

Analiza i simulacija vođenja procesa u industriji

Lindić, Fran

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:964469>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

FRAN LINDIĆ

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, lipanj, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Fran Lindić

ANALIZA I SIMULACIJA VOĐENJA PROCESA U
INDUSTRIJI

ZAVRŠNI RAD

Mentor završnog rada: prof. dr. sc. Nenad Bolf

Zahvaljujem se profesoru Bolfu i dr. Hercegu na ponuđenoj temi i pomoći pri izradi završnog rada.

SAŽETAK

U kemijskim procesima od laboratorija do složenih procesnih postrojenja većina procesnih veličina kontinuirano se mijenja. Posljedica je to dinamičkog vladanja procesa na koji često utječu poremećaji. Vođenje procesa je potrebno kako bi se proces održao na željenom radnom području te kako bi se kompenzirali poremećaji koji utječu na proces, a time i na kvalitetu proizvoda i procesnu opremu koja se zbog velikih oscilacija može oštetiti.

Ovim završnim radom analiziraju se industrijski primjeri vođenja procesa. Pri tome se provelo ugađanje regulatora na primjeru kaskadne regulacije. Također se analiziralo kako sljepljivanje regulacijskog ventila i vanjski poremećaji utječu na stabilnost regulacijskog kruga.

Primjenom proporcionalnog i integracijskog djelovanja regulatora analizirani su procesi s velikim i malim zadržkama, procesi s kaskadnim vođenjem, kao i procesi s poremećajima i mehaničkim problemima sljepljivanja izvršnih elemenata kakvi se susreću u industriji.

Ključne riječi: procesne veličine, vođenje procesa, regulator, kaskadna regulacija, ugađanje regulatora

ABSTRACT

In chemical processes from laboratories to complex process plants, most process variables are continuously changing. This is due to complex process dynamics often affected by disturbances. Process control is necessary in order to maintain the process in the desired working conditions, and to compensate the disturbances affecting the process, product quality and process equipment.

In this baccalaureus thesis industrial examples of process control were analysed. Cascade control loops tuning, the effect of valve stiction and other disturbances on the control loops were examined.

Using controller proportional and integral action, processes with large and small delays, cascade control, as well as processes with disturbances and mechanical issues were analysed.

Key words: process variables, process control, controller, cascade control, controller tuning

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Kratka povijest vođenja procesa.....	2
1.2. Procesne veličine.....	3
1.3. Metode vođenja procesa	5
1.4. Vođenje procesa u praksi	8
2. TEORIJSKI DIO	9
2.1. Analiza dinamike procesa.....	9
2.2. Regulatori i regulacijski krug	13
3. SIMULACIJSKO ISTRAŽIVANJE I RASPRAVA	19
3.1. Određivanje parametara procesa regulacije protoka u izmjenjivaču topline	19
3.2. Ugađanje regulatora temperature u destilacijskoj koloni	22
3.3. Optimizacija regulacije temperature u destilacijskoj koloni	30
3.4. Ugađanje parametara regulatora u destilacijskoj koloni s kaskadnom regulacijom.....	33
3.5. Analiza regulacijskog kruga kod pojave sljepljivanja regulacijskog ventila.....	36
3. ZAKLJUČAK	40
4. POPIS OZNAKA	41
5. LITERATURA	42

1. UVOD

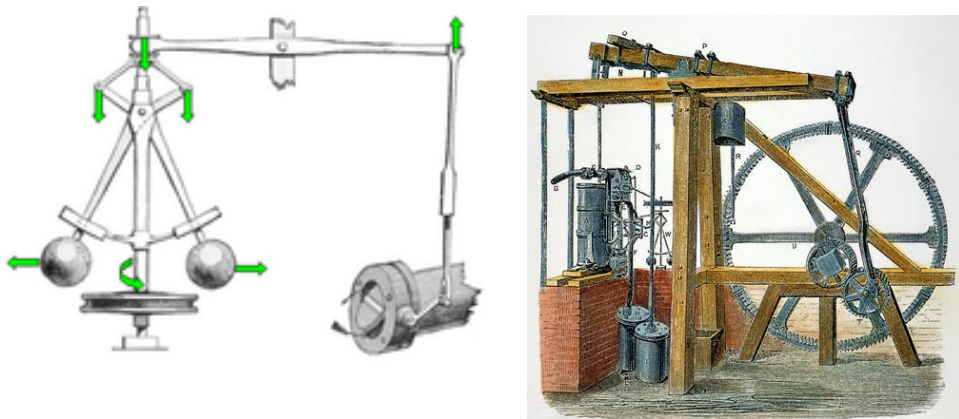
Kada se promatraju kemijski procesi u tvornicama i laboratorijima primjećujemo tok tvari. Sve bitne procesne varijable neprestano se mijenjaju, nekada malo variraju, a nekada zbog velikih poremećaja dolazi i do velikih oscilacija. Dakle, može se zaključiti da se procesi odvijaju dinamično. Vođenje i projektiranje te zatim analiziranje i optimiranje procesa je moguće tek tada kada postoji razumijevanje njegovog dinamičkog vladanja [1].

Vođenje se upotrebljava u svim inženjerskim disciplinama poput kemijskog inženjerstva, prehrambenog inženjerstva, farmaciji, elektrotehnici i strojarstvu. Također, upotrebljava se na širokom području od vođenja postrojenja do kontroliranja projektila i vjetroelektrana [1].

Razumijevanje načela vođenja procesa bitno je za svakog kemijskog inženjera. Na primjer, projektanti su primorani predvidjeti dinamičko vladanje jediničnih operacija i procesne opreme zato što postrojenja stalno rade u dinamičkim uvjetima. Posao inženjera je projektiranje, nadgledanje rada i bavljenje vođenjem sustava za automatsko vođenje na svoj željeni način i pri određenim radnim uvjetima [1].

1.1. Kratka povijest vođenja procesa

Premda postoji veliki broj primjera iz povijesti, prva upotreba vođenja u današnjem smislu vuče korijene iz 1775. James Watt osmislio je automatski regulator za parni stroj, slika 1. Tim regulatorom odvijala se neprestana vrtnja parnih strojeva balansom centripetalne sile i otvorenosti ventila pare. Skoro svi prvi regulatori koristili su se samo u industriji kao automatski regulatori. Ozbiljnija upotreba automatskog vođenja krenula je krajem 1920.-ih i od tada neprestano raste [1].



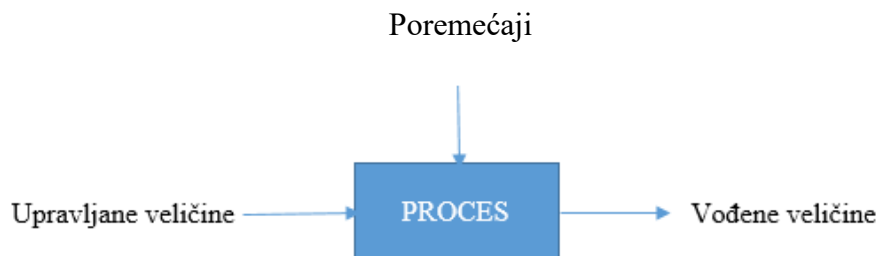
Slika 1. Automatski regulator kod parnog stroja Jamesa Watta

Porastom industrijske uporabe kreiran je veliki broj tehnika automatskog vođenja. Pojava digitalnih računala i mikroprocesora 1960.-ih uvelike je ubrzala automatizacije raznih procesa. Procjenjuje se da je u suvremenoj industriji 10-15 % investicija orijentirano na instrumentaciju i vođenje. U posljednjih trideset godina taj se postotak udvostručio te je i dalje stalno u porastu [1].

Teorija automatskog vođenja se kao kontribucija također brzo razvijala. No, iako je matematička teorija dobro razvijena, u praksi se teško koristi zbog toga što se realni uvjeti nerijetko razlikuju od teorijskih [1].

1.2. Procesne veličine

Za poznavanje automatskog vođenja prvo treba razlikovati tri bitna pojma vezana uz sve procese: vođene veličine (engl. *controlled quantities*), upravljive (podesive) veličine (engl. *manipulated quantities*) i poremećajne veličine ili poremećaji (engl. *disturbances*), slika 2. Procesni tokovi ili stanja koji se mogu voditi (regulirati) ili držati na željenoj vrijednosti nazivamo vođene veličine. To su protok, tlak, razina tekućine, temperatura, koncentracija, sastav itd. One su uzrok promjena u procesu i prema teoriji sustava zovemo ih izlaznim veličinama (eng. *outputs*). Za pojedinu vođenu veličinu zadaje se određena željena vrijednost koja se naziva referentna ili zadana vrijednost, odnosno radna točka (engl. *set point*) [1].

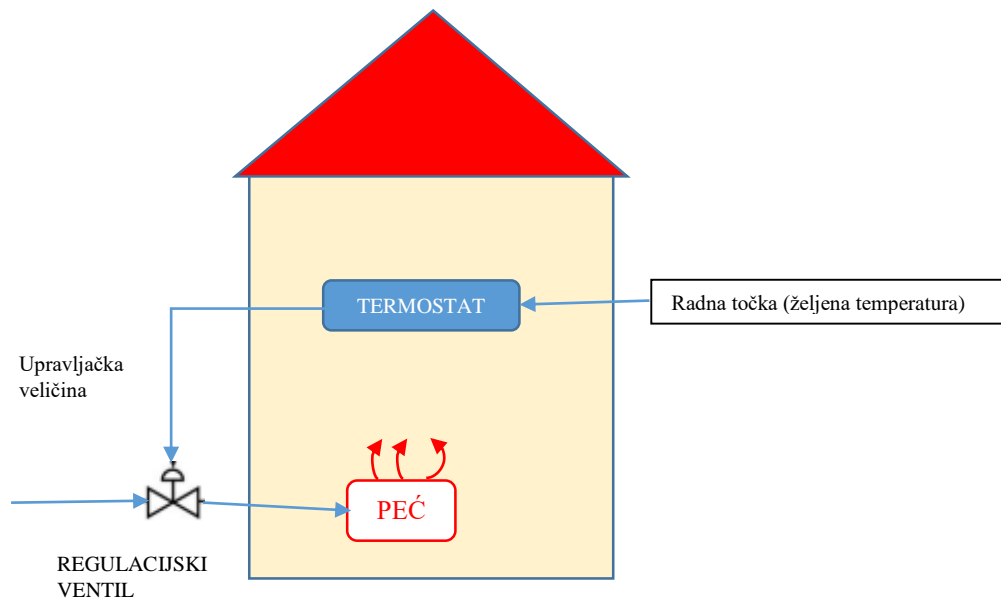


Slika 2. Uzročno-posljedični prikaz

Pojedinoj vođenoj veličini pridružuje se adekvatna upravljana veličina s kojom upravlja regulator i to većinom radi sustav za automatsko vođenje (automatska regulacija). Tijekom vođenja procesa u velikom broju slučajeva upravlja se regulacijskim ventilom. Sustav za vođenje postoji zbog poremećaja koji svojim djelovanjem na proces pomiču vođenu veličinu podalje od zadane vrijednosti. Upravljanje veličine i poremećaji izazivaju promjene u procesu te se zbog toga nazivaju ulazne veličine (engl. *inputs*). Sustav za automatsko vođenje treba uzrokovati promjene upravljane veličine tako da se zadana vrijednost vođene varijable očuva usprkos djelovanju poremećaja. Ovaj princip vođenja naziva se automatska stabilizacija. Također, moguće je promijeniti referentnu vrijednost pa se i onda mijenja upravljana veličina kako bi vođena veličina slijedila referentnu vrijednost. To se naziva slijednim vođenjem (engl. *tracking control*) [1].

Sada će se analizirati jedan primjer iz svakodnevnog života. Slika 3. predočava sustav kućnog grijanja. U tom sustavu, vođenu veličinu predstavlja temperatura prostorije. Reguliranjem temperature čovjek održava udobnost u kući. Poremećaji koji izazivaju promjenu

temperature prostorija jesu promjena vanjske temperature, otvaranje i zatvaranje vrata te ulazak i izlazak osoba u/iz prostorije. Sustav automatskog vođenja dizajniran je tako da regulira protok goriva u peć kako bi osigurao da vrijednost temperature prostorije ne odskače od željene vrijednosti. To postiže tako da unosi toplinsku energiju u sustav. U takvom sustavu upravljana veličina bi bila protok topline, a vođena veličina temperatura prostorije [1].

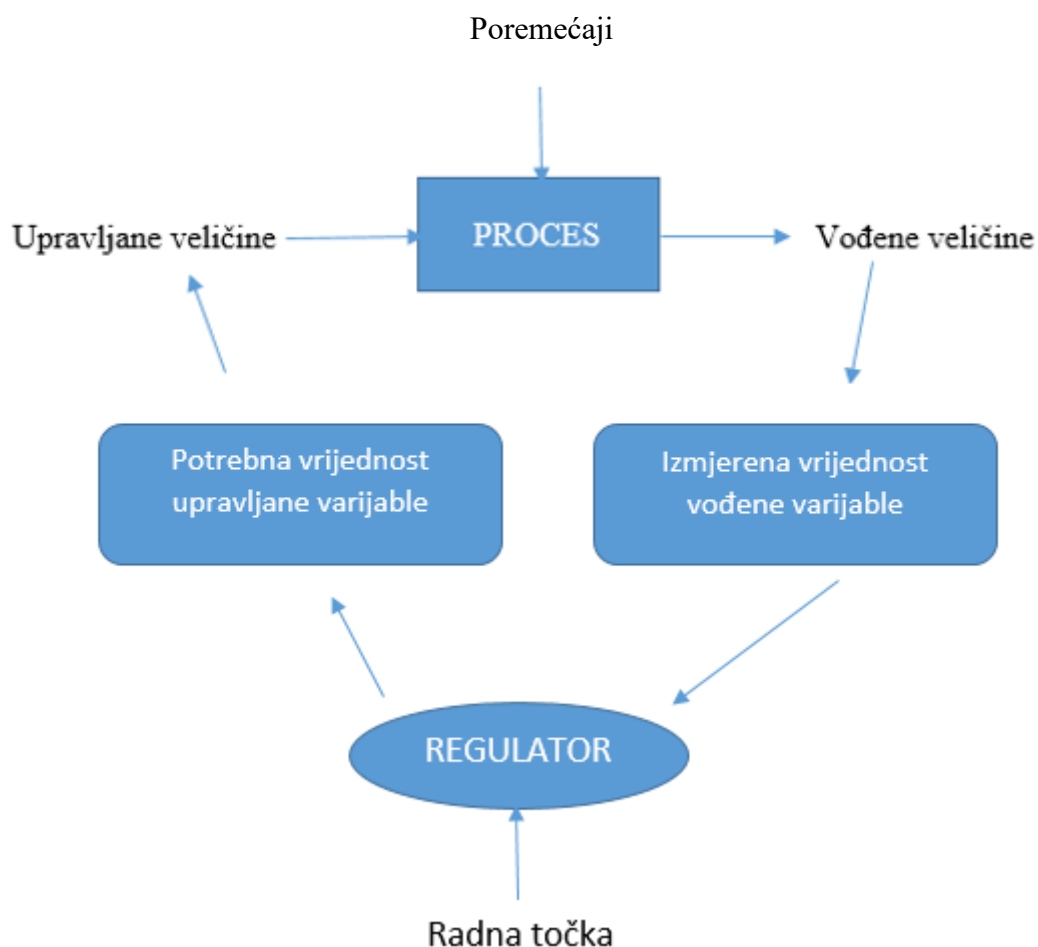


Slika 3. *Regulacija temperature u kući*

1.3. Metode vođenja procesa

1.3.1. Vođenje povratnom vezom

Vođenje povratnom vezom (engl. *feedback control*) osnovni je oblik automatskog vođenja prikazano na slici 4. Mjerno osjetilo detektira vođenu veličinu, a mjerni pretvornik prosljeđuje signal o vrijednosti vođene veličine. Ta vrijednost dolazi do regulatora koji radi na temelju povratne veze tj. on kontinuirano uspoređuje zadanu i izmjerenu vrijednost vođene veličine. Na osnovi izračunate razlike regulator određuje iznos signala odstupanja od željene vrijednosti. Algoritam regulatora proračunava signal koji dolazi s izlaza regulatora tj. vrijednost upravljane veličine. Signal se šalje do izvršnih elemenata koji prilagođavaju upravljanu veličinu [1].

