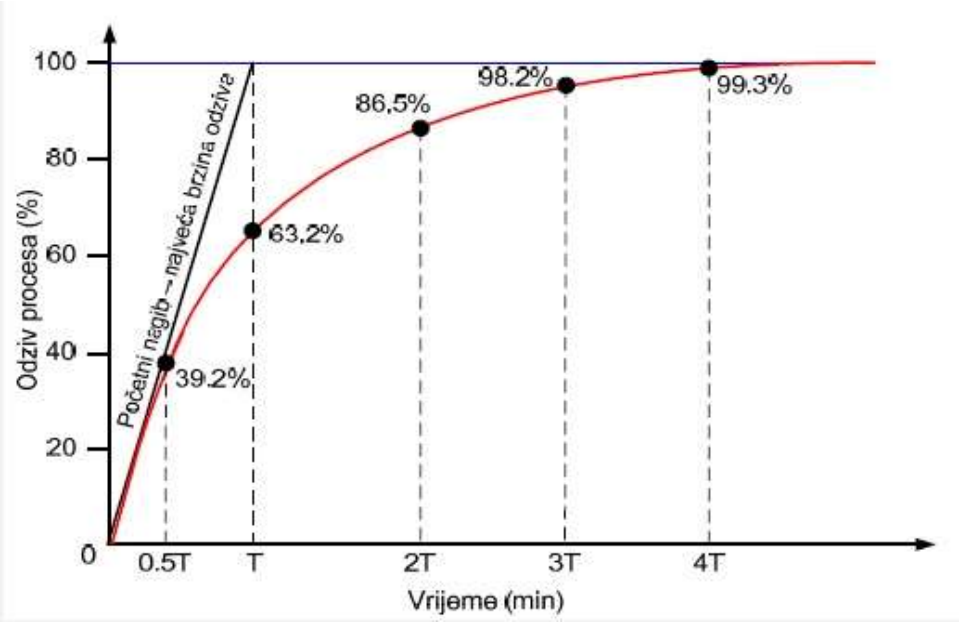
2.3.1. Procesi prvog reda

Odziv procesa prvog reda karakterizira akumulacija tvari ili energije. Dinamički odziv definira se vremenskom konstantom koja u matematičkom smislu predstavlja vrijeme potrebno da se postigne 63,2 % konačne promjene izlazne veličine. Brzina odziva na poremećaj neprestano opada, a maksimalna je u trenutku kada se poremećaj pojavio. Statička osjetljivost procesa je veličina koja govori o statičkoj karakteristici procesa. Opisuje ovisnost izlaznih veličina o ulaznima, neovisno o vremenu. Mrtvo vrijeme je vrijeme potrebno da nakon promjene ulazne veličine, dođe do pojave promjene odziva izlazne veličine. Veličine ovise o procesu te radnim uvjetima u procesu.[6]

Jednadžba procesa prvog reda:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = k \cdot u \tag{26}$$

gdje je y izlazna veličina, a *u* ulazna ili pobudna veličina.



Slika 2.8. *Odziv procesa prvog reda*

2.3.2. Procesi drugog reda

Većina industrijskih procesa ne može se opisati modelom procesa prvog reda. Tada se koriste modeli višeg reda kod kojih se najveća brzina odziva na promjenu ulazne veličine javlja tek nakon nekog vremena. Procesi višeg reda javljaju se kada su procesi prvog reda serijski vezani, kada je regulator u seriji s drugim komponentama regulacijskog kruga, kod djelovanja sile na tijela i fluide, kod procesa s distribuiranim parametrima.

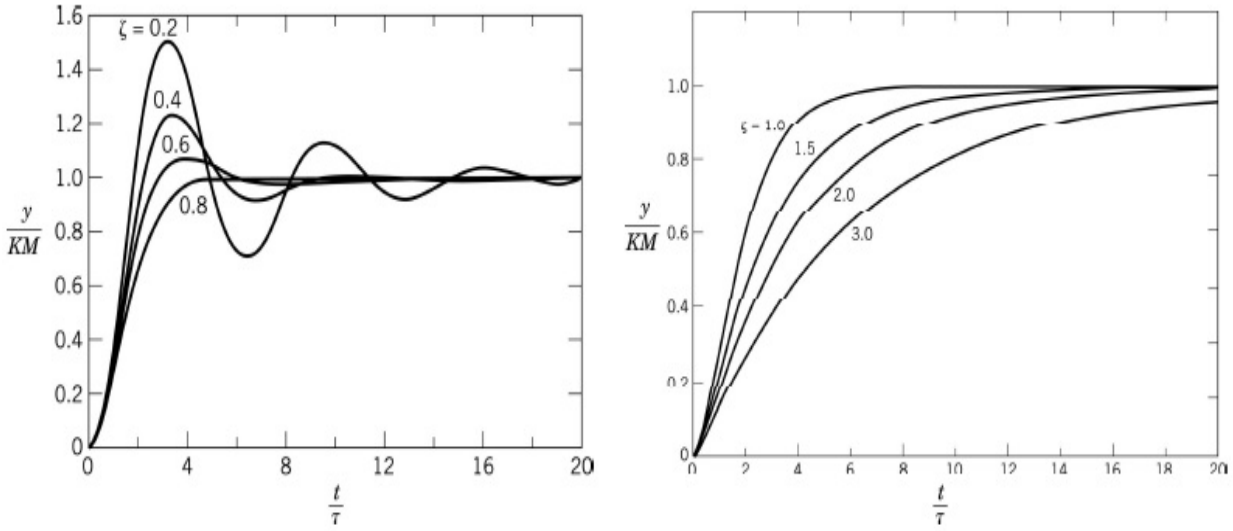
Karakteristične veličine koje opisuju proces drugog reda su vremenska konstanta, statička osjetljivost, koeficijent prigušenja i mrtvo vrijeme. Koeficijent prigušenja (ζ) definira oblik odzivne krivulje. Kada je koeficijent prigušenja veći od 1 odziv je prigušen, za $\zeta = 1$ odziv procesa je kritično prigušen, za $0 < \zeta < 1$ odziv je neprigušen s padajućom amplitudom. Za vrijednosti koeficijenta prigušenja manje od

0 proces je nestabilan, a za ζ = 0 sustav oscilira rezonantnom frekvencijom kako je prikazano na slici 2.9. [6]

Jednadžba procesa drugog reda:

$$\tau^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\varsigma\tau \frac{dy}{dt} + y = k \cdot u \tag{27}$$

gdje je y izlazna veličina, a *u* ulazna ili pobudna veličina.



Slika 2.9. *Prikaz neprigušenog i prigušenog odziva procesa drugog reda*

2.3.3. Integrirajući procesi

Integrirajući ili procesi nultog reda su procesi koji nemaju statičku osjetljivost u uobičajenom smislu. Procese nultog reda karakteriziraju mrtvo vrijeme i integracijska brzina. Integracijska brzina predstavlja nagib pravca odziva, a računa se prema slijedećoj formuli:

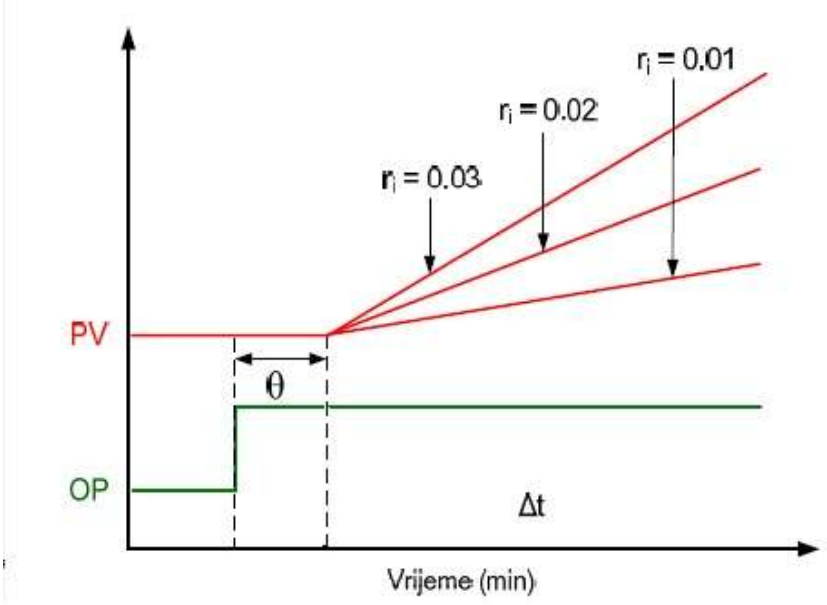
$$r_{\text{int}} = \frac{\frac{\Delta PV}{\Delta t}}{\Delta OP} \tag{28}$$

Jednadžba procesa nultog reda:

$$\frac{dy}{dt} = k \cdot u \tag{29}$$

gdje je *k*=konst.

Prilikom promjene ulazne veličine, *y*(*t*) nema ograničenja pa će nastaviti rasti ili padati dok ne dođe do nove promjene ulazne veličine.[6]



Slika 2.10. *Odziv procesa nultog reda*

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Opis procesa atmosferske destilacije

Sirova nafta u postrojenje se dovodi tlačnim cjevovodom pomoću crpke. Prvi proces obrade nafte provodi se u odsoljivaču. Nakon odsoljivača nafta se provodi kroz cijevni snop izmjenjivača topline gdje preuzima toplinu od gornjeg cirkulacijskog refluksa, atmosferskog ostatka te donjeg cirkulacijskog refluksa.

Predgrijana nafta zatim se uvodi u peć kroz osam paralelnih cjevovoda. U peći se zagrijava na konačnu temperaturu prije uvođenja u destilacijsku kolonu, a najlakše komponente isparavaju. Zagrijana nafta, djelomično u parnoj fazi uvodi se u atmosfersku kolonu T-6101, gdje dolazi do daljnjeg isparavanja. Na slici 3.1. prikazan je dio postrojenja atmosferske destilacije u Rafineriji nafte Sisak.

Pare ugljikovodika prolaskom prema vrhu kolone uspostavljaju na pliticama ravnotežu s kapljevinom, pa se kapljevina obogaćuje teže hlapivim, a pare lako hlapivim komponentama. U svrhu poboljšanja odvajanja lako hlapivih komponenata na dnu atmosferske kolone dodaje se pregrijana vodena para.

U koloni T-6101 temperatura se mjeri u vrhu kolone, na 32. plitici, na 30. plitici, na 16. plitici, na 14. plitici, na pojnoj plitici, u dnu kolone, i na usisu crpke atmosferskog ostatka. Neispareni ugljikovodici sakupljaju se u dnu kolone, odakle se kao proizvod dna, atmosferski ostatak, pomoću crpke odvode u izmjenjivače topline da bi se ohladili, dio se vraća u proces, a ostatak se odvodi u kolonu za vakuumsku destilaciju na daljnju preradu. Pare ugljikovodika iz vrha kolone odvode se i hlade, te većim dijelom kondenziraju u zračnom hladnjaku, a zatim uvode u posudu kao nestabilizirani benzin. Iz atmosferske kolone osim proizvoda vrha, nestabiliziranog benzina i dna, odvode se bočne frakcije u kapljevitom stanju: frakcija teškog benzina s 36. plitice, frakcija petroleja s 23. plitice, frakcija lakog plinskog ulja, s 19. plitice, i frakcija teškog plinskog ulja između dva sloja strukturiranih punila.

