

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
ZAVOD ZA MJERENJE I AUTOMATSKO VOĐENJE PROCESA

Dženita Šola, Ana-Marija Tomić, Andreja Žužić

ANALIZA I OPTIMIRANJE RADA POSTROJENJA
ANALYSIS AND OPTIMIZING OF PLANT
OPERATION

Zagreb, 2017.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za mjerenja i automatsko vođenje procesa na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom dr. sc. Željke Ujević Andrijić, dr. sc. Ivana Mohlera i izv. prof. dr. sc. Nenada Bolfa i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

Popis skraćenica i simbola korištenih u radu

Simboli:

t	vrijeme (min)
y	izlazni signal mjernog osjetila
r	integracijska brzina (min^{-1})
T	temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
T_v	temperatura vrelišta ($^{\circ}\text{C}$)
a	promjena ulazne veličine
k	statička osjetljivost procesa
K_c	pojačanje regulatora

Grčki simboli:

τ_d	derivacijska konstanta (min)
τ_i	integracijska konstanta (min)
ε	signal pogreške (%)
θ	mrtvo vrijeme (min)
τ	vremenska konstanta (min)
γ	vrijednost iteracijskog koraka metode reduciranih gradijenata

Skraćenice:

eng.	riječ ili fraza na engleskom jeziku
EU	inženjerske jedinice, eng. <i>Engineering Units</i>
LPU	lako plinsko ulje, bočna frakcija atmosferske destilacije
TPU	teško plinsko ulje, bočna frakcija atmosferske destilacije
FC	regulacija protoka, eng. <i>Flow Control</i>
LC	regulacija razine, eng. <i>Level Control</i>
OP	izlaz, eng. <i>Output</i>
MV	mjerena veličina, eng. <i>Measured Value</i>
PV	vođena veličina, eng. <i>Process Value</i>
SP	referentna (zadana) veličina, eng. <i>Set Point</i>
TC	regulacija temperature, eng. <i>Temperature Control</i>
IAE	integral apsolutne pogreške, eng. <i>Integrated Absolute Error</i>
PID	Proporcionalno-Integracijsko-Derivacijski regulator, eng. <i>Proportional-Integral-Derivative Controller</i>

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Teorijski dio	2
2.1. Svojstva nafte	2
2.2. Opis vođenja procesa atmosferske destilacije	3
2.2.1. Sekcija pripreme nafte za preradu i predgrijavanje nafte	4
2.2.2. Sekcija frakcionacije	5
2.2.3. Sekcija stabilizacije.....	10
2.2.4. Sekcija razdvajanja benzina (spliter)	11
2.3. Regulacijski krug	11
2.4. Regulator	13
2.5. Modeli procesa.....	16
2.6. Problemi pri vođenju procesa	20
3. Metodika rada	21
3.1. Dijagnostika rada regulacijskih krugova	21
3.2. Metoda reduciranih gradijenata	27
3.3. Statistička analiza procesa	29
3.3.1. <i>X</i> kontrolni dijagram	29
3.3.2. <i>S</i> kontrolni dijagram.....	31
3.3.3. CUSUM kontrolni dijagram.....	32
3.3.4. EWMA (eng. <i>Exponentially Weighted Moving Average</i>).....	34
3.3.5. Sposobnost procesa.....	35
3.3.6. Indeks sposobnosti procesa	36
4. Rezultati.....	37
4.1. Linearne korelacije	37
4.2. Dijagnostika rada regulacijskih krugova	40
4.2.1. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-1 (TC7/FC13).....	42
4.2.2. Kaskadna regulacija temperature dna kolone C-4 (TC33/FC32)	43
4.2.3. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-4 (TC157/FC30)	44
4.2.4. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-5 (TC162/FC36).....	44
4.2.5. Regulacija protoka vodene pare u striper C-2C (FC24)	45
4.3. Identifikacija modela i optimiranje parametara regulatora.....	46
4.3.1. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-1 (TC7/FC13).....	47

4.3.2. Kaskadna regulacija temperature dna kolone C-4 (TC33/FC32)	49
4.3.3. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-4 (TC157/FC30).....	52
4.3.4. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-5 (TC162/FC36).....	53
4.3.5. Regulacija protoka pare za stripiranje u koloni C-2C (FC24)	55
4.4. Statistička analiza procesa	57
5. Zaključak.....	63
Literatura.....	64
Prilog 1.....	67
Prilog 2.....	68
Prilog 3.....	69

1. Uvod

Projektiranje, vođenje i optimizacija procesa atmosferske destilacije predstavljaju velike izazove inženjerima zbog svoje složenosti. Naime, postrojenje radi kontinuirano, a dijelovi postrojenja su međusobno povezani pa se poremećaji iz jednog dijela prenose u sljedeći. Iz tog razloga je važno u industrijskim postrojenjima procesne varijable održavati unutar definiranih granica kako bi postrojenja radila stabilno, a kvaliteta produkata bila zadovoljavajuća. Nadziranje, dijagnostika i optimiranje sustava za vođenje industrijskih procesa imaju ključnu ulogu u osiguranju da postrojenja ostvaruju radne zadatke.

U ovom istraživanju analizirao se rad industrijskog postrojenja atmosferske destilacije u Rafineriji nafte Rijeka i optimiralo djelovanje regulacijskih krugova kako bi se ostvario optimalan rad postrojenja i visoka kvaliteta produkata. Na temelju podataka prikupljenih s postrojenja identificirani su dinamički modeli regulacijskih krugova te na osnovu njih optimirani parametri regulatora. U svrhu praćenja kvalitete proizvoda provedena je statistička analiza procesa primjenom odgovarajućih kontrolnih dijagrama i alata deskriptivne statistike.

Krajnji cilj ovog rada je optimiranje postrojenja atmosferske destilacije, što znači stabilniji rad postrojenja, veća kvaliteta proizvoda i smanjeni utjecaj na okoliš.

2. Teorijski dio

2.1. Svojstva nafte

Rafinerijska preradba nafte uključuje veći broj primarnih i sekundarnih procesa (separacijski, konverzijski, postupci dorade) kojima je cilj konverzija sirove nafte u produkte željenih prinosa i kakvoće.

Postupci prerade nafte su bitno vezani uz njezin sastav budući da je nafta kompleksna smjesa različitih tipova ugljikovodičnih spojeva, s manjim ili većim udjelima neugljikovitika (S, N, O). Poznato je da prinosi i kakvoća dobivenih produkata ovise u prvom redu o koncentraciji navedenih vrsta spojeva u sirovoj nafti. U skladu s tim, činjenica da određena nafta sadrži prenisku koncentraciju poželjnih komponenata za proizvodnju nekog goriva ili maziva, može uvjetovati neopravdanost njezine primjene u ekonomskom smislu.

Da je kvaliteta nafte bitna, ide u prilog činjenica da je nafta, uz prirodni plin i vodu, jedan od glavnih geostrateških čimbenika stoga je za trgovinu naftom neophodno praćenje kvalitete nafte i njenih frakcija. Radi se o utvrđivanju propisanih graničnih vrijednosti i značajki kvalitete tekućih naftnih goriva uzorkovanjem i laboratorijskom analizom tekućeg naftnog goriva, u svrhu postizanja veće kvalitete proizvoda što u konačnici kao rezultat ima i smanjenje emisija štetnih tvari u okoliš [1, 8].

Imajući to u vidu u sklopu ovog rada praćena su ključna svojstva produkata s postrojenja atmosfenske destilacije:

- početak i kraj destilacije teškog benzina (ASTM*¹ destilacija)
- tlak para lakog benzina
- filtrabilnost lakog plinskog ulja
- točka zamućenja lakog plinskog ulja

*¹ASTM metode su metode koje je 1976. godine propisalo Američko udruženje za ispitivanje i materijale [9].

- *ASTM destilacija*

Destilacijsko područje ima veliko značenje prilikom analize nafte i naftnih frakcija, a dobivene informacije osobito su važne pri projektiranju i praćenju rada destilacijskih kolona. Budući da je isparljivost primarna značajka kapljevina, ona je povezana s ostalim fizikalnim značajkama kao što su viskoznost, točka paljenja te temperatura samozapaljenja. Destilacijski

test prema ASTM normi, definira destilacijsko područje, odnosno temperature početka i kraja destilacije. Početak destilacije je temperatura pri kojoj počinje kondenzacija određene naftne frakcije, a kraj destilacije je temperatura na kojoj završava. Raspon temperatura vrelišta naftnih frakcija iz destilacijske kolone često se razlikuje i određuje se prema vrsti nafte i traženoj kvaliteti proizvoda [1].

- *Tlak para (RVP)*

Tlak para prema Reidu (RVP) jest osnovni standardizirani parametar vezan za isparivost goriva. Ovaj parametar određuje tlak para nad kapljevnom pri temperaturi od 100 °F (37,8 °C) prilikom kojeg omjer volumena para i kapljevine iznosi 4:1 (ASTM D 323). RVP vrijednost treba biti dovoljno visoka za pokretanje hladnih motora, a istovremeno treba biti dovoljno niska kako bi jamčila minimalne gubitke prilikom isparavanja u procesu distribucije goriva i upotrebi u vozilu [1].

- *Filtrabilnost*

Točka filtrabilnosti je temperatura na kojoj dolazi do kristalizacije parafina i začepjenja filtra za gorivo u motornim vozilima. Do kristalizacije parafina dolazi smanjenjem temperature pa stoga svojstvo filtrabilnost definira primjenjivost goriva pri niskim temperaturama [1].

- *Točka zamućenja*

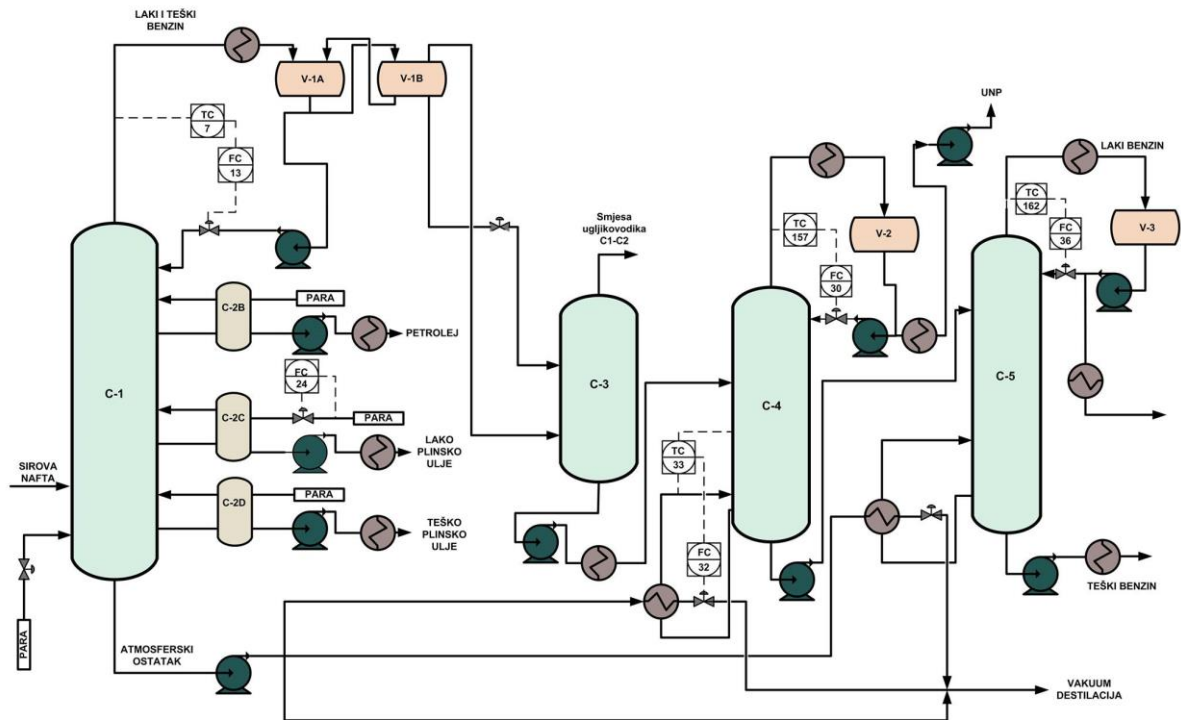
Točka zamućenja također je parametar koji govori o primjenjivosti goriva pri niskim temperaturama. To je temperatura ispod koje dolazi do izlučivanja malih količina voska koji uzrokuje zamućenje dizelskog goriva i lakog plinskog ulja (LPU). Prisutnost voska zgušnjava LPU, a time i dizelsko gorivo što uzrokuje začepjenje filtra u motornim vozilima [1].

2.2. Opis vođenja procesa atmosferske destilacije

Postrojenje destilacije pri atmosferskom tlaku (engl. *topping*) primarno je postrojenje u svakoj rafineriji. Sirova nafta koja dolazi u rafineriju je kapljevina smeđe-zeleno-crne boje, a po svom sastavu vrlo složena smjesa ugljikovodika. Zadatak postrojenja je separirati naftu na pojedine proizvode koji se kasnije na drugim postrojenjima prerađuju ili doraduju s ciljem dobivanja više vrijednih proizvoda.

Postrojenje se može podijeliti na sljedeće sekcije:

- Sekcija pripreme nafte za preradu
- Sekcija predgrijavanja nafte
- Sekcija frakcionacije
- Sekcija stabilizacije
- Sekcija razdvajanja benzina (*splitter*) [10]



Slika 2.1. Pojednostavljeni prikaz postrojenja atmosferske destilacije

2.2.1. Sekcija pripreme nafte za preradu i predgrijavanje nafte

Sirova nafta se prije primarne prerade na postrojenju atmosferske destilacije mora pripremiti. Prvo se uklanjaju svi sedimenti i voda, koji se najčešće nalaze u obliku emulzija, dodatkom deemulgatora. Dodatno razbijanje emulzija potom se provodi pomoću električnih odsoljivača koji uz deemulgatore i dodatak tople vode otapaju i ispiru anorganske soli, a dipolne molekule vode sakupljaju se na elektrodama razbijajući emulziju te stvaraju velike kapljice vode koje se potom talože.

Tako pripremljena nafta se u sekciji za predgrijavanje zagrijava do temperature potrebne za destilaciju. Zagrijavanje se u peći provodi konvekcijski, tako da se nafta zagrijava

dovođenjem pregrijane pare (protustrujna izmjena topline), i radijacijski zagrijava toplinom plamena izgaranja goriva.

2.2.2. Sekcija frakcionacije

U atmosferskoj koloni odvija se rektifikacijska destilacija (frakcionacija) nafte. Prethodno pripremljena i zagrijana nafta na temperaturi od 360 °C do 375 °C uvodi se pri dnu atmosferske kolone u zonu isparavanja (*tzv. flash zona*). Zagrijana nafta je smjesa pare i kapljevine koja zbog razlike tlakova u peći (12 bar) i atmosferske kolone (1,5 bar) naglo isparava u zoni isparavanja. Pare odlaze prema vrhu kolone kroz niz tavana na kojima se kondenziraju, a teže hlapive komponente vraćaju se prema dnu kolone.

Radi što oštrijeg odvajanja bočnih frakcija dio kondenziranog destilata se vraća u kolonu refleksom. Kondenzirane pare dolaze u kontakt s parama unutar kolone, a rezultat je izmjena topline i tvari pri čemu pare postaju sve bogatije na lako hlapivim komponentama, a kapljevita faza na teže hlapivim komponentama. Do kontakta dolazi na pliticama s ventilima i strukturiranim punilima.

Svaka se destilacijska kolona sastoji od stripirajućeg dijela (donji dio kolone u koji se dodaje vodena para radi uklanjanja lako hlapivih komponenata) i rektificirajućeg dijela koji se nalazi iznad mjesta ulaza sirovine u kolonu. U rektificirajućem dijelu odvija se frakcionacija. Radi povećanja oštine frakcionacije, osim vršnog refleksa, u rektificirajućem dijelu nalaze se i dva cirkulacijska međurefluksa s ulogom stabilizacije rada kolone [11].

Atmosferskom destilacijom dobivaju se sljedeće frakcije:

- vršna frakcija (laki benzin, LB i teški benzin, TB)
- petrolej (P)
- lako plinsko ulje (LPU)
- teško plinsko ulje (TPU)
- atmosferski ostatak (AO) koji se dalje prerađuje vakuum destilacijom

U procesu se reguliraju sljedeće varijable:

- tlak u koloni
- temperatura vrha kolone
- temperature i količine međurefluksa
- temperature na pliticama s kojih se uzimaju bočni rezovi
- količina dodane pare za stripiranje i u dno atmosferske kolone

2.2.2.1. Regulacija tlaka u koloni

Tlak je važna varijabla koja određuje radnu temperaturu, kao i raspodjelu pare i kapljevine duž destilacijske kolone. Pri višim tlakovima gubici plina su manji, a kapacitet prerade se povećava. Pri nižim tlakovima djelotvornost je veća zbog veće relativne hlapivosti.

Kod atmosferske destilacijske kolone (C-1) tlak na vrhu kolone regulira se tlakom na vrhu apsorpcijske kolone (C-3) te se održava na vrijednosti oko 1 bar (Slika 2.1.).

Gornji produkt atmosferske kolone prolazi kroz niz izmjenjivača topline, kondenzira se i sakuplja u sabirnoj posudi. Nekondenzirani plinovi iz sabirne posude odvođe se na daljnju obradu u apsorpcijsku kolonu. Tlak na vrhu apsorpcijske kolone održava se oko 1 bar regulacijskim ventilom tlaka (21PC19/21PY19C) na toku u sabirnu posudu.

U slučaju preniskog tlaka na ulazni vod u sabirnu posudu putem regulacijskog ventila tlaka (21PC26) uvodi se lož plin, kojim se sustav tlači i dolazi do porasta tlaka. U slučaju previsokog tlaka višak vršnog produkta kolone C-3 se otpušta kroz regulacijski ventil (21PY19A) na baklju čime se smanjuje tlak (Prilog 1) [11, 12].

2.2.2.2. Regulacija temperature vrha kolone

Temperatura vrha kolone određuje kraj destilacije vršnog produkta. Što je temperatura vrha viša, vršni produkt sadržavati veću količinu teže hlapivih komponenti. Temperatura vrha (oko 145 °C) regulira se regulacijom protoka oštrog hladnog refluksa iz sabirnika refluksa (V-1A). Na izlaznom toku iz sabirne posude nalaze se regulacijski ventili za regulaciju protoka destilata i refluksa. Regulator temperature na izlazu iz vrha kolone (21TC7) i regulator protoka (21FC13) su u kaskadnom režimu rada (Slika 2.1., Prilog 2 i 3).

U slučaju poremećaja temperature vrha kolone (čime se mijenja sastav destilata, a time i javljaju poremećaji u sljedećim procesnim jedinicama) regulator temperature mijenja radnu točku regulatora protoka. Promjenom otvorenosti ventila mijenja se protok refluksa što utječe na hlađenje ili zagrijavanje vrha kolone [11, 12].

- *Održavanje kvalitete produkta vrha kolone*

U svrhu dobivanja vršnog produkta s višim krajem destilacije potrebno je povisiti temperaturu vrha kolone. Posljedica više temperature je veći sadržaj težih ugljikovodika višeg vrelišta u vršnom produktu. S druge strane, u svrhu dobivanja vršnog produkta s nižim krajem

destilacije potrebno je smanjiti temperaturu vrha kolone što će rezultirati smanjenjem sadržaja težih ugljikovodika u vršnom produktu.

Regulacija kraja destilacije produkata vrha kolone ima ograničenje. Temperatura vrha kolone mora biti toliko visoka da onemogući kondenzaciju vodene pare na vrhu kolone i da se osigura prisutnost nužnih ugljikovodika u vršnom produktu.

Početak destilacije (oko 75 °C) produkata vrha kolone ovisi o sadržaju i vrsti lako hlapivih komponenata u nafti i djelomično o tlaku u vršnom sabirniku refluksa [11, 12].

2.2.2.3. Regulacija temperature i količine međurefluksa

Višak topline koji se u kolonu unosi isključivo sirovinom potreban je u svrhu ostvarenja određenog stupnja rektifikacije jer viši stupanj rektifikacije zahtjeva veći refluks i obratno. Oduzimanje topline odvija se pomoću tri refluksa; vršnim i dvama bočnim cirkulacijskim refluksima. Količinom i temperaturom bočnih refluksa dodatno se održava opća ravnoteža kolone.

U svrhu postizanja većih preradbenih kapaciteta kolone i što veće rekuperacije topline tijekom predgrijavanja sirovine poželjna je što veća količina bočnog refluksa. Sva toplina između dviju bočnih frakcija ne smije se oduzeti bočnim refluksom jer bi se time unutarnji refluks toliko smanjio da bi rektifikacija, uz postojeći broj tavana između dviju bočnih frakcija, bila manje učinkovita.

- *Temperatura donjeg međurefluksa*

Jedna od bočnih frakcija je teško plinsko ulje (TPU) koji se izvlači iznad i ispod punila 2 putem regulacije razine (regulacijski ventil razine 21LC8) u bočnoj striper koloni. Nakon što se dovede određena količina pare iznad frakcije i uklone zaostale lakše komponente dio TPU odlazi na daljnju obradu (regulacijom protoka, 21FC27), a dio se hladi te se vraća iznad punila 1 (Slika 2.1, Prilog 1).

Osnovna uloga donjeg međurefluksa jest da osigura dovoljnu količinu kapljevine za ispiranje punila, sprječavanje njihova presušivanja, nastajanje i taloženje koksa te začepljenje punila. Ujedno mu je uloga i sprječavanja prolaska zaostalih para težih frakcija prema višim dijelovima kolone kako ne bi došlo do poremećaja drugih vođenih varijabli i u konačnici do utjecaja na kvalitetu viših frakcija (promjena boje LPU).

Da ne bi došlo do navedenih poremećaja bitno je dobro regulirati temperaturu i količinu oduzimanja međurefluksa. Količinu oduzimanja međurefluksa, a time posredno i temperaturu reguliraju regulacijski ventil protoka produkta (21FC18) održavajući protok na zadanoj vrijednosti (Prilog 1 i 3) [11, 12].

- *Temperatura gornjeg međurefluksa*

Osnovna uloga gornjeg međurefluksa jest da hladi gornji dio kolone. Oduzimanjem topline potpomaže se kondenzacija para, a na taj način povećava se dotok kapljevine na gornje plitice uz smanjenu potrebu za vršnim refluksom. Iako se smanjenjem vršnog refluksa povećava prinos visoko vrijednog proizvoda (primarni benzin, PB), smanjuje se kvaliteta frakcioniranja.

Kapljevina se izvlači iz kolone potom hladi, izmjenom topline s drugim proizvodima i sirovinom, te ponovno vraća u kolonu. Regulacija protoka provodi se regulacijskim ventilom protoka (21FC14), dok se temperatura na povratnomvodu u kolonu regulira regulacijskim ventilom temperature (21TC12) (Prilog 3) [11, 12].

2.2.2.4. Regulacija temperature na pliticama s kojih se uzimaju bočni rezovi i količine dodane pare za stripiranje

Temperature na pliticama u direktnoj su vezi s temperaturom vrenja bočnih frakcija. Reguliraju se količinama koje se odvođe s pojedinih tavana. Što je količina oduzimanja veća, to je veća temperatura na odgovarajućem tavanu. Istovremeno, zbog smanjenja unutrašnjeg refluksa porast će i temperatura na donjem tavanu. Ukoliko se žele zadržati iste karakteristike donjeg produkta potrebno je smanjiti njegovo odvođenje za istu količinu za koju je povećano odvođenje lakšeg gornjeg produkta.

- *Regulacija kvalitete bočnih produkata*

Iz atmosferske kolone se oduzimaju tri bočne frakcije za koje je važna regulacija početka i kraja destilacije. Na početak destilacije djeluje se količinom dodane pare za stripiranje (pregrijana vodena para), dok se na kraj destilacije djeluje količinom kapljevine koja se izvlači iz kolone.

Para za stripiranje dodaje se u striper bočnih produkata. Veća količina pare za stripiranje povlači za sobom više lako hlapivih ugljikovodika karakterističnih za početak destilacije te se oni vraćaju s parom natrag u kolonu, a frakcije će imati viši početak

destilacije. Manja količina pare uvjetuje sniženje početka destilacije jer je frakcija bogatija na lakše hlapivim komponentama. Povećanje količine pare povisit će vrelište za određenu vrijednost, ali samo do nekog stupnja. Daljnje dovodenje pare ne bi više imalo utjecaja te bi stvaralo dodatne probleme (opterećenje vrha kolone, vršnih kondenzatora, veća količina kondenzata, teža regulacija temperature u spremnicima V-1A i B). Povećanje početka destilacije bez povećanja kraja destilacije postići će se tako da se smanji izvlačenje te frakcije i poveća izvlačenje gornje frakcije za isti iznos (Slika 2.1.).

Namještanje kraja destilacije provodi se promjenom količine izdvojene kapljevine. Ako se s destilacijske plitice izvlači veća količina frakcije, u džepu za izvlačenje produkata bit će niža razina tekućine. Prijelaz topline prema gore bit će veći i brži, odnosno rast će temperatura u koloni. To znači da će u gornji dio kolone dolaziti veća količina težih ugljikovodika koji otežavaju i povisuju kraj destilacije te frakcije. Da se poveća kraj destilacije bočne frakcije bez povećanja početka destilacije, potrebno je povećati njeno izvlačenje, a smanjiti oduzimanje donje frakcije za istu količinu [11, 12].