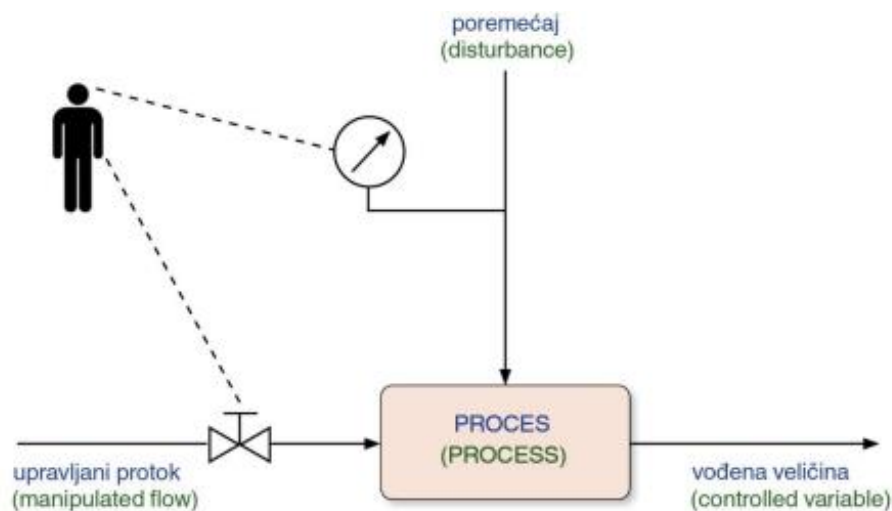


Slika 4. Automatsko vođenje povratnom vezom

Prednost ovog načina vođenja je ta što nije potrebno unaprijed znati koji će sve poremećaji utjecati na proces i koliko iznosi njihova vrijednost. Ovaj princip vođenja je najjednostavniji i najčešće se upotrebljava u industriji [1].

1.3.2. Ručno unaprijedno vođenje

Vođenje po principu unaprijedne veze (engl. *feedforward control*) konceptijski odstupa od vođenja povratnom vezom. Prikaz ručne izvedbe ovakvog vođenja nalazi se na slici 5. Operator, na temelju informacije o poremećaju koju dobiva od mjernog indikatora, podešava upravljanu veličinu kako bi spriječio veću promjenu ili varijaciju vođene veličine. Vođenjem unaprijednom vezom nastojimo otkloniti odstupanja prije no što se ono dogodi [1].



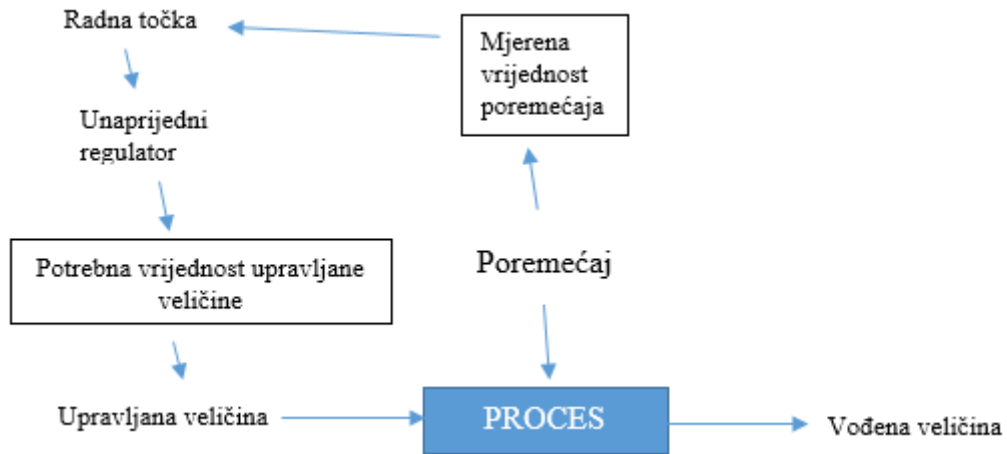
Slika 5. Ručno unaprijedno vođenje [1]

Ako se želi ovim načinom voditi proces potrebno je jako dobro poznavati proces. Mora se imati uvid u vrste poremećaja koji bi se mogli pojaviti u procesu te ih treba moći izmjeriti. Nakon svega toga namješta se upravljana veličina kako bi kompenzirali poremećaje [1].

1.3.3. Automatsko unaprijedno vođenje

Automatsko vođenje unaprijednom vezom može se vidjeti na slici 6. Na slici se može vidjeti poremećaj koji djeluje na proces te senzor kojim se mjeri ovaj poremećaj. Nakon što su

se izmjerile vrijednosti poremećaja, regulator će prema unaprijednom načelu podesiti potrebne vrijednosti upravljane veličine [1].



Slika 6. Automatsko vođenje unaprijednom vezom

1.4. Vođenje procesa u praksi

1.4.1. Zašto je potrebno vođenje?

Kako bi se mogao napraviti dobar projekt automatskog vođenja jako je bitno poznavati dinamiku i vođenje procesa. Projektiranje podrazumijeva jasno određivanje odgovarajućih mjernih osjetila i pretvornika te izvršnih elemenata. Za mjerenje ključnih procesnih veličine kao što su protok, temperatura i tlak koristimo osjetila [1].

Uz sve to, potrebno je odrediti i kapacitet procesne opreme. Potreban je dovoljan kapacitet kako zbog poremećaja i promjena nebi došlo do preopterećenja procesne opreme, a na posljertku i katastrofe velikih razmjera. Zbog toga je potrebno određivati maksimalne i minimalne vrijednosti ključnih veličina te prema tome prilagoditi procesnu opremu [1].

1.4.2. Kako se provodi vođenje?

Vođenje se uglavnom provodi automatski, a za to je potrebno proračunati ključne funkcije mjerenja te upravljati odgovarajućom opremom uz to da su svi elementi povezani u cjelinu. Danas se vođenje provodi koristeći elektroničku opremu i sustave za vođenje. Računalo se koristi kao regulator te je ono drugi ključni element vođenja procesa [1].

1.4.3. Gdje se primjenjuje vođenje?

Vođenje se odvija u operatorskoj sali (engl. *control room*) gdje su inženjerima i operatorima omogućene, u svakom trenutku, sve bitne informacije o stanju u pogonu. Operacijska sala ne mora nužno biti blizu samog procesa koji se vodi već može biti udaljena i do nekoliko kilometara. Operator se u sali bavi nadgledanjem procesa i reguliranjem velikog broja veličina. Postrojenja uvijek imaju mogućnost da se njihovo vođenje prebaci s automatskog na ručno kako bi operator bio u mogućnosti u svakom trenutku prekinuti neželjeni proces [1].

1.4.4. Čime se bavi inženjer tj. stručnjak za automatsko vođenje te koje su svrhe i ciljevi vođenja procesa?

Inženjer se bavi projektiranjem procesa, mjerenjem brzine odziva i prema tome odabirom prigodnog osjetila, određivanjem koji će se izvršni elementi ugraditi te odabirom strukture sustava za vođenje [1].

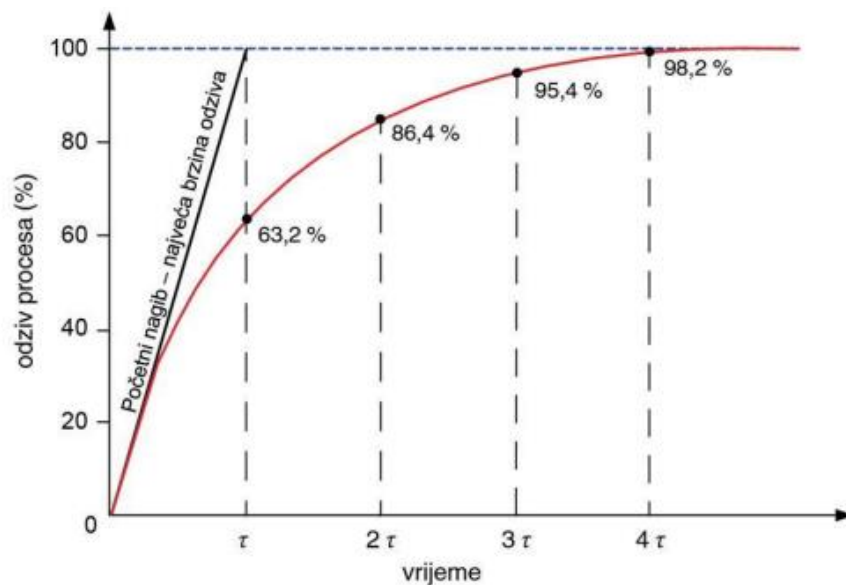
2. TEORIJSKI DIO

2.1. Analiza dinamike procesa

Kako bi se vladalo procesom i sustavom za vođenje potrebno je poznavati osnove dinamičkog vladanja procesa. Utvrđivanje odziva procesa najjednostavnije se provodi tako da izvedemo test na skok (engl. *step test*) promjenom upravljane veličine nakon čega se prati odziv vođene veličine [2].

2.1.1. Proces prvog reda

Proces prvog reda tipičan je oblik odziva dinamičkog procesa. Kada se promjeni vrijednost upravljane varijable za neki određeni iznos ta promjena se dogodi trenutno i skokovito. Tijekom analiziranja odziva prati se prijelaz iz početnog u konačno stanje. Na slici 7. prikazan je odziv procesa prvog reda na skokomičnu pobudu [2].



Slika 7. Odziv procesa prvog reda [2]

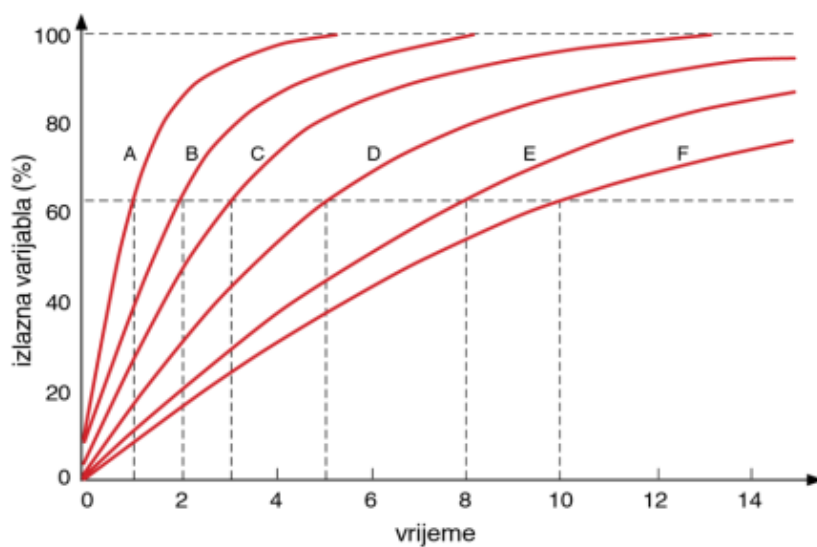
Odziv u ovom procesu zaostaje za poremećajem, a opisuje se jednačom:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = k u \quad (1)$$

y označava izlaz, u ulaz, k statičku osjetljivost, a τ vremensku konstantu procesa.

Proces prvog reda se još naziva i zadržkom prvog reda (engl. *first order lag*) ili eksponencijalnom prijenosnom zadržkom (engl. *eksponential transfer lags*). Te odzive odlikuje akumulacija energije i tvari, a vremenska konstanta (engl. *time constant*) je dinamički odziv. Matematički, vremenska konstanta označava vrijeme potrebno da se ostvari 63,2 % ukupne promjene izlazne veličine, slika 8 [2].

Promotri li se slika 8., koja govori o različitim brzinama odziva na skokomičnu pobudu, vidjet će se da brzina odziva na poremećaj neprekidno pada. Na početku, brzina odziva ima najveću moguću vrijednost jer je krivulja A najstrmija odnosno najbrže dolazi do vrijednosti izlazne varijable od 100 %, a kasnije brzina odziva konstantno pada.



Slika 8. Odzivi procesa prvog reda na skokomičnu pobudu [2]

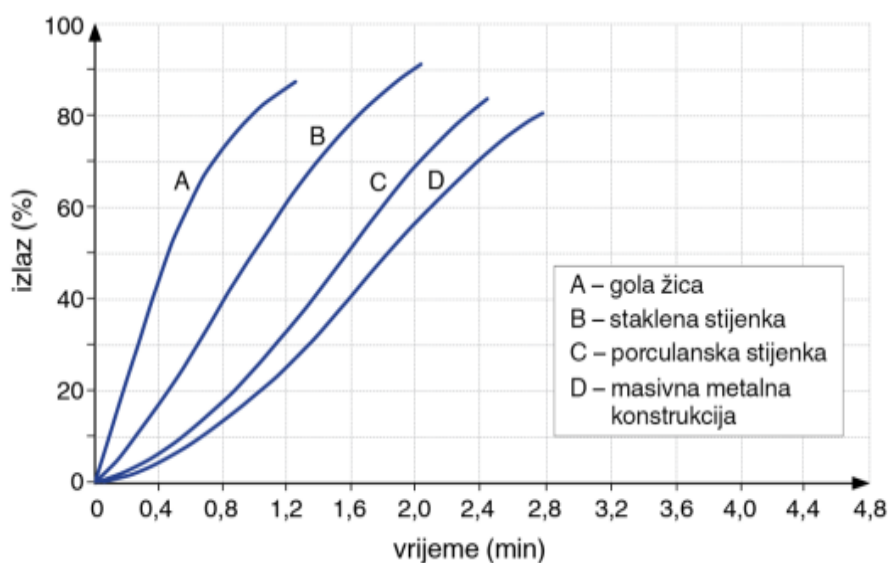
2.1.2. Procesu višeg reda

Postoje procesi koji se ne mogu pisati modelom procesa prvog reda. U tom procesu maksimalna brzina odziva javlja se tek nakon određenog vremena, a ne na početku (točka infleksije na krivulji S oblika). Iz toga se zaključuje da se radi o procesu višeg reda, a oni mogu biti posljedica:

- a) nekoliko u seriju povezanih procesa prvog reda;
- b) ako je regulator koji je definiran jednadžbom prvog reda serijski povezan s drugim komponentama;
- c) zbog djelovanja sile (npr. inercija) na mehaničke dijelove i tekućinu;

- d) kada proces posjeduje distribuirane karakteristike kod kojih je odziv definiran diferencijalnim jednačbama višeg reda ili parcijalnim diferencijalnim jednačbama [2].