Bočne se frakcije uvode u kolone za stripiranje, T-6102, gdje se stripiraju pregrijanom vodenom parom da se uklone zaostale lako hlapive komponente i poboljša kvaliteta frakcija. U striperu teškog benzina i u striperu petroleja za

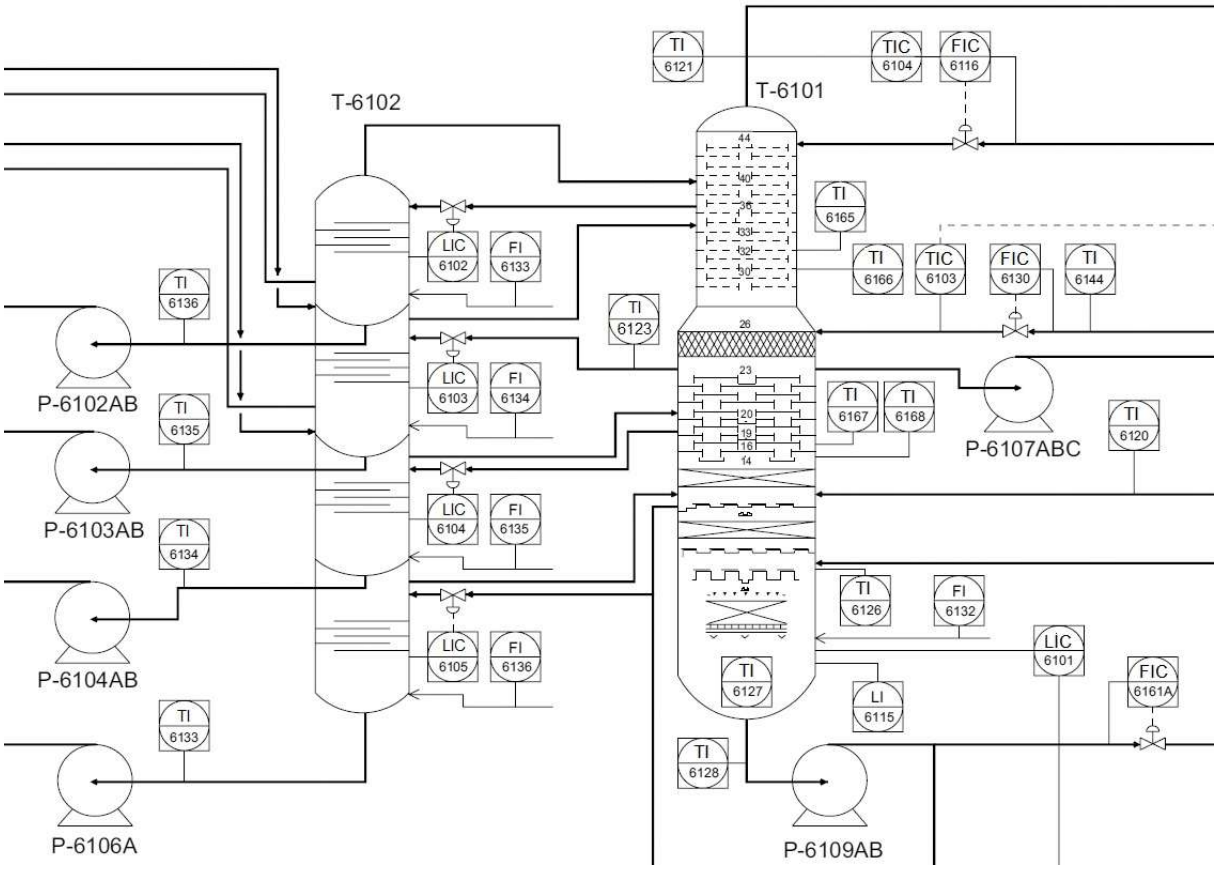
uklanjanje zaostalih lako hlapivih ugljikovodika služe i isparivači, grijani donjim cirkulacijskim refluksom. Razina u striperima održava se regulatorima razine, koji djeluju na regulacijske ventile na dovodu teškog benzina, petroleja, lakog plinskog ulja i teškog plinskog ulja iz atmosferske kolone u stripere. Mjeri se protok vodene pare u bočne stripere i temperature teškog benzina, petroleja, lakog plinskog ulja i teškog plinskog ulja iz atmosferske kolone u stripere.

Teški se benzin iz bočnog stripera pomoću crpke provodi kroz cijevni snop izmjenjivača topline, predgrijavajući nestabilizirani benzin prije uvođenja u stabilizator benzina T-6104, a zatim hladi kroz vodeni hladnjak i odvodi u spremnik.

Petrolej i lako plinsko ulje se iz bočnog stripera pomoću crpke provode kroz izmjenjivače topline, gdje predaju toplinu nafti, a zatim provode kroz vodeni hladnjak, te odvode u spremnik proizvoda.

Teško se plinsko ulje iz bočnog stripera pomoću crpke odvodi u postrojenje FCC na daljnju preradu ili u zračnom hladnjaku hladi, a zatim odvodi u spremnik proizvoda.

Regulacija protoka bočnih proizvoda: teškog benzina, petroleja i lakog plinskog ulja provodi se s regulatorima protoka FIC-6122, FIC-6101 i FIC-6102, a teškog plinskog ulja u postrojenje FCC pomoću FIC-6105 i FIC-6107, a u vod sirovine pomoću FIC-6141. Temperature teškog benzina, petroleja, lakog plinskog ulja i teškog plinskog ulja na izlazu iz bočnih stripera mjere se s TI-6136, TI-6135, TI-6134, TI-6133. [7]

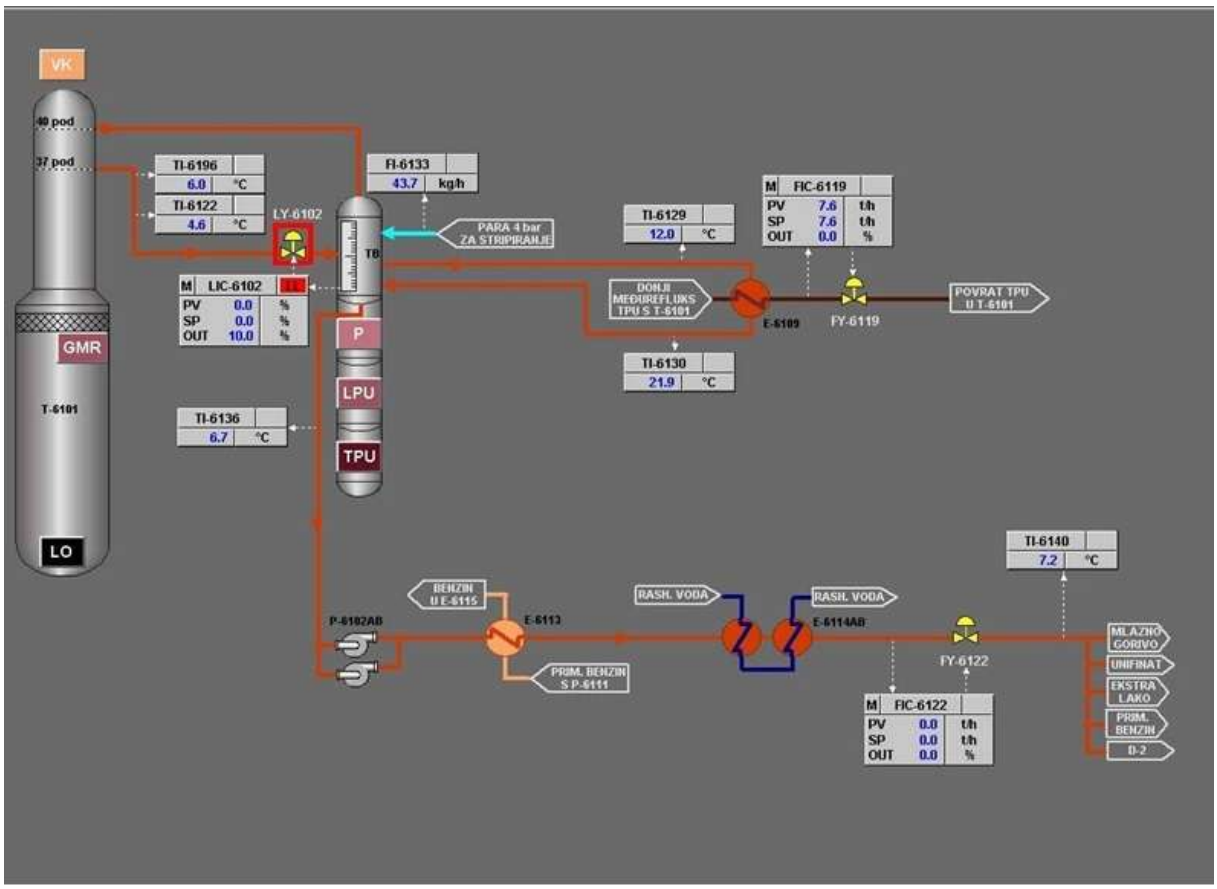


Slika 3.1. *Postrojenje atmosferske destilacije u Rafineriji nafte Sisak*

3.1.1. Opis procesa stripiranja teškog benzina

Iz kolone za atmosfersku destilaciju T-6101 s 37. tavana izvlači se bočna frakcija teškog benzina. Na vodu frakcije do stripera teškog benzina nalaze se dva mjerila temperature, TI-6196 i TI-6122. U koloni za stripiranje teški benzin se stripira predgrijanom parom koja je pod tlakom 4 bar. Lakše komponente iz frakcije teškog benzina s parom odlaze prema vrhu stripera, te se kao produkt vrha stripera vraćaju u kolonu za atmosfersku destilaciju T-6101 na 40. tavan. Razina dna stripera regulira se u regulacijskom krugu LIC-6102 pomoću regulacijskog ventila LY-6102. Dio produkta dna stripera odvodi se u izmjenjivač topline E-6109 gdje preuzima dio topline donjeg cirkulacijskog refluksa atmosferske kolone. Na vodu prema E-6109 nalazi se osjetilo temperature TI-6129, dok se na vodu iz izmjenjivača prema striperu nalazi osjetilo temperature TI-6130. Produkt dna stripera teškog benzina odvodi se na daljnje procese prerade. Protok se regulira u regulacijskog krugu FIC-6122

regulacijskim ventilom FY-6122. Temperatura odvedenog produkta dna snižava se u izmjenjivačima topline E-6113 i E-6114AB.