Bočne frakcije koje se uzimaju s pojedinih tavana u koloni jesu:

- Petrolej (175-225 °C)
- Lako plinsko ulje (225-300 °C)
- Teško plinsko ulje (300-370 °C)
- *Petrolej (P)*

Petrolej prva je bočna frakcija atmosferske kolone koja se izvlači u manju striper kolonu. Količina izvlačenja regulira se regulacijskim ventilom razine (21LC6) koji uz to ima ulogu održavanja stabilne razine u striper koloni (C-2B). Iznad kapljevine se dodaje para za stripiranje (regulacijski ventila protoka 21FC23) čime se regulira početak destilacije. Vodena para snižava parcijalni tlak para ugljikovodika, a time zaostale lakše komponente isparavaju te se vraćaju atmosfersku kolonu. Ostatak kapljevine se dodatno zagrijava i vraća natrag u striper kolonu gdje isparavaju zaostale lakše komponente. Kraj destilacije određuje količina koja se izvlači iz kolone putem regulacijskog ventila razine (21LC6), a ta količina zadaje se na regulacijskom ventilu protoka za odvod produkta (21FC2). Kada se postigne stabilno stanje, količina koja se putem 21LC6 uvodi u striper ista je kao i količina teškog benzina na FIC-6122. U slučaju da se promijeni radna točka 21LC6, količina izvlačenja bit će različita od 21FC2 sve dok se ne postigne ustaljeno stanje (Slika 2.1., Prilog 3).

- *Lako plinsko ulje (LPU)*

Sljedeća u nizu frakcija je lako plinsko ulje (LPU). Izvlači se iz kolone C-1 u manju striper kolonu C-2C, a količina se regulira regulacijskim ventilom razine (21LC8) tako da razina bude stabilna. Nadalje se kao i kod prethodne frakcije dodaje pregrijana para (21FC24), lakše komponente isparavaju i vraćaju se u kolonu C-1. Dodatno zagrijavanje, kako bi se „oslobodile“ lakše komponente, neće se provoditi budući da je LPU puno teža frakcija te daljnjim zagrijavanjem u kolonu se dovodi višak topline. Taj višak topline bit će potrebno ukloniti te može kao takav stvoriti probleme u regulaciji. Kraj destilacije LPU određuje količina izvlačenja kapljevine iz džepa kolone preko 21LC7, a ta količina se zadaje kao radna točka regulatora protoka produkta 21FC3 (Slika 2.1., Prilog 3) [11, 12].

- *Teško plinsko ulje (TPU)*

Sustav regulacije opisan je kod opisa regulacije temperature donjeg međurefluksa (poglavlje 2.2.2.3.).

2.2.2.5. Regulacija količine dodane pare u dno atmosferske kolone

Uvođenjem pregrijane vodene pare u dno kolone, iz kapljevite faze sirovine u zoni isparavanja uklanjaju se lakše hlapive komponente, a pored toga se iz stripirajuće sekcije kolone uklanja inertni refluks nad zonom isparavanja. Pregrijana para povećava temperaturu u zoni isparavanja i smanjuje utrošak topline u peći. Količine pare određene su projektom za svako mjesto trošenja i ne smiju se prekoračiti jer bi moglo doći do kondenzacije vodene pare na vrhu kolone, a osim toga i do preopterećenja vršnog kondenzatora tj. sabirnika refluksa ukoliko se radi s maksimalnim kapacitetom [11, 12].

2.2.3. Sekcija stabilizacije

Ova sekcija služi za separaciju ukapljenog naftnog plina (smjesa plinova propana i butana) od kapljevito produkta (C₅ - 180 °C).

U refluksnoj posudi vršnog produkta, osim kondenziranog produkta, naći će se i određena količina nekondenziranih plinova. Kondenzirani i nekondenzirani produkti će se u apsorpcijskoj koloni ponovo dovoditi u kontakt čime se poboljšava izmjena tvari.

Iz smjese para, komponente s nižim tlakom para i nižim vrelištem imaju veću tendenciju otapanja u kapljevine. S obzirom na to, teže komponente se mogu separirati iz

smjese plinova i koncentrirati kao "apsorbent" otopljen u kapljevine. Apsorpcija se povećava s upotrebom veće količine kapljevite faze uz povišeni tlak i nižu temperaturu.

Apsorpcija se provodi u protustrujnoj koloni s tavanima gdje se pare uzdižu prema vrhu kolone, a kapljevita faza se uvodi na vrhu i kreće se prema dolje tuširajući plinove. Na taj način dolazi do hlađenja plinova i apsorpcije težih komponenti plina u kapljevine, dok se istovremeno lakše komponente iz kapljevine odvajaju i odlaze zajedno s ostalim plinovima prema vrhu kolone. Uloga apsorpcije je, kao i kod ostalih frakcionacija, povećanje čistoće produkata.

Produkt dna apsorpcijske kolone odlazi u sekciju stabilizatora. Nakon stabilizacije jedan dio produkta vrha (ukapljeni naftni plin, UNP) se kondenzira u zračnim hladnjacima te se vraća kao refluks na vrh kolone stabilizatora, a preostali dio se šalje na doradu. Proizvod s dna stabilizatora ($C_5 - 180\text{ }^\circ\text{C}$) odlazi na sekciju razdvajanja benzina (spliter) [11, 12].

2.2.4. Sekcija razdvajanja benzina (spliter)

Ova sekcija služi za razdvajanje proizvoda dna stabilizacijske kolone. Razdvaja se lagani benzin ($C_5 - 80\text{ }^\circ\text{C}$) proizvod vrha splitter kolone od frakcije ($C_5 - 180\text{ }^\circ\text{C}$) proizvoda dna kolone, koji služi kao sirovina na sljedećim postrojenjima u smjesi s teškim benzinom.

2.3. Regulacijski krug

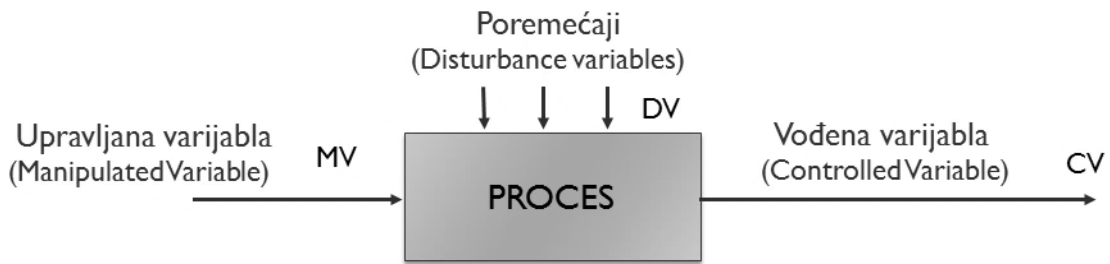
Pri sustavnom razmatranju procesa i za razumijevanje automatskog vođenja vrlo je važno razlučiti tri karakteristične veličine procesa (Slika 2.2.):

Ulazne veličine – definiraju stanje tokova tvari i energije koji uzrokuju promjenu u procesu. Pod tim pojmom podrazumijevaju se poremećaji i upravljive varijable. Njihova suštinska razlika je ta da su upravljive varijable veličine koje se prate i na njih možemo direktno utjecati (npr. protok, temperatura, razina, tlak). S druge strane poremećaji utječu na proces i vođenu varijablu i na njih ne možemo direktno utjecati.

Izlazne veličine – opisuju vladanje procesa koje se pokazuje kao promjena akumulacije tvari ili energije u procesu.

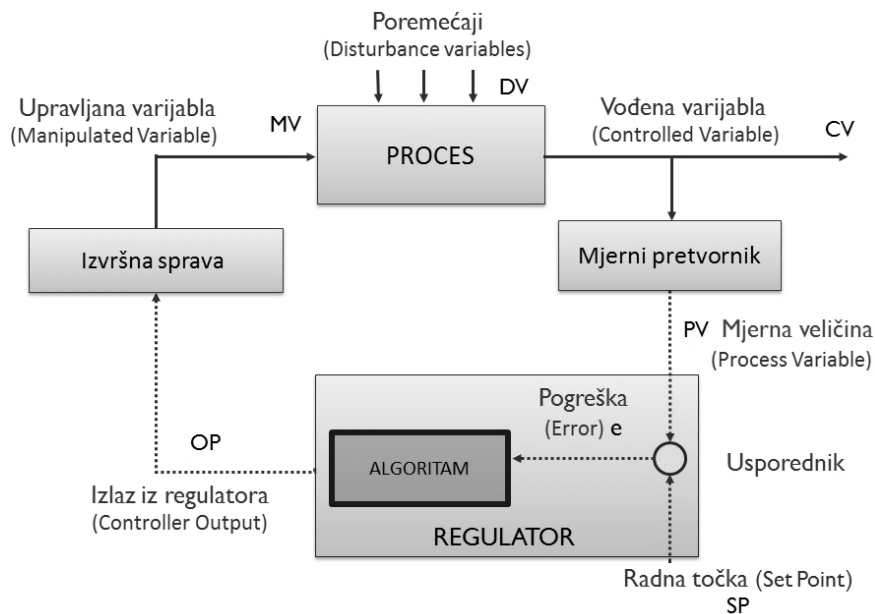
Parametri – definiraju strukturu procesa:

- fizikalno-kemijska svojstva tvari
- geometrijske karakteristike procesa



Slika 2.2. Shematski prikaz karakterističnih veličina procesa

Regulacijski krug je sustav vođenja koji se sastoji od mjernog pretvornika, koji pretvara mjernu veličinu u mjerni signal, razumljiv jedinici za vođenje. Kod regulacijskog sustava cilj vođenja je da vođene varijable sustava što bolje prate unaprijed postavljene referentne varijable (vrijednost radne točke). Referentne varijable se u usporedniku uspoređuju s trenutnim vođenim varijablama. Rezultat je pogreška na temelju koje računski element za vođenje, tj. regulator formira upravljački signal koji se prenosi do izvršnih elemenata gdje se podešava potrebna vrijednost ulazne veličine procesa. Ovaj način vođenja je osnovna metoda vođenja procesa, a naziva se vođenje procesa povratnom vezom (Slika 2.3.) [7].



Slika 2.3. Shematski prikaz regulacijskog kruga

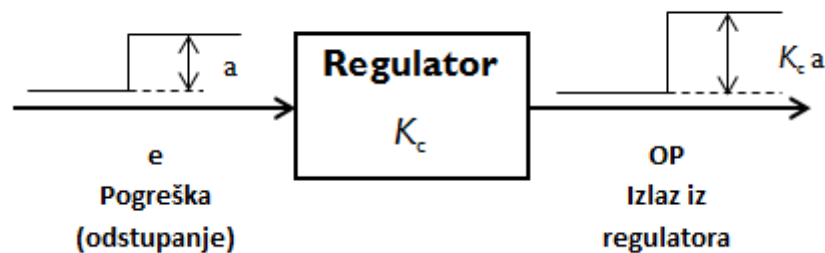
2.4. Regulator

Regulator je računski jedinica (kalkulator) koja na temelju signala pogreške iz usporednika računa potrebne promjene upravljačke veličine. Regulator čine ulazni i izlazni elementi, usporednik te računski jedinica, a sastoji se od tri različita djelovanja: proporcionalnog, integracijskog i derivacijskog [7].

- *Proporcionalno djelovanje*

Proporcionalno djelovanje je osnovno djelovanje svakog regulatora i djeluje kao reakcija na promjenu radne točke (SP), promjenu tereta ili pojavu poremećaja u procesu. Ovakvo djelovanje karakterizira tzv. proporcionalna konstanta (pojačanje), K_c i njime se vođena varijabla (PV) održava unutar prihvatljivog područja oko radne točke (SP). Najjednostavniji regulator koji posjeduje samo proporcionalno djelovanje naziva se P regulatorom, a njegov algoritam glasi:

$$OP = K_c \cdot e . \quad (1)$$



Slika 2.4. Proporcionalno djelovanje regulatora

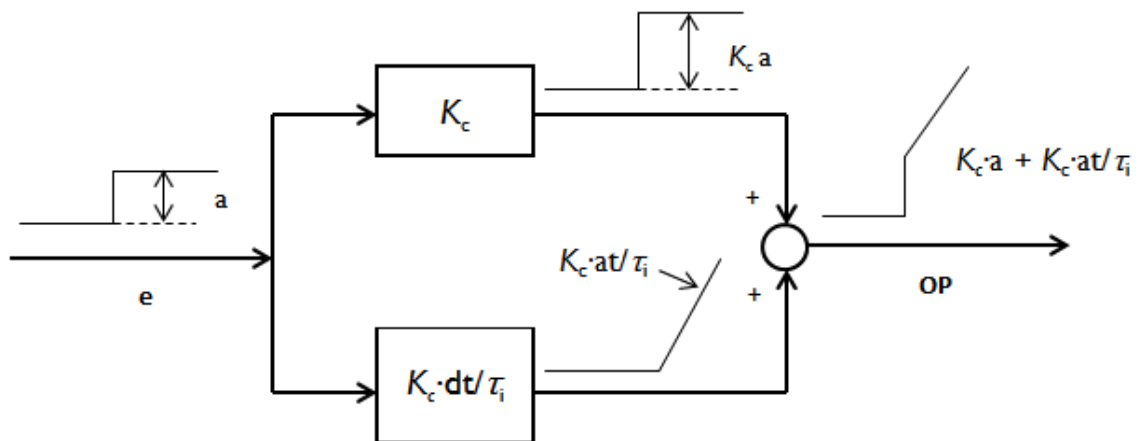
Karakteristike P regulatora su brz i stabilan odziv te pojava preostalog regulacijskog odstupanja (eng. *Offset*) koja se odnosi na stalno odstupanje vođene varijable od radne točke. Prilikom ugađanja ovakvog tipa regulatora treba imati na umu da preveliko pojačanje može uzrokovati nestabilnost u regulacijskom krugu, dok premalo pojačanje može za posledicu imati da se regulacijski ventil ne otvara i ne zatvara u potpunosti [7].

- *Integracijsko djelovanje*

Integracijsko djelovanje mijenja izlaz iz regulatora (OP) shodno integralu pogreške po vremenu te se naziva i reset djelovanje, a karakterizira ga integracijsko vrijeme (τ_i). Ovo djelovanje služi za kompenzaciju poremećaja koji traju dulje vremensko razdoblje i uklanja

preostalo regulacijsko djelovanje (eng. *Offset*) osim oscilacija oko radne točke (SP). Integracijsko djelovanje se u praksi povezuje s proporcionalnim i takva kombinacija se naziva proporcionalno – integracijskim (PI) regulatorom čiji algoritam glasi:

$$OP = K_c \cdot \left[e + \frac{1}{\tau_i} \int e dt \right] \quad (2)$$



Slika 2.5. Odziv PI regulatora na skokomičnu promjenu ulaza

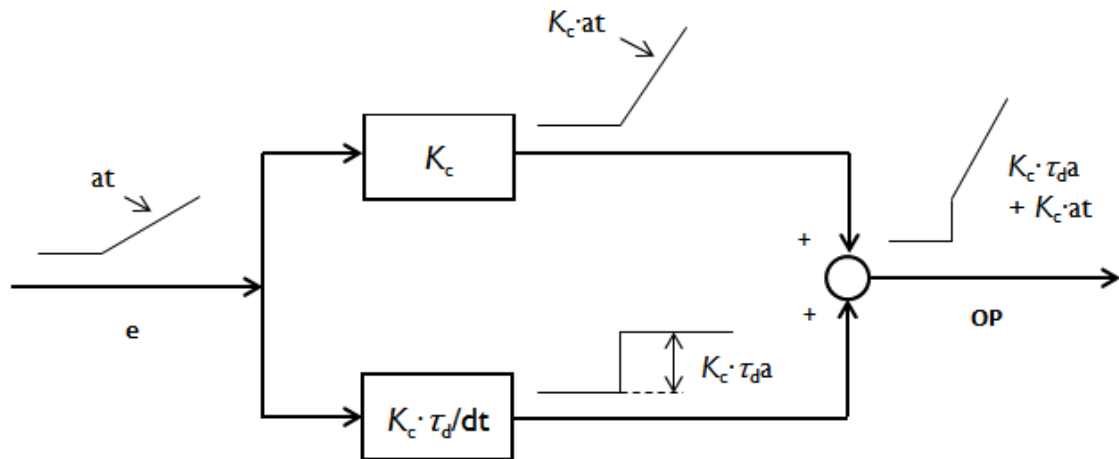
Prilikom ugađanja regulatora važno je da integracijsko vrijeme nema preveliki iznos jer u tom slučaju dolazi do prebačaja PV-a prije dolaska u radnu točku [7].

- *Derivacijsko djelovanje*

Derivacijsko djelovanje mijenja izlaz iz regulatora (OP) shodno brzini promjene vođene varijable (PV). Karakterizira ga derivacijsko vrijeme (τ_d) koje se izražava u minutama, a čiji preveliki iznos može dovesti do velike nestabilnosti u regulacijskom krugu. Dodavanjem derivacijskog djelovanja u regulator dodaje se zapravo prethođenje (eng. *lead*) kako bi se kompenzirala vremenska zadržka (eng. *lag*) te se ovo djelovanje koristi za regulaciju procesa s velikom zadržkom, odnosno sporim odzivom (npr. regulacija temperature u spremnicima ili reaktorima). Derivacijsko djelovanje nije preporučljivo primjenjivati u krugovima s puno šuma kao što su regulacijski krugovi razine ili protoka budući da šumovi mogu imati značajan utjecaj na izlazni signal regulatora (OP). Mjerni šum se u praksi uklanja uvođenjem i četvrte konstante u regulator, a to je filtarska konstanta (τ_f) [7].

Za praktične potrebe se derivacijsko djelovanje spaja s proporcionalnim te se dobiva PD regulator čiji algoritam glasi:

$$OP = K_c \cdot \left[e + \tau_d \frac{de}{dt} \right]. \quad (3)$$

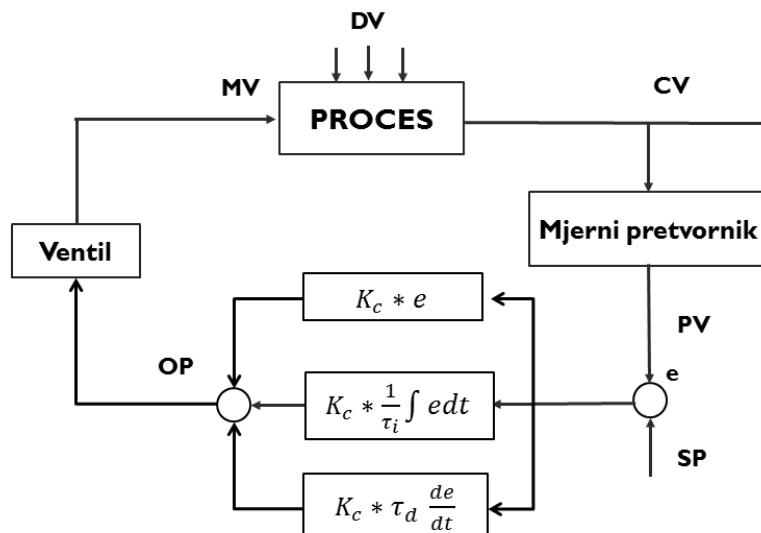


Slika 2.6. Odziv PD regulatora na pravčastu promjenu ulaza

- *PID regulator*

Proporcionalno – integracijsko – derivacijski (PID) regulator je najčešće primjenjivani regulator za vođenje procesa povratnom vezom i obuhvaća sva tri prethodno spomenuta djelovanja. Karakterizira ga brz odziv bez preostalog regulacijskog odstupanja (eng. *Offset*), a nedostatak mu je što je vrlo složen za ugađanje budući da je potrebno ugoditi tri parametra [7]. Algoritam PID regulatora glasi:

$$OP = K_c \cdot \left[e + \frac{1}{\tau_i} \int e dt + \tau_d \frac{de}{dt} \right]. \quad (4)$$



Slika 2.7. Shematski prikaz PID regulatora

2.5. Modeli procesa

Modelima procesa opisuje se dinamičko vladanje procesa, a do modela procesa dolazi se postupkom modeliranja [7]. Modeliranje uključuje identifikaciju i izbor bitnih svojstava realnog fizičkog sustava uz:

- matematički opis procesa
- analizu i procjenu značajki sustava modela
- razmatranje točnosti i ograničenja modela
- upotrebu modela i njegovu nadogradnju

Temeljna podjela modela jest na:

- teorijske modele procesa
- empirijske modele procesa
- poluempirijske modele procesa

Teorijski modeli procesa izvode se na temelju kemijskih, bioloških i fizikalnih načela te daju fizikalni uvid u vladanje procesa. Problemi se javljaju pri procjeni parametara kompleksnih procesa (koeficijenti brzina reakcija, koeficijenti prijenosa topline, fizikalnih svojstava, itd.), kao i prilikom nepotpunih podataka o procesu. Iako su primjenjivi na širokom području, potrebno je dulje vrijeme za njihov razvoj.

Empirijski modeli procesa izvode se na temelju eksperimentalnih podataka odnosno informacija iz realnog procesa. Iako su jednostavniji za razvoj od teorijskih modela, problemi nastupaju prilikom ekstrapolacije podataka na cijelo radno područje.

Poluempirijski modeli procesa predstavljaju spoj teorijskog i empirijskog modela. Odnosno numeričke vrijednosti parametara teorijskog modela izračunavaju se iz eksperimentalnih podataka. Jednostavniji su za razvoj od teorijskih modela te omogućuju ekstrapolaciju na šire područje radnih uvjeta.

Zbog složenosti samog postupka modeliranja često se nastoji procese prikazati jednostavnim modelima. Takvi modeli izvode se iz odziva vođene (izlazne) varijable na skokomičnu promjenu upravljane (ulazne) varijable pri čemu se vladanje nastoji aproksimirati linearnim modelom procesa nižeg reda:

- Proces prvog reda
- Proces drugog reda
- Proces nultog reda

- *Proces prvog reda*

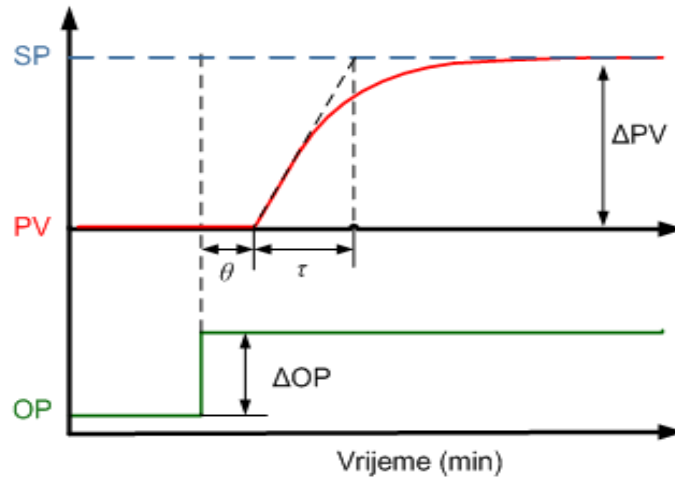
Kod modela procesa prvoga reda odzivom na skokomičnu promjenu javlja se karakteristična odzivna krivulja (Slika 2.8.). Promjenom upravljane varijable, npr. otvorenosti ventila, vođena varijabla nakon određenog vremena započinje s promjenom te dostiže i stabilizira se na novoj vrijednosti radne točke.

Model procesa prvoga reda:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = k \cdot u \quad (5)$$

Proces prvog reda karakteriziraju:

- vremenska konstanta, τ (vrijeme potrebno da se ostvari 63,2% konačne promjene izlazne veličine)
- mrtvo vrijeme, θ (vrijeme potrebno da se nakon promjene pojavi tj. započne odziv na poremećaj ili promjenu radne točke)
- statička osjetljivost, k (govori koliko će se izlazna veličina, PV promijeniti za danu promjenu izlaza regulatora, OP)



Slika 2.8. Odziv procesa prvoga reda na skokomičnu promjenu ulazne veličine

- *Proces drugog reda*

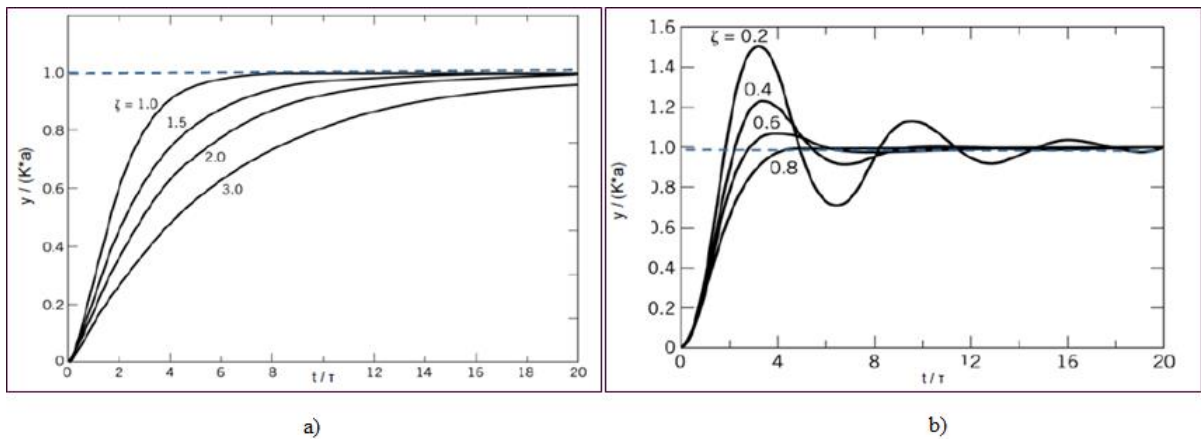
Kod modela procesa drugoga reda odzivom na skokomičnu promjenu javlja se karakteristična odzivna krivulja (Slika 2.9). Razlikuju se dva oblika odziva ovisno o koeficijentu prigušenja, ξ . Ako je koeficijent prigušenja veći od jedan ($\xi > 1$) tada odzivna krivulja dolazi u radnu točku bez prebačaja i oscilacija (Slika 2.9.a). Ako je koeficijent prigušenja između vrijednosti 0 i 1 ($0 < \xi < 1$) tada odzivna krivulja dolazi u radnu točku uz prethodni prebačaj i oscilacije oko iste (Slika 2.9.b).