U praksi se često susreću procesi viših redova. Na slici 9. mogu se vidjeti odzivi osjetila temperature bez i s tuljcem koji se koristi za zaštitu od vanjskih utjecaja. Odziv osjetila u zaštitnom tuljcu je tromiji, a odzivna krivulja poprima oblik položenog slova S. Takve slučajeve karakterizira velika zadržka te je zbog toga proces puno teže voditi [2].



Slika 9. Utjecaj plašta na mjerenje temperature [2]

2.1.3. Mrtvo vrijeme

Obično se označava s θ , a predstavlja jedan od najvećih problema suvremenog vođenja procesa. Tijekom mrtvog vremena nema nikakvog odziva, a s tim ne postoji ni povratna informacija pomoću koje dolazi do korekcijskog djelovanja. Mrtvo vrijeme još se naziva i prijenosnim kašnjenjem ili vremenskim kašnjenjem, a u praksi je neizbježno i veoma često. Određuje se tako da se mjeri vrijeme potrebno da od promjene ulaza dođe do promjene odziva izlaza [2].

2.1.4. Opće značajke dinamičkog vladanja procesa

Potrebno je spoznati da su procesi u regulacijskom krugu nestabilni odnosno dinamični. Generalno, ako je u regulacijskom krugu više zadržke, odnosno više vremenskih konstanti i više mrtvih vremena, proces je teže voditi. Zadržke mogu biti povezane s ventilom, osjetilom ili procesom i sve štete dobrom vođenju procesa.

Potrebno je shvatiti da se na dinamiku procesa često ne može mnogo utjecati stoga je potrebno projektirati i instalirati sustav koji unosi što manje zadržke u regulacijski krug. Zaključno, u praksi je važno dobro procijeniti dinamiku vladanja svih komponenta sustava kako bi proces bio što stabilniji i povoljniji za regulaciju [2].

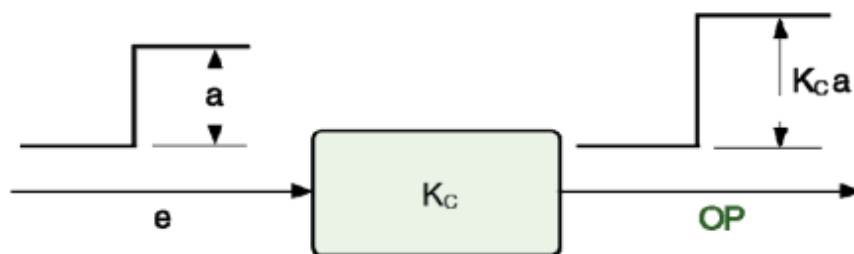
2.2. Regulatori i regulacijski krug

2.2.1. Regulatori

To su kalkulatori koji se primjenjuju kako bi na temelju signala pogreške iz usporednika (komparatora) računali nužne vrijednosti upravljačke varijable. Osim regulatora u kućištu se nalaze i drugi funkcionalni elementi poput A/D pretvornika, usporednika, snimača te D/A pretvornika. Regulatori se kategoriziraju prema tome koji izvor energije ih pokreće. Tako mogu biti elektronički (digitalni), pneumatski, mehanički i hidraulički. Danas su u upotrebi uglavnom digitalni regulatori [3].

2.2.2. Proporcionalno djelovanje regulatora

Osnovno i najjednostavnije djelovanje kontinuiranog regulatora naziva se proporcionalnim djelovanjem, a kod tog djelovanja izlazna veličina regulatora proporcionalna je signalu pogreške. Na slici 10. nalazi se slikovito objašnjenje proporcionalnog djelovanja regulatora kada se ulazna pogreška mijenja skokomitično [3].



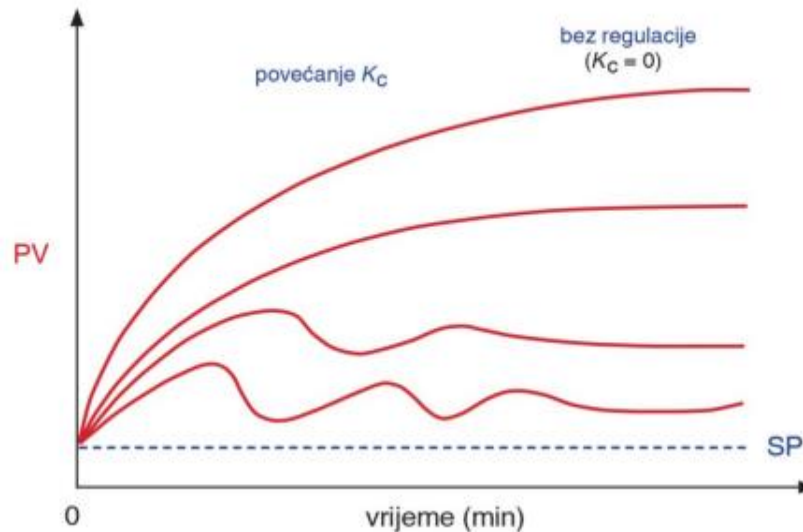
Slika 10. Proporcionalno djelovanje regulatora [3]

Vrijednost upravljane veličine računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$OP = K_C e \quad (2)$$

OP označava upravljaju varijablu, K_C pojačanje regulatora (engl. *controller gain*), a e iznos pogreške odnosno odstupanja od željene vrijednosti. K_C označava promjenu varijable po jedinici promjene signala poremećaja.

Proporcionalni regulator je najjednostavniji za ugoditi, a očituje se velikom stabilnošću i vrlo je brzog odziva. Jedini manjak takvog tipa regulatora je preostalo regulacijsko odstupanje (engl. *offset*), a to znači da čak i nakon njegovog djelovanja uvijek će biti odstupanja stvarne vrijednosti vođene veličine od radne točke [3].



Slika 11. Preostalo regulacijsko odstupanje [3]

2.2.3. Integracijsko djelovanje regulatora

Integracijski regulator integrira signal pogreške (e) što znači da svojim djelovanjem iznos upravljane varijable mijenja brzinom koja je proporcionalna pogrešci. Što je veće odstupanje to će se izvršna sprava brže kretati, a kada dostigne vrijednost radne točke, onda izvršna sprava miruje. To upućuje na to da za razliku od proporcionalnog djelovanja ovdje nema preostalog regulacijskog odstupanja u ustaljenom stanju [3].

Integracijski regulator uglavnom djeluje zajedno s proporcionalnim, a taj sklop nazivamo proporcionalno-integracijski regulator ili PI regulator. Temeljni algoritam PI regulacije je sljedeći:

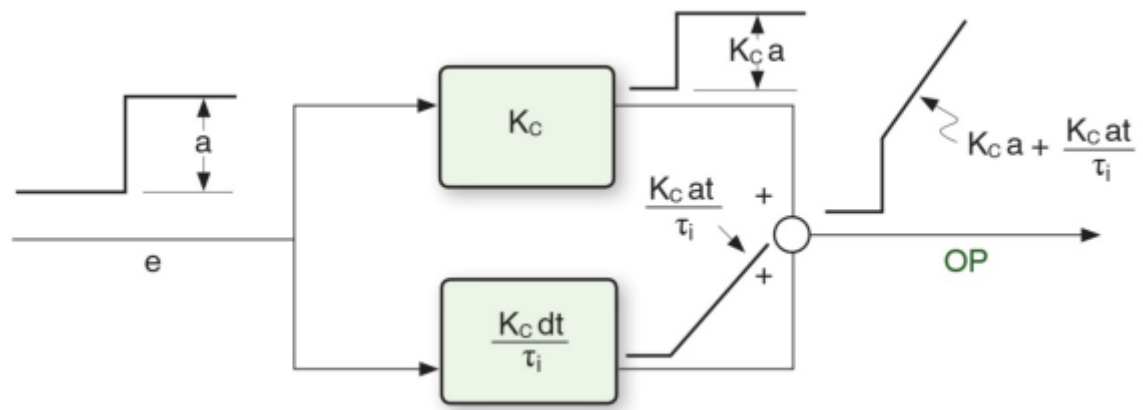
$$OP = K_C \left(1 + \frac{1}{\tau_i} \int e \, dt \right) \quad (3)$$

OP – iznos upravljane varijable e – signal pogreške

K_C – pojačanje regulatora

τ_i - konstanta integracije [s]

Na slici 12. prikazano je djelovanje PI regulatora. Gornji dio regulatora predstavlja proporcionalni, a donji dio integracijski dio PI regulatora. Možemo uočiti skokomičnu promjenu ulaza i kako pojedini dio regulatora mijenja izlaz odnosno kako djeluje.



Slika 12. Djelovanje PI regulatora [3]

PI regulator mijenja izlaz tako da zbraja djelovanja proporcionalnog i integracijskog dijela regulatora. Integracijsko djelovanje funkcionira tako da ponavlja iznos proporcionalnog djelovanja u vremenu τ_i .

Prednost ovog načina regulacije je uklanjanje preostalog regulacijskog odstupanja pomoću integracijskog djelovanja, no nedostatak je to što se stabilnost kruga ponešto smanji. Ugađanje PI regulatora je nešto kompleksnije od ugađanja samo proporcionalnog regulatora. Postoji mogućnost da se koristi samo integracijsko djelovanje, ali samo kod specifičnih slučajeva [3].

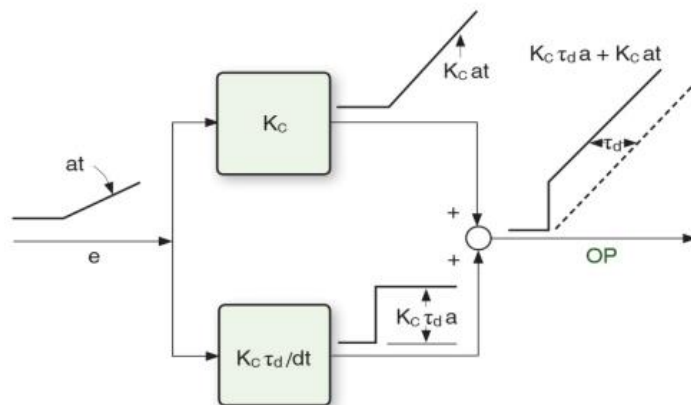
2.2.4. Derivacijsko djelovanje

Derivacijsko djelovanje ovisi o brzini signala pogreške, e , a nikad se ne primjenjuje samostalno. Stoga, derivacijsko se djelovanje uvijek koristi u kombinaciji s proporcionalnim, a jednačba prema kojoj djeluje glasi:

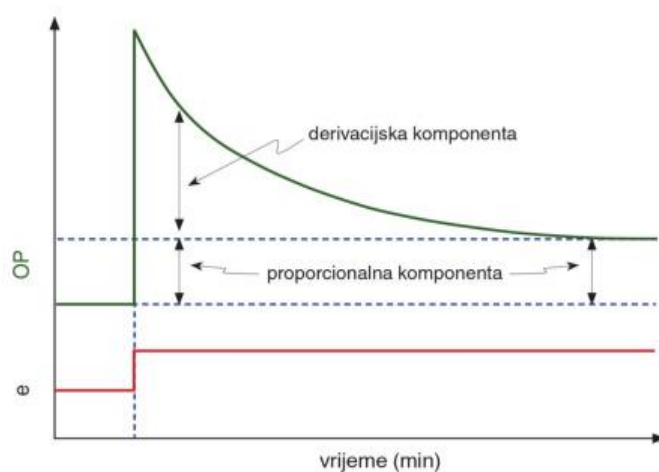
$$OP = K_C \left(1 + \tau_D \frac{d}{dt} \right) \quad (4)$$

U ovoj je jednadžbi τ_D derivacijska konstanta ili derivacijsko vrijeme.

Dodatkom derivacijsko djelovanja u sustav unosimo prethodjenje (engl. *lead*) kako bi se kompenzirala zadržka u regulacijskom krugu. Ovo djelovanje nije lako za primjenu i ugađanje pa se primjenjuje isključivo na procese koji se očituju velikom zadržkom. Kada se koristi derivacijsko djelovanje potrebno je filtrom odstraniti šum kako nebi došlo do poremećaja izlaznog signala. Na slici 13. može se vidjeti kako funkcionira PD regulator. Gornji dio se odnosi na proporcionalno djelovanje, a donji na derivacijsko djelovanje. Derivacijsko djelovanje stabilizira krug te je zbog toga moguće koristiti veće pojačanje regulatora i tako još dodatno smanjiti preostalo regulacijsko odstupanje kod proporcionalnog djelovanja [3].



Slika 13. Djelovanje PD regulatora kod pravčaste promjene ulaza [3]



Slika 14. Djelovanje PD regulatora kod skokomične promjene ulaza [3]

2.2.5. PID regulacija

Proporcionalno-integracijsko-derivacijski regulator koji posjeduje sva tri djelovanja i koristi se kao standardni kontinuirani regulator za vođenje povratnom vezom. Jednadžba kojom djeluje je sljedeća:

$$OP = K_C \left(1 + \frac{1}{\tau_i} \int edt + \tau_d \frac{d}{dt} \right) \quad (5)$$

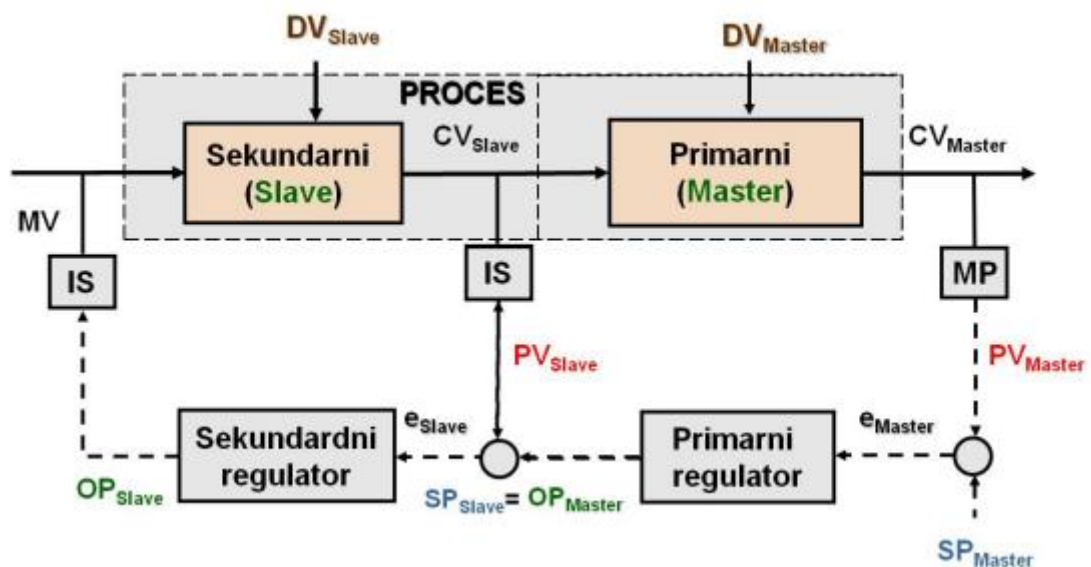
Ovaj način vođenja očituje se brzim odzivom i nema preostalog regulacijskog odstupanja. Vrlo je složen za ugađanje, ali ako se to dobro učini onda postićemo najbolju moguću regulaciju [3].