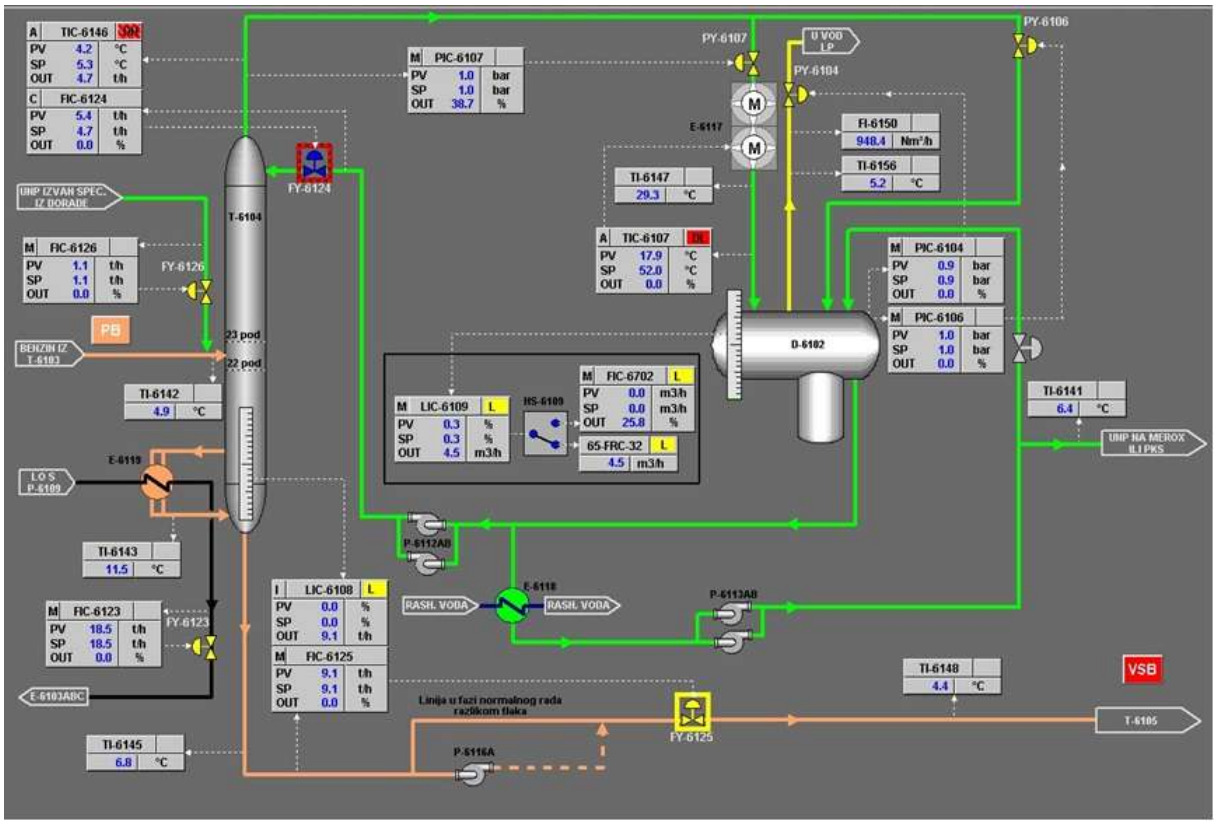


Slika 3.2. *Stripiranje teškog benzina*

3.1.2. Opis procesa u stabilizatoru primarnog benzina

U stabilizator primarnog benzina T-6104 uvodi se sirovina koja je mješavina benzina iz apsorbera T-6103 čiji se protok regulira ventilom FY-6121, i ukapljenog naftnog plina (UNP) koji je izvan propisane specifikacije, čiji protok se regulira ventilom FY-6126. Prije uvođenja u T-6104 mjeri se temperatura sirovine na TI-6142. Sirovina se u T-6104 uvodi između 22. i 23. tavana. U T-6104 dolazi do razdvajanja C_4 i lakših komponenti od teže frakcije benzina. Produkt vrha odlazi u debutanizer D-6102 na daljnju obradu. Regulacija temperature vrha stabilizatora vrši se u kaskadnom regulacijskom krugu TIC-6146, kojemu je sekundarni regulacijski krug FIC-6124. Preko regulacijskog ventila FY-6124 upravlja se protokom kapljevitog refluksa iz debutanizera . Regulacija tlaka u stabilizatoru vrši se u regulacijskom krugu PIC-6107 preko regulacijskog ventila PY-6107. Produkt dna stabilizatora T-

6104 koristi se za izmjenu topline u izmjenjivaču topline E-6119 sa lakim ostatkom atmosferske destilacije. Razina dna stabilizatora T-6104 regulira se u kaskadnom regulacijskom krugu LIC-6108. Sekundarni krug je FIC-6125 koji upravlja regulacijskim ventilom FY-6125.



Slika 3.3. *Stabilizacija primarnog benzina*

3.2. Dijagnostika procesa i regulacijskih krugova

Statistički pokazatelji vladanja regulacijskog kruga mogu ukazati na određene nedostatke regulacije i kvantificirati ih. Također, statistički parametri služe kao brojčani pokazatelji poboljšanja vladanja regulatora nakon ugađanja.

Programski paket Apromon[8] služi za analizu vladanja regulacijskog kruga. Na temelju podataka prikupljenih iz procesa računa niz kriterija vladanja regulacije. Neki od kriterija nabrojani su i objašnjeni u nastavku teksta.

Integral apsolutne pogreške (eng. *Integrated absolute error*, IAE)

$$IAE = \int_0^\infty |\varepsilon(t)| dt \tag{30}$$

Integral kvadrata pogreške (eng. *Integrated square error*, ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} \varepsilon(t)^2 \, dt \tag{31}$$

Devijacija pogreške (eng. *Error deviation*) je prosječna razlika između zadane radne točke (eng. *Setpoint, „SP"*) i izmjerene procesne varijable (eng. *Process value, „PV"*) tokom cijelog vremenskog perioda za koji se analiziraju podaci.

Varijanca pogreške (eng. *Mean squared error*) računa se prema slijedećem izrazu:

$$\sigma^2 = \frac{\sum \left(\bar{x} - \mu\right)}{N} \tag{32}$$

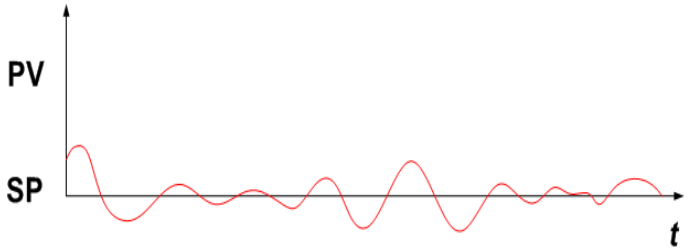
pri čemu je σ^2 varijanca, $\bar{x}$ je aritmetička sredina, μ je stvarna aritmetička sredina cjelokupne populacije, a N je broj uzoraka.

Standardna devijacija se (eng. *Standard deviation*) računa prema izrazu :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^2} \tag{33}$$

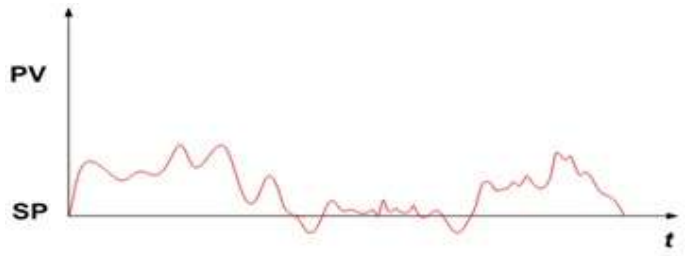
gdje je σ standardna devijacija, a N broj uzoraka.

Čvrstoća regulacije (eng. *Control tightness*) opisuje koliko često PV prelazi preko SP-a. Visoke vrijednosti ovog kriterija govore da je regulacija čvrsta i oštra, a niske vrijednosti da je regulacija troma. Uzrok trome regulacije je malo integracijsko djelovanje. No, prekomjerno derivacijsko djelovanje također može biti razlog visokih vrijednosti ovog kriterija. Kriterij čvrstoće regulacije je pokazatelj ugođenosti regulatora.



Slika 3.4. *Grafički prikaz kriterija čvrstoće regulacije*

Disbalans (eng. *Imbalance*) odnosi se na omjer vremena provedenog s obiju strana SP-a. Ovaj kriterij indicira lošu regulaciju, veliki vanjski poremećaj ili probleme s regulacijskim ventilima. Vrijednost 1 predstavlja idealnu vrijednost. Više vrijednosti, koje nisu poželjne, upućuju na to da PV provodi više vremena na jednoj od strana SP-a (više ili niže od SP-a), a također ukazuju i na slabo regulacijsko djelovanje uslijed velikih vanjskih poremećaja ili problema vezanih uz ventil.



Slika 3.5. *Grafički prikaz kriterija disbalansa*

Rastuća oscilacija (eng. *Hunting*) definira se kao pojava oscilacija signala PV-a s velikim amplitudama koje su približno konstantnih iznosa. *Hunting* se obično javlja prije pojave nestabilnog osciliranja signala PV-a. Poželjna vrijednost kriterija je 0, jer kriterij broji pojave *hunting* signala koje mogu biti posljedica preagresivno ugođenog regulatora.

Poklapanje (eng. *Match*) **–** kriterij koji svrstava regulacijske krugove u 14 skupina prema njihovim dominantnim frekvencijama signala. Regulacijski krugovi sa istim vrijednostima kriterija match imaju iste frekvencije signala. Visoke vrijednosti kriterija karakteristične su za regulacijske krugove koji imaju sporije dominantne frekvencije signala, dok su niže vrijednosti kriterija karakteristične za krugove s brzim dominantnim frekvencijama signala.

Zasićenje izlaznog signala (eng. *Saturation OP*) je kriterij koji u obliku postotka prikazuje koliko je vremena izlazni signal regulatora (eng. *Output, OP*) imao vrijednosti veće od 90% ili manje od 10%, te kada se nije koristila ručna regulacija. Poželjno je da vrijednosti budu što niže.

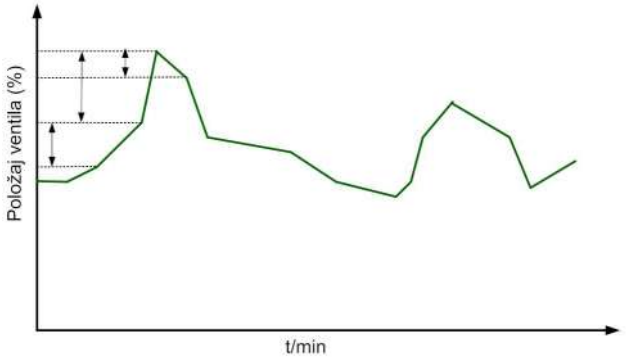
Pik OP-a (eng. *Spike OP*)– ovaj kriterij prikazuje najveću promjenu izlaznog signala regulatora (OP) primjećenu u cijelom setu podataka. Veće vrijednosti ovog kriterija ne znače nužno da je regulacija loša, već kao indikator velikih promjena izlaznog

signala koje mogu biti posljedica agresivnog proporcionalnog djelovanja ili šuma u signalu procesne varijable koji znatno utječe na derivacijsko djelovanje regulatora.