Model procesa drugoga reda:

$$\tau^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2 \xi \tau \frac{dy}{dt} + y = k u(t) \quad (6)$$

Proces drugoga reda karakteriziraju:

- dvije vremenske konstante, τ_1 i τ_2
- mrtvo vrijeme, θ
- koeficijent prigušenja, ξ
- statička osjetljivost, k



Slika 2.9. Odziv procesa drugoga reda na skokomičnu promjenu ulazne veličine

- *Proces nultog reda*

Kod modela procesa nultoga reda, tzv. integrirajućih procesa, na skokomičnu promjenu ulazne varijable javlja se pravčasti odziv koji ne poprima novu stabilnu vrijednost već nastavlja rasti ili padati (Slika 2.10.). Iz tog razloga procese nultoga reda ne karakteriziraju statička osjetljivost i vremenska konstanta.

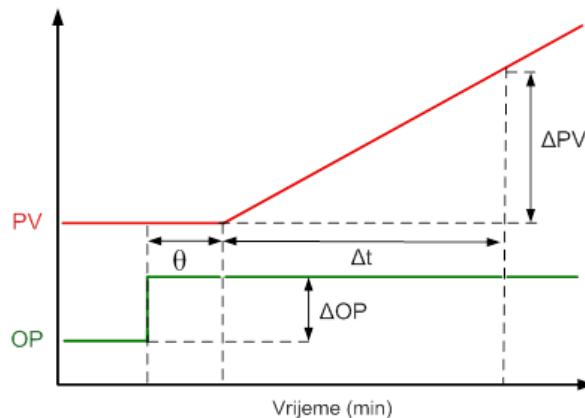
Model procesa nultoga reda:

$$\frac{dy}{dt} = k \cdot u \tag{7}$$

Proces nultoga reda karakteriziraju:

- mrtvo vrijeme, θ

- integracijska brzina, $r_{\text{int}} = \frac{\Delta PV}{\Delta OP \Delta t}$



Slika 2.10. Odziv procesa nultog reda na skokomičnu promjenu ulazne veličine

2.6. Problemi pri vođenju procesa

Svjesnost o važnosti ugođenih regulacijskih krugova unutar rafinerijskog postrojenja Rafinerije nafte Rijeka postoji koliko i samo vođenje postrojenja još od vremena opreme baziranoj na pneumatici i pneumatskim regulatorima s kraja šezdesetih godina prošlog stoljeća [13].

Primarni cilj sustava za vođenje je održavanje željenih uvjeta odabranog sustava i podešavanje odabranih veličina u njemu koje pridonose ekonomičnosti procesa i kvaliteti proizvoda. U realnom procesu javljaju se mnogi problemi vezani uz vođenje, a to su najčešće stalna oscilacija PV-a oko radne točke, stalno odstupanje PV-a, spori dolazak u radnu točku te prevelika i dugotrajna oscilacija PV-a nakon promjene radne točke.

Navedeni problemi posljedica su raznih poremećaja koji se javljaju u procesu, a mogu biti posljedica međudjelovanja regulacijskih krugova te nelinearnosti u procesu i izvršnim spravama. Poznato je da približno trećina problema u regulaciji procesa potječe upravo od regulacijskih ventila koji su zbog svoje neidealnosti skloni mehaničkim problemima što uzrokuje kraći vijek trajanja. Osim toga, kod regulacijskih ventila javlja se problem mrtvog pojasa, a ventili su često predimenzionirani što znači da im osjetljivost naglo pada pri velikim otvorenostima [7].

U tablici 1. prikazani su statistički podaci dobiveni na temelju praktičnih iskustava stručnjaka koji se bave mjerenjem i regulacijom. Iz njih slijedi da određeni broj regulacijskih krugova nije dobro projektiran i instaliran, 30% nije uopće ugođeno, a čak 85% nije dobro ugođeno.

Tablica 1. *Tipični problemi s regulacijskim krugovima*

20 %	regulacijskih krugova nije dobro projektirano
30 %	ima problema s izvršnim elementima (npr. regulacijskim ventilima)
15 %	regulacijskih krugova nije pravilno instalirano
30 %	nije uopće ugođeno
85 %	regulacijskih krugova nije dobro ugođeno

3. Metodika rada

Za optimalan rada procesa važno je optimirati sustav za vođenje procesa. Optimiranje se provodi u nekoliko koraka [2]:

- dijagnostika rada regulacijskih krugova
- identificiranje statičkih i dinamičkih karakteristika procesa
- optimiranje parametara regulatora i simulacija regulacije
- primjena na postrojenje

Optimalan rada sustava za vođenje doprinosi poboljšanju kvalitete proizvoda, maksimizaciji kapaciteta postrojenja, očuvanju procesne opreme i okoliša, povećanju sigurnosti rada postrojenja te minimizaciji potrošnje sirovine i energije.

3.1. Dijagnostika rada regulacijskih krugova

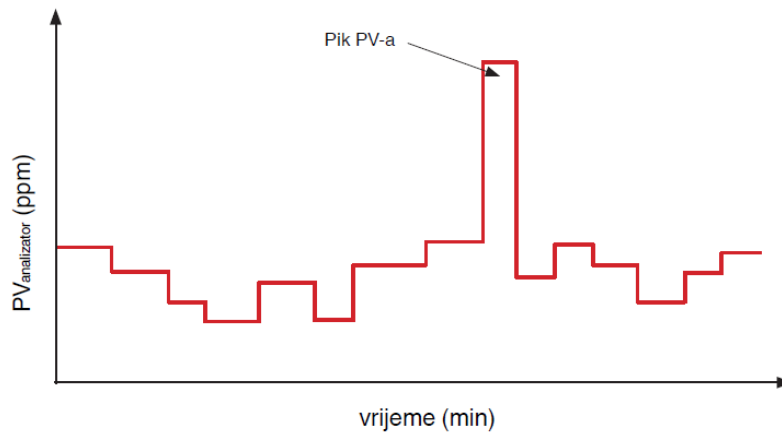
Za dijagnostiku rada regulacijskih krugova primijenjen je softverski alat Apromon pomoću kojeg je moguće kontinuirano nadzirati rad i dijagnosticirati probleme u radu industrijskih procesa i sustava za vođenje. Koristan je za sustave u kojima regulacija ne radi zadovoljavajuće. Primjenom više od 25 statističkih pokazatelja dijagnosticiraju se problemi u radu mjernih pretvornika te izvršnih elemenata. Statistički pokazatelji mogu se podijeliti u sljedeće skupine [3]:

- *Pokazatelji rada instrumenta*

Zamrznuti PV (eng. *Frozen PV*) je brojilo koliko je puta signal vođene veličine bio zamrznut (nije se mijenjao u odnosu na zadnju vrijednost). Kriterij prikazuje postotak zamrznutog PV-a u odnosu na vremenski interval analiziranih podataka.

Zasićenje PV-a (eng. *Saturation PV*) prikazuje koliko je vremena (u postocima - %) vođena veličina bila unutar 3% od njezine gornje ili donje granice.

Pik PV-a (eng. *Spike PV*) prikazuje najveće promjene vođene veličine te djeluje kao pokazatelj nestabilnosti ili poremećaja u procesu.

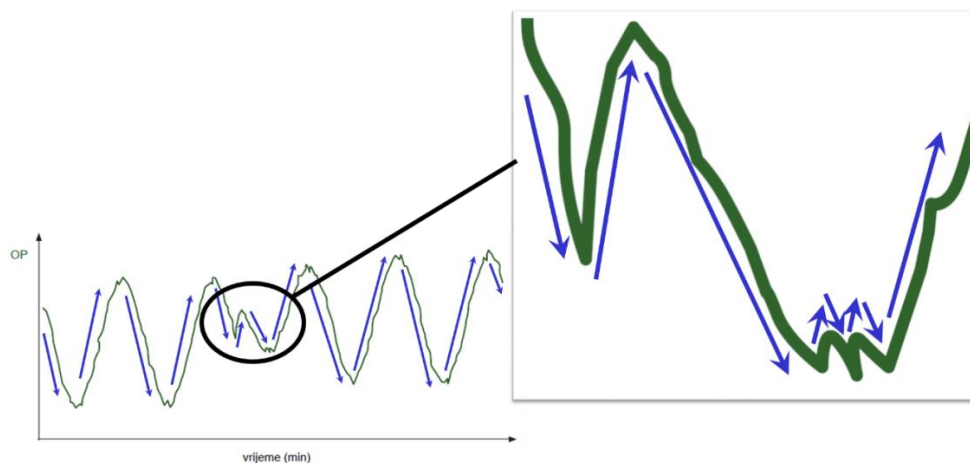


Slika 3.1. Kriterij pik PV-a

- *Pokazatelji rada ventila*

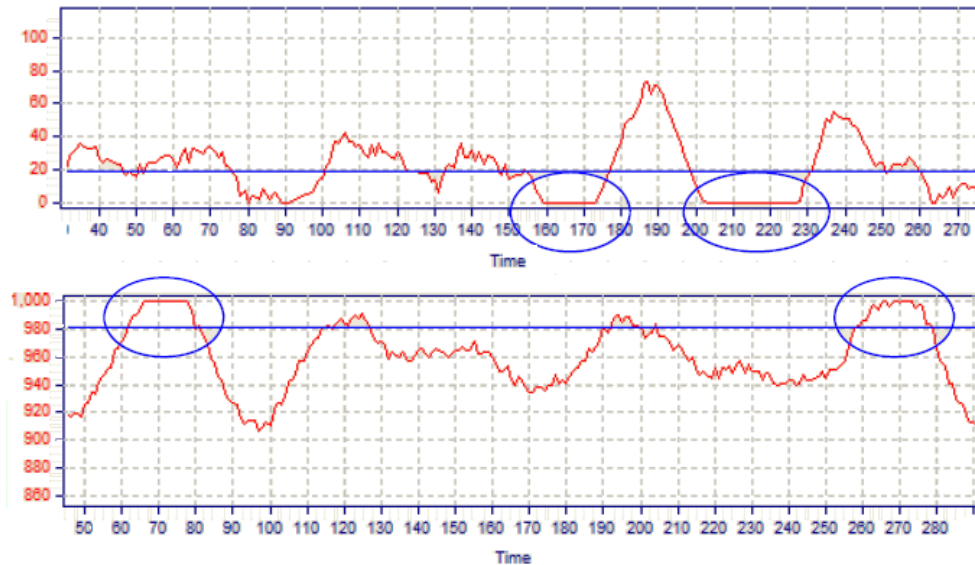
Kretanje ventila (eng. *Rope length*) prikazuje ukupno kretanja ventila tijekom definiranog vremenskog perioda. Velike vrijednosti ukazuju na prekomjerno kretanje ventila koje uzrokuje kvarove i kraće servisno vrijeme ventila.

Kolebanje ventila (eng. *Vacillation*) je brojilo promjene smjera rada ventila.



Slika 3.2. Kriterij kolebanja ventila

Zasićenje izlaza iz regulatora (eng. *Saturation OP*) prikazuje koliko je vremena (u postocima - %) izlaz iz regulatora bio iznad 90% ili ispod 10%.

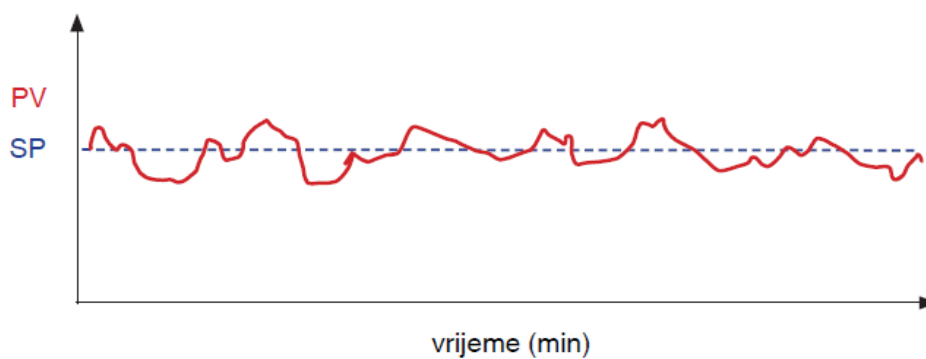


Slika 3.3. Kriterij zasićenja izlaza iz regulatora

- *Pokazatelji rada regulatora*

Integral apsolutne pogreške (eng. *Integrated Absolute Error, IAE*) je apsolutna vrijednost razlike između vođene veličine (PV) i radne točke (SP) integrirana po vremenu.

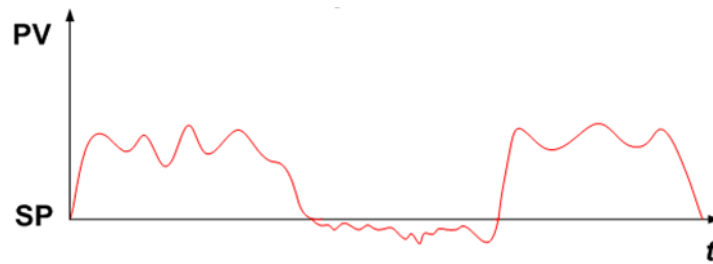
Čvrstoća regulacije (eng. *Control tightness*) je učestalost prelaska vođene veličine (PV) preko radne točke (SP). Pokazatelj je čvrstoće ugođenog regulatora (Slika 3.4.). Visoke vrijednosti kriterija opisuju čvrstu regulaciju, dok niske vrijednosti opisuju tromu regulaciju.



Slika 3.4. Kriterij čvrstoće regulacije

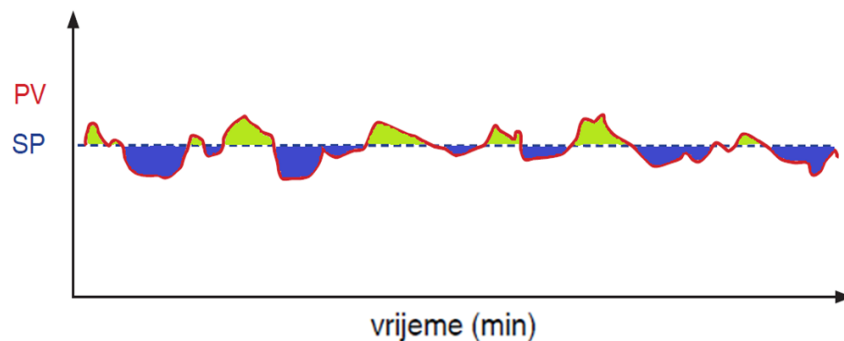
Disbalans (eng. *Imbalance*) je omjer vremena vođene veličine provedenog s obje strana radne točke. Indicira loše vođenje, velike vanjske poremećaje ili probleme s regulacijskim ventilima. Slika 3.5. prikazuje primjer kada je vrijednost kriterija disbalans veća od 1. U tom slučaju vođena veličina provodi znatno više vremena iznad radne točke u odnosu

na vrijeme koje provodi ispod radne točke. To rezultira lošim regulacijskim djelovanjem uslijed vanjskih poremećaja ili problema vezanih uz ventil.



Slika 3.5. Kriterij disbalansa PV-a

Asimetrija (eng. *Skew*) je omjer pozitivnog i negativnog integrala pogreške. Pokazatelj je tromosti rada djelovanja regulatora, pojava poremećaja u procesu ili problema na ventilu.

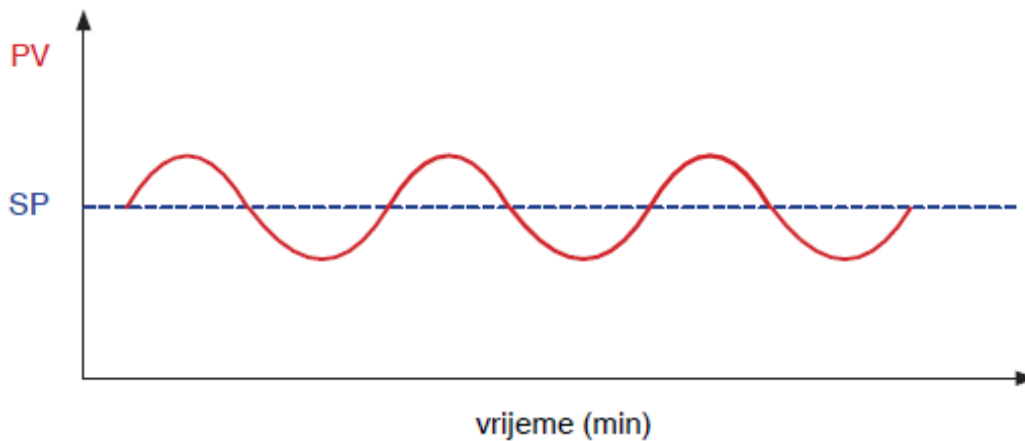


Slika 3.6. Kriterij asimetrije PV-a

Tromost (eng. *Crimp*) prikazuje omjer akumulirane promjene radne točke i akumulirane promjene vođene veličine. Pokazatelj je tromosti ili agresivnosti djelovanja regulatora. Vrijednosti veće od 1 upozoravaju na jednu od ove dvije mogućnosti:

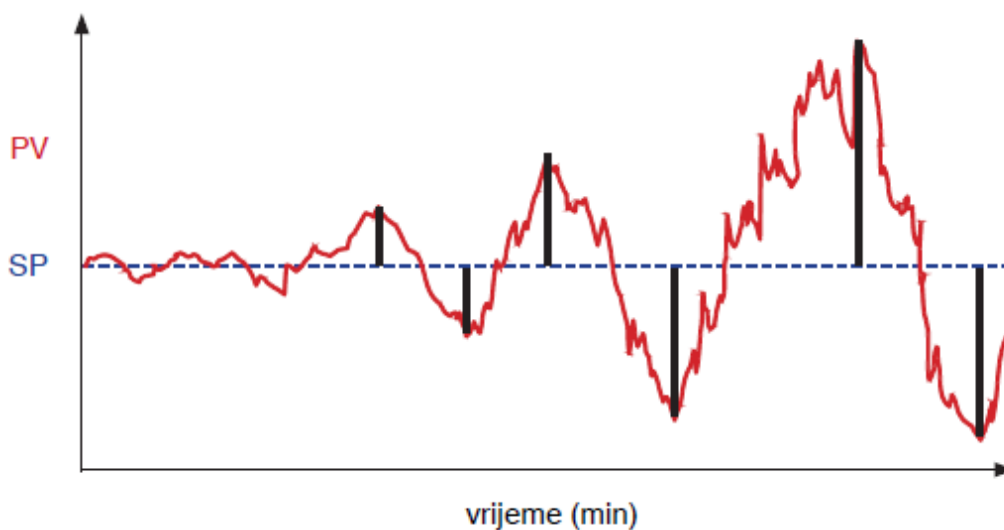
- regulacija je veoma troma i PV ne dostiže SP dovoljno brzo
- u slučaju kaskadne regulacije, primarni krug je preagresivan u odnosu na sekundarni krug

Nestabilnost (eng. *Unstable*) je pojava kontinuirane oscilacije te pokazatelj agresivnog djelovanja regulatora.



Slika 3.7. Kriterij nestabilnosti

Rastuća oscilacija (eng. *Hunting*) opisuje pojavu rastuće oscilacije u regulacijskom krugu. Pokazatelj je agresivnog djelovanja regulatora, a bilo koja pozitivna vrijednost kriterija pokazatelj je rastuće oscilacije.



Slika 3.8. Kriterij rastuće oscilacije

Softverski paket Apromon pomoću tri kriterija proračunava doprinose proporcionalnog, integracijskog i derivacijskog djelovanja PID regulatora:

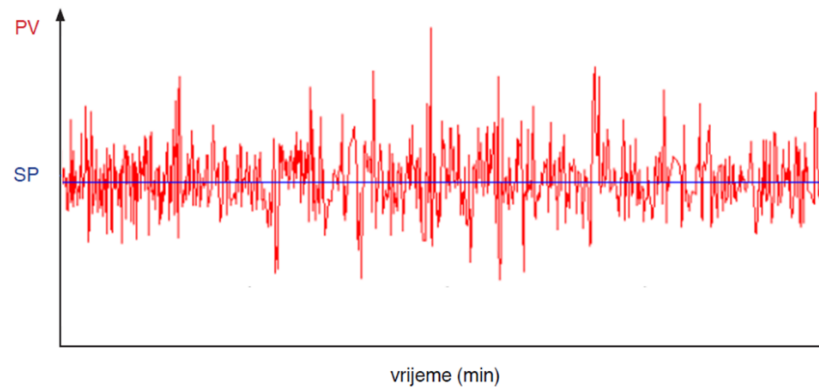
- *proporcionalni doprinos* (eng. *Proportional Contribution*)
- *integracijski doprinos* (eng. *Integral contribution*)
- *derivacijski doprinos* (eng. *Derivative Contribution*)

Intervencija (eng. *Intervene*) je kriterij koji prikazuje koliko je puta PID regulatoru bio promijenjen način vođenja, ručno ili automatski.

Vrijeme rada (eng. *Onstream factor*) prikazuje koliko je vremena (u postocima - %) regulator u automatskom ili ručnom režimu rada.

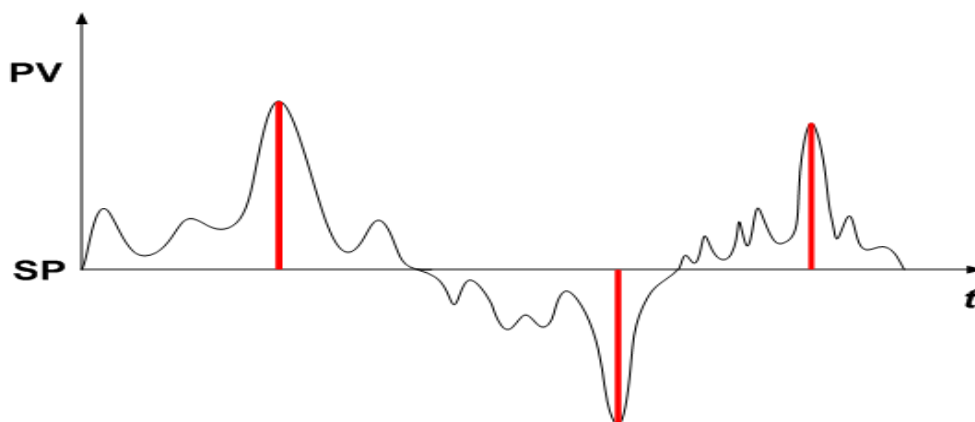
- *Pokazatelji međudjelovanja regulacijskih krugova*

Razina šuma (eng. *Noise level*) prikazuje količine šuma u signalu vođene veličine.



Slika 3.9. Kriterij razine šuma

Spektar frekvencija (eng. *Spectrum*) je kriterij koji ukazuje na prisutnost određene frekvencije signala u vođenoj veličini. Niže vrijednosti kriterija ukazuju na dominaciju jedne frekvencije što može biti usko povezano s oscilirajućim radom regulatora. Visoke vrijednosti upućuju da je signal vođene veličine sastavljen od signala nekoliko različitih frekvencija što je indikacija prisutnosti šuma ili poremećaja u signalu.



Slika 3.10. Kriterij spektra s jednom dominantnom frekvencijom

Preklapanje (eng. *Match*) je prikaz tagova i/ili regulatora u sustavu kojima se preklapaju frekvencije.

Ocjena kvalitete regulacijskog kruga je sumarni kriterij koji govori o stanju regulacije na temelju kombinacije navedenih pokazatelja kojima se dodjeljuje odgovarajući težinski koeficijent.

3.2. Metoda reduciranih gradijenata

Optimiranje parametara regulatora je važan dio unapređenja procesa jer dovodi do poboljšanja rada regulatora i samim time do boljeg izvođenja procesa. Jedna od učestalih metoda u današnjoj praksi je još uvijek *metoda pokušaja i pogreške*. Radi se o iterativnoj metodi u kojoj nasumičnom promjenom parametara regulatora gledamo posljedice na cijeli sustav.

Optimiranje parametara regulatora moguće je provesti i pomoću standardnih metoda: Ziegler-Nichols, Cohen-Coon i Lambda metoda. U današnje vrijeme, zbog sve veće modernizacije sustava i tehnologije, koristi se i metoda automatskog ugađanja regulatora. Neke jednostavnije metode ugađanja provode sami regulatori, dok se za one kompliciranije metode koriste posebno specijalizirani softverski paketi.

Na postrojenju se provodi konačno ugađanje parametara regulatora počevši s prethodno određenim parametrima. Nakon promjene parametara regulatora prati se vladanje procesa te se po potrebi ispituje na promjenu radne točke ili na pojavu poremećaja.

Za optimiranje parametara regulatora primijenio se softverski paket PiTOPS koji primjenjuje metodu reduciranih gradijenata za pronalaženje minimuma funkcije cilja. Za identificiranje parametara modela procesa kao minimum funkcije cilja uzela se pogreška između trenda vođene varijable i izlaza iz modela. Kod optimiranja parametara regulatora minimum funkcije cilja predstavlja pogreška između vođene varijable i radne točke. Metoda u iterativnim koracima proporcionalnim negativnoj vrijednosti gradijenta funkcije u trenutačnoj točki proračunava minimum funkcije cilja [7].