2.2.6. Ugađanje regulatora

Kako bi se postigla dobra regulacija, važno je odrediti optimalne vrijednosti pojačanja regulatora, K_C , integracijskog vremena, τ_i i derivacijskog vremena, τ_d . Početni problem koji se susreće kada se ugađa regulator je što je dobro vođenje, a to se razlikuje od procesa do procesa. Kako bi se namjestio regulator, potrebno je promotriti cijeli proces koji se sastoji od procesnog prostora, mjerne i izvršne opreme, cjevovoda i ostale procesne opreme. Prilikom podešavanja regulatora, statička osjetljivost procesa diktirat će koje bi bilo optimalno pojačanje K_C potrebno za regulator, na način da ovisno o brzini promjene vođene varijable za postotak otvorenosti ventila (vrijednost statičke osjetljivosti) namješta pojačanje koje bi vrijednost vođene varijable što prije dovelo do vrijednosti radne točke. Preko vremenske konstante i mrtvog vremena, koji određuju zadržku, namjestiti ćemo iznos integracijske i derivacijske konstante. Iz navedenog možemo zaključiti da se regulatori nemogu tvornički namjestiti već ih treba podešavati na licu mjesta s obzirom na vrstu procesa. Za takvo ugađanje pogoduju matematički modeli regulacijskog kruga i simulacija procesa. Krug se podešava sve dok ne ostvarimo zadovoljavajuću regulaciju procesa. Postoji ugađanje metodama otvorenog i zatvorenog regulacijskog kruga [3].

2.2.7. Kaskadna regulacija

Kod kaskadne regulacije uvodi se jedan regulacijskog kruga unutar drugog, slika 15. Da bi se to moglo postići potrebno je pronaći međuveličinu koja služi kao vođena veličina u unutarnjem krugu. Kaskadna regulacija je najkorisnija kada u sustavu postoji velika dinamička zadržka, a to je uglavnom kod vrlo sporih procesa. Kod takvih procesa treba puno vremena da od pojave poremećaja krene korekcijsko djelovanje. Kada krene korekcijsko djelovanje, onda treba dugo čekati rezultate. Korištenje kaskadne regulacije zahtjeva ugradnju dodatne mjerne opreme kao što je dodatni regulacijski krug, dodatni senzor i oprema za prijenos signala [4].



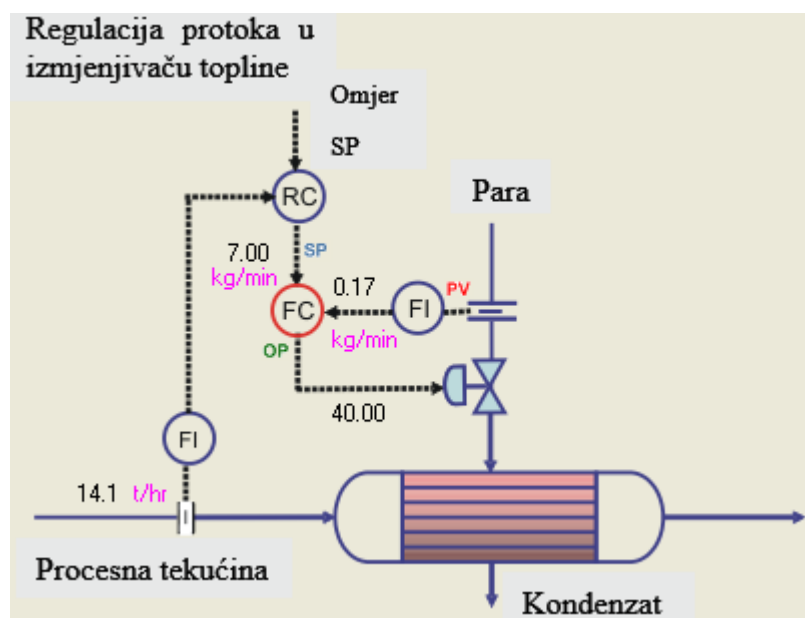
Slika 15. Kaskadna regulacija [4]

3. SIMULACIJSKO ISTRAŽIVANJE I RASPRAVA

3.1. Određivanje parametara procesa regulacije protoka u izmjenjivaču topline

3.1.1. Kratki opis procesa

Izmjenjivači topline su naprave koje se koriste u svrhu zagrijavanja ili hlađenja procesnog toka. U ovom slučaju izmjenjivač topline zagrijava procesnu tekućinu pomoću vodene pare indirektnim kontaktom pare i procesne tekućine. Plašt i cijevi međusobno su u kontaktu pa se preko zajedničke površine izmjenjuje toplina. Na taj način procesna tekućina se zagrijava na određenu temperaturu, a para se hladi i kondenzira. U ovom konkretnom primjeru regulira se protok pare kako bi se procesna tekućina zagrijala na željenu temperaturu. Slikom 16. prikazan je simulacijski primjer prethodno opisanog procesa u programskom paketu SIMCET.



Slika 16. Prikaz izmjenjivača topline u SIMCET-u [4]

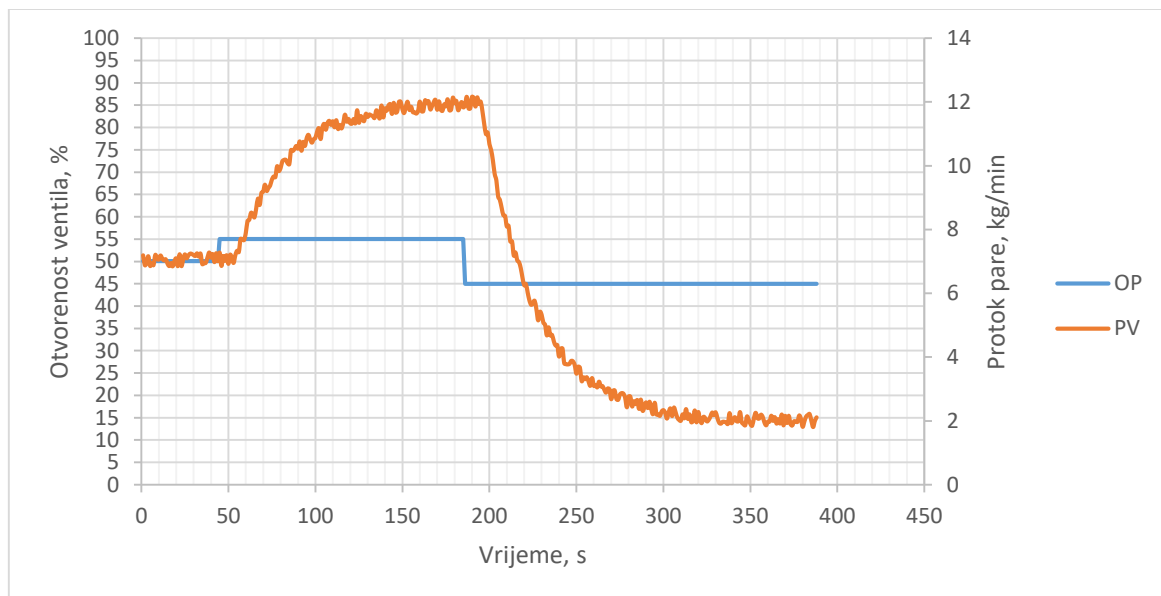
U ovom se primjeru protok pare regulira pomoću regulatora protoka (FC) koji dobiva informaciju o protoku pare putem mjerila i indikatora protoka (FI) koji je mjerna prigušnica.

Radna točka (*SP*) vezana je uz regulator omjera (*RC*) koji regulira omjer procesne tekućine i pare te s obzirom na izmjereni protok procesne tekućine on daje naredbu regulatoru protoka koji onda dalje otvara ili pritvara ventil pare kako bi se podesio željeni protok.

3.1.2. Određivanje parametara procesa

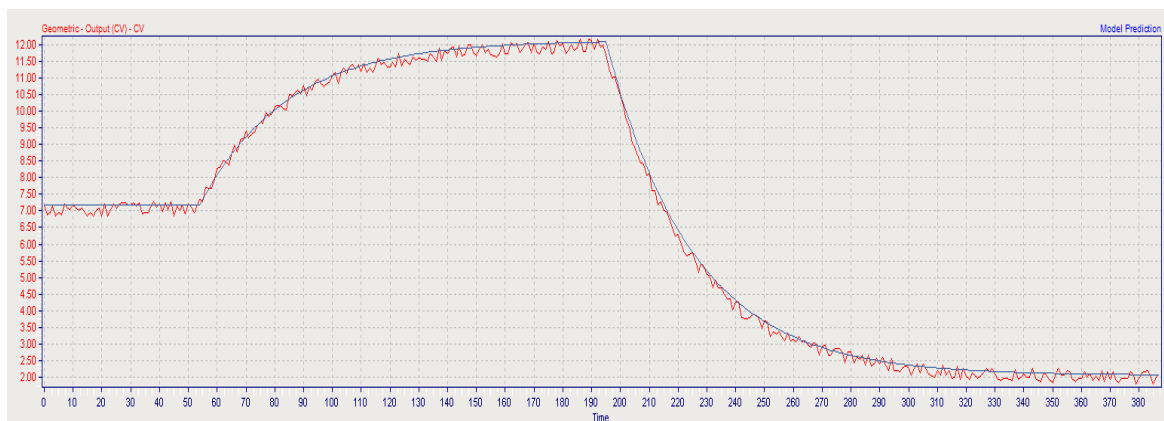
Slijedi određivanje parametara procesa pomoću programskog paketa PITOPS.

Prvo se provodi test na skok za određivanje parametara procesa. Test na skok je izveden tako da se regulacija sustava prebaci na ručni rad te se prvo upravljačka varijabla podesi na 5 % veću vrijednost, a potom, kada se sustav stabilizira, smanji *OP* za 10 %. Prikaz testa na skok prikazan je na slici 17.



Slika 17. Test na skok kod regulacije protoka pare u izmjenjivaču topline

Nakon testa na skok, podaci se spremaju i otvaraju u programu za procjenu parametara. Nakon upisa inicijalnih parametara procesa, slijedi optimizacija parametara izborom određene optimizacijske metode. Dobiveni model validira se vizualno (poklapanje sa stvarnim podacima). U validaciji također pomaže i vrijednost pogreške koja se metodom najmanjih kvadrata izračunava na temelju odstupanja vrijednosti dobivenih metodom optimizacije u programu i stvarnih podataka.



Slika 18. Usporedba odziva modela s eksperimentalnim podacima

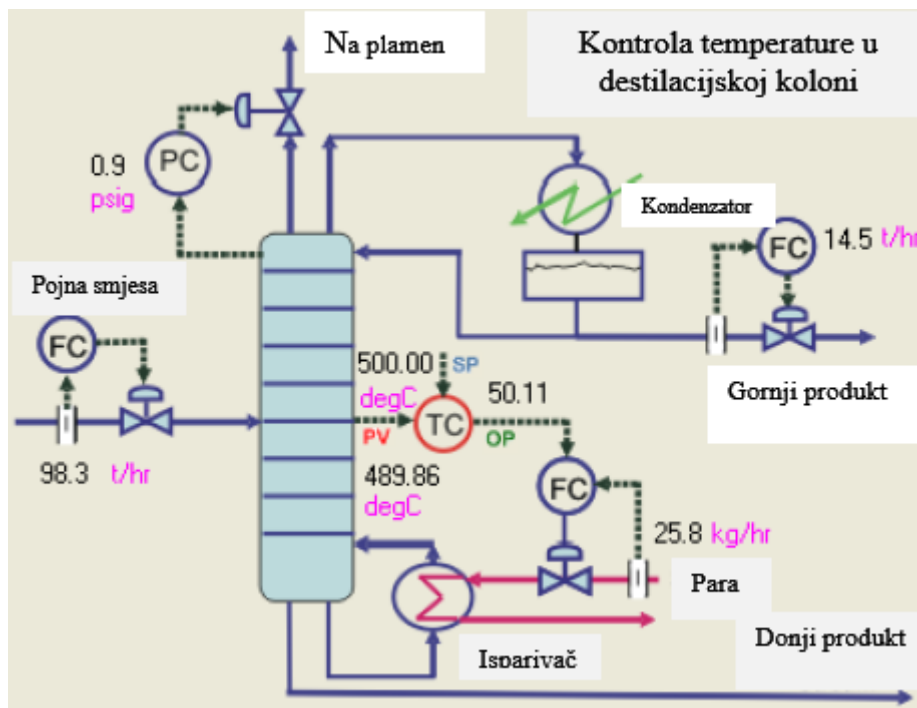
Tablica 1. Usporedba vrijednosti parametara procesa

	Određeno grafički	Optimizacijski algoritam
Zadržka	10 s	11,1 s
Statička osjetljivost	1 kg/min/%	1 kg/min/%
1. vremenska konstanta	30 s	30,6 s
2. vremenska konstanta	0 s	0 s

Iz prethodne tablice zaključuje se da se grafički određeni parametri stvarnih podataka i parametri dobiveni optimizacijski algoritam *geometric* jako dobro slažu.

3.2. Ugađanje regulatora temperature u destilacijskoj koloni

Destilacija je postupak odjeljivanja kapljevite smjese na bazi različitih temperatura vrelišta pojedinih komponenata smjese. Prikaz destilacije nalazi se na slici 19.