Zasićenje procesne varijable (eng. *Saturation* PV) prikazuje u obliku postotka vrijeme u kojem je procesna varijabla bila unutar 3% vrijednosti od minimuma ili maksimuma radnog područja instrumenta. Poželjne su što niže vrijednosti kriterija.

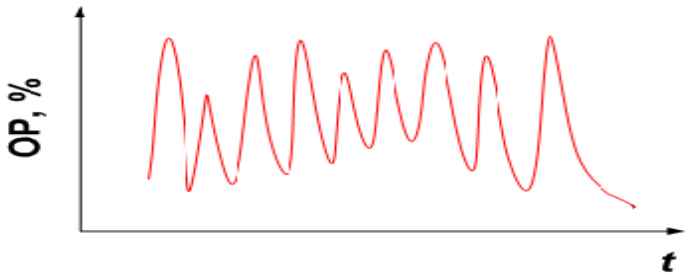
Pik PV-a (eng. *Spike PV*) prikazuje najveću promjenu procesne varijable (PV) primjećenu u cijelom setu podataka. Veće vrijednosti ovog kriterija ne znače nužno da je regulacija loša, već su indikator velikih promjena vrijednosti procesne varijable koje mogu uzrokovati pretjerano djelovanje regulatora koje je nepoželjno.

Kretanje ventila (eng. *Rope* length) prikazuje ukupno kretanje regulacijskog ventila tokom cijelog seta podataka. Visoke vrijednosti karakteriziraju prekomjerno kretanje ventila i mogu utjecati na oštećenje i skraćenje životnog vijeka ventila, međutim u nekim regulacijskim krugovima nije moguće izbjeći takvo djelovanje regulacije.



Slika 3.6. *Grafički prikaz kriterija kretanja ventila*

Kolebanje ventila (eng. *Vacillation*) opisuje koliki je broj puta regulacijski ventil promijenio smjer rada.



Slika 3.7. *Grafički prikaz kriterija kolebanja ventila*

Doprinos proporcionalnog djelovanja (eng. *Proportional contribution*) prikazuje u obliku postotka udio proporcionalnog djelovanja regulatora u ukupnom djelovanju regulatora.

Doprinos integralnog djelovanja (eng. Integr*al contribution*) prikazuje u obliku postotka udio integralnog djelovanja regulatora u ukupnom djelovanju regulatora.

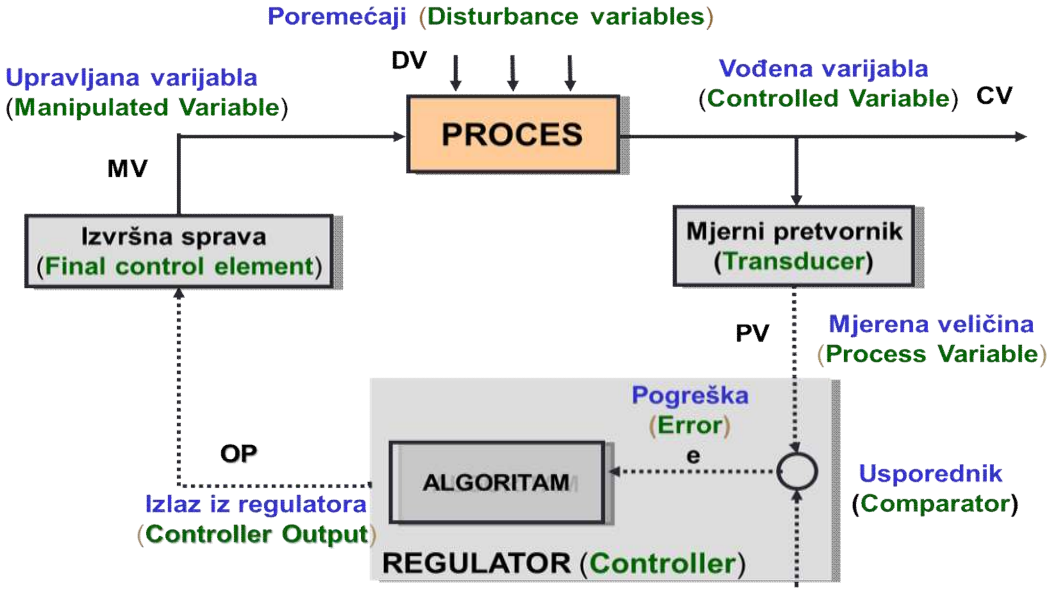
Ocjena kvalitete regulacijskog kruga (eng. *Grade*) predstavlja sveukupnu ocjenu rada regulacijskog kruga. Ona se proračunava na osnovi kombinacije navedenih kriterija. Za algoritam računanja ocjene može se reći da je „pametan“ odnosno da izbjegava preklapanje kriterija. [8]

3.3. Identificiranje empirijskih modela procesa

Regulacijski krug čine proces, mjerni pretvornik, usporednik, regulator te izvršna sprava. Karakteristične veličine procesa su vođena, upravljana i poremećajna veličina. Mjerni pretvornik pretvara mjerenu vođenu veličinu u mjerni signal, PV (eng. *Process Variable*). Usporedbom izmjerene veličine i radne točke, SP (eng. *Set Point*) formira se signal pogreške, na temelju kojega regulator određenim algoritmom proračunava potrebno djelovanje, izlaz iz regulatora, OP (eng. *Controller Output*). Signal izlaza iz regulatora dolazi u izvršni element koji podešava upravljanu veličinu na takav način da suzbije djelovanje poremećajnih veličina na vođenu veličinu..

Model procesa predstavlja matematički opis vladanja promatranog fizičkog i/ili kemijskog sustava. Poznavanje modela procesa omogućava simulaciju procesa bez mijenjanja uvjeta u stvarnom procesu, te se na temelju simulacije provodi proučavanje i poboljšanje rada procesa. Time se izbjegava unos poremećaja i

nestabilnosti tijekom rada postrojenja. Većina industrijskih procesa može se opisati modelima nultog, prvog ili drugog reda.



Slika 3.8. *Shema regulacijskog kruga s povratnom vezom*

Identificiranje dinamičkog modela procesa provedeno je u programskom paketu koji uz identificiranje modela procesa omogućava i ugađanje standardnih i kaskadnih regulacijskih krugova. Programski paket za identificiranje modela procesa i optimiranje parametara regulatora koristi geometrijsku, gradijentnu i gravitacijsku metodu optimiranja.

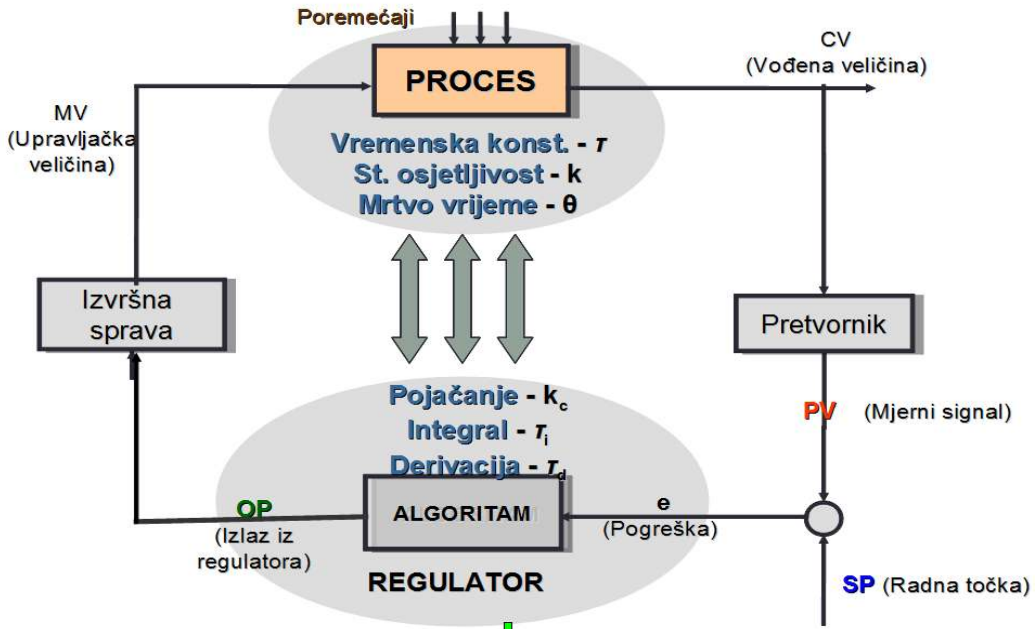
Za određivanje empirijskog modela i ugađanje parametara regulatora uzeti su podaci s postrojenja, prikupljani uz različita vremena uzorkovanja.

3.4. Ugađanje parametara regulatora

Analizom rada procesa i identifikacijom parametara određuje se empirijski modeli procesa. Na temelju identificiranih parametara modela procesa, optimiraju se parametri regulatora - pojačanje, k_c, integracijsko djelovanje, τ_i, derivacijsko djelovanje, τ_D, slika 3.9.

Optimirani parametri osnova su za ugađanje regulatora na postrojenju. Na postrojenju se provodi fino ugađanje parametara regulatora počevši s prethodno

određenim parametrima. Nakon promjene parametara regulatora prati se vladanje procesa te po potrebi ispituje na promjenu radne točke ili pri pojavi poremećaja.



Slika 3.9. *Međuovisnost parametara procesa i regulatora*

Softverski paket Pitops[9] za optimiranje parametara regulatora primjenjuje metodu reduciranih gradijenata za pronalaženje minimuma funkcije. Provodi se u iterativnim koracima proporcionalnim negativnoj vrijednosti gradijenta funkcije u trenutačnoj točki.

Ako je viševeličinska funkcija $F(x)$ definirana i derivabilna oko točke A, funkcija $F(x)$ najbrže se smanjuje za korake iz točke A u smjeru negativnog gradijenta F u točki A, $-\nabla F(a)$. Ako je vrijednost koraka γ u izrazu:

$$b = a - \gamma \cdot \nabla F(a) \tag{34}$$

dovoljno mala, slijedi da je $F(a) \geq F(b)$. Uzevši ovu pretpostavku u obzir, kao lokalni minimum od F uzima se x_0 te se razmatra niz $x_0, x_1, x_2, \ldots, x_n$ koji prati slijedeći izraz:

$$x_{n+1} = x_n - \gamma_n \nabla F(x_n), \quad n \geq 0. \tag{35}$$

Cilj je ostvariti konvergenciju x_n u željeni lokalni minimum iz niza funkcija:

$$F(x_0) \geq F(x_1) \geq F(x_2) \geq \ldots \geq F(x_n)$$

Vrijednost koraka γ može se mijenjati u svakoj iteraciji. Uzevši u obzir određene pretpostavke funkcije F (npr. konveksna funkcija, funkcija kontinuiteta prema Lipschitzu) i partikularne izbore γ (npr. putem linijske pretrage koja zadovoljava Wolfeove uvjete), očekuje se dolazak u lokalni minimum .