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:

$$b = a - \gamma \cdot \nabla F(a) \quad (8)$$

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 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ koji prati slijedeći izraz:

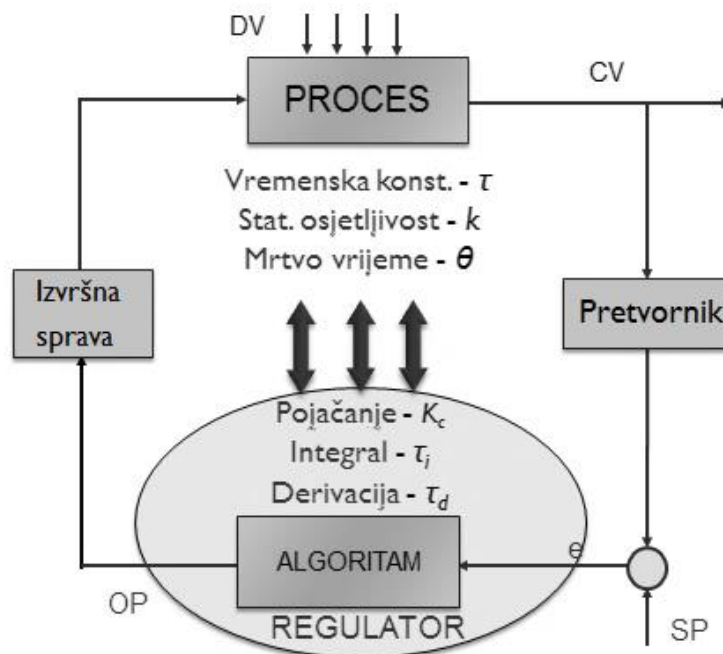
$$x_{n+1} = x_n - \gamma_n \nabla F(x_n), \quad n \geq 0. \quad (9)$$

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

$$F(x_0) \geq F(x_1) \geq F(x_2) \geq \dots \geq F(x_n) \quad (10)$$

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 postizanje lokalnog minimuma.

Ova metoda optimiranja je veoma popularna zbog jednostavne provedbe, brzog proračuna i mogućnosti optimiranja parametara empirijskih modela. Za optimalno vođenje procesa važno je ugoditi parametre regulatora prema parametrima procesa kao što je prikazano na slici 3.11.



Slika 3.11. Ugađanje parametara regulatora prema parametrima procesa

3.3. Statistička analiza procesa

Kvaliteta proizvoda u današnje vrijeme predstavlja primarni i strateški cilj svake velike tvrtke te glavni alat kojim se postiže konkurentnost na tržištu. Na osiguravanje i poboljšavanje kvalitete procesa i proizvoda važan utjecaj imaju zakonski propisi, zahtjevi za većom sigurnošću i zaštitom okoliša, ali i zahtjevi potrošača odnosno korisnika proizvoda i usluga [2, 5, 6].

Statistička procesna kontrola definira se kao primjena statističkih metoda za mjerenje i analizu varijabilnosti (varijacija) u nekom procesu, a osnovni alat za praćenje i ispitivanje statističke kontrole proizvoda ili procesa su kontrolni dijagrami. Najčešće korišteni kontrolni dijagrami su Shewertovi X i S dijagrami te CUSUM (eng. *Cumulative Sum*) i EWMA (eng. *Exponentially Weighted Moving Average*) dijagrami. Procesna kontrola kvalitete obuhvaća i analizu te proračun indeksa mogućnosti procesa (eng. *Process Capability Analysis*) koji pokazuju u kojoj mjeri proces koji je pod statističkom kontrolom zadovoljava željene specifikacije proizvoda [14].

3.3.1. X kontrolni dijagram

Ova statistička metoda naziva se još i koncept racionalnih podgrupa budući da se njome analizira određeni broj podgrupa koje se zatim uspoređuju.

Centralna (središnja) vrijednost na kontrolnom dijagramu računa se kao srednja vrijednost ($\bar{\bar{x}}$) aritmetičkih sredina svake podgrupe (\bar{x}). Varijabilnost procesa se onda promatra se kao odstupanje srednjih vrijednosti grupa (\bar{x}) od cjelokupne srednje vrijednosti ($\bar{\bar{x}}$).

Srednja vrijednost podgrupe računa se kao:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{i,j} , \quad (11)$$

a izraz za standardnu devijaciju podgrupe glasi:

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [(x_{i,j}] - \bar{x}_i)^2} , \quad (12)$$

gdje je n – broj mjerenja u podgrupi, a $x_{i,j}$ – j-to mjerenje u i-toj podgrupi.

Ukupna srednja vrijednost računa se prema sljedećem izrazu:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{x}_i, \quad (13)$$

a prosječna standardna devijacija kao:

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, \quad (14)$$

gdje N označava broj podgrupa.

Procijenjena standardna devijacija računa se prema izrazu (15) koji sadrži konstantu c_4 koja ovisi o broju mjerenja u svakoj podgrupi (n).

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{1}{C_4 \sqrt{n}} \bar{s}. \quad (15)$$

Tablica 2. Vrijednosti konstante c_4

Veličina podgrupe (n)	Vrijednost konstante c_4
2	0,7979
3	0,8862
4	0,9213
5	0,9400
6	0,9515
7	0,9594
8	0,9650
9	0,9693
10	0,9727
15	0,9823
25	0,9896

Gornja kontrolna granica izračunava se kao:

$$UCL = T + c\sigma_x, \quad (16)$$

a donja kontrolna granica prema izrazu:

$$LCL = T - c\sigma_x, \quad (17)$$

gdje je T (eng. *Target*) – ciljana vrijednost, odnosno ukupna srednja vrijednost.

3.4.2. S kontrolni dijagram

S kontrolni dijagram je u svojoj osnovi vrlo sličan X kontrolnom dijagramu, samo što se u ovom slučaju promjenjivost procesa promatra pomoću standardne devijacije. Ta razlika uvjetuje i drugačiji način definiranja kontrolnih granica pri čemu izraz za proračun gornje kontrolne granice glasi:

$$UCL = B_4s, \quad (18)$$

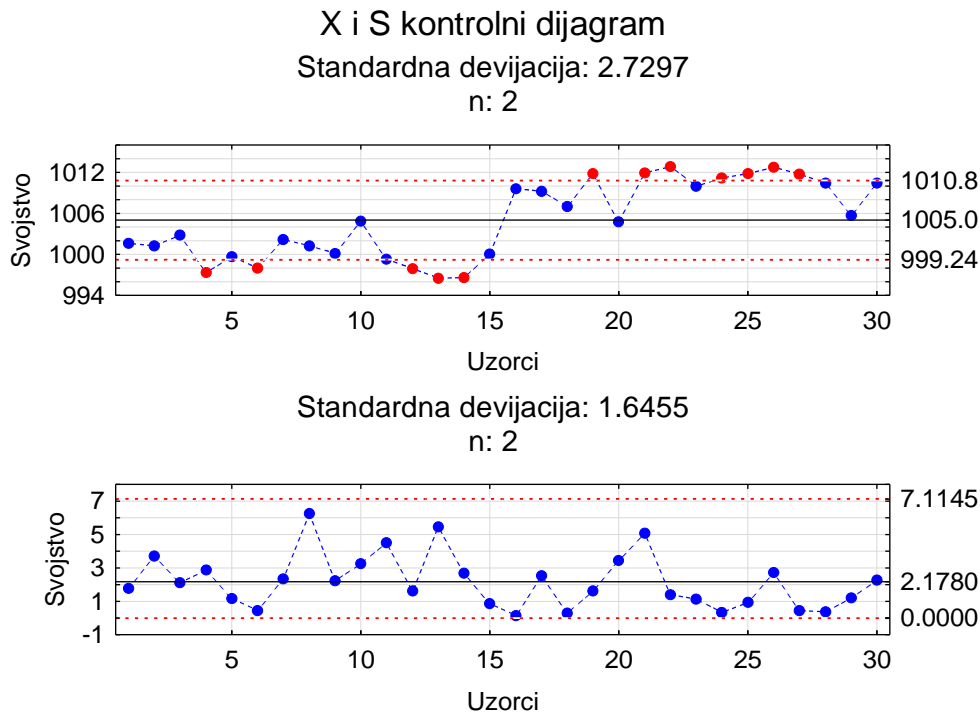
dok se donja kontrolna granica izračunava na sljedeći način:

$$LCL = B_3s. \quad (19)$$

Pri proračunu standardne devijacije koriste se izrazi (12) i (14), a gornja i donja kontrolna granica definiraju se pomoću konstanti B_4 i B_3 danima u tablici 3. i ovise o broju mjerenja unutar podgrupe.

Tablica 3. Vrijednosti konstanti B_4 i B_3

Veličina podgrupe (n)	Vrijednost konstante B_4	Vrijednost konstante B_3
2	3,267	0
3	2,568	0
4	2,266	0
5	2,089	0
6	1,970	0,030
7	1,882	0,118
8	1,815	0,185
9	1,761	0,239
10	1,716	0,284
15	1,572	0,428
25	1,435	0,565



Slika 3.12. *Primjer X i S kontrolnog dijagrama*

Budući da prilikom vođenja procesa ponekad i male varijacije mogu uzrokovati značajne poremećaje, za praćenje industrijskih procesa i kvalitete proizvoda primjenjuju se osjetljiviji kontrolni dijagrami kao što su CUSUM i EWMA. Veća osjetljivost tih kontrolnih dijagrama proizlazi iz toga što se prilikom proračuna uzimaju u obzir i podaci prethodnih mjerenja [14].

3.3.3. CUSUM kontrolni dijagram

CUSUM kontrolni dijagram se često koristi za praćenje industrijskih procesa budući da je u stanju otkriti i jako malo varijacije koje se ne mogu prepoznati korištenjem X i S kontrolnih dijagrama. Proračun se temelji na kumulativnoj sumi odstupanja mjerne varijable x od ciljane vrijednosti označene s T . Ciljanu vrijednost najčešće se zadaje ovisno o željenim specifikacijama procesa, odnosno proizvoda. Na isti način se mogu odabrati gornja i donja kontrolna granica.

Općeniti izraz za kumulativnu sumu glasi:

$$C(k) = \sum_{j=1}^k [(\bar{x}_1(j) - T)] \quad , \quad (20)$$

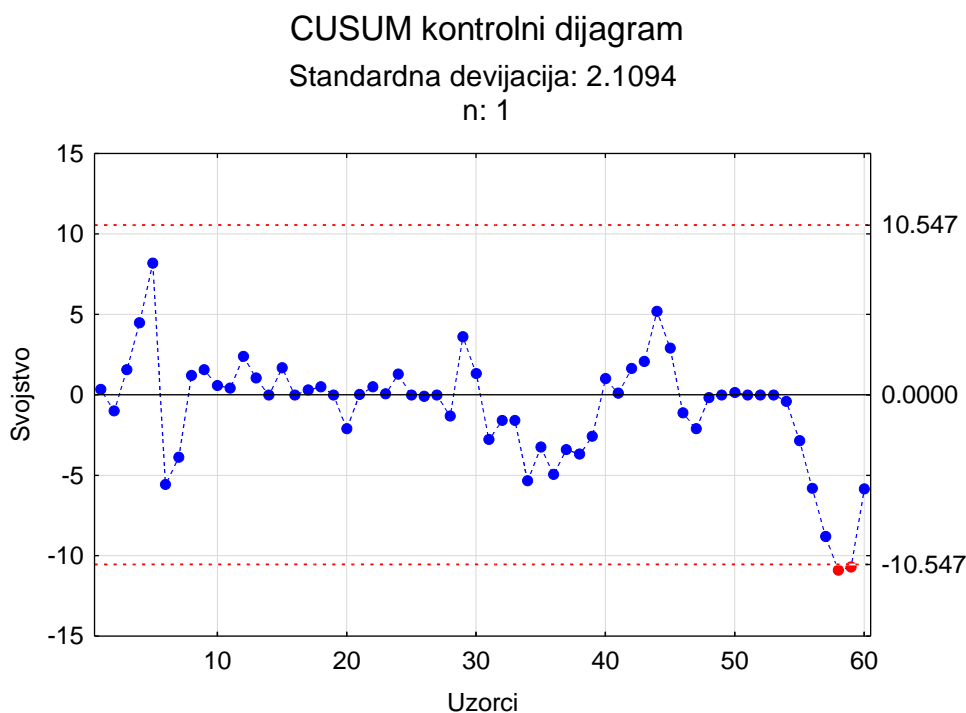
pri čemu je k – konstanta koja odgovara dopuštenom odstupanju, a njena vrijednost se određuje na temelju iskustvenih pravila ovisno o vrsti procesa koji se prati. Za industrijske procese ta konstanta najčešće poprima vrijednost $k = 3$.

Budući da mjerna varijabla x može od ciljane vrijednosti T odstupati u pozitivnom i negativnom smjeru, za konstruiranje kontrolnih dijagrama definiraju se dvije vrste kumulativne sume: $C^+(k)$, koja sumira odstupanje u pozitivnom smjeru te $C^-(k)$ koja sumira odstupanja u negativnom smjeru. Te se vrijednosti izračunavaju prema sljedećim izrazima:

$$C^+(k) = \max[0, \bar{x}(k) - (T + k) + C^+(k - 1)], \quad (21)$$

$$C^-(k) = \max[0, (T - k) - \bar{x}(k) + C^-(k - 1)]. \quad (22)$$

Proračun započinje s pretpostavkom da su početne vrijednosti suma $C^+(0)$ i $C^-(0)$ jednake nuli budući da na početku postoji samo jedna mjerna točka te se ne može izračunati odstupanje. Primjer CUSUM kontrolnog dijagrama dan je na slici 3.13.



Slika 3.13. *Primjer CUSUM kontrolnog dijagrama*

3.3.4. EWMA (eng. *Exponentially Weighted Moving Average*)

EWMA proračun se temelji na eksponencijalnoj usporedbi podataka uzastopnih mjerenja u svrhu detekcije malih pomaka (odstupanja) u procesu. Tom metodom se izračunava prosjek izmjerenih vrijednosti pri čemu podaci dobivaju sve manju težinu što su vremenski udaljeniji od početnog mjerenja.

Proračun se temelji na sljedećem izrazu koji vrijedi za $t = 1, 2, 3, \dots, n$:

$$EWMA_t = \lambda * Y_t + (1 - \lambda) * EWMA_{t-1}, \quad (23)$$

gdje je $EWMA_0$ – pomična srednja vrijednost prikupljenih podataka (ciljana vrijednost), Y_t – mjerenje u vremenu t , n – broj mjerenja, λ – konstanta koja poprma vrijednosti između 0 i 1 te $EWMA_{t-1}$ – pomična srednja vrijednost podataka u prethodnom mjernom trenutku.

Ako je $\lambda = 1$, samo „novija“ mjerenja utječu na vrijednost $EWMA_t$, a ako je $\lambda = 0$ veću težinu će imati stariji podaci. Najčešće se u proračunu koristi vrijednost λ između 0,1 i 0,3, a postoje i brojne tablične vrijednosti koji se biraju prema vrsti mjerenja i ostalim parametrima promatranog procesa.

Gornja kontrolna granica EWMA dijagrama računa se prema izrazu:

$$UCL = T + 3\sigma_x \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda}}, \quad (24)$$

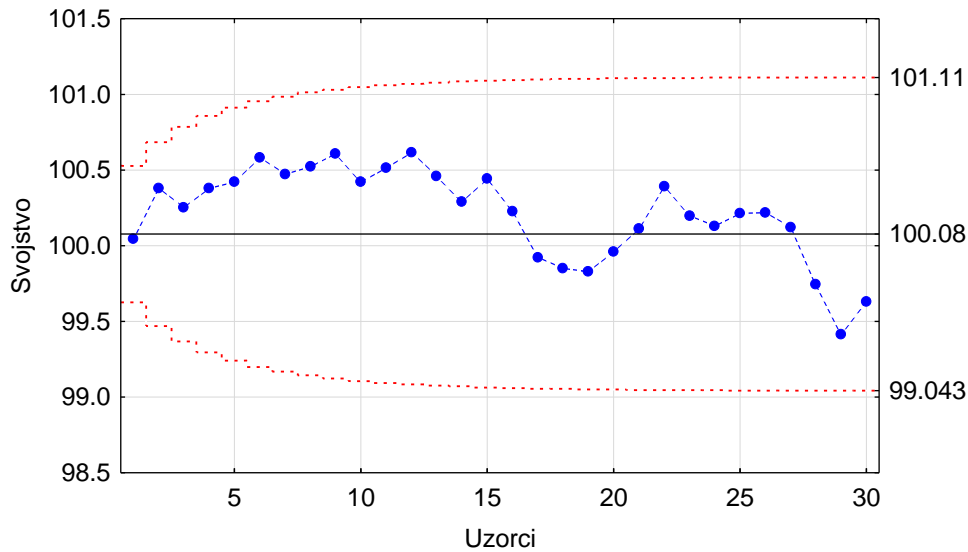
a donja kontrolna granica se definira na sličan način:

$$LCL = T - 3\sigma_x \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda}}, \quad (25)$$

gdje je T – ciljana vrijednost, a $\hat{\sigma}_x$ – procijenjena standardna devijacija izračunata prema izrazu (15).

Za provedbu ove statističke metode potrebni su reprezentativni podaci iz procesa jer se iz tih podataka izračunava ciljana vrijednost (T). Ciljana vrijednost se, kao i kod CUSUM kontrolnog dijagrama, može odabrati i prema zahtijevanim specifikacijama proizvoda. Zatim se može se započeti s praćenjem vladanja procesa u vremenu. Primjer EWMA kontrolnog dijagrama dan je na slici 3.14.

EWMA kontrolni dijagram
Standardna devijacija: 2.1275
n: 2
Lambda: 0.1



Slika 3.14. *Primjer EWMA kontrolnog dijagrama*

U slučaju EWMA kontrolnog dijagrama treba naglasiti jednu važnu razliku u odnosu na ostale kontrolne dijagrame obrađene u ovom radu. Naime, na slici 3.14. može se vidjeti da kontrolne granice nisu ravne linije već su pomične i postaju s vremenom sve šire budući da pomak u vremenu obuhvaća sve veći broj podataka.

3.3.5. Sposobnost procesa

Pored toga što se industrijski procesi analiziraju pomoću prethodno navedenih kontrolnih dijagrama, za njih se mogu računati i indeksi sposobnosti. Sposobnost procesa (eng. *Process capability*) pokazuje u kojoj mjeri proces koji je pod kontrolom zadovoljava gornju i donju specifikacijsku granicu proizvoda [6, 15].

Sposobnost procesa (C_p) računa se prema sljedećem izrazu:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}, \tag{26}$$

pri čemu je USL – gornja specifikacijska granica, LSL – donja specifikacijska granica, a σ – standardna devijacija.

Ukoliko C_p poprimi vrijednost veću od 1, to znači da se proces može provesti od početka do kraja i pritom dati određenu kvalitetu proizvoda. Međutim, to istovremeno ne govori o kvaliteti proizvoda te se u tu svrhu provodi proračun indeksa sposobnosti procesa (C_{pk}).

3.4.6. Indeks sposobnosti procesa

Indeks sposobnosti procesa (C_{pk}) služi za praćenje varijacija na specifikacijskim granicama nekog proizvoda. Koristi se za kratkotrajna mjerenja, a njegova vrijednost ukazuje na kvalitetu proizvoda i na njegovu sposobnost da zadovolji zakonske propise vezane uz kvalitetu te zahtjeve kupaca i krajnjih korisnika. Za proračun C_{pk} potrebno je poznavati gornju (USL) i donju (LSL) specifikacijsku granicu te standardnu devijaciju, a krajnji izraz glasi [6, 15]:

$$C_{pk} = \frac{\min[\bar{x} - LSL, USL - \bar{x}]}{3\sigma} \quad (27)$$

Prema izrazu (27) proizvod je kvalitetniji što njegovo mjereno svojstvo manje odstupa od ciljane vrijednosti \bar{x} .

4. Rezultati

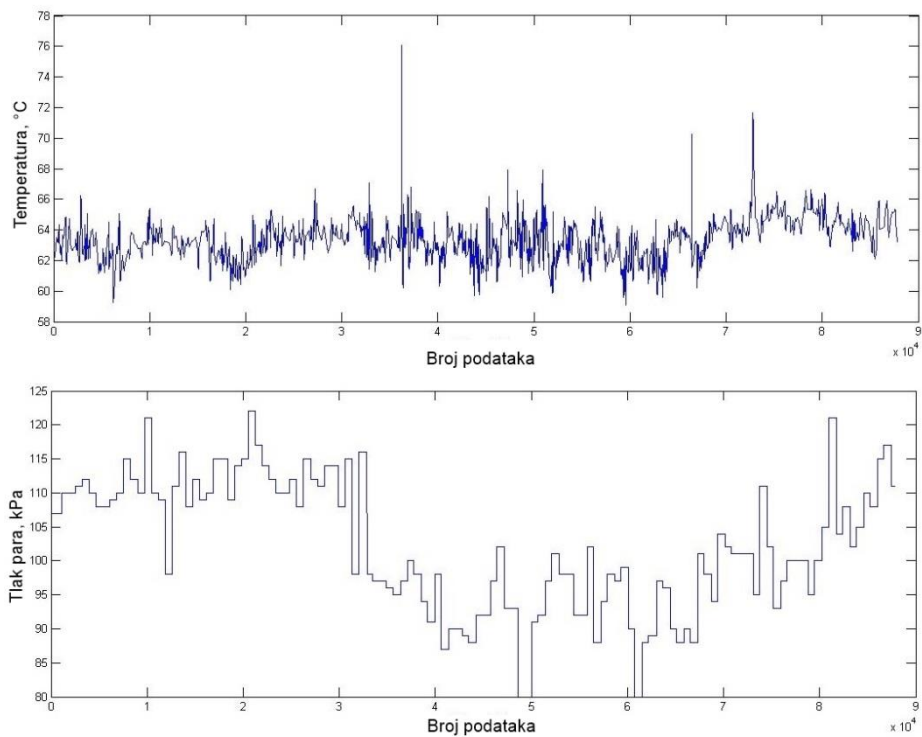
4.1. Linearne korelacije

Kako bi pokazali utjecaj regulacijskog kruga na određeno svojstvo kvalitete proizvoda izračunati su Pearsonovi koeficijenti korelacije (R). Pearsonov koeficijent korelacije predstavlja mjeru linearne povezanosti dviju normalno distribuiranih varijabli. U ovom radu su to vođena veličina regulacijskog kruga (PV) i svojstvo proizvoda određeno laboratorijskom analizom. Ako ne postoji korelacija između ulazne i izlazne varijable, onda je koeficijent korelacije jednak nuli, a ako korelacija postoji onda se koeficijent korelacije nalazi u rasponu od minus 1 do 1 [4].

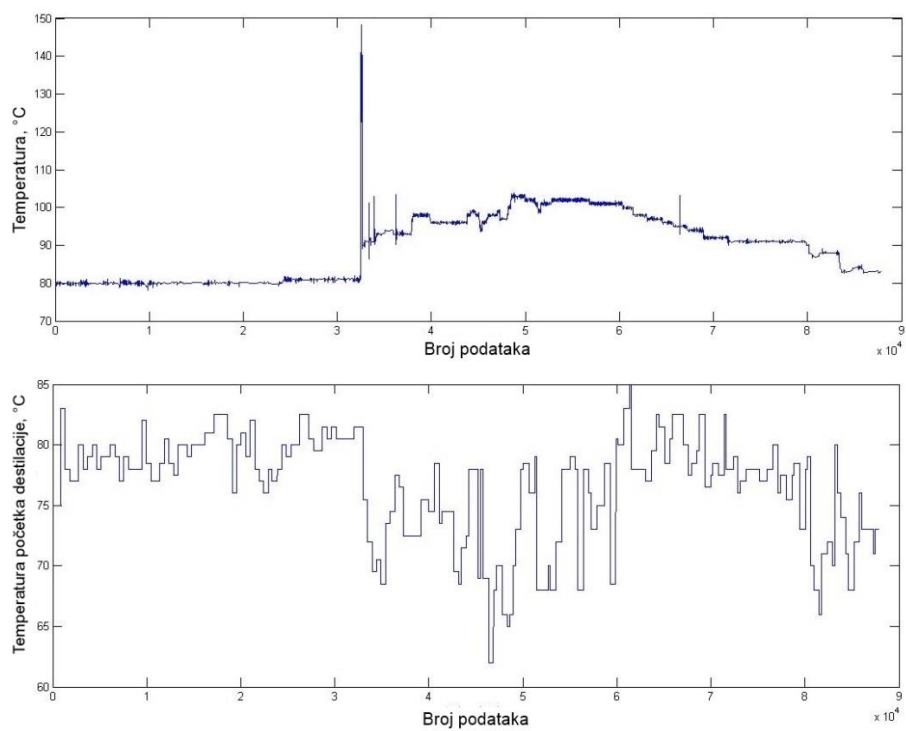
Izračun korelacija je proveden u softverskom paketu Statistica 12.5, a rezultati su prikazani u tablici 4. te potkrijepljeni i prikazima procesnih varijabli i svojstava kvalitete u određenom periodu (slike 4.1. do 4.5.).