Slika 19. Prikaz kontrole temperature u destilacijskoj koloni u SIMCET-u [7]

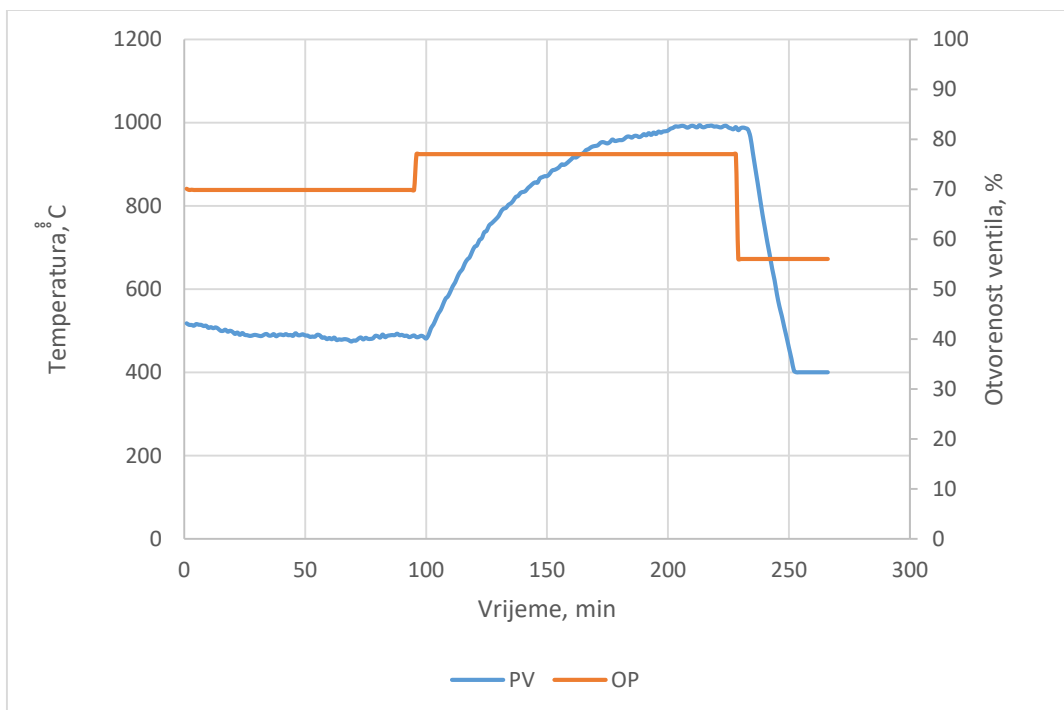
3.2.1. Kratki opis procesa

Pojna smjesa uvodi se u destilacijsku kolonu kako bi se tamo razdvojila na gornji i donji proizvod. Gornji proizvod se sastoji od velikog udjela lakše hlapivih komponenata, a donji proizvod od velikog udjela teže hlapivih komponenata smjese. Iako je cilj razdvojiti smjesu na potpuno čiste komponente, to u praksi nije moguće pa uvijek zaostaju male količine teže hlapljivih komponenata u gornjem proizvodu i lakše hlapljivih komponenata u donjem proizvodu. Protok pojne smjese regulira se pomoću regulatora protoka (FC) koji dobiva povratnu informaciju o izmjerenom protoku te pomoću regulacijskog ventila regulira protok kako bi se zadovoljile količine gornjeg i donjeg proizvoda. Isparivač zagrijava pojnu smjesu pomoću vruće pare te ju prevodi u parno stanje. Temperatura u destilacijskoj koloni kaskadno se regulira pomoću dva međusobno povezana regulatora temperature (TC) i protoka pare (FC) koja zagrijava pojnu smjesu. Mjeri se temperatura u koloni te ugađa regulator temperature čiji izlaz zadaje radnu točku regulatoru protoka vruće pare kako bi se u konačnici postigla željena

vrijednost temperature u koloni. Regulacijom temperature se postiže određena čistoća gornjeg i donjeg proizvoda koja je jako bitna za proces. Kondenzator u ovom procesu omogućava da se gornji proizvod obogati lakše hlapivim komponentama smjese ukapljivanjem i vraćanjem dijela gornjeg proizvoda u kolonu kako bi se dodatno smanjio udio određene količine teško hlapivih komponenti, a povećao udio lako hlapljivih. Količina gornjeg proizvoda koja se vraća u kolonu regulira se regulatorom protoka (FC). Regulator tlaka (PC) održava određeni tlak u destilacijskoj koloni tako da odvodi višak plinovitog proizvoda na plamen (baklju).

3.2.2. Statička osjetljivost, vremenska konstanta i mrtvo vrijeme procesa

Regulacijski krug temperature stavlja se u ručni rad (*manual mode*) i mijenja upravljačka varijabla (*OP*) u obliku skoka (test na skok). Rezultat ovog postupka prikazan je na slici 20.

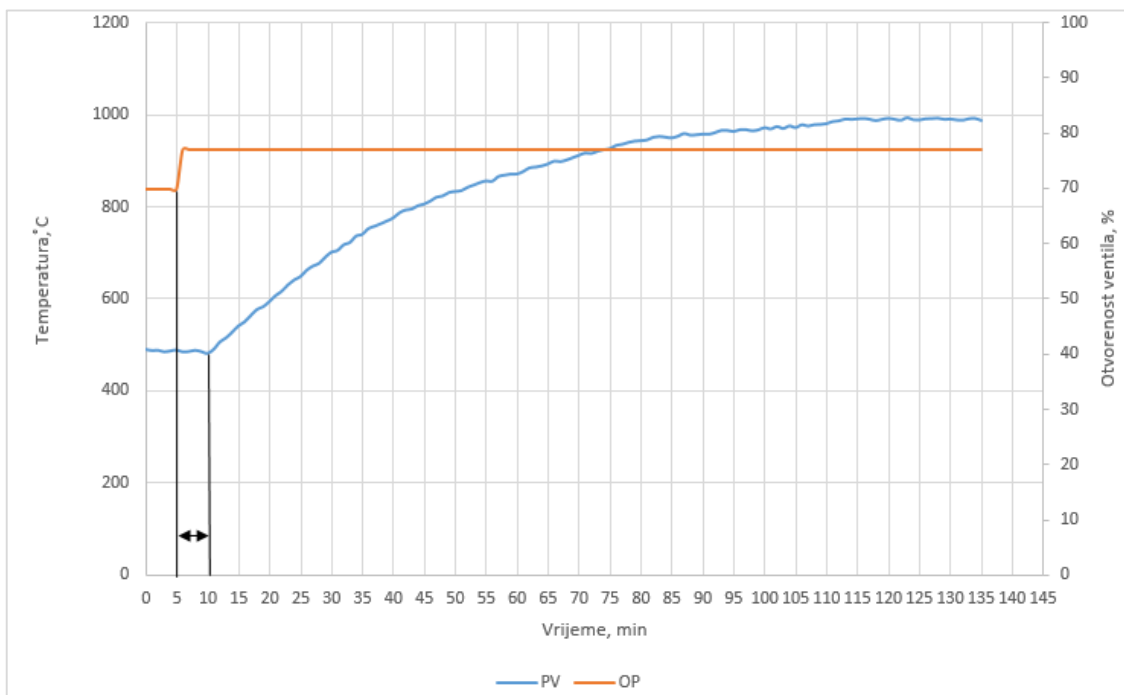


Slika 20. Test na skok

Plava linija označava vođenu varijablu, dok narančasta linija označava upravljačku varijablu.

Iznos upravljačke varijable se prvo poveća za 5 %, a potom smanji za 10 %. Vidljivo je da se povećanjem vrijednosti temperatura u koloni povećala na 990 °C i to kroz poprilično dug vremenski period zbog toga što je destilacija relativno spor proces. Potom, smanjenjem vrijednosti *OP*-a za 10 %, temperatura u koloni je brzo i nekontrolirano pala na 400 °C te se oglasio „PV niski alarm“ koji govori da je temperatura preniska za proces.

Slijedi određivanje mrtvog vremena procesa.



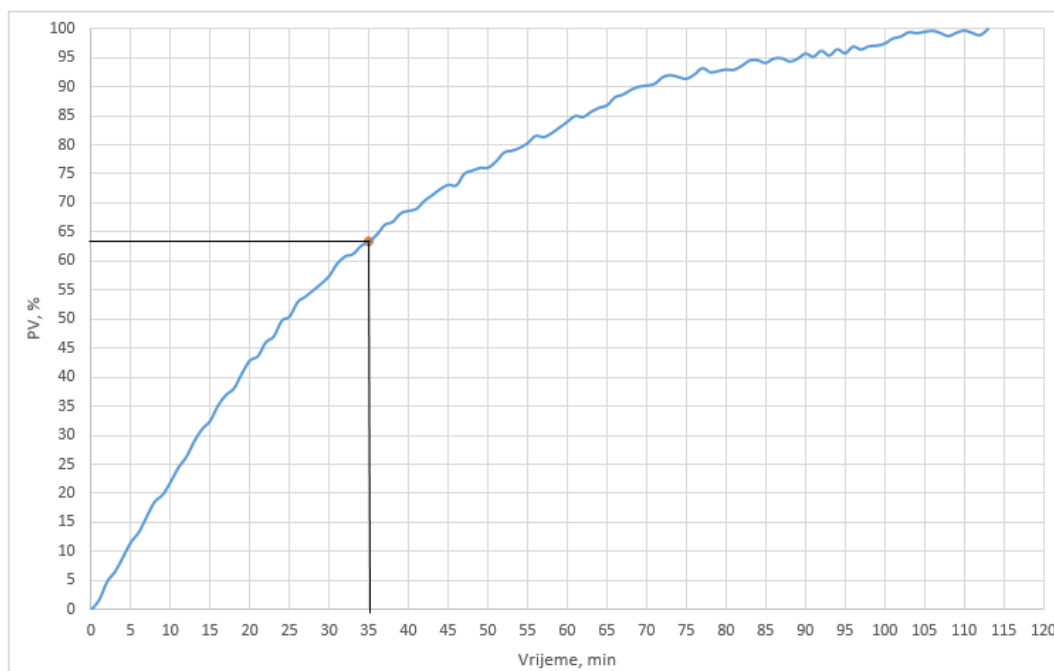
Slika 21. Mrtvo vrijeme

Grafički određeno mrtvo vrijeme prema slici 21. iznosi 5 min, a označava vrijeme potrebno da nakon promjene *OP*-a dođe do odziva sustava. Prema ovoj slici može se odrediti i statička osjetljivost procesa:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta OP} = \frac{(993,73 - 481,04)^\circ\text{C}}{55\% - 50\%} = 7,14^\circ\text{C} / \% \quad (6)$$

Iznos statičke osjetljivosti govori koliko će se promijeniti temperatura u koloni za određeni iznos *OP*-a. Što je veća statička osjetljivost veća će biti i promjena *PV*-a.

Slijedi određivanje vremenske konstante procesa koja nam označava vrijeme potrebno da *PV* dostigne iznos od 63,2 % konačne vrijednosti *PV*-a. Vremenska konstanta se također određuje preko grafičkog prikaza, a prethodno se vrijednosti *PV*-a prebacuju u postotke.



Slika 22. *Vremenska konstanta*

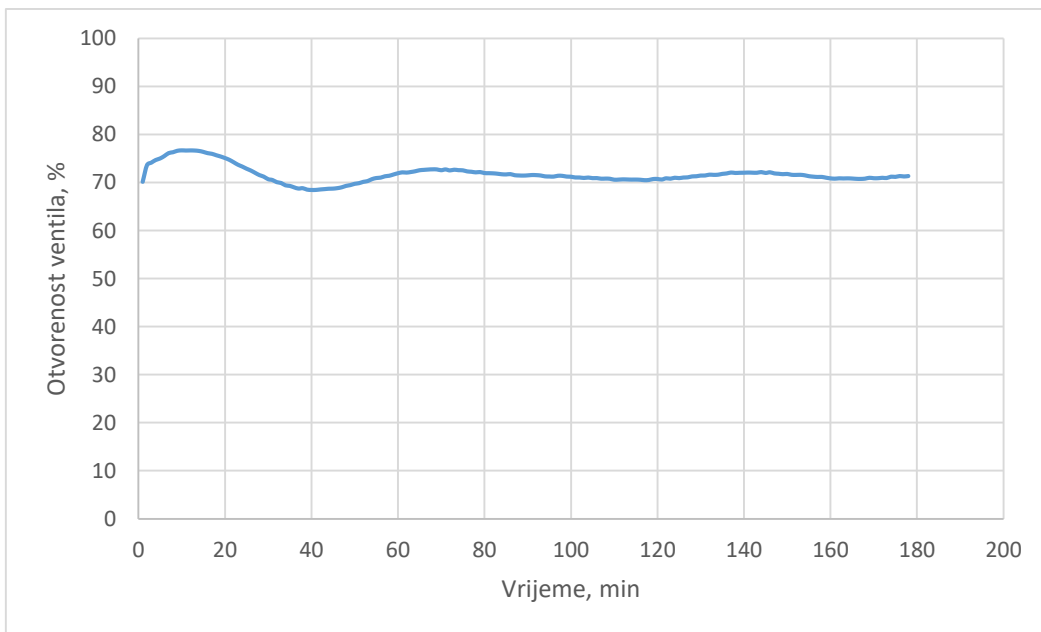
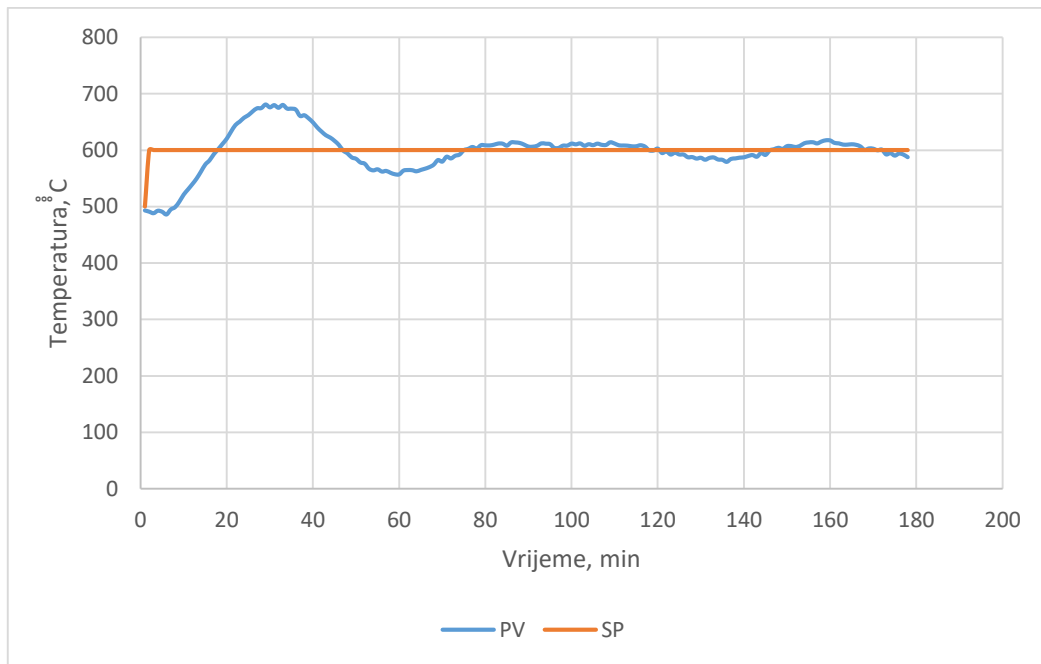
Iznos vremenske konstante je 35 minuta.

3.2.3. Vladanje sustava pri promjeni parametara regulatora

Nakon što su određeni parametri procesa, analizira se utjecaj parametara regulatora na regulaciju temperature u destilacijskoj koloni. Prvo će se vidjeti kako sustav reagira na promjenu radne točke (SP) s već definiranim parametrima.