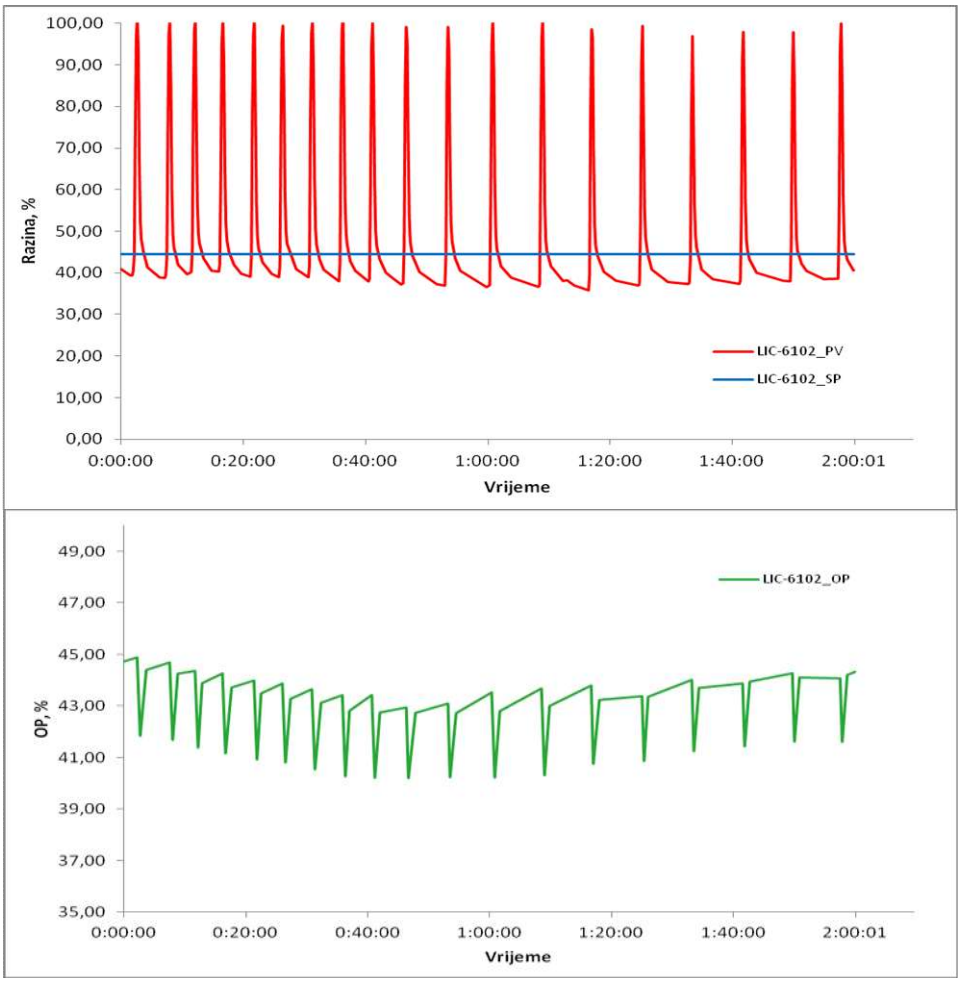
Ova metoda veoma je popularna za optimiranje zbog jednostavne provedbe, brzog proračuna i optimiranje parametara empirijskih modela.[10]

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Striper teškog benzina (LIC-6102)

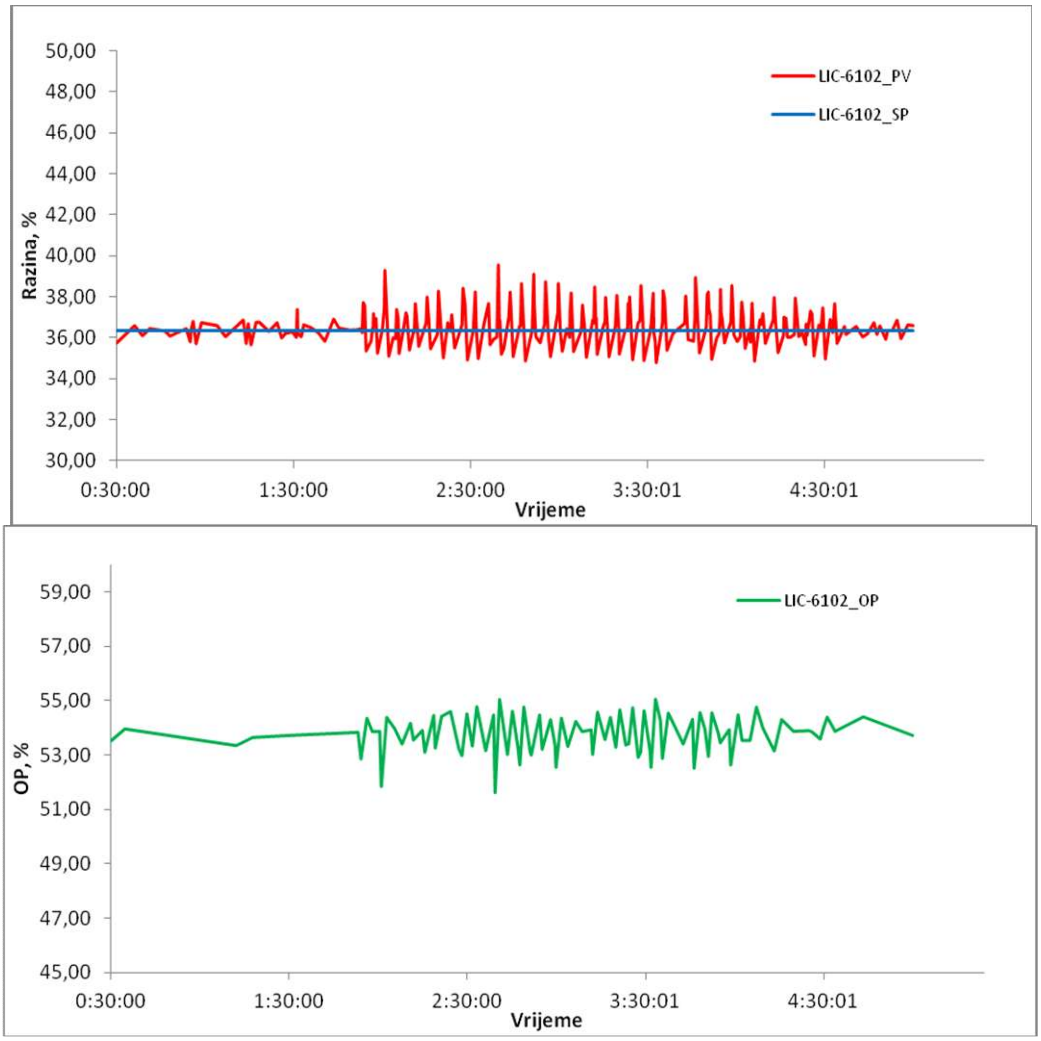
Analiza rada regulacijskih krugova stripera teškog benzina provedena je na temelju podataka s postrojenja atmosferske destilacije u Rafineriji nafte Sisak.

Regulacija razine dna stripera teškog benzina (*LIC-6102*) nije bila zadovoljavajuća. Regulacijski krug LIC-6102 radio je nestabilno, a razina je oscilirala između 40-100%, slika 4.1. Zbog procesnih zahtjeva maksimalna dopuštena razina je ograničena na 50%. Dodatni problem pri radu regulacijskog kruga bila je pojava sljepljivanja regulacijskog ventila što unosi dodatne problemu u regulaciju.



Slika 4.1. *Rad regulacijskog kruga LIC-6102 prije ugađanja*

Ručnim izjednačavanjem protoka na ulazu u striper teškog benzina i protoka u regulacijskom krugu FIC-6122 izjednačeni su protoci na ulazu i izlazu u proces pa je zatvorena bilanca tvari. Posljedica toga je da su oscilacije razine dna stripera teškog benzina smanjene, slika 4.2