Tablica 4. *Korelacije za promatrana svojstva*

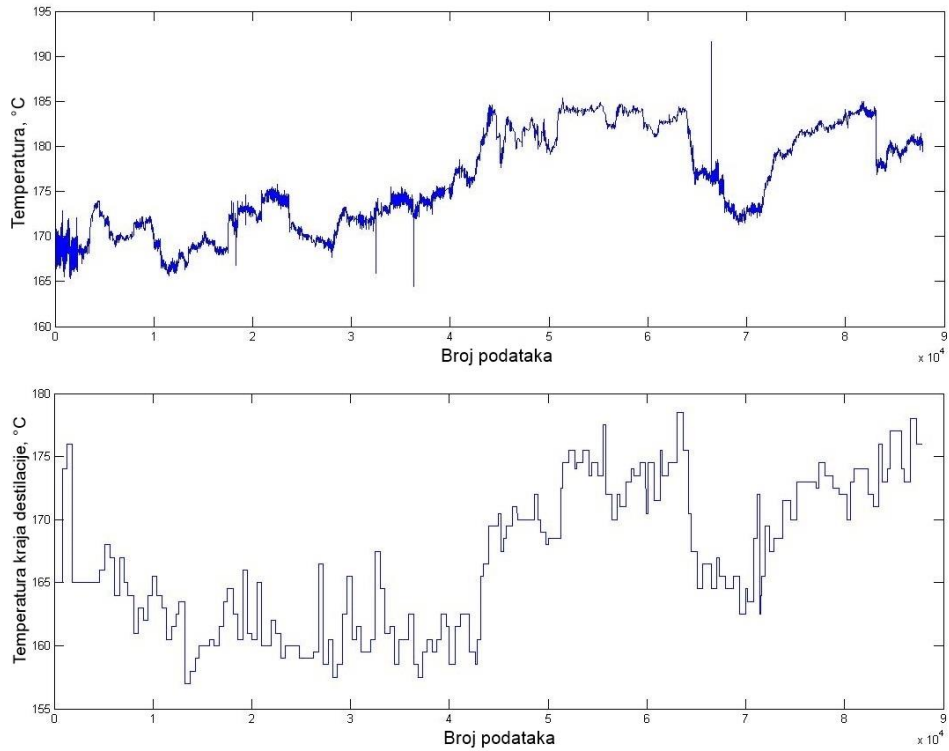
Regulacijski krug	Proizvod	Praćeno svojstvo	Korelacija
TC157 / FC30	LAKI BENZIN (LB)	TLAK PARA	0,11
TC33 / FC32			0,70
TC162 / FC36	TEŠKI BENZIN (TB)	POČETAK DESTILACIJE	-0,41
TC7 / FC13		KRAJ DESTILACIJE	-0,48
FC24	LAKO PLINSKO ULJE (LPU)	TOČKA ZAMUĆENJA	-0,45
		FILTRABILNOST	-0,40



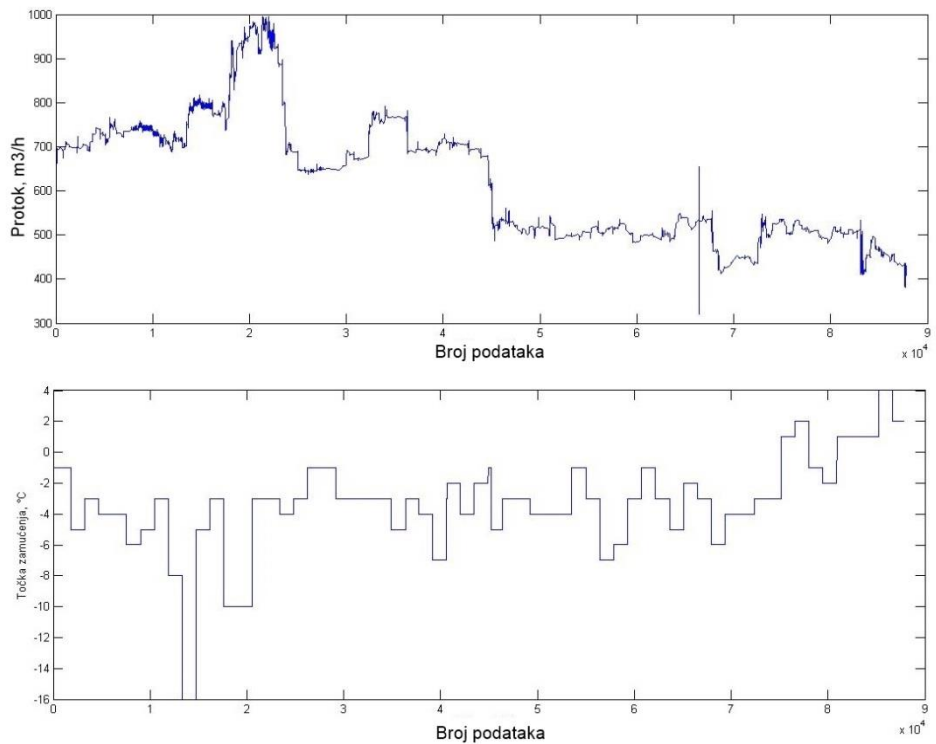
Slika 4.1. Usporedba trendova promjene temperature vrha kolone C-4 i tlaka para lakog benzina



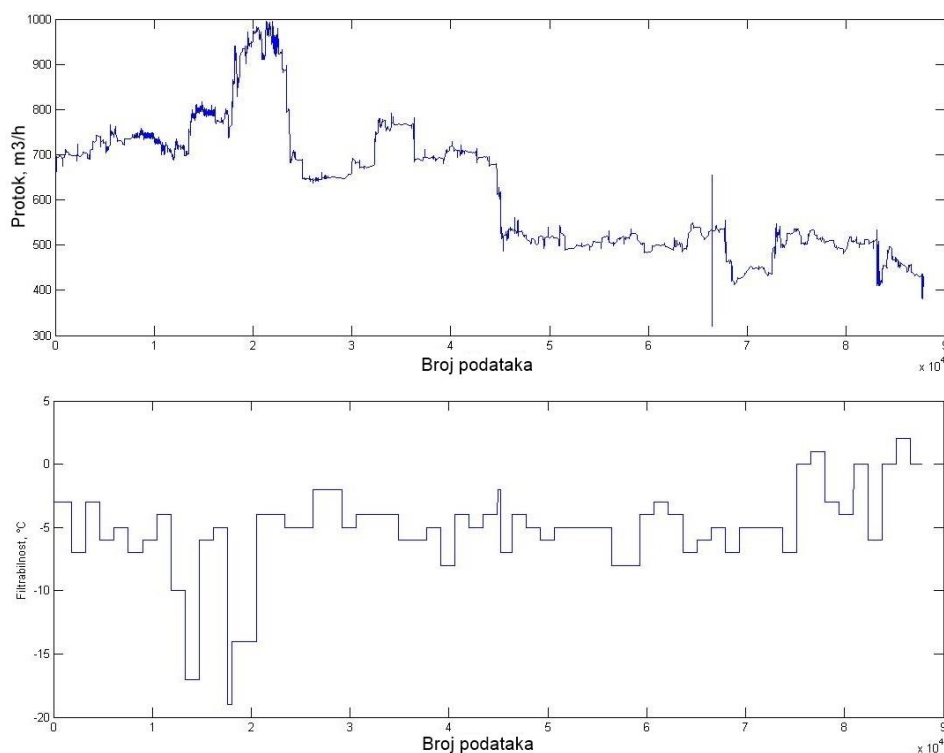
Slika 4.2. Usporedba trendova temperature vrha kolone C-5 i početka destilacije teškog benzina



Slika 4.3. Usporedba trendova temperature vrha kolone C-1 i kraja destilacije teškog benzina



Slika 4.4. Usporedba trendova protoka pare u koloni C-2C i točke zamućenja LPU



Slika 4.5. *Usporedba trendova protoka pare u koloni C-2C i
točke filtrabilnosti LPU*

Iz prikaza procesnih varijabli temperature i protoka i pripadajućih svojstava kvalitete vidljivo je da trend promjena vođenih veličina utječe na trend svojstava kvalitete što dodatno ukazuje na postojanje korelacije, odnosno na utjecaj regulacije na promatrano svojstvo.

4.2. Dijagnostika rada regulacijskih krugova

Nakon što su statističkom analizom izdvojeni regulacijski krugovi s najvećim utjecajem na svojstva međuprodukata atmosfertske destilacije, provedena je dijagnostika rada. Analiza je provedena za devet regulacijskih krugova s tim da su u tablicama 5. i 6. prikazani brojčani za najvažnije kriterije prije i poslije optimiranja primarnih krugova temperature i regulacijskog krug protoka.

Tablica 5. Kriteriji rada regulatora prije optimiranja

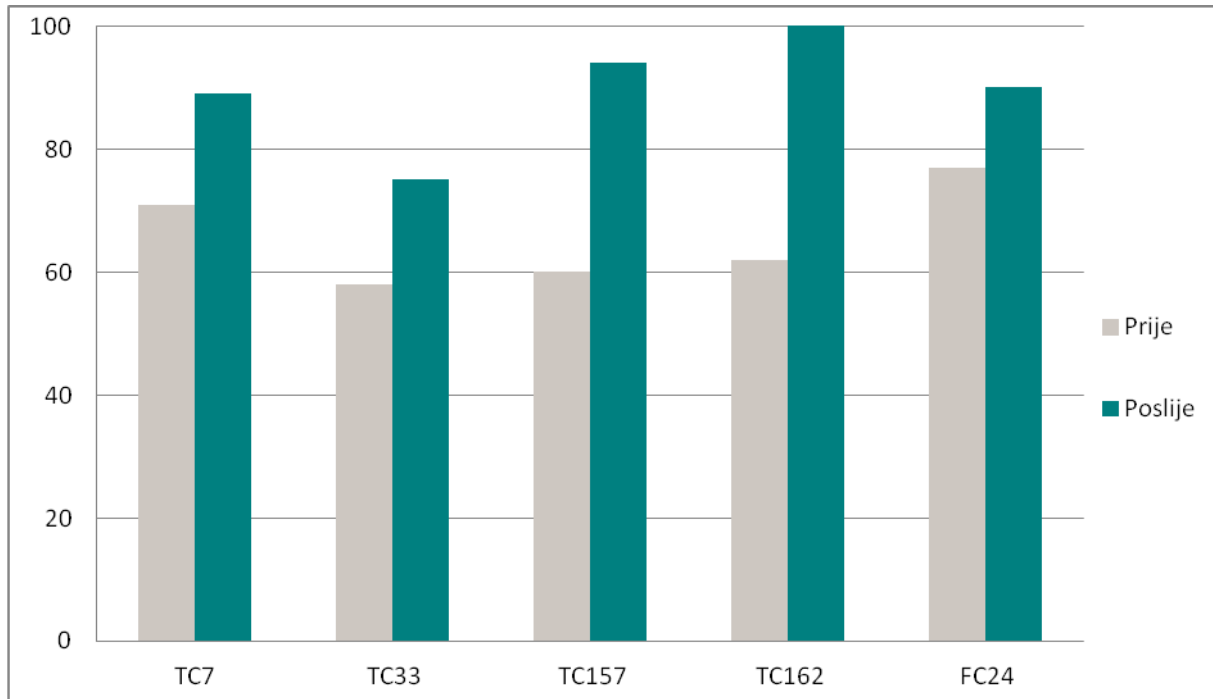
Kriteriji	Regulacijski krug				
	TC7	TC33	TC157	TC162	FC24
Vrijeme rada, %	100	100	58,39	100	100
Pogreška, EU	0,51	0,62	0,38	0,13	2,13
Čvrstoća regulacije	1,87	0,13	0,49	0,25	3,25
Disbalans	1,06	31,02	2,21	32,70	1,12
Asimetrija	1,98	50	2,85	721,50	1,27
Ocjena	71	58	60	62	77

Tablica 6. Kriteriji rada regulatora poslije optimiranja

Kriterij	Regulacijski krug				
	TC7	TC33	TC157	TC162	FC24
Vrijeme rada, %	100	100	100	100	100
Pogreška, %	0,07	0,29	0,05	0,01	0,29
Čvrstoća regulacije	4,69	7,63	5,72	9,89	293,71
Disbalans	1,74	1,01	1,49	1,11	1,14
Asimetrija	2,53	2,39	1,99	1,01	1,12
Ocjena, %	89	75	94	100	90

Regulacijski krugovi (TC7, TC33, TC162 i FC24) prije i poslije optimiranja rade u automatskom režimu rada, osim kruga TC157 koji je prije optimiranja oko 42% vremena radio ručno. Nakon optimiranja i taj krug je u potpunosti radi u automatskom režimu. Dodatna poboljšanja rada regulacije nakon optimiranja vidljiva su u kriteriju pogreške čija se vrijednost nakon optimiranja smanjila za sve promatrane krugove. Vrijednosti ostalih kriterija - čvrstoća regulacije, disbalans i asimetrija – ovise o pojedinačnom procesu i regulacijskom

krugu. Ukupna poboljšanja regulacije iskazana su konačnom ocjenom koja uzima u obzir sve kriterije na način da im se dodjeljuje odgovarajući težinski koeficijent.



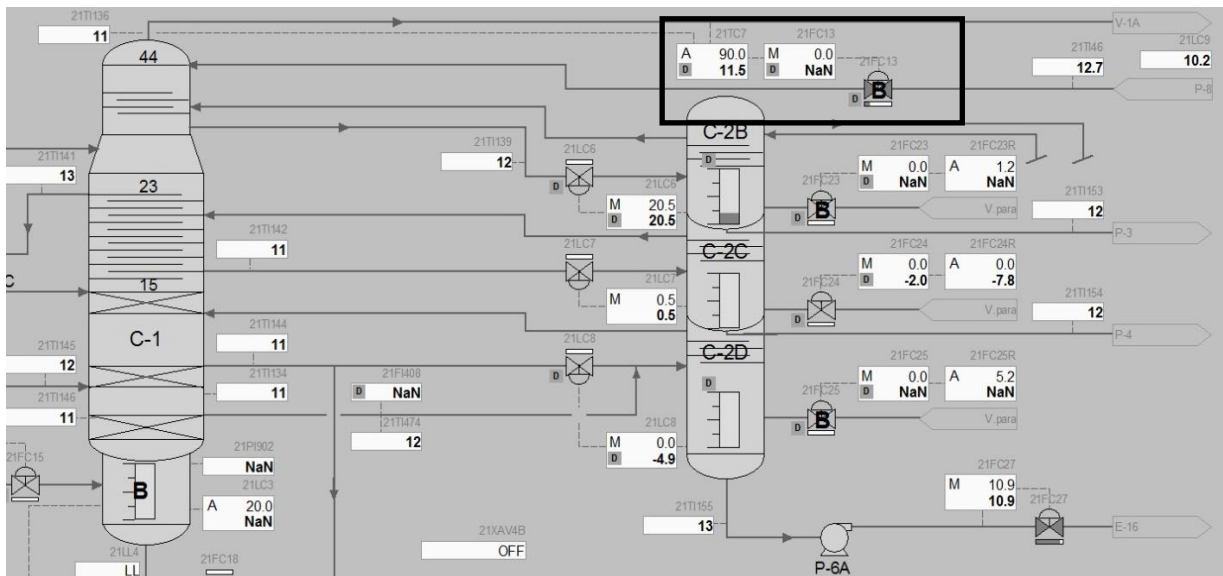
Slika 4.6. Usporedba kriterija ocjene prije i poslije optimiranja

Na temelju slike 4.6. može se zaključiti da je rad svih regulacijskih krugova znatno poboljšán.

Optimirani regulacijski krugovi temperature su primarni krugovi u kaskadnom način rada; TC7/FC13, TC33/FC32, TC157/FC30, TC162/FC36. Položaj i uloge navedenih kaskadni regulatora i regulacijskog kruga protoka FC24 navedene su u nastavku.

4.2.1. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-1 (TC7/FC13)

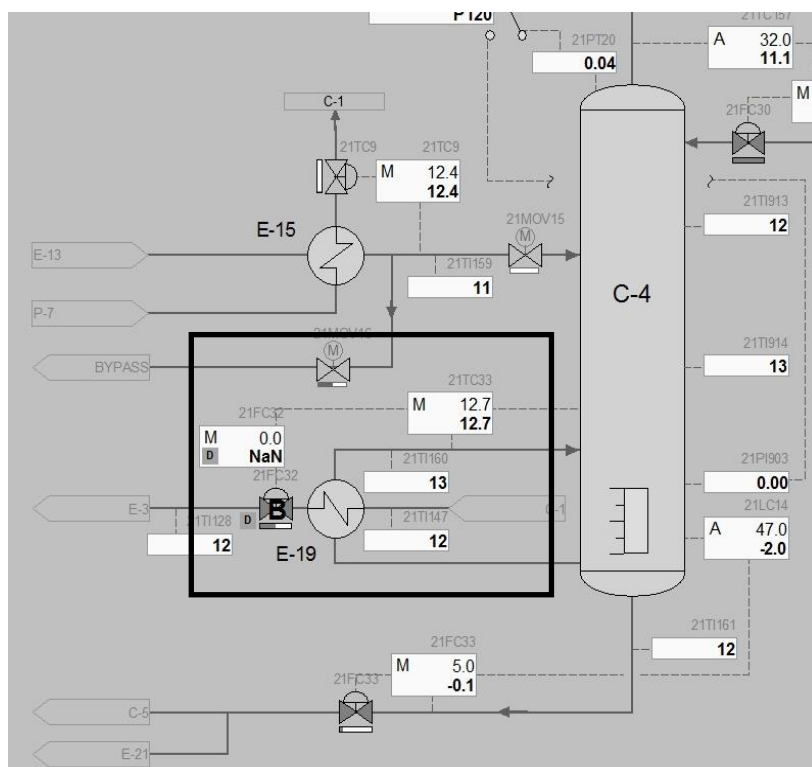
Regulacijski krugovi smješteni su na vrhu atmosfere kolone C-1 i služe za regulaciju temperature vrha kolona (Slika 4.7.) pomoću protoka refleksa vršnog produkta (lakog i teškog benzina). Primarni krug (eng. *Master*) je 21TC7, dok je 21FC13 sekundarni krug (eng. *Slave*).



Slika 4.7. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-1

4.2.2. Kaskadna regulacija temperature dna kolone C-4 (TC33/FC32)

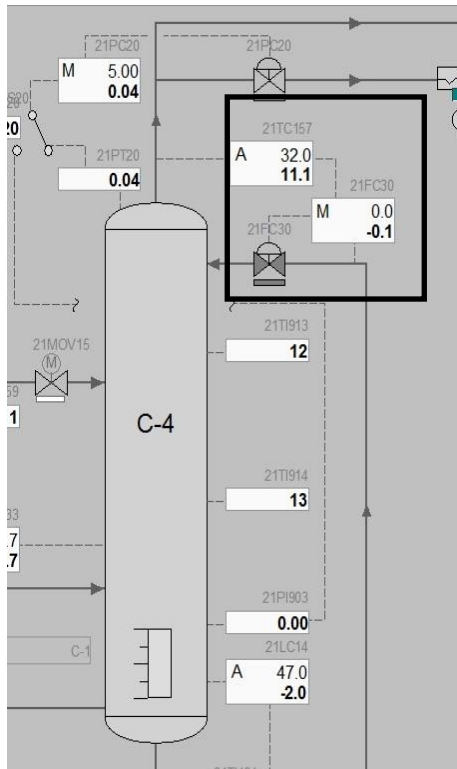
Regulacijski krugovi smješteni su pri dnu stabilizacijske kolone C-4 (Slika 4.8.) i služe za regulaciju temperature dna kolone preko protoka izmjenjivača topline E-19. Primarni krug je 21TC33, dok je 21FC32 sekundarni krug.



Slika 4.8. Kaskadna regulacija temperature dna kolone C-4

4.2.3. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-4 (TC157/FC30)

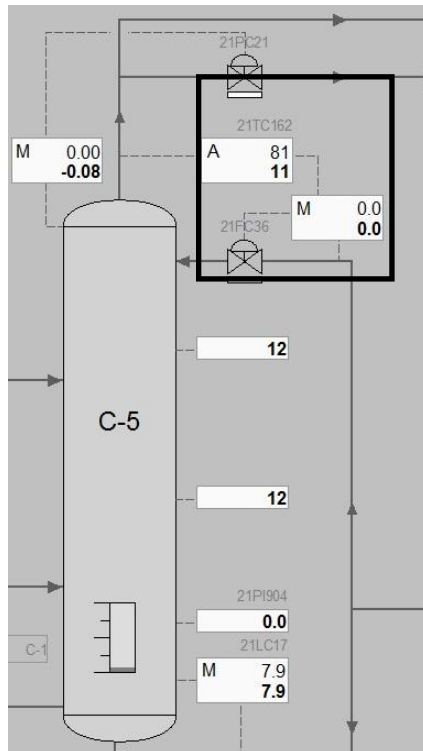
Regulacijski krugovi smješteni su na stabilizacijskoj koloni C-4 (Slika 4.9.) i koriste se za regulaciju temperature vrha kolone pomoću protoka refluksa. Primarni krug (eng. *Master*) je 21TC157, dok je 21FC30 sekundarni krug (eng. *Slave*).



Slika 4.9. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-4

4.2.4. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-5 (TC162/FC36)

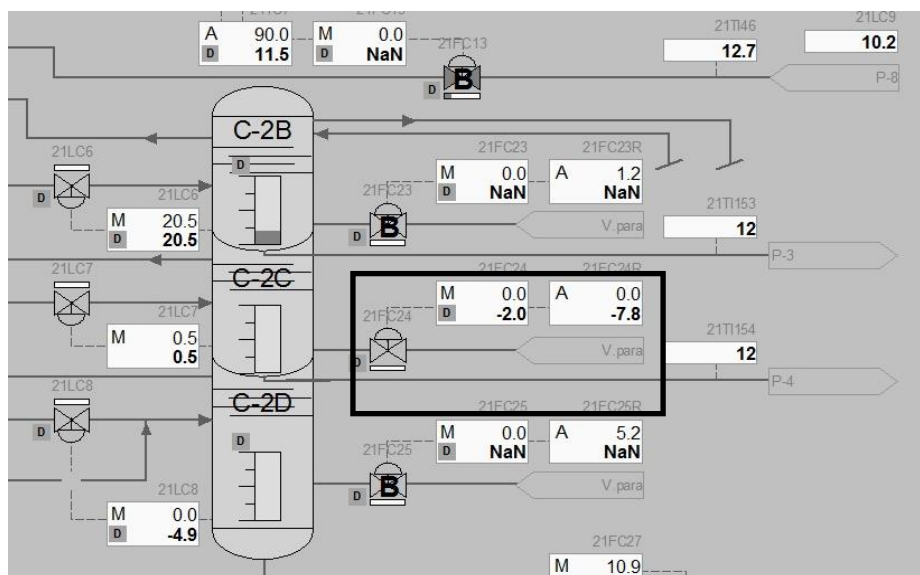
Regulacijski krugovi smješteni su na spliterskoj koloni C-5 (Slika 4.10.) u kojoj se provodi odvajanje lakog i teškog benzina. Regulacija temperature vrha kolone odvija se pomoću protoka refluksa. Primarni krug (eng. *Master*) je 21TC162, dok je 21FC36 sekundarni krug (eng. *Slave*).



Slika 4.10. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-5

4.2.5. Regulacija protoka vodene pare u striper C-2C (FC24)

Regulacijski krug služi za regulaciju protoka vodene pare na ulazu u kolonu za stripiranje C-2C lakog plinskog ulja (Slika 4.11.) i radi u automatskom režimu rada.



Slika 4.11. Regulacija protoka vodene pare u striper C-2C

4.3. Identifikacija modela i optimiranje parametara regulatora

Identificiranje modela procesa i optimiranje parametara regulatora provedeno je metodom reduciranih gradjenata, a dobiveni rezultati prikazani su u tablicama 7. i 8.

Tablica 7. Rezultati identifikacije modela procesa

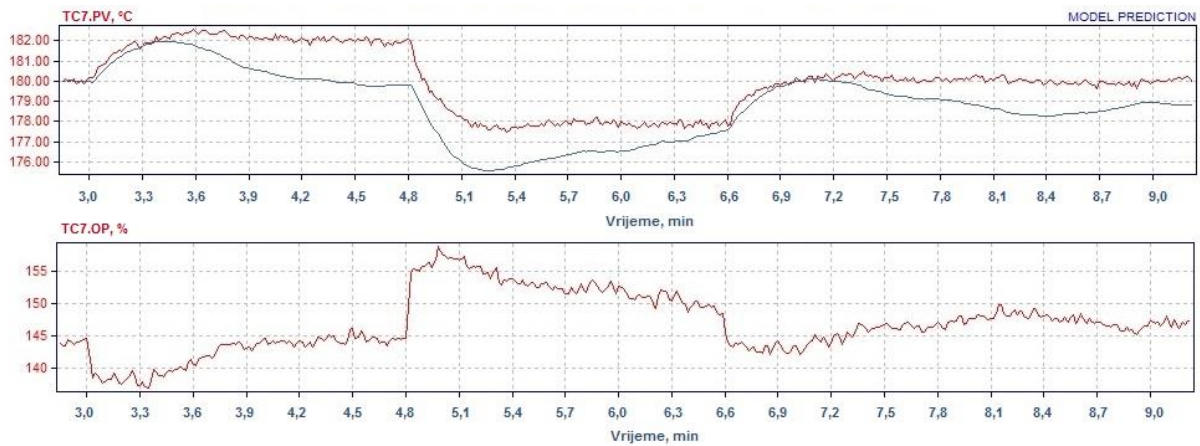
Regulacijski krug	Parametri modela		
	θ , min	k , °C / %	τ , min
TC7	1,0	-0,4	13,0
FC13	0,25	2,7	0,5
TC33	1,5	1,5	4,2
FC32	0,25	3,1	0,58
FC30	0,25	1,8	0,33
TC162	0,25	-0,8	2,75
FC36	0,25	1,2	0,67
FC24	0,25	4,2	0,58

Tablica 8. Parametri regulatora prije i poslije optimiranja

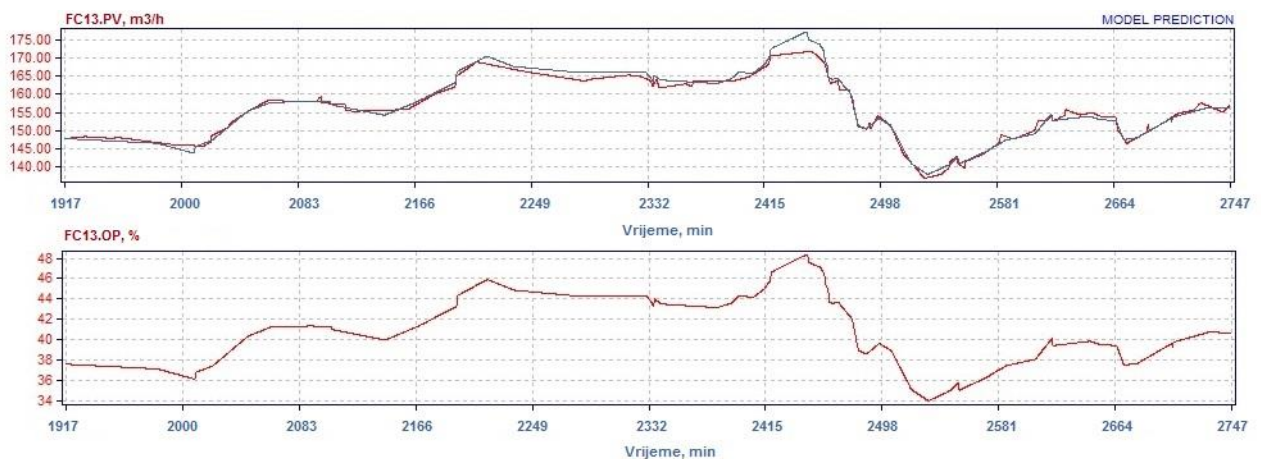
Regulacijski krug	Parametri PRIJE OPTIMIRANJA			Parametri POSLIJE OPTIMIRANJA		
	K_c	τ_i , min	τ_d , min	K_c	τ_i , min	τ_d , min
TC7	3,0	6,0	0,4	5,5	12,0	0
FC13	0,9	1,2	0	1,2	0,55	0
TC33	6,0	3,0	0,5	3,6	5,0	0
FC32	0,5	0,4	0	0,32	0,65	0
FC30	0,5	1,0	0	0,29	0,32	0
TC162	10,0	5,0	0	11,0	3,0	0
FC36	3,0	5,0	0	1,3	0,74	0
FC24	0,55	0,2	0	2,0	0,4	0

4.3.1. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-1 (TC7/FC13)

Na temelju dinamičkog vladanja vođene veličine temperature (TC7.PV), protoka (FC13.PV) i djelovanja regulacijskog ventila izvedena su dva dinamička modela prvog reda, prikazana na slikama 4.12. i 4.13., a parametri oba modela (θ , k , τ) dani su u tablici 7.