Tablica 2. *Početni parametri regulatora*

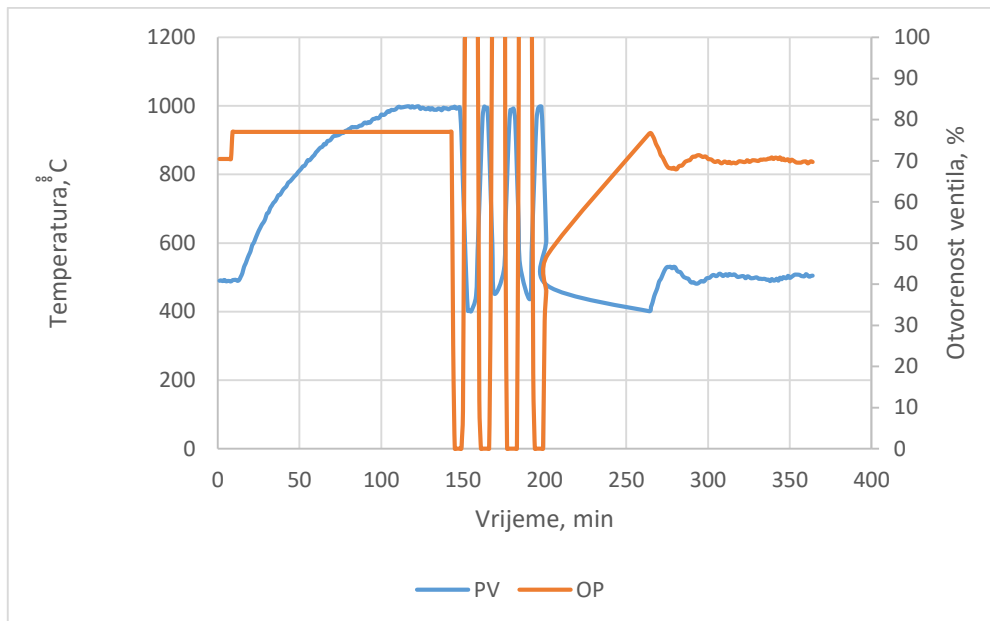
P	0,1
I	7 min
D	0 min



Slika 23. Reakcija sustava na promjenu SP-a

Radna točka je promijenjena s 500°C na 600°C te se pratila promjena PV-a. OP je također porastao i time povećao protok vruće pare koja grije kolonu. Ovaj način regulacije nije idealan zbog velikog prebačaja preko radne točke.

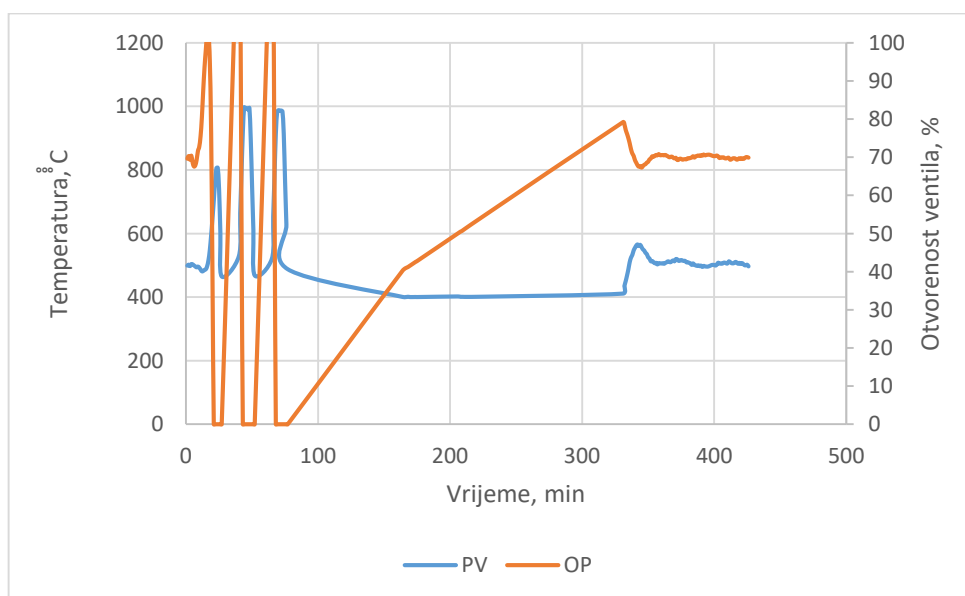
Slijedi povećavanje vrijednosti proporcionalne konstante P na iznos 3 te promatranje utjecaja na proces.



Slika 24. Utjecaj promjene proporcionalnog djelovanja na proces

Iz navedenog može se uočiti da se *OP* mijenja tako da stalno oscilira od 0 do 100 % što čini proces vrlo nestabilnim te se naizmjenice javljaju „visoki“ i „niski“ alarmi. Kako bi se sustav stabilizirao potrebno je smanjiti integracijsko djelovanje postavljanjem parametra I na 30 minuta i smanjiti proporcionalnu konstantu na 0,3.

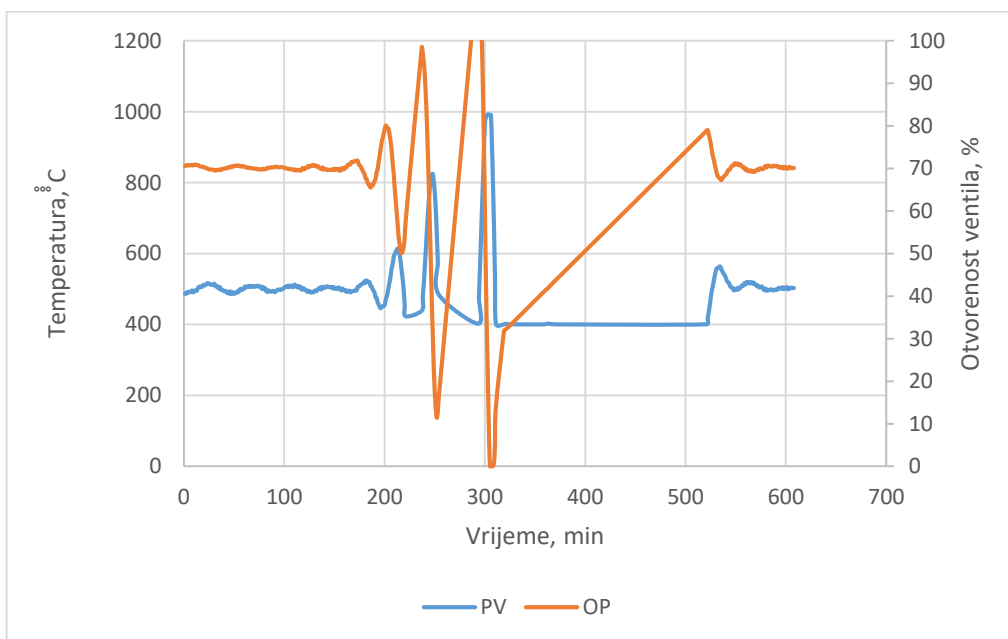
Slikom 25. prikazati će se reakcija sustava na povećanje integracijskog djelovanja smanjenjem integracijske konstante s 7 na 2 minute.



Slika 25. Utjecaj promjene integracijskog djelovanja na sustav

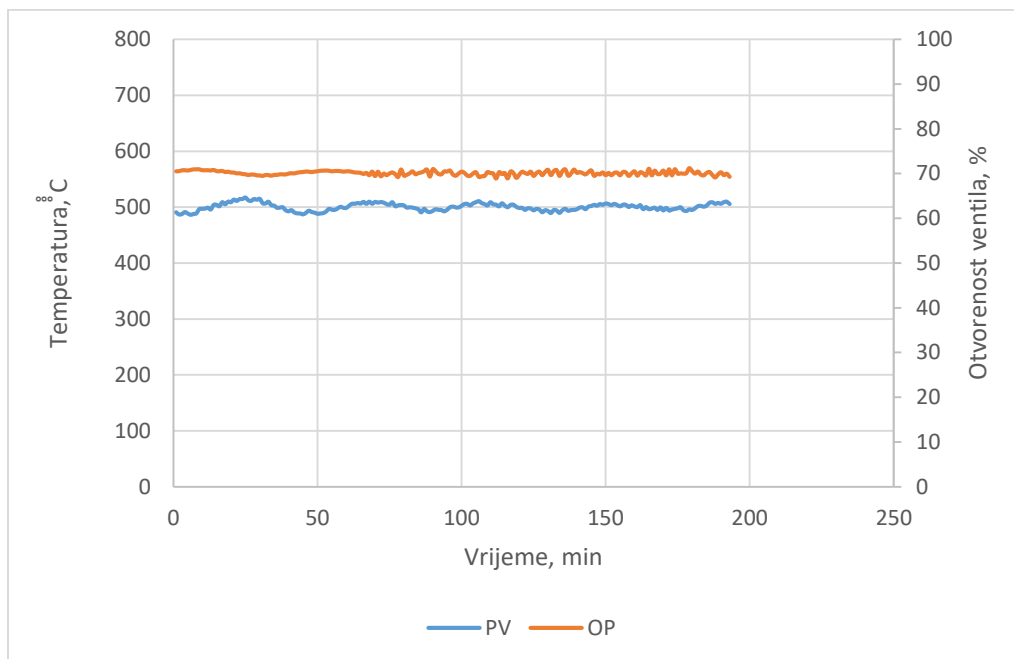
Vidljivo je da se da sustav vrlo slično vlada kao i kod promjene proporcionalnog djelovanja regulatora. *OP* oscilira od 0 do 100 % te je sustav vrlo nestabilan. Kada se smanji integracijsko djelovanje povećanjem integracijskog vremena na 30 minuta sustav se stabilizira.

Promjenom derivacijskog djelovanja mijenjanjem derivacijske konstante sustav se također vlada kao i u prethodna dva slučaja. *OP* jako oscilira te čini sustav nestabilnim.

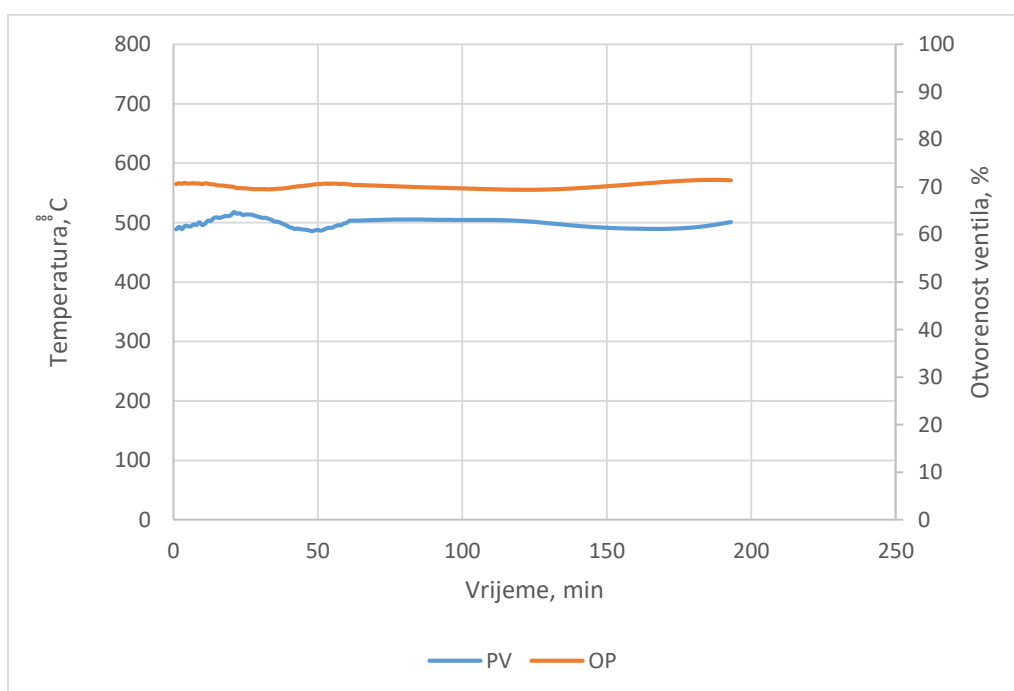


Slika 26. Utjecaj promjene derivacijskog djelovanja na sustav

Na kraju su prikazani grafički prikazi (Slika 27. i Slika 28.) u kojima se uočava kako filtarska konstanta djeluje na regulacijski krug. Vidljivo je da se upotrebom filtarske konstante uvelike smanjio šum u regulacijskom krugu.



Slika 27. Signal PV-a bez filtriranja

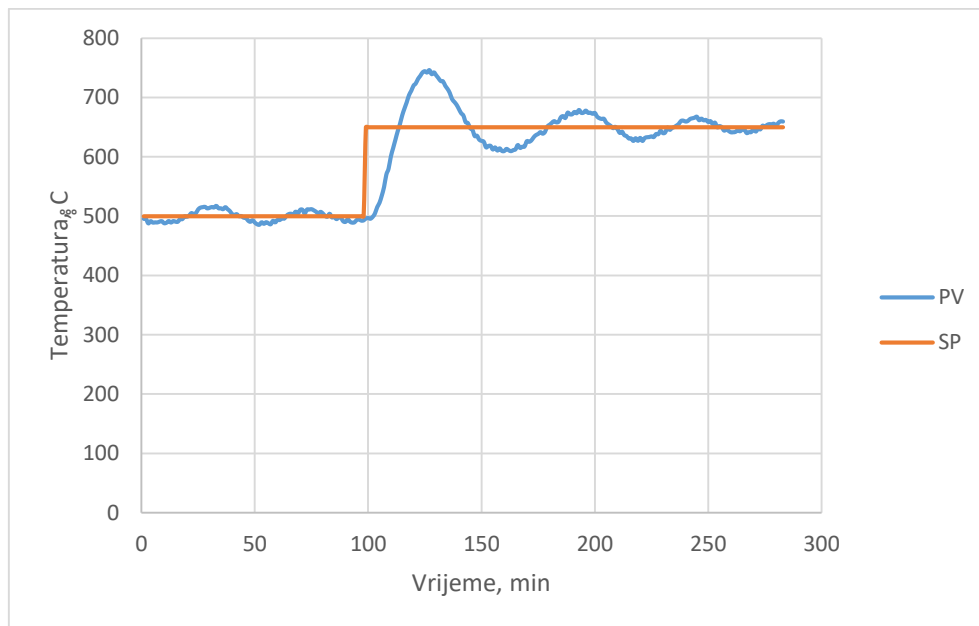


Slika 28. Filtrirani signal PV-a

Za kraj može se reći da je za ručno ugađanje regulatora za prikazani proces destilacije pogodno koristiti malo pojačanje i veću integracijsku konstantu regulatora (manje integracijsko djelovanje) kako bi odziv bio brz i kako bi proces bio stabilan. Derivacijsko djelovanje za ovaj proces nije potrebno.