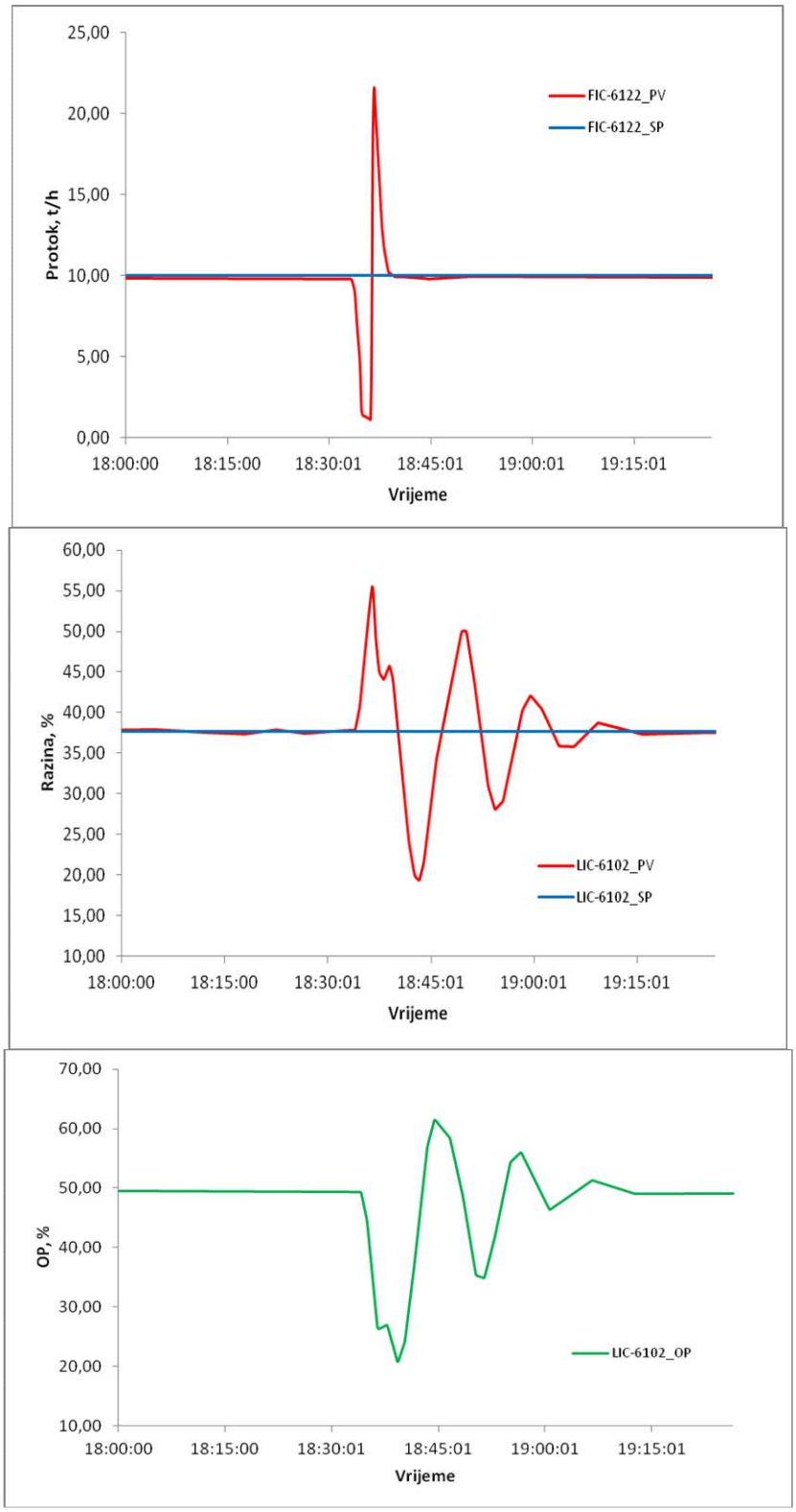


Slika 4.2. *LIC-6102 nakon izjednačavanja materijalne bilance*

Tablica 4.1. *Parametri procesa LIC-6102*

Parametri procesa	
Θ	20 s
r_{int}	0,025 s^{-1}

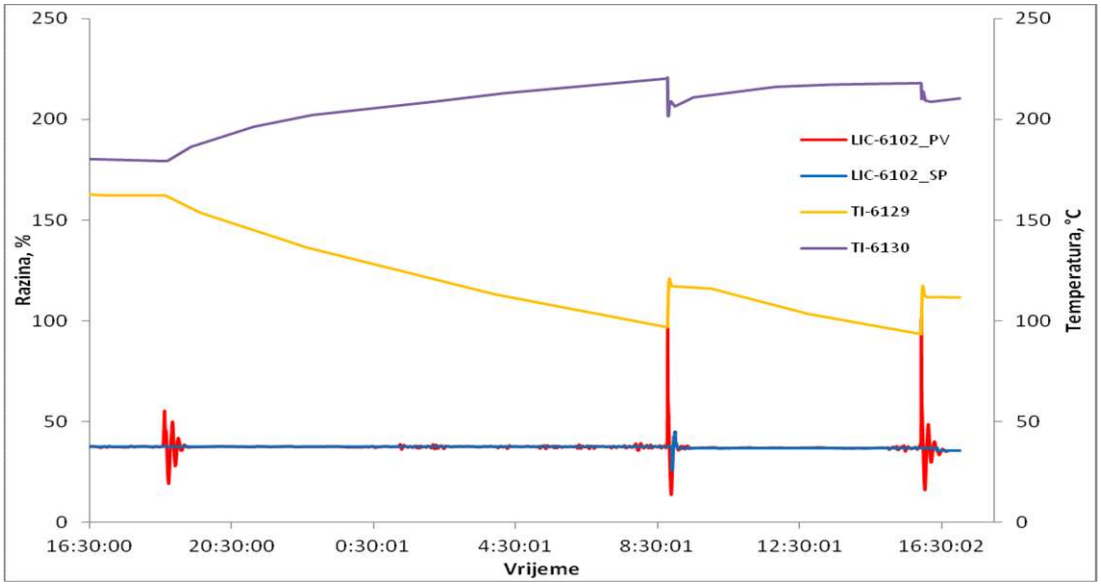
Regulacija razine u regulacijskom krugu LIC-6102 može se opisati modelom integratora, čiji parametri su dani u tablici 4.1. Na rad regulacijskog kruga LIC-6102 utjecaj mogu imati interakcije s regulacijskim krugovima FIC-6119 i FIC-6122. Regulacijski krug FIC-6119 regulira protok medija s kojim se izmjenjuje toplina u isparivaču stripera i radi se o procesu koji se opisuje modelom prvog reda, dok se FIC-6122 odnosi na protok izvlačenja produkta dna stripera teškog benzina, koji se također opisuje modelom prvog reda. Analizom je ustanovljeno da FIC-6119 nema značajnog utjecaja na regulaciju razine stripera teškog benzina jer je u ručnom načinu rada te nema značajnih poremećaja. Utjecaj FIC-6122 može biti značajan jer se prilikom promjene bunkera, u koji se odvodi produkt dna stripera teškog benzina u regulacijski krug LIC-6122, javlja poremećaj prikazan na slici 4.4. Posljedica pada protoka u FIC-6122 je porast razine u LIC-6102, koji dovodi do neželjenog stanja u procesu koje je opisano u nastavku.



Slika 4.4. *Poremećaj u regulacijskom krugu FIC-6122 i utjecaj na LIC-6102*

Razinu dna stripera teškog benzina potrebno je održavati ispod 50% jer se na toj razini nalazi povratni tok u kolonu iz isparivača. U slučaju da razina poraste iznad gornjeg ograničenja dolazi do zagušenja protoka kroz cijev rebojlera. Posljedica

smanjenog protoka je dulje zadržavanje kapljevine u isparivaču što povećava količinu izmjenjene topline, odnosno temperaturu kapljevine koja se vraća u striper. Zbog povećanje temperature dolazi do porasta tlaka na mjestu povratka u striper. Zbog smanjenog protoka, istovremeno dolazi do nakupljanja kapljevine na ulazu u isparivač, što dovodi do sniženja temperature kapljevine koja ulazi u isparivač odnosno smanjenja tlaka na ulazu u isparivač. Ove dvije pojave uzrokuju kontinuirano smanjenja pada tlaka, što za posljedicu ima dodatno smanjenje protoka kroz rebojler. Protok se kontinuirano smanjuje do trenutka kada se u džepu na ulazu u rebojler nakupi „kritična“ količina kapljevine, tada dolazi do naglog proboja kapljevine kroz isparivač. Posljedica prolaska kapljevine je nagli porast razine dna stripera teškog benzina, temperatura na ulazu u isparivač raste jer se smanjila količina hladne kapljevine pa će dotok vruće kapljevine s viših tavana stripera imati značajniji utjecaj. Temperatura na izlazu iz isparivača se smanjuje zbog dotoka hladne struje koja nije dovoljno vremena provela u isparivaču da bi se zagrijala. Nakon proboja kapljevine kroz rebojler ponovno počinje kontinuirano smanjenje protoka zbog smanjenja pada tlaka, a neželjena pojava u procesu se se ponavlja. Ovakav način rada procesa, prikazan slikom 4.3., je nepoželjan i potrebno je intervenirati i riješiti ga ručnim vođenjem.



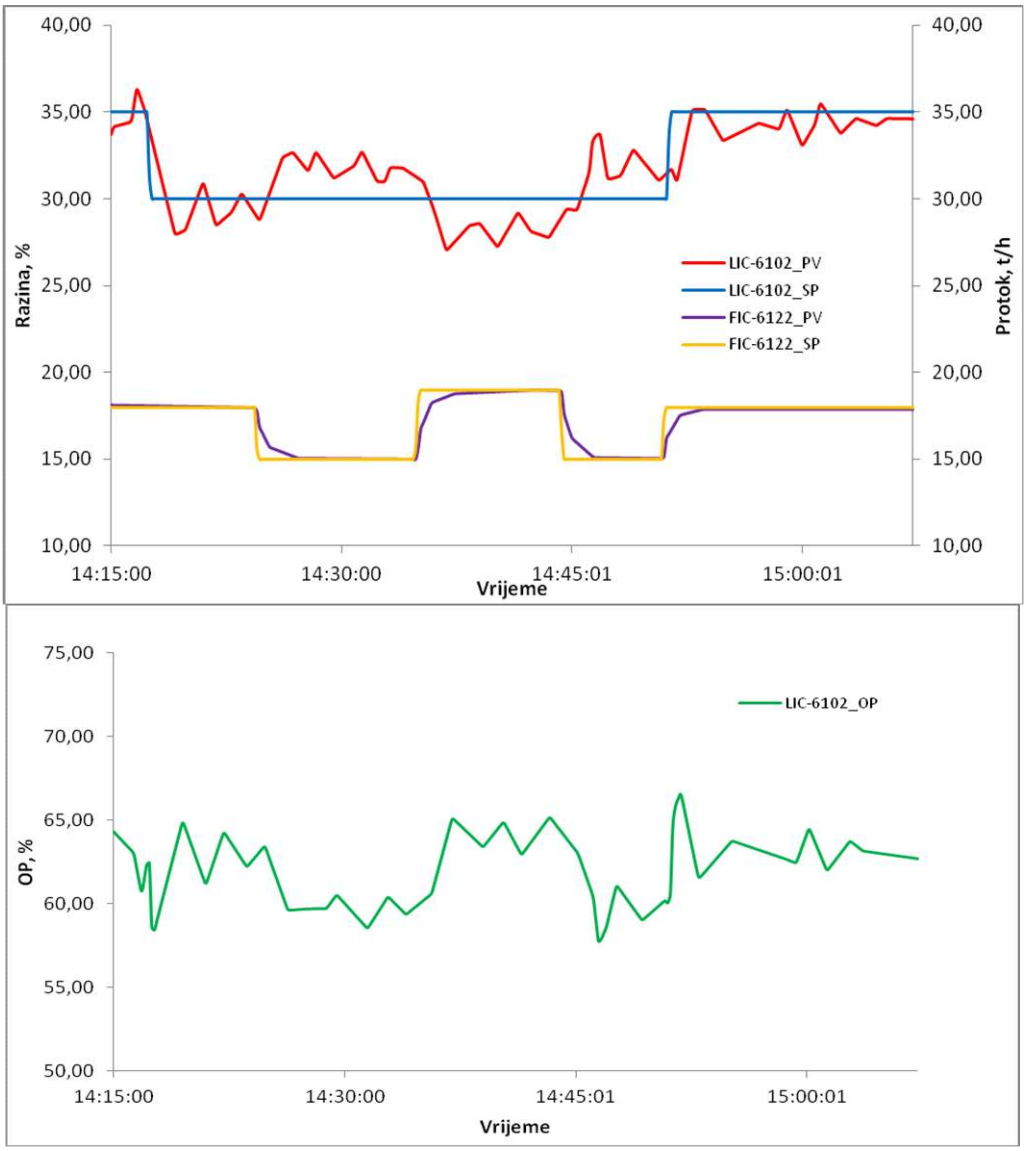
Slika 4.3. *Neželjene pojave pri vođenju procesa*

Manji prebačaj i mirniji rad regulacijskog kruga LIC-6102 bitni su kako bi se izbjegao dolazak procesa u neželjeno stanje. U smislu regulacije procesa to podrazumijeva manji prebačaj prilikom dolaska u novu radnu točku i mirniji rad regulatora. Parametri regulatora prije i poslije ugađanja dani su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. *Parametri regulatora*

Parametri regulatora	Prije ugađanja	Nakon ugađanja
P	0,70	1,20
I	80 s	1200 s

Optimiranje parametara regulatora provedeno je tako da se postigne stabilniji rad i manji prebačaj prilikom promjene radne točke. Nakon optimiranja povećane su vrijednosti parametara za proporcionalno djelovanje i integracijsko djelovanje. Rad regulacijskog kruga testiran je na promjenu radne točke regulacijskog kruga LIC-6102 i promjenu protoka u regulacijskom krugu FIC-6122 koja predstavlja poremećaj za regulacijski krug LIC-6102. Na slici 4.5. prikazano je djelovanje regulacije na promjenu radne točke i poremećaj. Za promjenu protoka od 3 t/h regulacijski krug LIC-6102 oscilira za 2,5%, a prilikom promjene radne točke bez prebačaja dolazi u novo stanje.