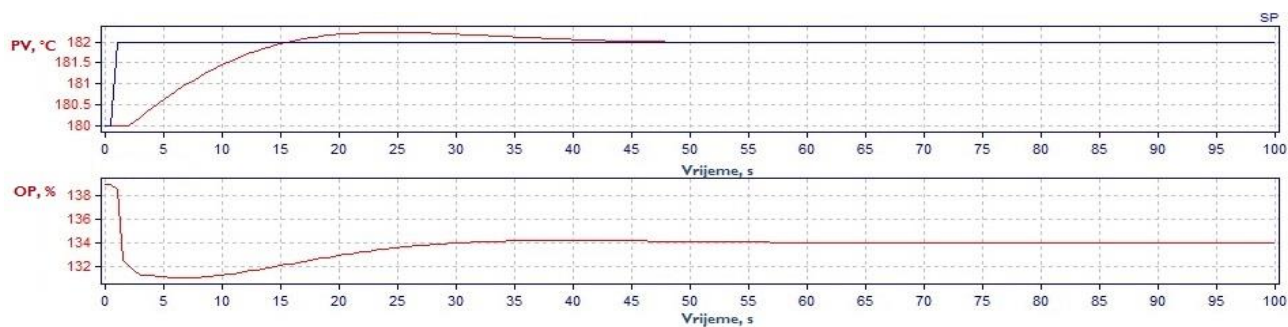


Slika 4.12. Model procesa regulacijskog kruga TC7

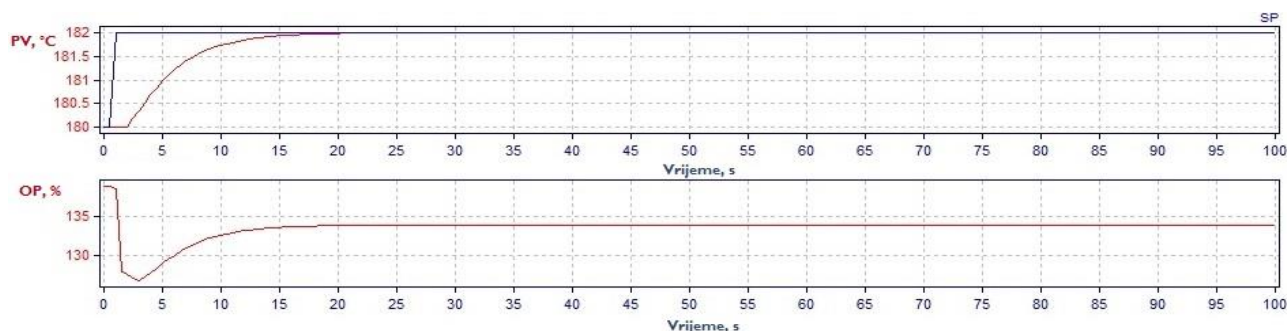


Slika 4.13. Model procesa regulacijskog kruga FC13

Na grafičkom prikazu 4.14. vidljivo je da vođena veličina temperature (TC7.PV) dolazi u radnu točku (SP) uz prebačaj. U ovom slučaju optimiranjem se postigao brži odziv bez prebačaja (Slika 4.15.).

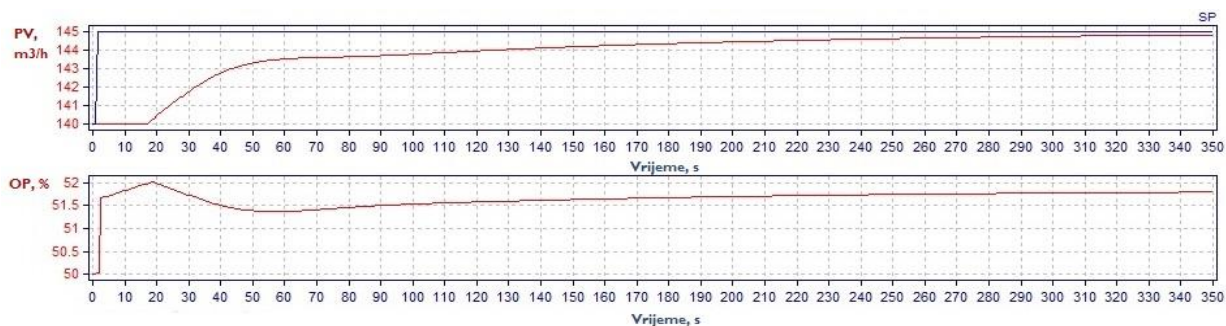


Slika 4.14. *Vladanje regulacijskog kruga TC7 prije optimiranja*

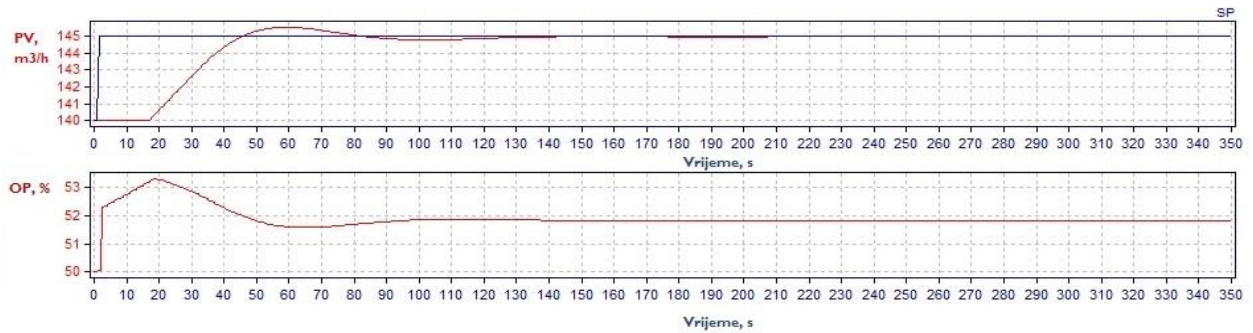


Slika 4.15. *Vladanje regulacijskog kruga TC7 poslije optimiranja*

Na grafičkom prikazu 4.16. vidljivo je da vođena veličina protoka (FC13.PV) vrlo sporo postiže vrijednost radne točke. Nakon optimiranja agresivnijom regulacijom postiglo se da vođena veličina uz blagi prebačaj brže dođe u vrijednost radne točke te se u njoj stabilizira (Slika 4.17.). Optimalni parametri regulatora prikazani su u tablici 8.



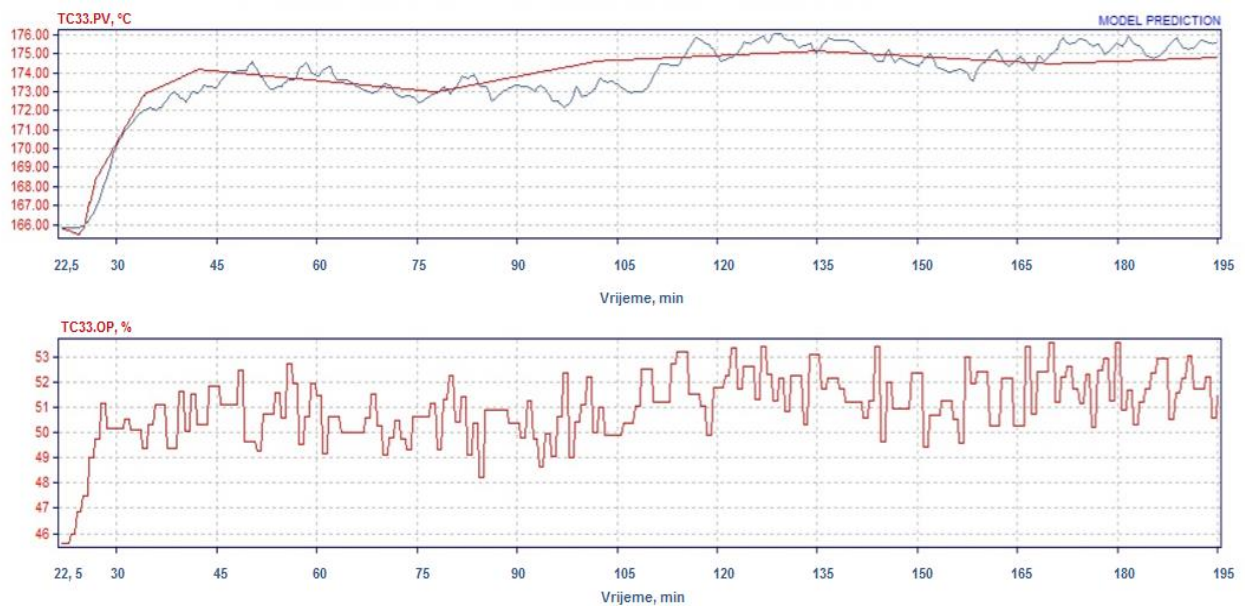
Slika 4.16. *Vladanje regulacijskog kruga FC13 prije optimiranja*



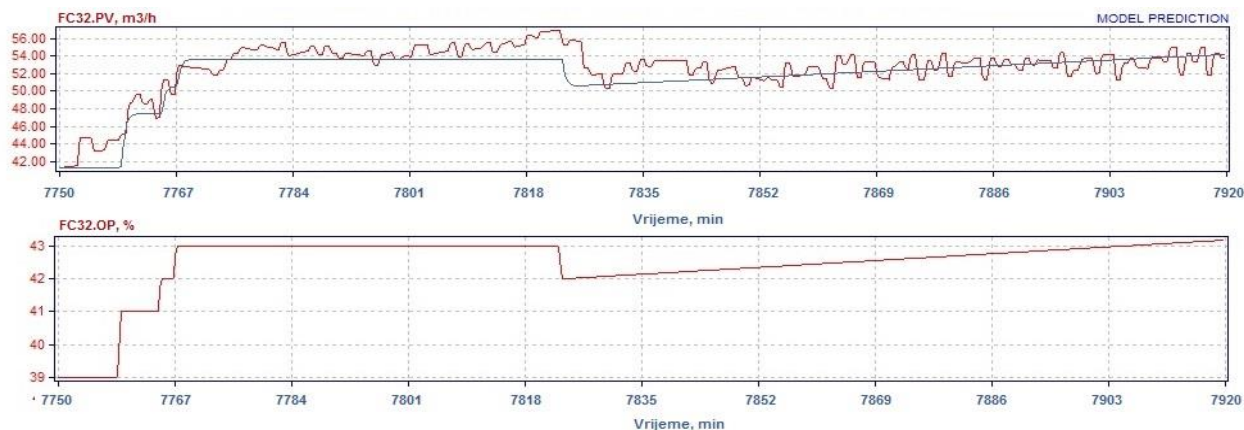
Slika 4.17. *Vladanje regulacijskog kruga FC13 poslije optimiranja*

4.3.2. Kaskadna regulacija temperature dna kolone C-4 (TC33/FC32)

Na temelju dinamičkog vladanja vođene veličine temperature (TC33.PV), protoka (FC32.PV) i djelovanja regulacijskog ventila izvedena su dva dinamička modela prvog reda, prikazana na slikama 4.18. i 4.19, a parametri oba modela (θ , k , τ) dani su u tablici 7.

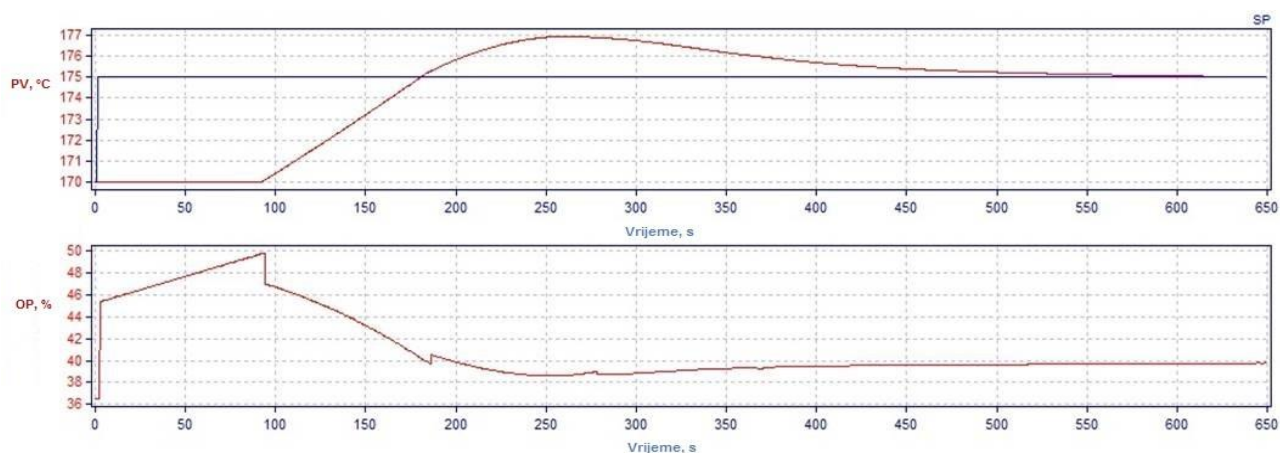


Slika 4.18. *Model procesa regulacijskog kruga TC33*

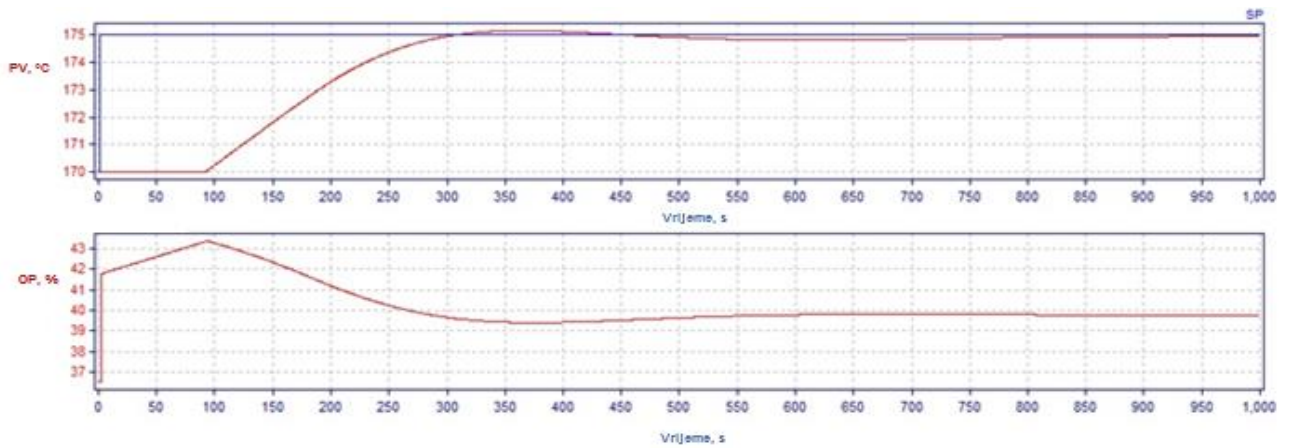


Slika 4.19. Model procesa regulacijskog kruga FC32

Na grafičkom prikazu 4.20. vidljivo je da vođena veličina temperature (TC33.PV) dolazi u radnu točku uz veliki prebačaj. Kod regulacijskih krugova temperature nije poželjno da temperatura oscilira oko radne točke zbog narušavanja kvalitete proizvoda. Stoga se optimiranjem postigao odziv bez prebačaja (Slika 4.21.).

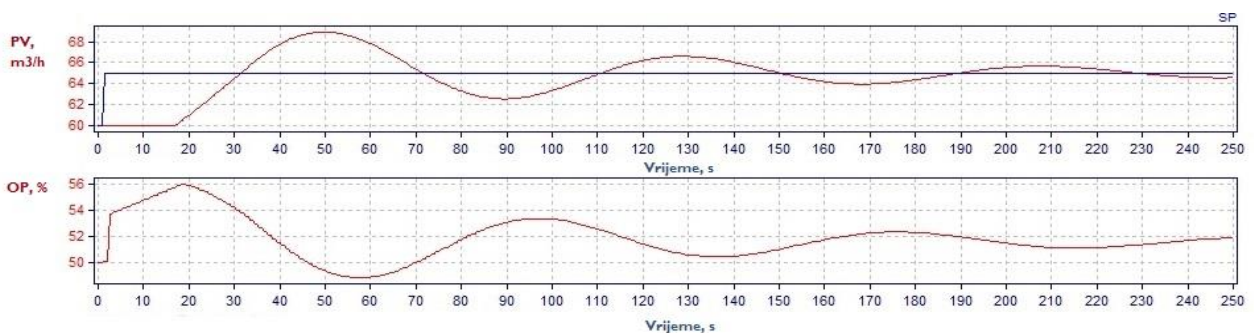


Slika 4.20. Vladanje regulacijskog kruga TC33 prije optimiranja

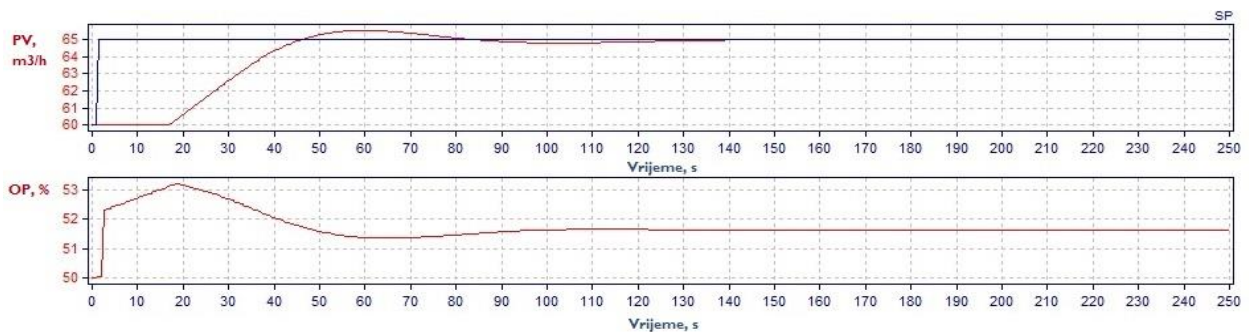


Slika 4.21. *Vladanje regulacijskog kruga TC33 poslije optimiranja*

Na grafičkom prikazu 4.22. vidljivo je da vođena veličina protoka (FC32.PV) dolazi u radnu točku uz prebačaj i titrajno smirivanje. Optimiranjem se postiglo da vođena veličina dolazi u radnu točku uz minimalan prebačaj i oscilacije te se nakon kratkog vremenskog perioda na toj vrijednosti i stabilizira (Slika 4.23.). Optimalni parametri regulatora prikazani su u tablici 8.



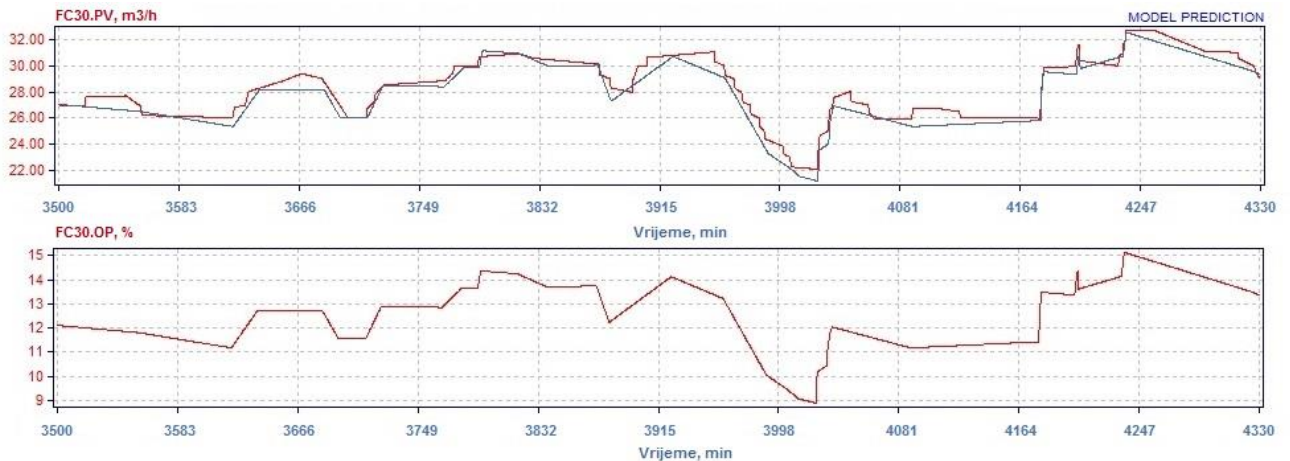
Slika 4.22. *Vladanje regulacijskog kruga FC32 prije optimiranja*



Slika 4.23. *Vladanje regulacijskog kruga FC32 poslije optimiranja*

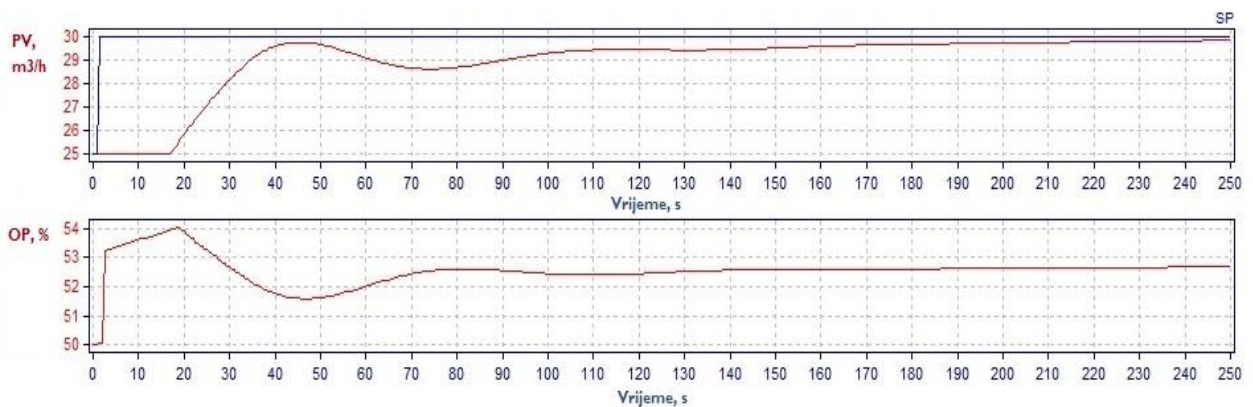
4.3.3. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-4 (TC157/FC30)

Na temelju dinamičkog vladanja vođene veličine protoka (FC30.PV) i djelovanja regulacijskog ventila izveden je dinamički model prvog reda, prikazan na slici 4.24., a parametri modela (θ , k , τ) dani su u tablici 7.