3.3. Optimizacija regulacije temperature u destilacijskoj koloni

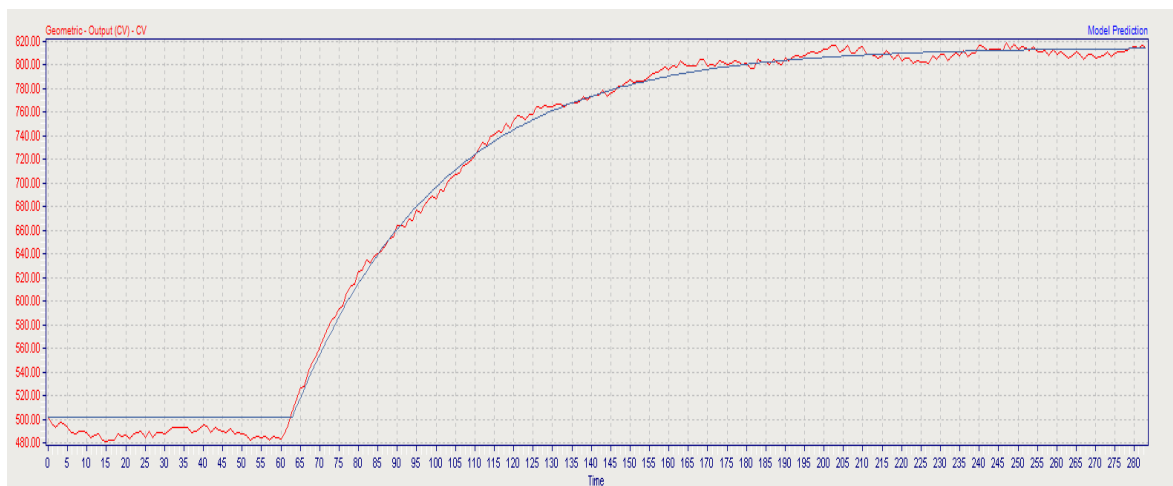
Optimizacija je proces kojim se mijenjaju postojeći parametri regulatora u svrhu boljeg vladanja procesa u regulacijskom krugu, bržeg odziva i veće konverzije produkta. Radi se tako da se prvo izvede test na skok na temelju čega se određuju parametri procesa, a potom optimiraju parametri regulatora. Prvo je ispitano vladanje regulacijskog kruga temperature u destilacijskoj koloni na promjenu radne točke (SP).



Slika 29. Promjena temperature uz promjenu radne točke (SP) u destilacijskoj koloni

Na slici 29. može se vidjeti veliki prebačaj temperature iznad radne točke što ukazuje da je potrebno promijeniti parametre regulatora. Također se može vidjeti da treba mnogo vremena da se ti prebačaji smanje te da je regulacijski krug poprilično nestabilan.

Slijedi određivanje parametara procesa. Koristio se optimizacijski algoritam *geometric* jer on najbolje opisuje krivulju iz simulacijskog programa.



Slika 30. Identifikacija procesa regulacije temperature u destilacijskoj koloni

Dobiveni su slijedeći parametri:

Tablica 3. Parametri procesa regulacije temperature u destilacijskoj koloni

	Grafički	Optimizacijski algoritam
Zadržka	5 min	8,1 min
Statička osjetljivost	7,75 °C /%	7,43 °C /%
1. vremenska konstanta	40 min	38,51 min
2. vremenska konstanta	0 min	0 min

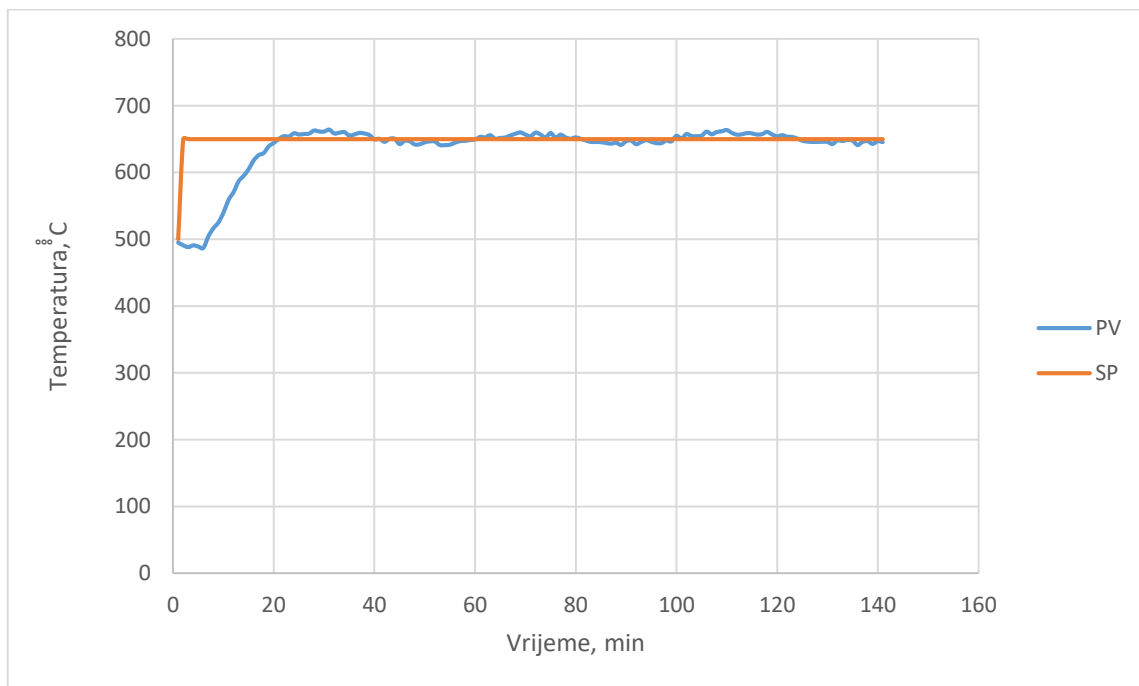
Ovdje se može vidjeti malo odstupanje parametara što je rezultat tek neznatnog neslaganja modela procesa i podataka iz simulacijskog programa. Optimizacijski algoritam *geometric* je najbolje opisao proces uz najmanju grešku s obzirom na ostale ponuđene algoritme.

Kada su određeni parametri procesa potrebno je optimirati parametre regulatora upotrebom programskog paketa PITOPS (modul optimizacije parametara). Unose se parametri procesa kao što je mjerna jedinica vremena koja se prilagođava prema jedinici i redu veličine onima kao u simulacijskom programu. Nakon što je sve priređeno za optimizaciju, potrebno je odabrati optimizacijski algoritam. Zbog velikog prebačaja koristi se optimizacijski algoritam *Pitops-IAE* (*Pitops-integral of absolute error*) koji se koristi za relativno agresivnu regulaciju. Dobiveni su slijedeći parametri:

Tablica 4. Početni parametri regulatora i parametri nakon optimizacije

	Početni parametri	Parametri nakon optimizacije
P	0,13	0,2
I	7 min	38,3 min
D	0 min	0 min

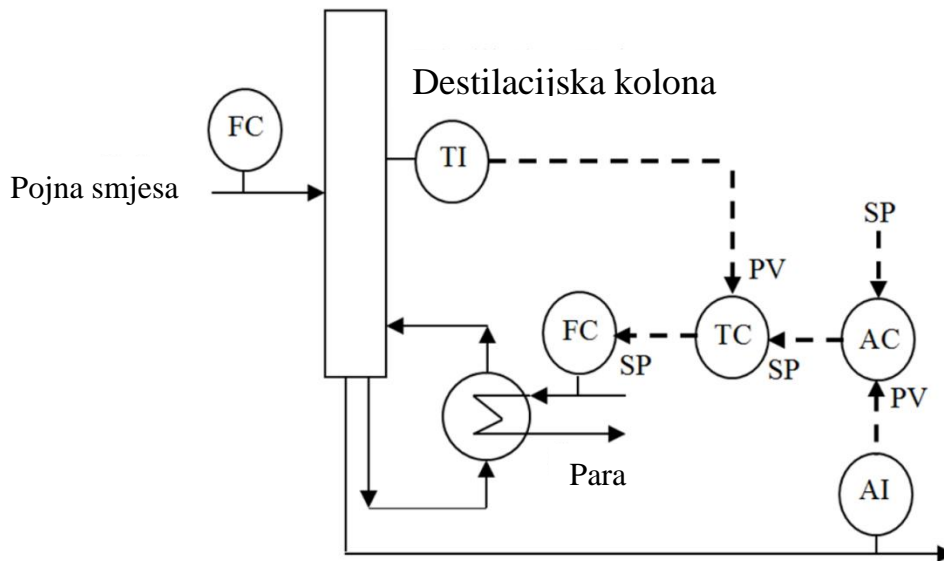
Vidljivo je kako se iznos proporcionalnog djelovanja (P) malo promijenio što upućuje na to da je temperatura relativno brzo dostigla vrijednost *SP*-a te nije bilo potrebno povećavati utjecaj proporcionalnog djelovanja. Potrebno je bilo smanjiti i utjecaj integracijskog djelovanja povećanjem integracijske konstante kako bi se smanjio prebačaj i kako bi se cijeli proces brže ustalilo nakon promjene radne točke. Dobiven je slijedeći rezultat, prikazan na slici 31.



Slika 31. Rezultat optimizacije parametara regulatora u procesu vođenja temperature u destilacijskoj koloni

3.4. Ugađanje parametara regulatora u destilacijskoj koloni s kaskadnom regulacijom

Kaskadna regulacija je način vođenja procesa tako da se uvede sekundarni regulacijski krug koji bi svojim djelovanjem trebao ubrzati odziv i ukloniti poremećaje koji djeluju na upravljačku varijablu. Uglavnom se koristi kod procesa s velikom dinamičkom zadržkom kao što je proces destilacije.



Slika 32. Destilacijska kolona s kaskadnom regulacijom [5]

U ovom primjeru regulira se sastav proizvoda dna kolone (AC regulator). Postoje tri povezana regulacijska kruga (FC, TC i AC) što se u ovom slučaju naziva dvostrukom kaskadnom regulacijom. Smatra se da je FC krug ugođen. AC je primarni krug (naziva se još vanjski ili *master*), TC je sekundarni (naziva se još unutarnji ili *slave*). Regulacija kreće ugađanjem unutarnjeg kruga prema vanjskom. Vanjski krug šalje radnu točku unutarnjem krugu što znači da AC šalje signal u postotnoj vrijednosti razmjerno mjernom opsegu unutarnjeg kruga (u ovom slučaju to je raspon temperature).

Slijedi ugađanje parametara regulatora zasebno za sekundarni i primarni krug.

Tablica 5. Parametri procesa

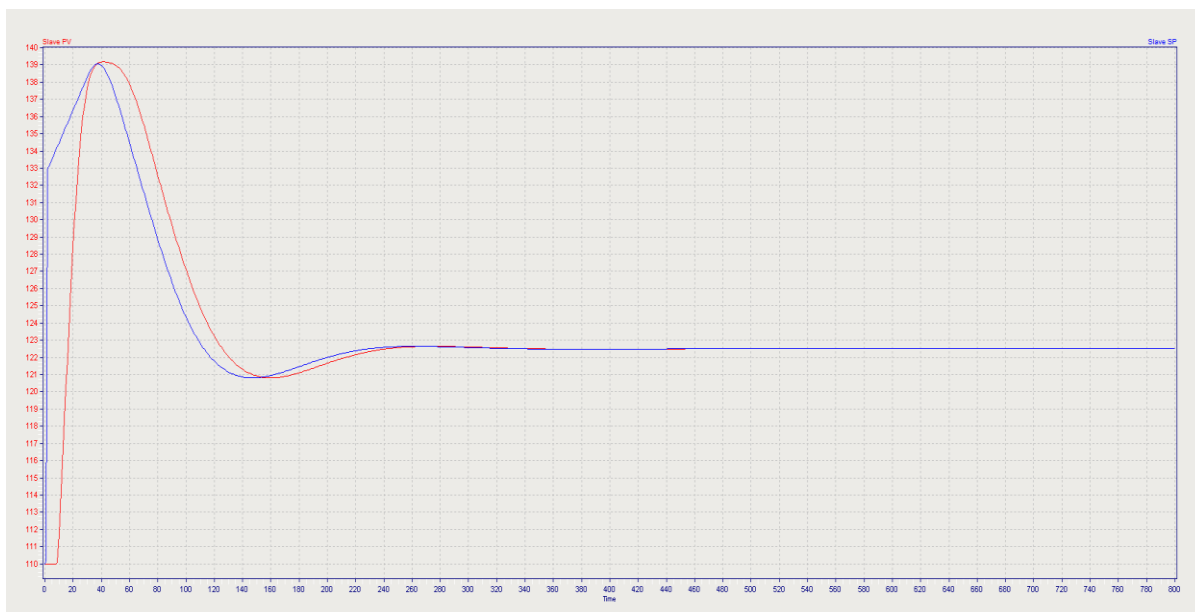
	Sekundarni regulacijski krug (TC)	Primarni regulacijski krug (AC)
Zadržka	7 min	20 min
Statička osjetljivost	1,3 °C /%	0,4 °C /%
1. Vremenska konstanta	25 min	110 min
2. Vremenska konstanta	0 min	0 min

Ugađanje se provodi tako da se prvo ugodi unutarnji regulacijski krug (sekundarni), a nakon toga vanjski (primarni). Optimizacija je provedena optimizacijskim algoritmom *Pitops-IAE* kojim se minimalizira integral apsolutnog odstupanja. Optimizacijom je dobiveno sljedeće:

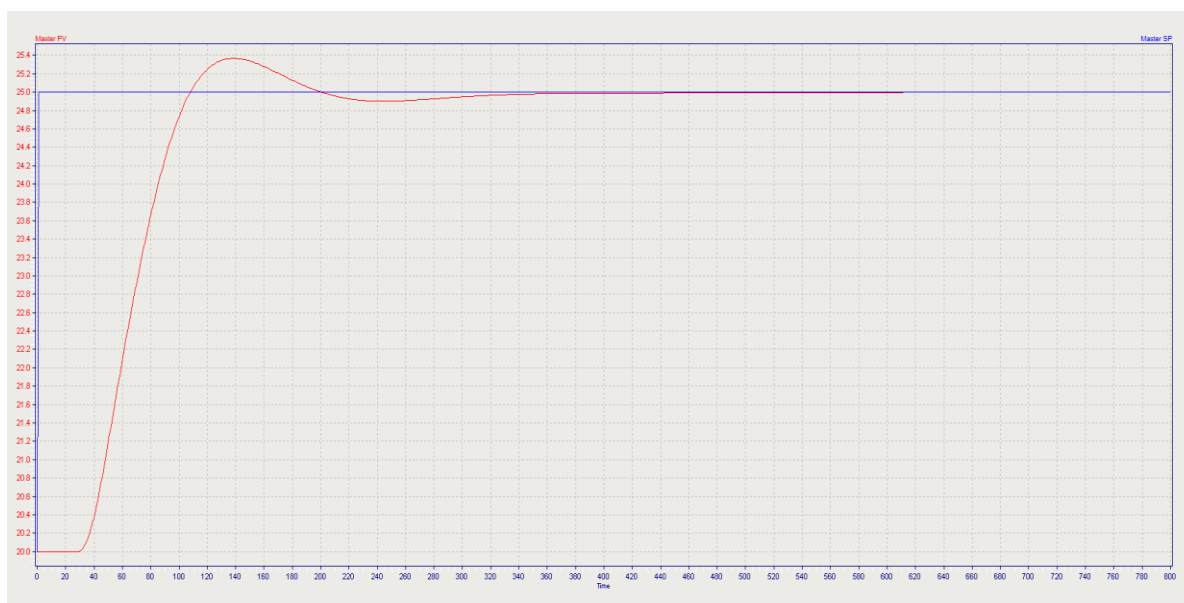
Tablica 6. Vrijednosti parametara regulatora

	Prije optimizacije		Poslije optimizacije	
	Primarni (AC)	Sekundarni (TC)	Primarni (AC)	Sekundarni (TC)
P	0,5	0	0,52	1,13
I	25 min	0 min	24,56 min	117,75 min
D	0 min	0 min	0 min	0 min
Filtar	0 min	0 min	0 min	0 min

Vidljivo je kako je bitno da je sekundarni krug brži od primarnog. Pravilo je da sekundarni krug bude brži barem 3 puta od primarnog. U nastavku je rezultat optimizacije prikazan grafovima.