Slika 4.5. *Regulacijski krug LIC-6102 nakon optimiranja parametara regulatora*

U softverskom paketu za analizu rada regulacije izračunate su vrijednosti kriterija koji daju uvid uvid u kvalitetu regulacije. U tablici 4.3. prikazane su vrijednosti kriterija prije i nakon ugađanja.

Tablica 4.3. *Kriteriji djelovanja regulatora LIC-6102 prije i nakon ugađanja*

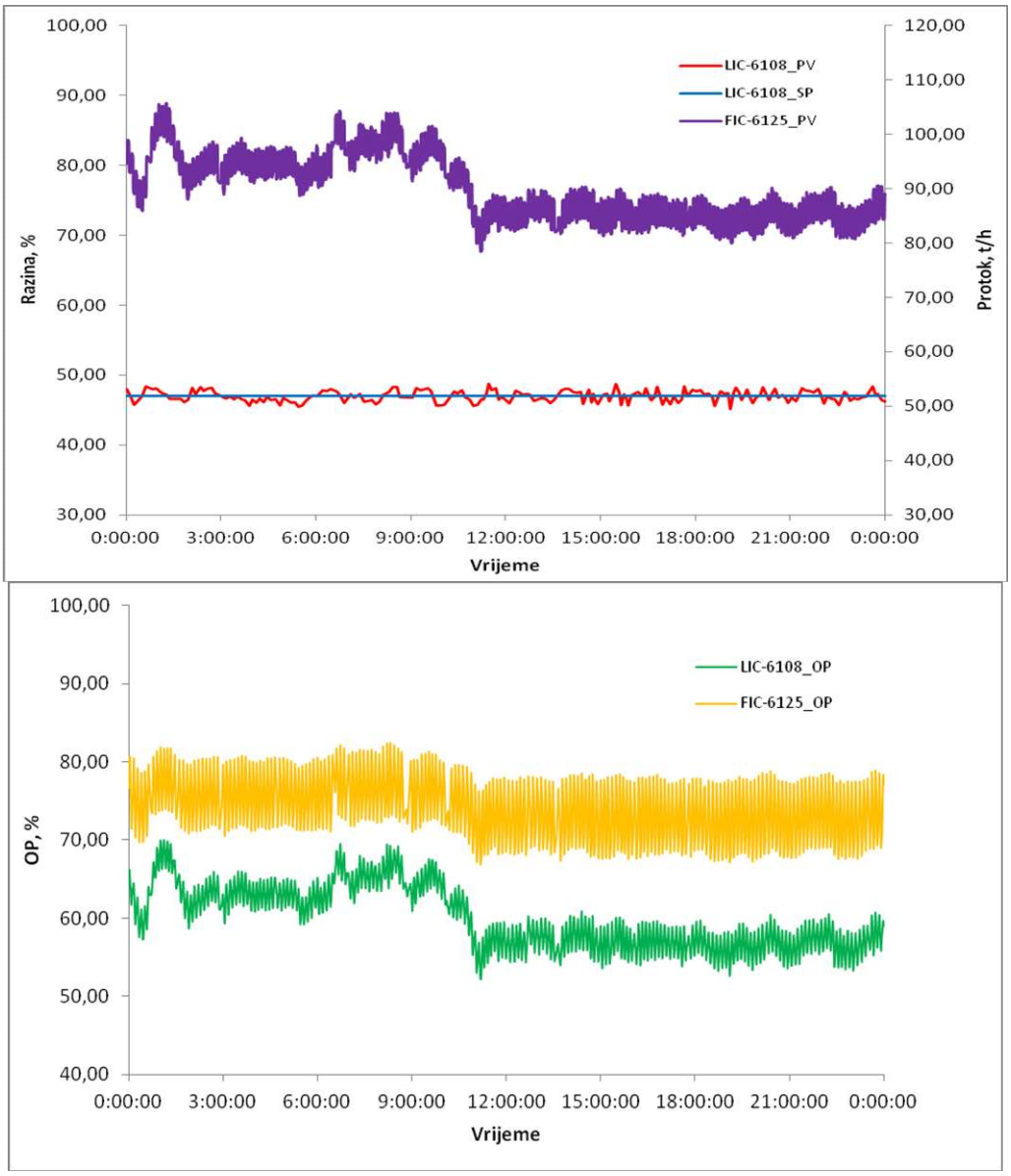
Kriteriji	Prije ugađanja	Nakon ugađanja
Integral apsolutne pogreške	8,284	0,280
Integral kvadrata pogreške	200,619	0,174
Devijacija pogreške	1,381	0,059
Varijanca	200,213	0,174
Standardna devijacija	14,150	0,417
Čvrstoća regulacije	18,266	31,404
Disbalans	4,122	1,006
Rastuća oscilacija	63	0
Poklapanje	14	4
Zasićenje OP	0	0
Pik OP	0,154	1,191
Zasićenje PV	0,01	0
Pik PV	2586	0
Kretanje ventila	0,015	0,090
Kolebanje ventila	0,005	0,055
Proporcionalno djelovanje	75,135	99,789
Integracijsko djelovanje	24,865	0,211
Ocjena	60	95

Nakon ugađanja parametara regulatora značajno su smanjeni kriteriji pogreške, a povećana je čvrstoća regulacije. Eliminirana je rastuća oscilacija PV-a koja može dovesti proces u nestabilno stanje. Zasićenja OP-a i PV-a nema, što znači da se ventil i procesna varijabla kreću na projektiranom radnom području. Pik PV-a je smanjen jer se procesna veličina više ne mijenja naglo, već postepeno. Veći iznosi kriterija kretanja i kolebanja ventila nakon ugađanja posljedica su čvršće regulacije. Doprinos integracijskog djelovanja bitno je smanjen pa je moguća pojava odstupanja PV-a od radne točke, no za proces je ključno PV ne oscilira većim amplitudama.

4.2. Stabilizator primarnog benzina (LIC-6108)

Na temelju podataka iz Rafinerije nafte Sisak provedena je analiza regulacijskih krugova vezanih uz stabilizator primarnog benzina (T-6104).

Pri optimiranju parametara za regulacijski krug razine dna stabilizatora primarnog benzina (*LIC-6108*) cilj je bio samjiti kretanje ventila, odnosno smanjiti oscilacije protoka produkta dna stabilizatora (*FIC-6125*). Regulacija razine stabilizatora provodi se kaskadnom regulacijom, u kojoj je regulacija razine dna stabilizatora primarni regulacijski krug koji zadaje radnu točku sekundarnom regulacijskom krugu, u ovom slučaju regulacijskom krugu protoka produkta dna stabilizatora. Oscilacije vrijednosti FIC-6125 potrebno je smanjiti jer je produkt dna stabilizatora primarnog benzina ulazna sirovina za spliter primarnog benzina (T-6105). U slučaju da vrijednost FIC-6125 oscilira, protok ulazne sirovine u spliter neće biti stabilan, a to utječe na radne uvjete splitera. Oscilacija vrijednosti protoka FIC-6125 može se vidjeti na slici 4.6. Osim toga na slici se može vidjeti i da je razina čvrsto ugođena, što znači da razina LIC-6108 ne odstupa puno od radne točke i često siječe pravac radne točke.



Slika 4.6. *Rad kaskadne regulacije LIC-6108/FIC-6125*

Analizom procesa u stabilizatoru utvrđeno je da na LIC-6108/FIC-6125 utjecaj imaju slijedeći regulacijski krugovi:

- Protok produkta dna (FIC-6121) iz apsorbera (T-6103) koji ovisi o razini u dnu apsorbera zbog kaskadne regulacije LIC-6107/FIC-6121
- Protok medija za izmjenu topline (FIC-6123) kroz isparivač stabilizatora (E-6119)
- Protok ukapljenog naftnog plina (FIC-6126) koji je van specifikacije te se dovodi u stabilizator

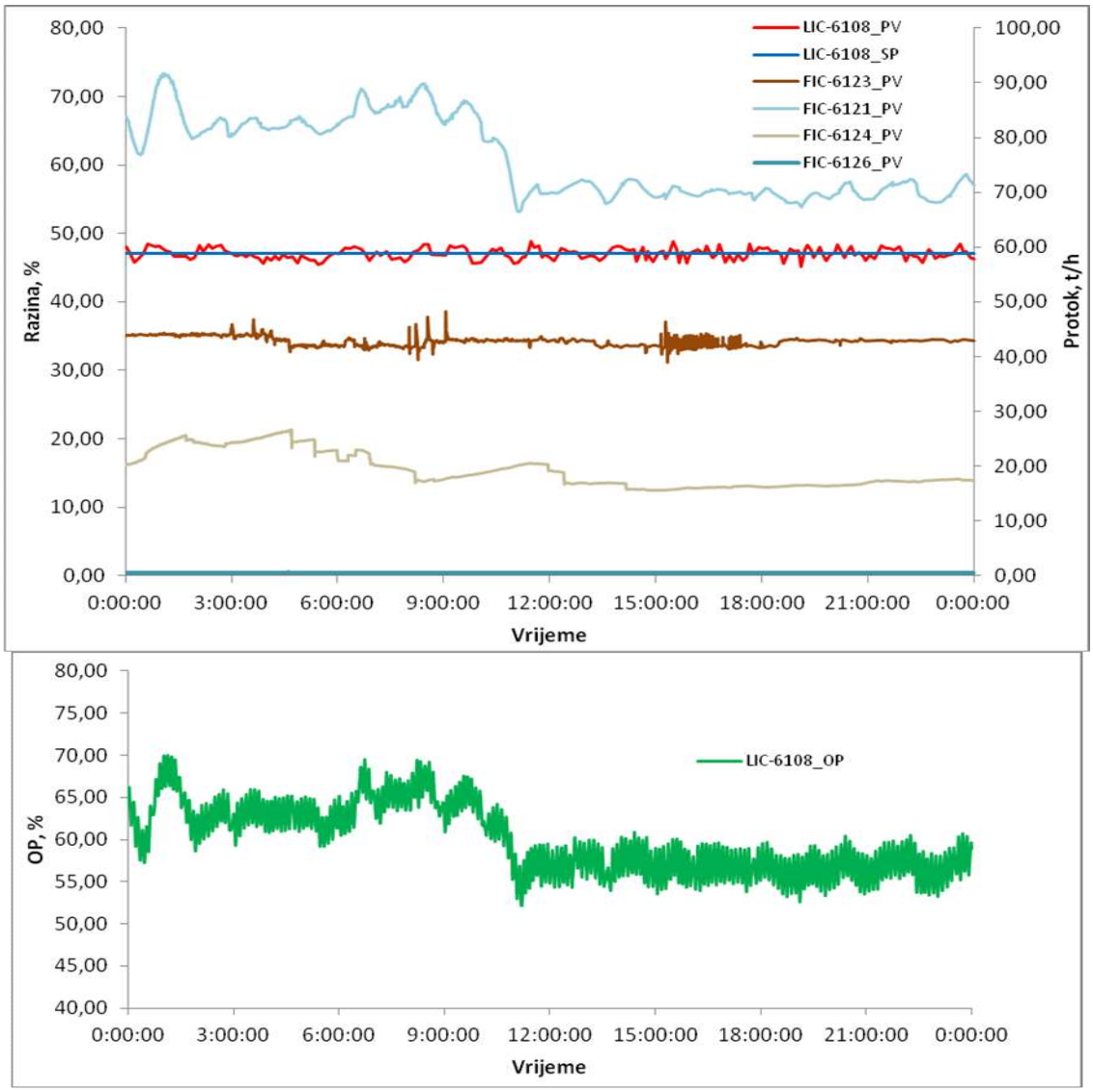
- Protok refluksa (FIC-6124) stabilizatora koji je sekundarni krug u kaskadnoj regulaciji temperature vrha stabilizatora (TIC-6146/FIC-6124)