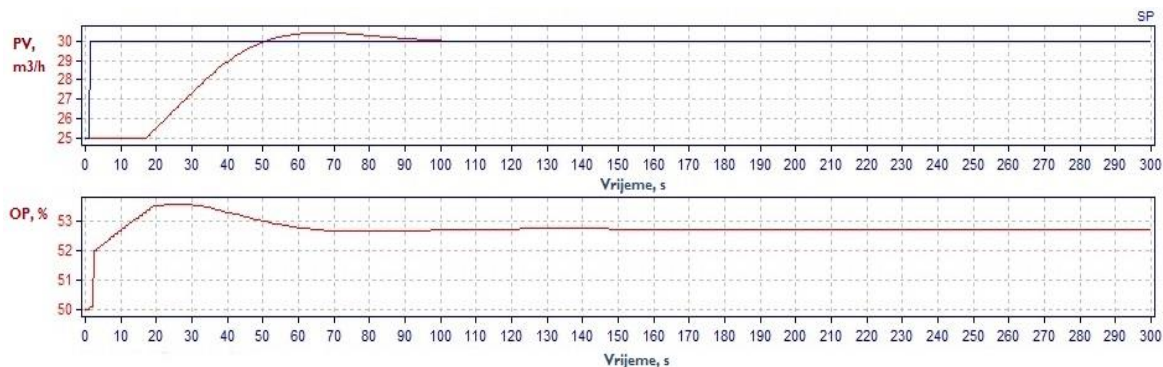


Slika 4.24. Model procesa regulacijskog kruga FC30

Na grafičkom prikazu 4.25. vidljivo je da vođenoj veličini protoka (FC30.PV) treba dulji vremenski period da dođe u radnu točku. Nakon optimiranja vođena veličina puno brže dolazi do radne točke uz zanemarivo mali prebačaj (Slika 4.26.). Optimalni parametri regulatora dani su u tablici 8.



Slika 4.25. Vladanje regulacijskog kruga FC30 prije optimiranja

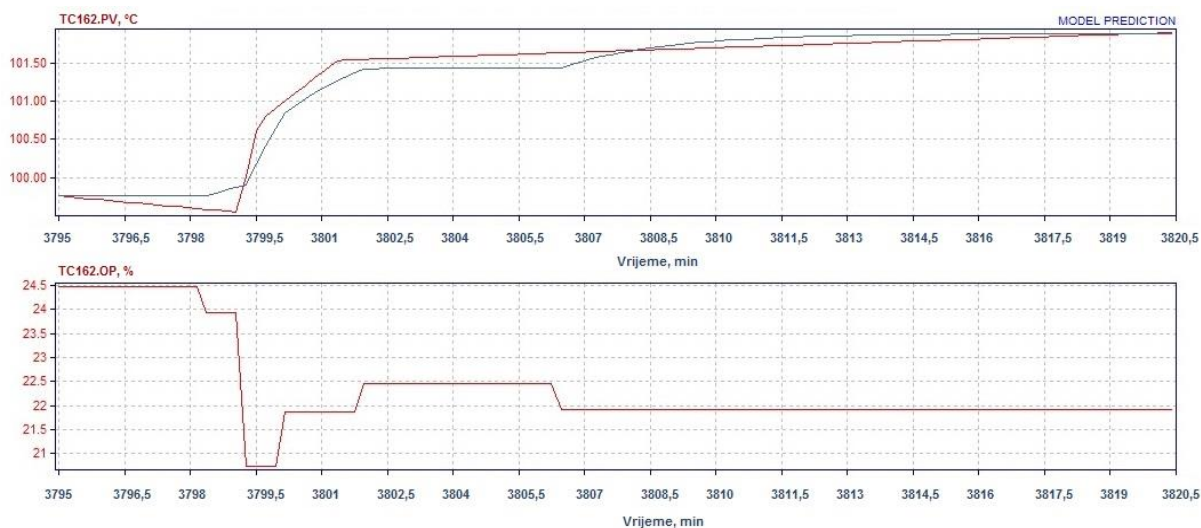


Slika 4.26. *Vladanje regulacijskog kruga FC30 poslije optimiranja*

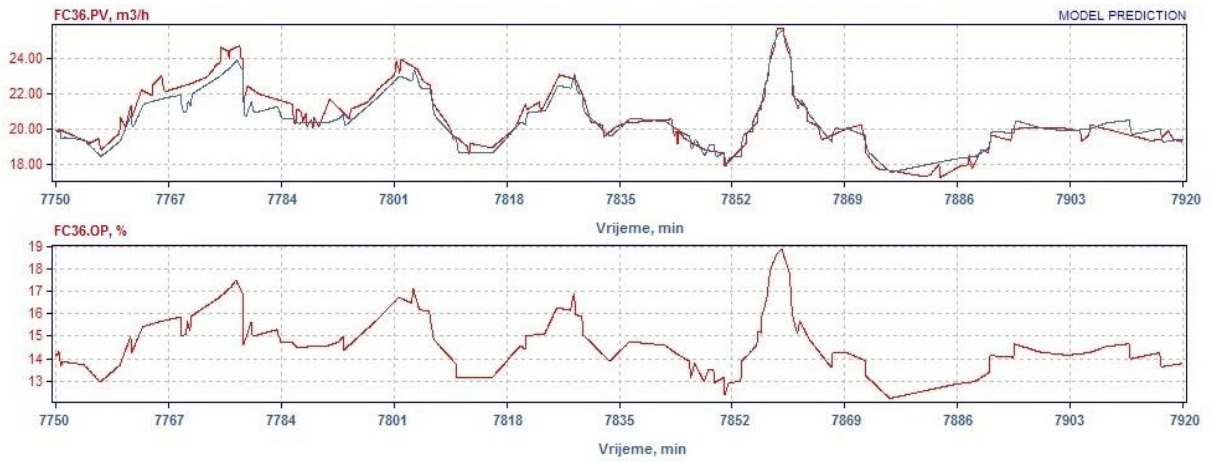
Za regulacijski krug temperature TC157 identifikaciju modela i optimiranje parametara regulatora nije bilo moguće provesti jer je regulacijski krug u ručnom režimu rada, a podaci iz baze podataka nisu bili prikladni za optimiranje.

4.3.4. Kaskadna regulacija temperature vrha kolone C-5 (TC162/FC36)

Na temelju dinamičkog vladanja vođene veličine temperature (TC162.PV), protoka (FC36.PV) i djelovanja regulacijskog ventila izvedena su dva dinamička modela prvog reda, prikazana na slikama 4.27. i 4.28., a parametri oba modela (θ , k , τ) dani su u tablici 7.

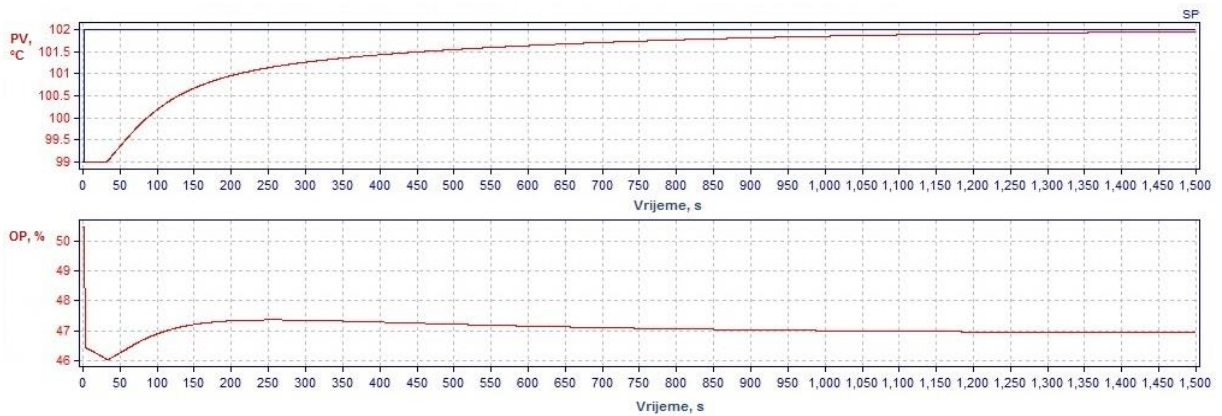


Slika 4.27. *Model procesa regulacijskog kruga TC162*

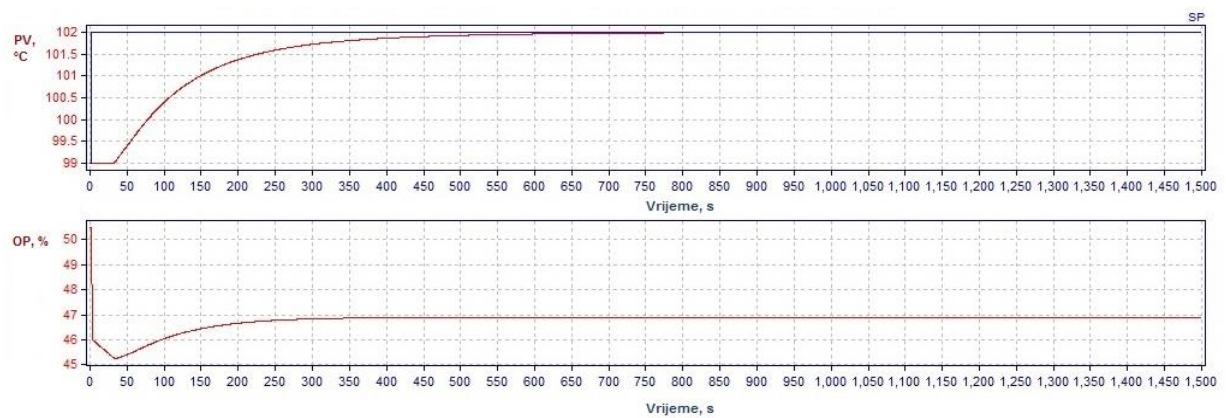


Slika 4.28. Model procesa regulacijskog kruga FC36

Optimiranjem regulacijskog kruga temperature TC162 postigao se značajno brži dolazak vođene veličine temperature (TC162.PV) do radne točke (Slike 4.29. i 4.30.).

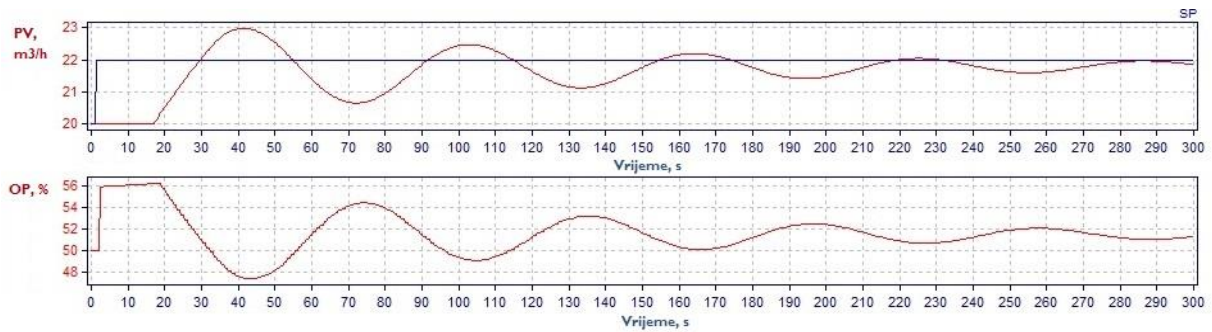


Slika 4.29. Vladanje regulacijskog kruga TC162 prije optimiranja

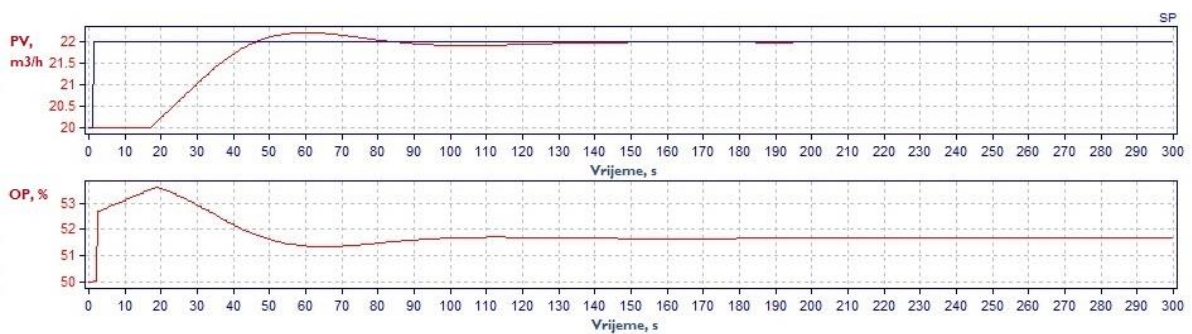


Slika 4.30. Vladanje regulacijskog kruga TC162 poslije optimiranja

Na grafičkom prikazu 4.31. vidljivo je da vođena veličina protoka (FC36.PV) dolazi u radnu točku uz nešto veći prebačaj i uz smirujuće oscilacije. Optimiranjem se postiglo da vođena veličina dolazi u radnu točku uz minimalan prebačaj i bez oscilacija (Slika 4.32.). Optimalni parametri regulatora dani su u tablici 8.



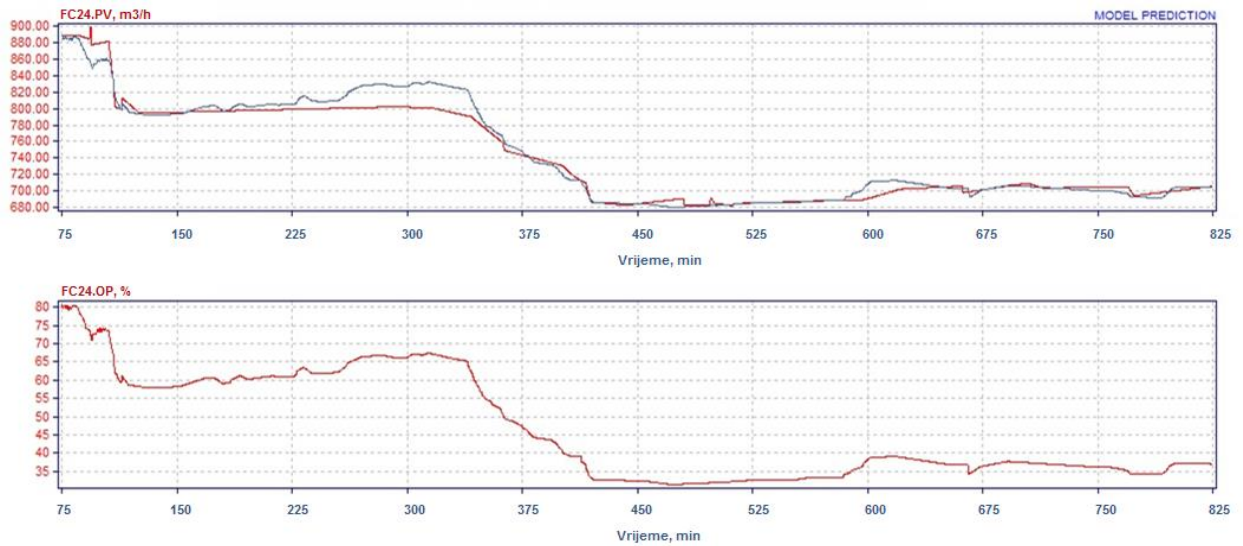
Slika 4.31. *Vladanje regulacijskog kruga FC36 prije optimiranja*



Slika 4.32. *Vladanje regulacijskog kruga FC36 poslije optimiranja*

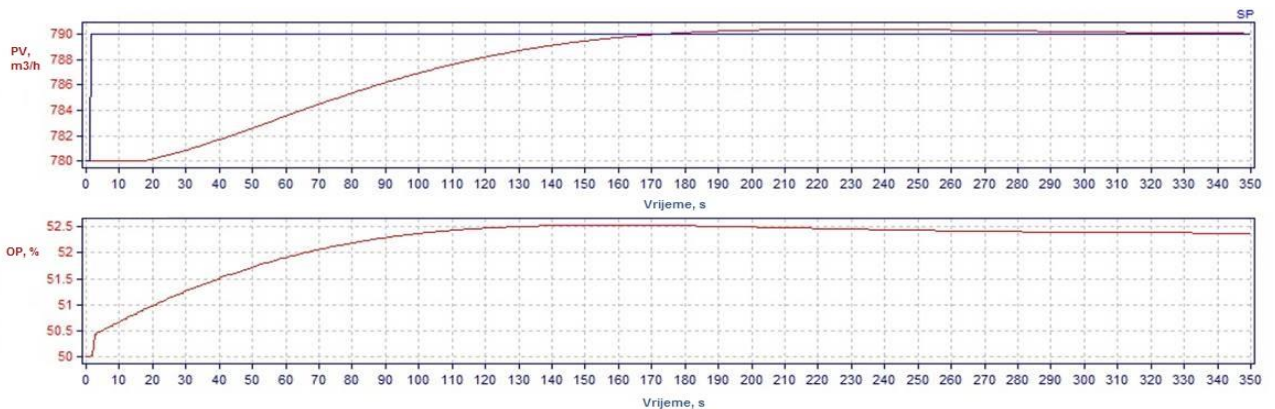
4.3.5. Regulacija protoka pare za stripiranje u koloni C-2C (FC24)

Na temelju dinamičkog vladanja vođene veličine protoka (FC24.PV) i djelovanja regulacijskog ventila izveden je dinamički model prvog reda, prikazan na slici 4.33., a parametri modela (θ , k , τ) dani su u tablici 7.

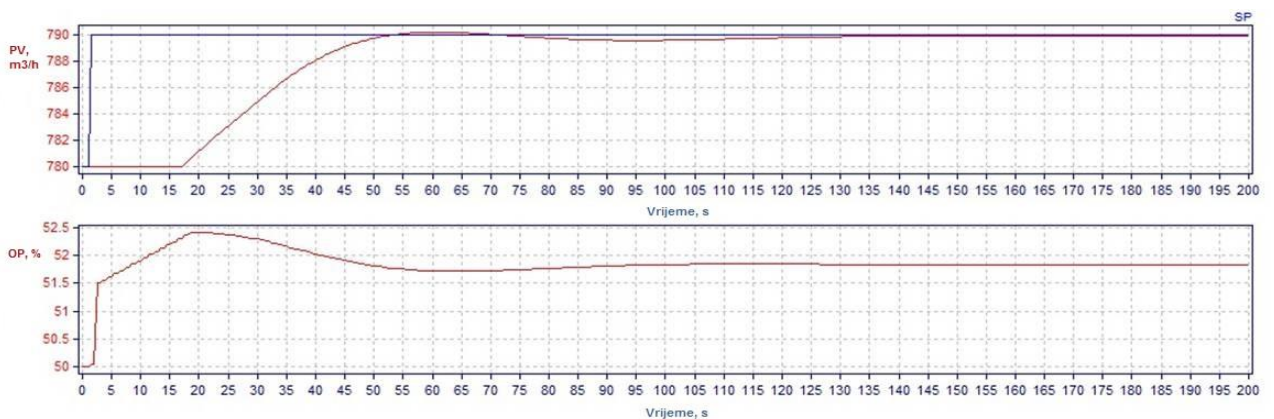


Slika 4.33. Model procesa regulacijskog kruga FC24

Optimiranjem regulacijskog kruga protoka FC24 postigao se značajno brži dolazak vođene veličine (FC24.PV) u radnu točku što se vidi na slikama 4.34 i 4.35. Optimalni parametri regulatora dani su u tablici 8.



Slika 4.34. Vladanje regulacijskog kruga FC24 prije optimiranja



Slika 4.35. Vladanje regulacijskog kruga FC24 poslije optimiranja

4.4. Statistička analiza procesa

Kao što je prikazano korelacijskom analizom, regulacija procesa ima veliki utjecaj na svojstva i kvalitetu proizvoda. Jedna od metoda praćenja, osiguravanja i poboljšanja kvalitete proizvoda je statistička analiza procesa. Statistički se kvaliteta može pratiti putem procesnih kontrolnih dijagrama te parametara deskriptivne statistike.

Tablice 9.-13. koje prikazuju deskriptivnu statistiku podataka laboratorijskih analiza određenih svojstava obuhvaćaju sljedeće [4, 6]:

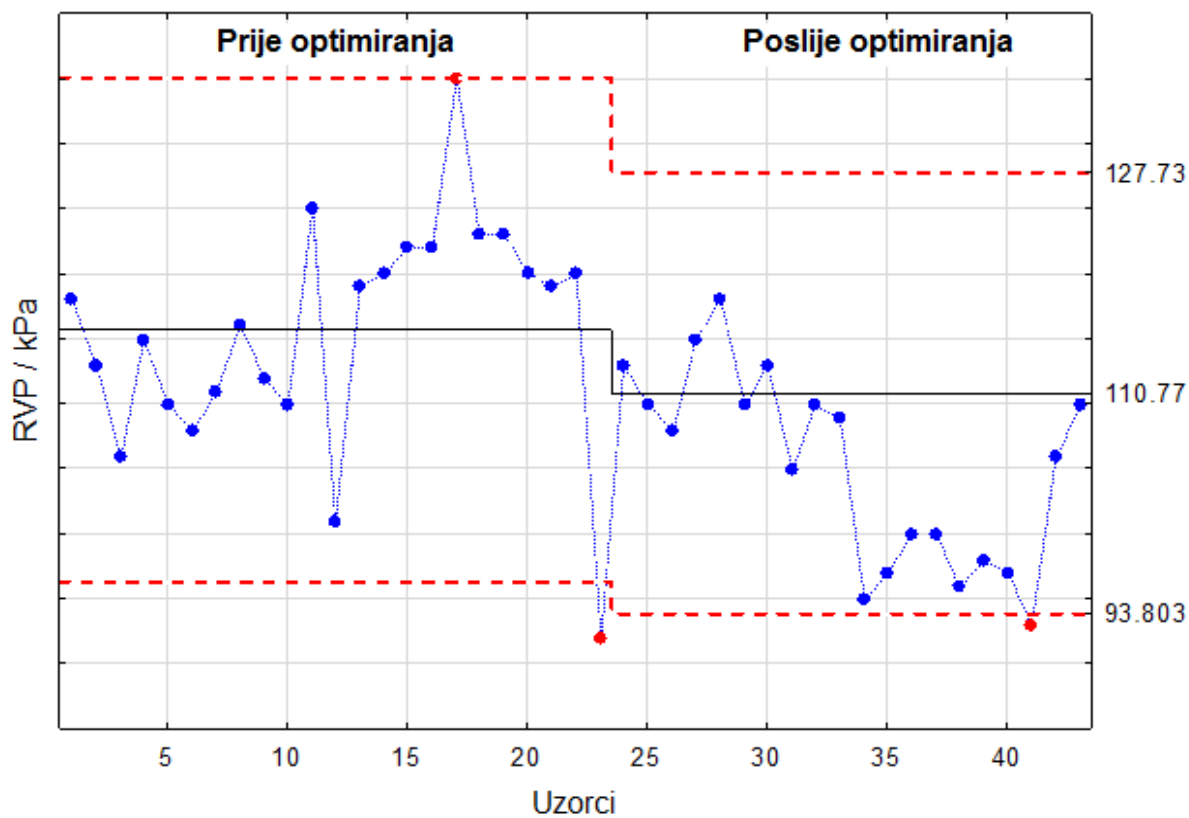
- *broj podataka*
- *aritmetička sredina podataka*
- *medijan* (centralna vrijednost)
- *suma rezultata*
- *raspon rezultata* (razlika između maksimalnog i minimalnog rezultata)
- *standardna devijacija* (mjera rasipanja podataka oko aritmetičke sredine)
- *varijanca* (prosječno kvadrirano odstupanje od aritmetičke sredine)
- *simetričnost distribucije*
- *zakrivljenost distribucije* koja može poprimiti sljedeće vrijednosti:
 - od -1 do 1 (*normalna distribucija*)
 - veće od 1 (*uska i visoka distribucija*)
 - manje od -1 (*spljoštena i široka distribucija*)

Najčešće primjenjivani kontrolni dijagrami u procesnoj industriji su \bar{X} , CUSUM i EWMA dijagrami. CUSUM i EWMA dijagrami namijenjeni su otkrivanju iznimno malih varijacija u procesu. U naftnoj industriji važno je da se vrijednosti ključnih svojstava održavaju unutar kontrolnih granica. Stoga je u ovom radu statistička analiza provedena primjenom \bar{X} kontrolnih dijagrama.

Prilikom provedbe statističke analize procesa prikupljeni podaci su podijeljeni na dva skupa podataka (prije i poslije optimiranja). U ovom radu praćena su sljedeća svojstva produkata: tlak para lakog benzina (RVP), temperatura početka i kraja destilacije teškog benzina te točka zamućenja i filtrabilnost lakog plinskog ulja.