Za regulacijske krugove koje treba ugoditi, odnosno LIC-6108 i FIC-6125 određeni su parametri empirijskih modela koji su prikazani u tablici 4.4. Regulacijski krug razine je proces integrator, dok je protok proces prvog reda.

Tablica 4.4. *Parametri procesa LIC-6108 i FIC-6125*

Parametri procesa			
FIC-6125		**LIC-6108**	
θ	10 s	θ	20 s
k	1,41	r_{int}	0,31 s^{-1}
τ	45 s		

Na slici 4.7. vidi se da najveći utjecaj na regulaciju razine LIC-6108 ima dotok sirovine iz apsorbera FIC-6121 jer krivulja izlaza regulatora LIC-6108_OP gotovo u potpunosti prati promjenu poremećaja, tj. promjenu protoka FIC-6121. Uzrok tome je što u bilanci tvari protok FIC-6121 doprinosi s najvećom količinom sirovine, dok su ostali protoci manjih vrijednosti i imaju manje oscilacija.



Slika 4.7. *Utjecaj okolnih regulacijskih krugova na regulaciju LIC-6108/FIC-6125*

Parametri regulatora prije ugađanja prikazani su u tablici 4.5. Ugađanje parametara regulatora je, stoga, potrebno provesti s ciljem smanjenja čvrstoće regulacije što će za posljedicu imati mirniji rad regulacijskog ventila. To se provodi destabilizacijom regulacijskog kruga LIC-6108. Pri ugađanju regulatora potrebno je postepeno smanjiti utjecaj integralnog djelovanja u krugu FIC-6125, a zatim i u krugu LIC-6108. Zadnji korak je smanjenje pojačanja u regulacijskom krugu LIC-6108 u slučaju da je prebačaj radne točke prevelik. Nakon promjene parametara očekuje se manje promjene radne točke protoka uz uvjet da razina oscilira maksimalno 3% iznad ili ispod vrijednosti radne točke. Nove vrijednosti parametara regulatora nije bilo moguće ispitati na postrojenju u vrijeme izrade ovog rada jer postrojenje nije bilo

u funkciji. S ponovnim pokretanjem postrojenja bit će primjenjeni novi parametri regulatora te će se procjeniti djelovanje regulacije nakon ugađanja.

Tablica 4.5. *Parametri regulacije LIC-6108/FIC-6125*

Parametri	LIC-6108	FIC-6125
P	1,5	0,4
I	550 s	14 s

U tablici 4.6. prikazani su kriteriji kvalitete regulacije određeni u softverskom paketu za procjenu rada regulacije.

Tablica 4.6. *Kriteriji kvalitete regulacije LIC-6108/FIC-6125 prije ugađanja*

Kriteriji	LIC-6108	FIC-6125
Integral apsolutne pogreške	0,594	1,563
Integral kvadrata pogreške	0,491	3,465
Devijacija pogreške	0,007	0,019
Varijanca	0,491	3,465
Standardna devijacija	0,701	1,861
Čvrstoća regulacije	2,625	16,875
Disbalans	1,116	1,031
Rastuća oscilacija	0	0
Poklapanje	14	8
Zasićenje OP	0	0
Pik OP	0,653	0,969
Zasićenje PV	0	0
Pik PV	0	0
Kretanje ventila	0,184	0,412
Kolebanje ventila	0,110	0,045
Proporcionalno djelovanje	20,330	4,337
Integracijsko djelovanje	79,670	95,663
Ocjena	74	82

Nakon ugađanja parametara regulatora očekuje se smanjenje kriterija čvrstoće regulacije te kretanja i kolebanja ventila. Osim toga, očekuje se povećanje doprinosa proporcionalnog djelovanja i smanjenje doprinosa integracijskog djelovanja.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je analizirati i optimizirati sustav za vođenje rafinerijskog procesa atmosferske destilacije. Na temelju podataka s postrojenja, provedena je analiza procesa, identificiranje modela i optimiranje parametara regulatora.

Vođenje procesa atmosferske destilacije važno je i s ekonomskog i sigurnosnog gledišta. Optimalna regulacija bitna je za uštedu energije i visoku kvalitetu proizvoda. Pored toga, dobra regulacija bitna je za siguran rad procesnih postrojenja

Rad postrojenja za atmosfersku destilaciju važan je pošto se sva nafta, koja se prerađuje u rafineriji, prvo obrađuje na postrojenju ovom postrojenju. Upravo zato kapacitet i cjelokuna rafinerijska prerada ovisi o radu postrojenja za atmosfersku destilaciju.

Optimizacija parametara regulatora na postrojenju za atmosfersku destilaciju bio je zahtjevan zadatak. Razlog tome je velik broj procesnih tokova, poremećaji koji se javljaju tijekom procesa i međudjelovanje regulacijskih krugova. Sve su to razlozi da se optimiranju regulacije pristupi na sustavan način.

Na temelju provedenog optimiranja i dobivenih rezultata očekuje se bolje djelovanje regulacijskih krugova, a kao posljedica i stabilniji rad postrojenja, veća kvaliteta proizvoda i dulji vijek trajanja procesne opreme,

Primjenom rezultata istraživanja na postrojenju dobit će se konačni uvid u uspješnost provedenog optimiranja postrojenja.

6. POPIS SIMBOLA

Simboli su dani redom kojim se pojavljuju u radu:

F – protok pojenja
D – protok destilata
B – protok produkta dna
z – množinski udio hlapljivije komponente u pojenju
y – množinski udio hlapljivije komponente u destilatu
x – množinski udio hlapljivije komponende u produktu dna
S – faktor separacije
S_{max} – maksimalni faktor separacije
α – relativna hlapljivost
N – broj idealnih tavana
V_B – količina isparavanja
Q_B – toplina dovedena u isparivač
ΔH_v – toplina isparavanja smjese u isparivaču
V_T – protok para iznad pojne plitice
q – toplinsko stanje pojenja
R_I – protok internog refluksa
R – protok refluksa
$C_{p,R}$ – toplinski kapacitet refluksa
T_0 – temperatura vrha kolone
T_R – temperatura refluksa
L – protok kapljevine ispod pojne plitice
G_T – vremensko kašnjenje u gornjem dijelu kolone iznad pojne plitice
G_B – vremensko kašnjenje u donjem dijelu kolone ispod pojne plitice
D_A – akumulacija destilata
D_I – interni protok destilata
B_I – interni protok produkta dna
B_A – akumulacija produkta dna
a – karakteristični faktor kolone

H_F – entalpija pojenja

h_D – entalpija destilata

h_B – entalpija produkta dna

Q_C – toplinska dužnost kondenzatora

Q_R – toplinska dužnost isparivača

c_i – vođena varijabla

m_i – upravljačka varijabla

λ_{ij} – relativna statička karakteristika

τ – vremenska konstanta procesa

k – statička osjetljivost procesa

θ – mrtvo vrijeme procesa

r_{int} – integracijska brzina

ζ – koeficijent prigušenja

PV – vrijednost procesne varijable

SP – vrijednost radne točke

OP – vrijednost izlaznog signala regulatora

t - vrijeme

IAE – integral apsolutne pogreške

ISE – integral kvadrata pogreške

k_c – pojačanje (proporcionalno djelovanje) regulatora

τ_i – integracijsko djelovanje regulatora

τ_d – derivacijsko djelovanje regulatora

7. LITERATURA

1. E. Beer, Destilacija, Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, Zagreb, 2006.
2. E. Cerić, Nafta, procesi i proizvodi, INA - Industrija nafte, Zagreb, 2006.
3. Z. Janović, Naftni i petrokemijski procesi i proizvodi, Hrvatsko društvo za goriva i maziva, Zagreb, 2011.
4. C. L. Smith, Distillation Control: An Engineering Perspective, Wiley, New Jersey, 2012.
5. B. G. Liptak, Instrument Engineer's Handbook, Vol. 2: Process Control and Optimization, 4th Edition, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
6. Bolf, Nenad: Interni materijali predavanje kolegija Mjerenje i vođenje procesa, FKIT
7. M. Novak, Razvoj dinamičkih modela softverskih senzora, Diplomski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2011.
8. http://picontrolsolutions.com/usermanuals/Apromon6.1Help.pdf (19. 4. 2015.)
9. http://picontrolsolutions.com/usermanuals/Pitops%20PID%20Help.pdf (19. 4. 2015.)
10. http://en.wikipedia.org/wiki/Gradient_descent (5. 7. 2015.)

8. ŽIVOTOPIS

Rođen sam u Slavonskom Brodu 2.10.1990. U mladoj dobi s roditeljima selim u Zagreb gdje završavam osnovnu školu i opću gimnaziju.

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije na Sveučilištu u Zagrebu upisujem 2009. godine. Stručnu praksu proveo sam analitičkom laboratoriju u tvrtci Pliva HRVATSKA d.o.o. Obranom završnog rada s temom *Metode regulacije pH* stječem titulu prvostupnika kemijskog inženjerstva 2012.

Na diplomskom studiju upisujem modul *Kemijsko procesno inženjerstvo*. Za vrijeme diplomskog studija dobio sam Dekanovu nagradu za zapaženi studentski rad s kolegama M. Cvetnićem i A. N. Zecom na temu *Optimiranje rada sustava za vođenje procesa izmjene topline* s kojim smo sudjelovali i na desetom *Susretu mladih kemijskih inženjera*.

Područja struke koja me zanimaju su procesno inženjerstvo, naftna i petrokemijska industrija, automatsko vođenje procesa, optimizacija i modeliranje procesa.