Tablica 9. Deskriptivna statistika za tlak para lakog benzina

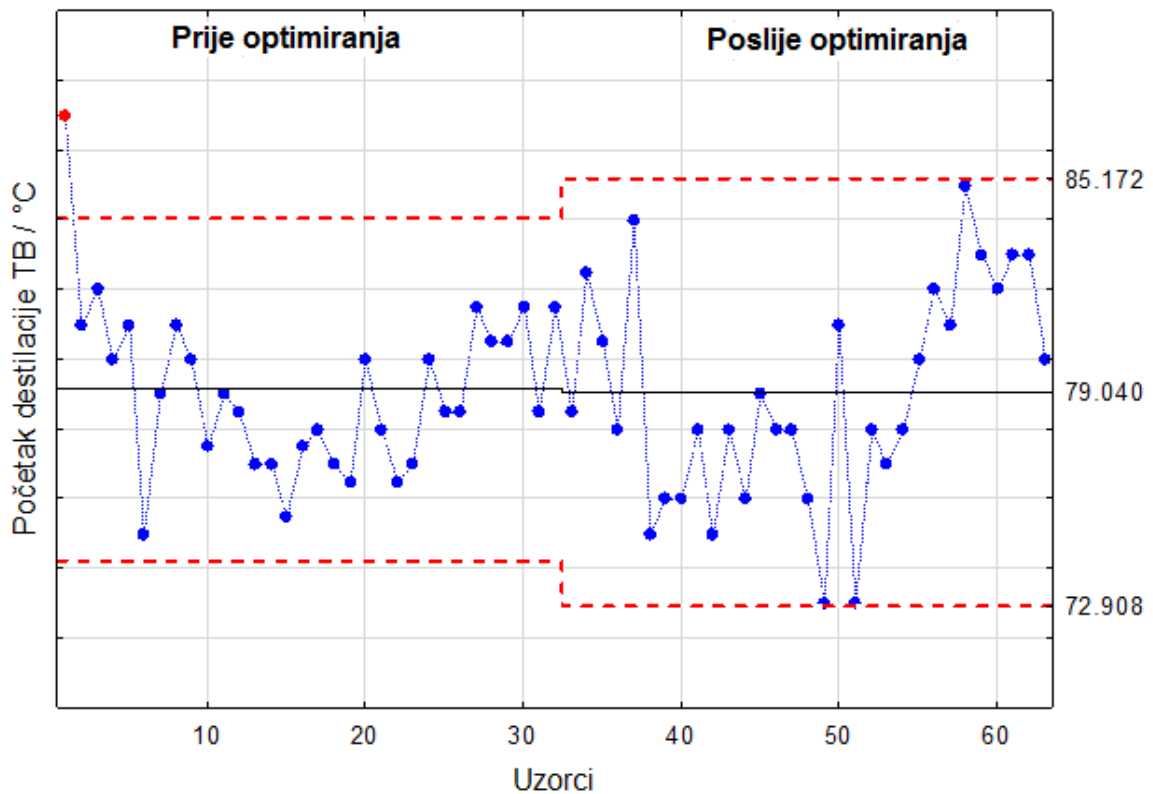
Elementi deskriptivne statistike	Prije	Poslije
Aritmetička sredina	111,65	105,15
Medijan	118	107
Raspon rezultata	43	25
Varijanca	80,33	56,56
Standardna devijacija	8,96	7,52
Simetričnost distribucije	-0,59	-0,10
Zakrivljenost distribucije	1,47	-1,3



Slika 4.36. X kontrolni dijagram za tlak para lakog benzina

Tablica 10. Deskriptivna statistika za početak destilacije teškog benzina

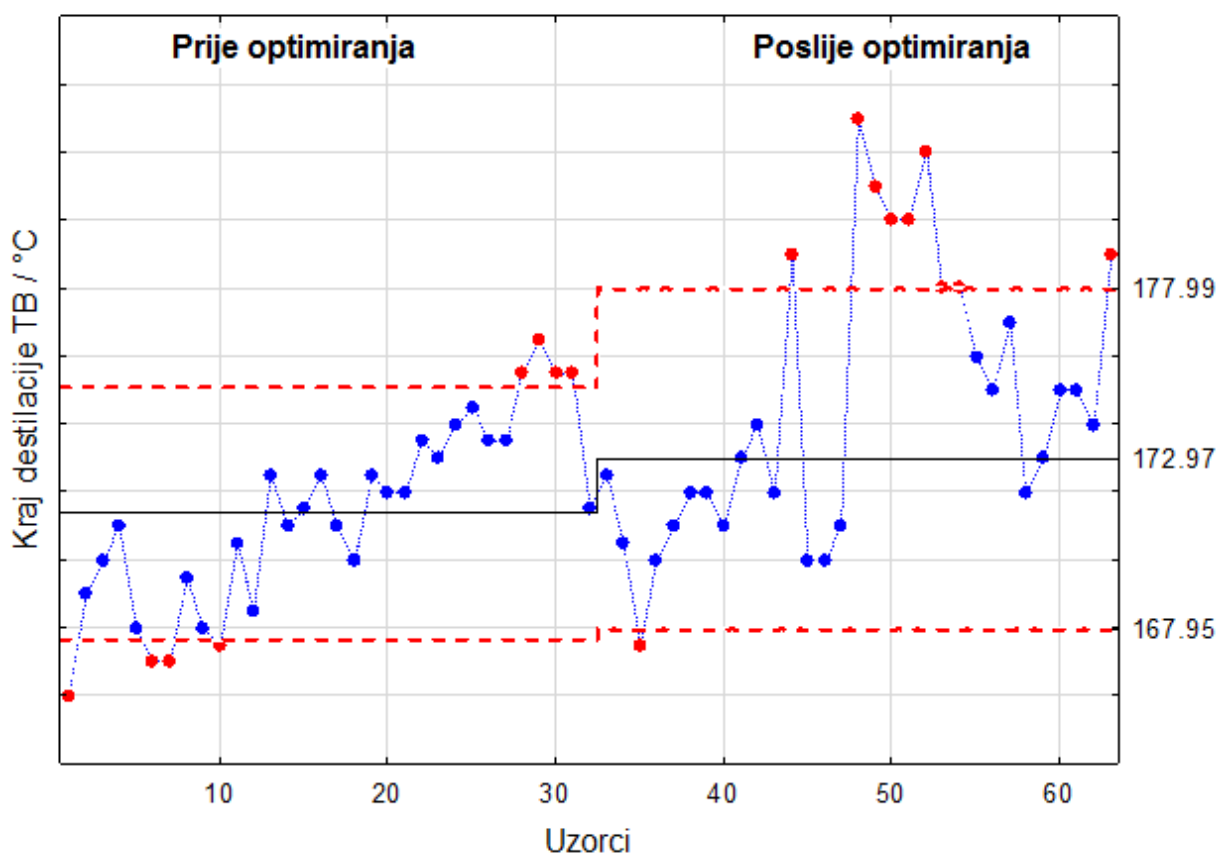
Elementi deskriptivne statistike	Prije	Poslije
Aritmetička sredina	79,13	78,95
Medijan	78,75	78
Raspon rezultata	12	12
Varijanca	5,68	10,09
Standardna devijacija	2,38	3,18
Simetričnost distribucije	0,95	0,01
Zakrivljenost distribucije	2,41	-0,73



Slika 4.37. X kontrolni dijagram za početak destilacije teškog benzina

Tablica 11. Deskriptivna statistika za kraj destilacije teškog benzina

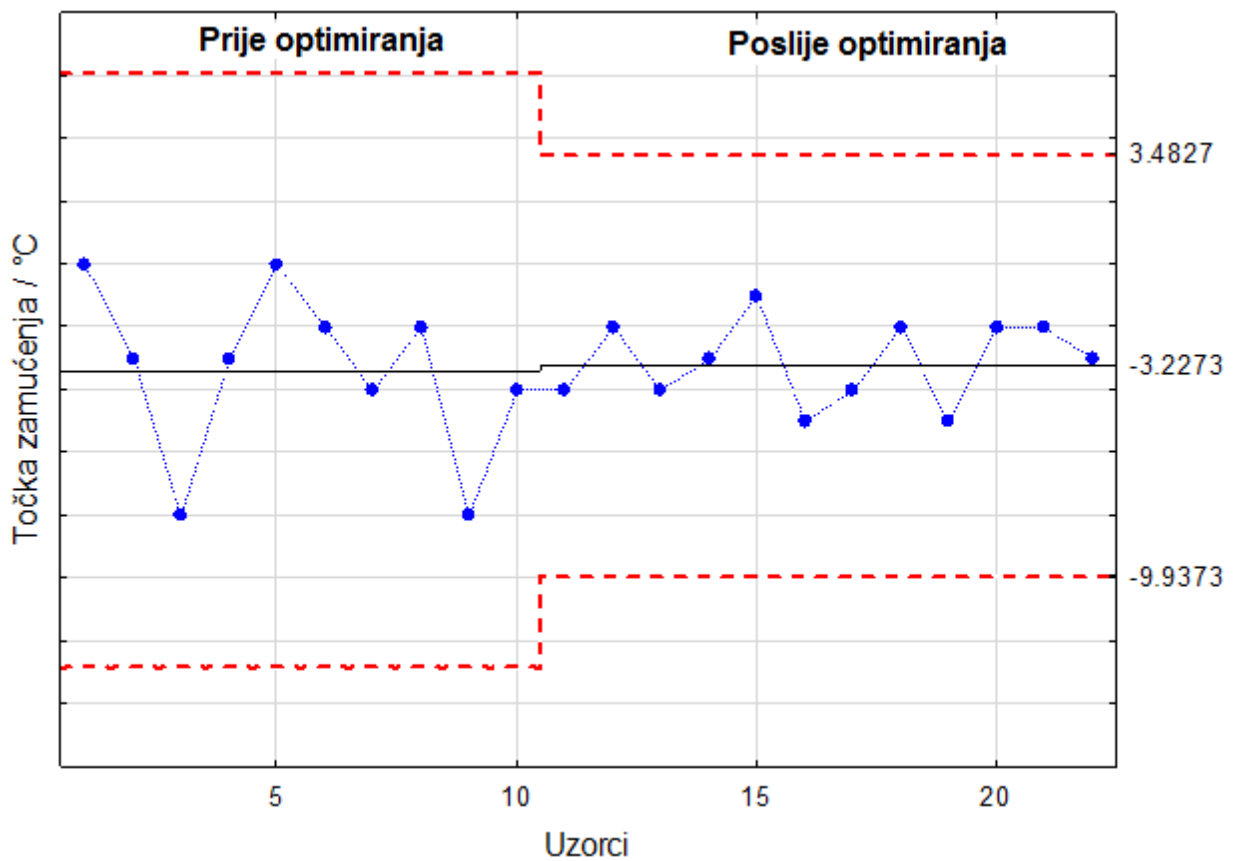
Elementi deskriptivne statistike	Prije	Poslije
Aritmetička sredina	171,36	174,63
Medijan	171,50	174
Raspon rezultata	10,5	15,5
Varijanca	7,81	16,72
Standardna devijacija	2,89	4,09
Simetričnost distribucije	-0,10	0,44
Zakrivljenost distribucije	-0,78	-0,82



Slika 4.38. X kontrolni dijagram za kraj destilacije teškog benzina

Tablica 12. Deskriptivna statistika za točku zamućenja LPU

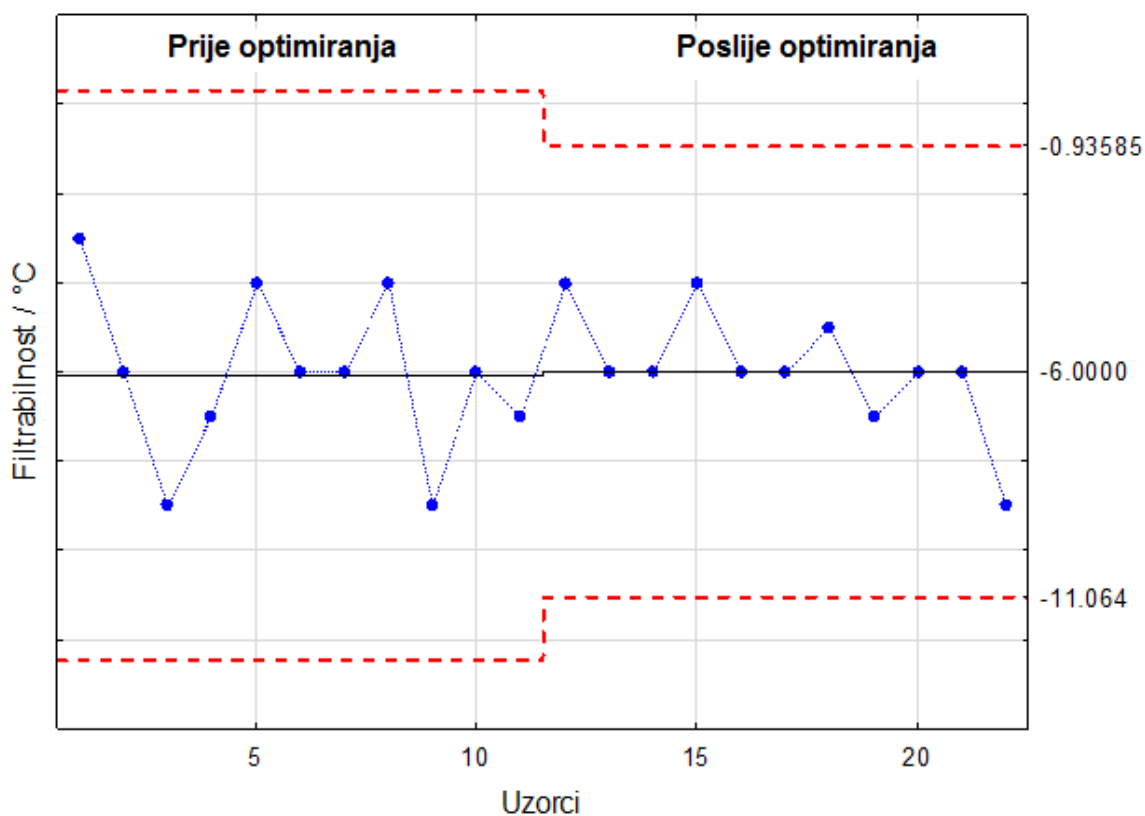
Elementi deskriptivne statistike	Prije	Poslije
Aritmetička sredina	-3,40	-3,08
Medijan	-3	-3
Raspon rezultata	8	4
Varijanca	7,82	1,72
Standardna devijacija	2,80	1,31
Simetričnost distribucije	-0,7	-0,1
Zakrivljenost distribucije	-0,16	-1,19



Slika 4.39. \bar{X} kontrolni dijagram za točku zamućenja LPU

Tablica 13. Deskriptivna statistika za točku filtrabilnosti LPU

Elementi deskriptivne statistike	Prije	Poslije
Aritmetička sredina	-6,09	-5,91
Medijan	-6	-6
Raspon rezultata	6	5
Varijanca	3,69	1,89
Standardna devijacija	1,82	1,38
Simetričnost distribucije	-0,05	-0,76
Zakrivljenost distribucije	-0,48	1,98



Slika 4.40. X kontrolni dijagram za točku filtrabilnosti LPU

Na grafičkim prikazima na slikama 4.36.-4.40. vidljivo je da su navedena svojstva unutar kontrolnih granica definiranih standardnom devijacijom podataka koja je izračunata i prikazana za sva svojstva u tablicama 9.-13. Ovom analizom pokazano je da regulacija utječe na promatrana svojstva pretpostavljena hipotezom ovog rada. Iz grafičkih prikaza vidljivo je da je poslije optimiranja došlo do suženja kontrolnih granica čime je ujedno postignuta i manja standardna devijacija ključnih svojstava proizvoda.

5. Zaključak

Cilj ovog rada bio je analizirati i optimirati sustav za vođenje rafinerijskog procesa atmosferske destilacije.

Na temelju prikupljenih podataka s postrojenja provedena je analiza procesa, identifikacija modela i optimiranje parametara regulatora. Paralelno s analizom rada regulatora provedena je i statistička analiza svojstava proizvoda određenih u laboratoriju.

Na početku rada provedena je korelacijska analiza na temelju koje su izdvojeni regulacijski krugovi s najvećim utjecajem na svojstva i kvalitetu ključnih proizvoda. Potom su uslijedili identifikacija modela procesa i ugađanje parametara regulatora u svrhu optimiranja rada regulacijskih krugova i cjelokupnog sustava za vođenje.

Kao zaseban dio ovog rada provela se statistička analiza procesa u svrhu poboljšanja kvalitete proizvoda. U sklopu analize pratila se kvaliteta proizvoda primjenom više statističkih metoda i kriterija.

Zadnji korak u projektu bila je primjena novih parametara regulatora na postrojenju atmosferske destilacije. Njihovom se primjenom ostvario stabilniji rad postrojenja, ujednačila kvaliteta proizvoda, a ujedno i smanjio utjecaj na okoliš.

Rezultati ovog rada pokazali su da je primjenom metoda praćenja, dijagnostike i optimiranja procesa moguće ostvariti poboljšanja i optimalni rad industrijskih procesa.

Literatura

1. Sertić – Bionda, K., Procesi prerade nafte, Skripta za laboratorijske vježbe, FKIT, Sveučilište u Zagrebu, 2006.
2. Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D.A. , Process Dynamics and Control, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2004.
3. Apromon Manual, version 6.1, PiControlSolutions, USA, 2012.
4. Statistical quality control handbook, Western Electric Company Inc., The Mack Printing Company, Pennsylvania, 1956.
5. Kaštelan Macan, M., Kemijska analiza u sustavu kvalitete, Školska knjiga – Zagreb, 2003.
6. Montgomery, D.C., Introduction to Statistical Quality Control, John Wiley & sons, Arizona, 2009.
7. Bolf, N., Predavanja (interna skripta), Sveučilište u Zagrebu, FKIT, Zagreb, 2015.
8. Janović, Z., Naftni i petrokemijski procesi i proizvodi, Hrvatsko društvo za goriva i maziva, Zagreb, 2004.
9. ASTM STANDARD D86: „Standard test method for distillation of petroleum products”, 1976.
10. Cerić, E., Nafta, procesi i proizvodi, IBC d.o.o., Sarajevo, 2012.
11. Tomić, A-M., Vođenje procesa destilacije, Završni rad, FKIT, 2015.
12. Beer, E., Destilacija, HDKI, Zagreb, 2006.
13. Žeželj, B., Šarlija, I., Program poboljšanja performansi regulacijskih krugova u INA Rafineriji nafte Rijeka, Goriva i maziva, **54** (2015) 44-63
14. Sanusi, R.A., Abujjya, M.R., Riaz, M., Abbas, N., Combined Shewart CUSUM charts using auxiliary variable, Computers & Industrial Engineering, **105** (2017) 329-337
15. Saha, A., Majumder, H., Performance analysis and optimization in turning of ASTM A36 through process capability index, Journal of King Saud University – Engineering Sciences, 2016.

Sažetak

Dženita Šola; Ana-Marija Tomić; Andreja Žužić

Analiza i optimiranje rada postrojenja

Današnja industrija suočena je s izazovima kako podmiriti sve veću potražnju za energijom uz manje emisije štetnih tvari pri čemu treba zadovoljiti visoke kriterije kvalitete produkta. Nadziranjem, dijagnostikom i optimiranjem sustava za vođenje industrijskih procesa osigurava se da postrojenja ostvaruju radne zadatke te ujedno ne utječu štetno na okoliš. Ovi ciljevi ostvaruju se preventivnim nadgledanjem procesa, otkrivanjem i dijagnozom kvarova te optimiranjem sustava za vođenje.

U industrijskim procesima velik broj varijabli potrebno je održavati unutar usko definiranih granica kako bi postrojenja radila stabilno, a kvaliteta produkata bila na visokoj razini. Primjenom suvremenih softverskih alata moguće je statistički analizirati rad procesa i sustava za vođenje, identificirati dinamičke modele procesa i regulacijskih krugova te optimirati njihove parametre. Time se postiže stabilnije vođenje procesa, veća kvaliteta proizvoda i optimalni rad procesa u svrhu manjeg utjecaja na okoliš.

U ovom istraživanju provedena je cjelovita analiza rada rafinerijskog postrojenja u kojem se optimiranjem sustava za vođenje teži ostvariti optimalan rad postrojenja i visoka kvaliteta proizvoda. Na temelju prikupljenih podataka statistički se analizira rad postrojenja atmosferske destilacije i razvijaju dinamički modeli regulacijskih krugova. Dinamički modeli osnova su za ugađanje parametara regulatora.

Vladanje regulacijskih krugova analiziralo se simulacijski, a u završnom koraku ostvarena su poboljšanja na postrojenju. Statističkom analizom pokazatelja rada prije i poslije optimiranja obuhvaćeni su ključni pokazatelji rada postrojenja, kao i ključni parametri kvalitete proizvoda.

Ključne riječi: modeliranje procesa, vođenje procesa, optimiranje procesa, atmosferska destilacija, statistička analiza

Summary

Dženita Šola; Ana-Marija Tomić; Andreja Žužić

Analysis and optimizing of plant operation

Today's industry is faced with many challenges to overcome the growing energy consumption with reduced pollutant emission while reaching high product quality. Monitoring, diagnosing and optimizing industrial process control system ensure that plants work optimally in accordance with environmental regulations. These goals are met by preventive monitoring, detection and diagnosis of malfunctions and control system optimization.

In industrial processes the great number of process variables requires maintenance in strictly defined boundaries for stable plant operation to achieve high quality of products. Using modern software tools, it is possible to statistically analyse the process and control system, identify dynamical models of the process and control loops, and optimize control system parameters. The results are more stable control, higher product quality and optimal operation.

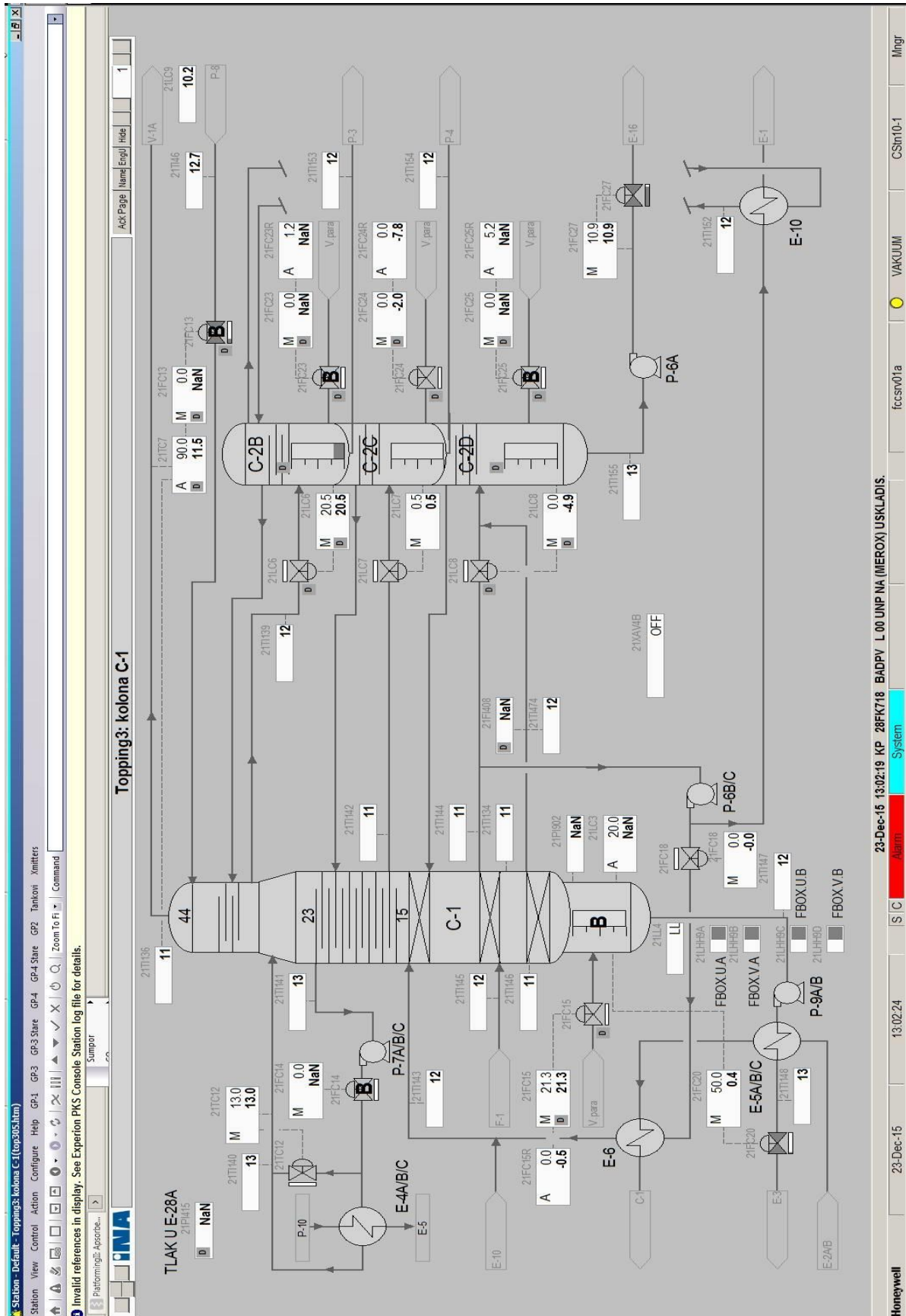
In this research a thorough analysis of the refinery plant is conducted in which optimizing control system strives to optimize overall plant operation. Based on collected data crude oil distillation unit is analysed statistically and dynamical models of control loops are developed. Dynamical models tend to be a good basis for controller tuning purpose.

The dynamical behaviour of the control loops is simulated and improved parameters are applied in the real plant. Statistical analysis of operation prior and after optimization includes the key performance indicators as well as the key parameters of product quality.

Keywords: process modelling, process control, process optimization, crude oil distillation, statistical analysis

Prilog 3

Prikaz dijela postrojenja s atmosferskom kolonom C-1 i manjim kolonama za stripiranje C-2



Životopisi

Dženita Šola rođena je 13. kolovoza 1993. godine u Zagrebu. Osnovnu školu pohađa u Zagrebu. Nakon završene osnovne škole upisuje opću IX. gimnaziju u Zagrebu. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije upisuje 2012. godine. Preddiplomski studij Kemijskog inženjerstva završava 2015. godine i upisuje diplomski studij Kemijsko procesno inženjerstvo.

Ana-Marija Tomić rođena je 27. siječnja 1994. godine u Rijeci. Osnovnu školu pohađa u općini Viškovo, Rijeka. Nakon završene osnovne škole upisuje opću gimnaziju „Gimnazija Andrije Mohorovičića Rijeka“. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije upisuje 2012. godine. Preddiplomski studij Kemijskog inženjerstva završava 2015. godine i upisuje diplomski studij Kemijsko procesno inženjerstvo.

Andreja Žužić rođena je 30. studenog 1993. godine u Zagrebu. Osnovnu školu pohađa u Jastrebarskom. Nakon završene osnovne škole upisuje opću gimnaziju u Srednjoj školi Jastrebarsko. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije upisuje 2012. godine. Preddiplomski studij Kemijskog inženjerstva završava 2015. godine i upisuje diplomski studij Kemijske tehnologije i proizvodi.