Slika 33. *Vladanje sekundarnog kruga nakon optimizacije*



Slika 34. *Vladanje primarnog kruga nakon optimizacije*

Crvena linija označava *PV*, a **plava linija** *SP*. Može se primijetiti da se regulacijski krug poprilično brzo stabilizira uz male prebačaje što ukazuje na dobru regulaciju.

3.5. Analiza regulacijskog kruga kod pojave sljepljivanja regulacijskog ventila

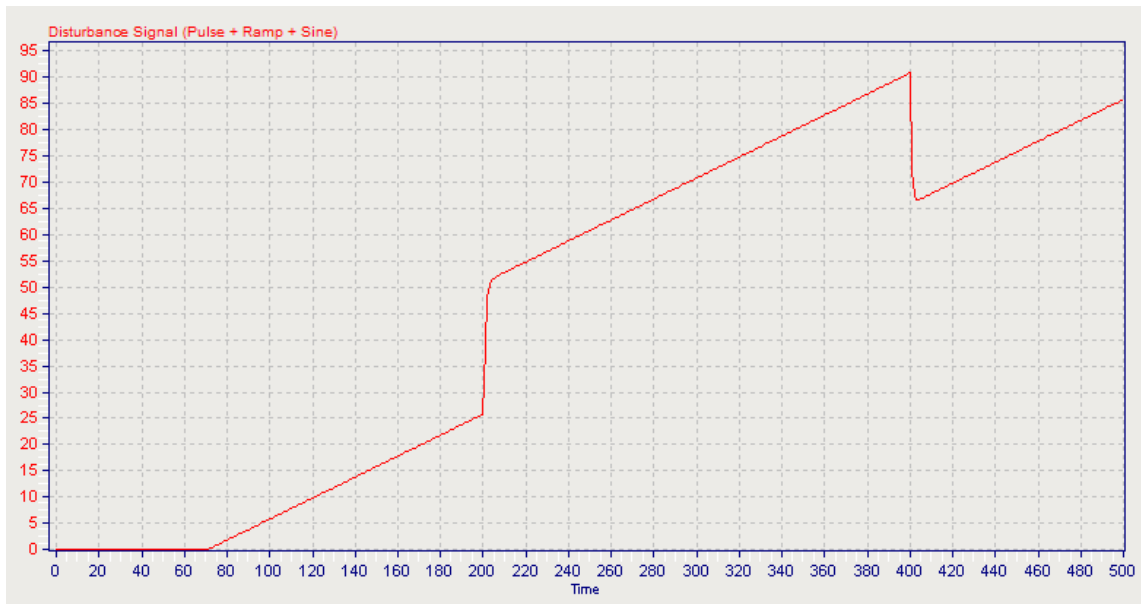
3.5.1. Kratki opis sljepljivanja regulacijskog ventila

Regulacijski ventili mogu imati „mrtvu zonu“ u svojim mehaničkim vezama. Kako se upravljačka veličina (*OP*) koja izlazi iz regulatora mijenja, ventil se možda neće pomicati neko vrijeme sve dok se *OP* ne promijeni za određenu granicu minimalnog praga. Problem sa sljepljivanjem može se pojaviti zbog zaglavljivanja ventila ili labavih spojeva. Sljepljivanje se često javlja kod starih regulacijskih ventila koji se dugo nisu održavani, ventilima koji rade s korozivnim, abrazivnim materijalima ili s lošim mehaničkim dijelovima [5].

Sljedećim primjerom pokazat će se kako sljepljivanje regulacijskog ventila utječe na rad regulacijskog kruga. Zatim će se pokušati optimirati tako da vanjski poremećaji i sljepljivanje ventila imaju što manji utjecaj na regulaciju.

3.5.2. Vanjski poremećaj

Na slici 35. vidi se grafički prikaz signala vanjskog poremećaja, koji se sastoji od pravčaste i pulsne komponente u odnosu na vrijeme procesa. Parametri poremećaja prikazani su u tablici 7.



Slika 35. Poremećaj u procesu

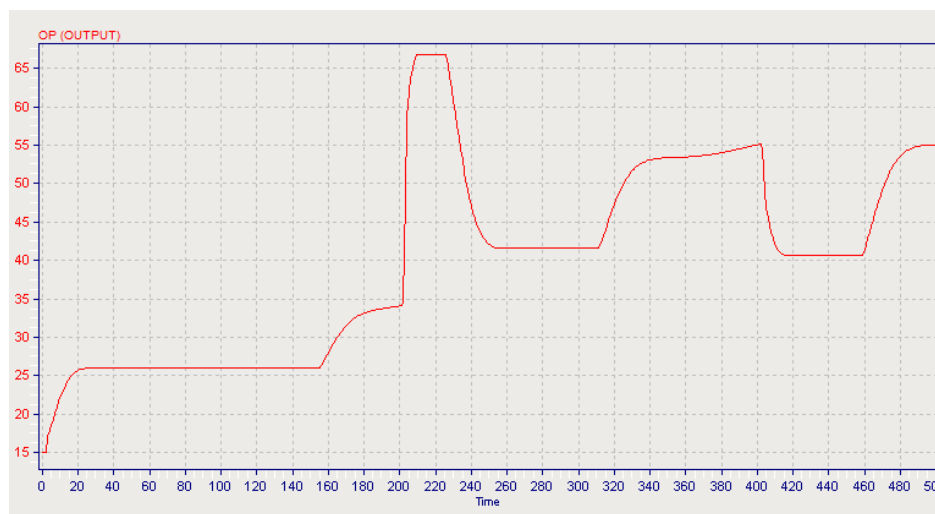
Tablica 7. Parametri poremećaja

	Pravčasti poremećaj	Pulsni poremećaj
Promjena	1000 s	25 s
Širina	/	200 s
Pojačanje	0,2	/

3.5.5. Sljepljivanje ventila

Uz postojeće poremećaje u procesu simulira se sljepljivanje ventila dodavanjem vrijednosti utjecaja sljepljivanja. Tipične vrijednosti utjecaja sljepljivanja su od 0,5 do 25 %, pri čemu se vrijednosti veće od 10 % smatraju visokima. Općenito, prisutnošću sljepljenosti ventila regulacija je loša, odnosno dolazi do neizbježnih oscilacija u procesu, a grafički prikaz otvorenosti ventila ima karakteristična „nazubljenja“ (Slika 36.) [5].

Dodaje se vrijednost utjecaja sljepljivanja ventila od 20 %.

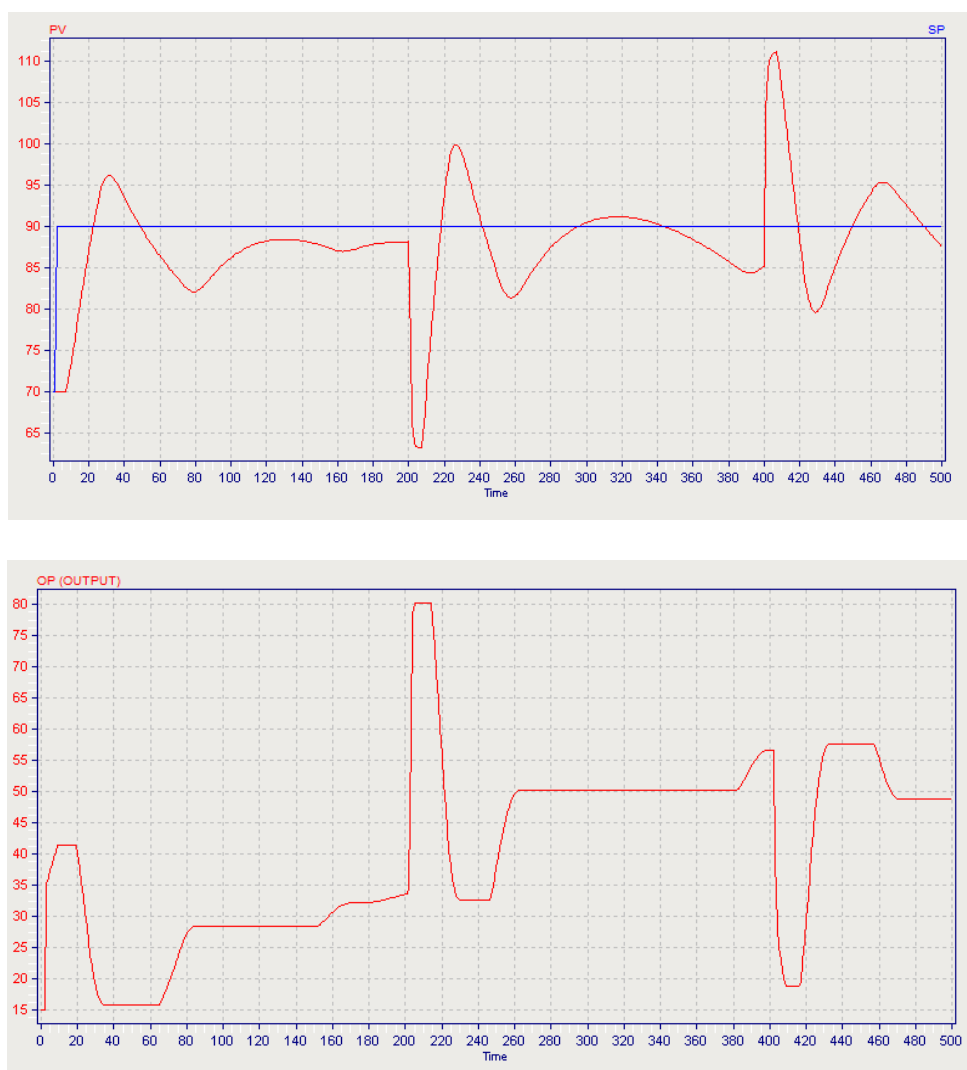


Slika 36. Otvorenost ventila uvođenjem vrijednosti utjecaja sljepljivanja

Sljepljivanje regulacijskog ventila utječe na reakciju *OP*-a, tj. otvorenost ventila tako da ventil jednostavno ne reagira u određenim vremenskim intervalima (ravne crvene linije na grafu na slici 36.).

3.5.6. Optimizacija

Potrebno je optimirati parametre regulatora kako bi se minimalizirao utjecaj vanjskog poremećaja i sljepljivanja regulacijskog ventila na regulacijski krug. Kriterij pri optimizaciji je *PITOPS-IAE*.



Slika 37. Prikaz odziva *PV*-a i *OP*-a nakon optimizacije parametara regulatora zbog utjecaja vanjskog poremećaja i sljepljivanja regulacijskog ventila

Tablica 9. Usporedba PID parametara

	Početni parametri regulatora	Parametri regulatora nakon optimizacije s utjecajem vanjskog poremećaja i utjecaja sljepljivanja ventila od 20 %
P	1	6,6
I	15 s	35,7 s
D	0 s	0 s

Iz prethodne tablice može se zaključiti da se vanjski poremećaj i sljepljivanje ventila kompenziralo povećanjem proporcionalnog i smanjenjem integracijskog djelovanja. Općenito, sljepljivanje ventila zahtijeva veće proporcionalno, a manje integracijsko djelovanje.

3. ZAKLJUČAK

Danas je teško zamisliti vođenje procesa bez velikog stupnja automatizacije. Optimizacija parametara regulatora omogućuje bolje vođenje procesa, što može povećati djelotvornost procesa i smanjiti rizik od opasnih situacija. Isto tako, može povećati ekonomičnost procesa, odnosno smanjiti utrošak energije.

Vođenje procesa kaskadnom regulacijom trebalo bi se više koristiti u praksi zbog toga što smanjuje zadržku i uklanja poremećaje u većini tromih procesa, a nije složena za primjenu i ugađanje. Suvremeni programi za određivanje parametara procesa i optimiranje parametara regulatora uvelike olakšavaju regulaciju procesa.

Simulacija procesa daje mogućnost za testiranje vladanja procesa u regulacijskom krugu bez posljedica na stvarno postrojenje. Pri tome daje uvid kako će sustav reagirati na promjenu radne točke i pojavu poremećaja.

Programi za optimiranje parametara regulatora olakšavaju optimizaciju regulacijskih krugova, kao i vođenja složenih industrijskih procesa u praksi.

4. POPIS OZNAKA

AC – regulator sastava (engl. *analysis controller*)

D – derivacijska konstanta regulatora

FC – regulator protoka (engl. *flow controller*)

FI – indikator protoka (engl. *flow indicator*)

I – integracijska konstanta regulatora

IAE – integral apsolutne pogreške (engl. *integral of absolute error*).

OP – izlaz regulatora (engl. *controller output*)

P – proporcionalna konstanta regulatora (pojačanje regulatora)

PC – regulator tlaka (engl. *pressure controller*)

PD – proporcionalno-derivacijski regulator

PI – proporcionalno-integracijski regulator

PID – proporcionalno-integracijsko-derivacijski regulator

PV – procesna veličina (engl. *process variable*)

RC – regulator omjera (engl. *ratio controller*)

SP – radna točka (engl. *set point*)

TC – regulator temperature (engl. *temperature controller*)

y – izlazna varijabla procesa

u – ulazna varijabla procesa

k – statička osjetljivost procesa

τ – vremenska konstanta procesa

Θ – mrtvo vrijeme

K_C – pojačanje regulatora (engl. *controller gain*)

e – signal pogreške

τ_i - konstanta integracije

τ_D – derivacijska konstanta

5. LITERATURA

[1] N. Bolf, Uvod, predavanje iz kolegija: Mjerenja i vođenje procesa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, akademska godina 2021./2022.

[2] N. Bolf, Analiza dinamike procesa, predavanje iz kolegija: Mjerenja i vođenje procesa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, akademska godina 2021./2022.

[3] N. Bolf, Regulatori, predavanje iz kolegija: Mjerenja i vođenje procesa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, akademska godina 2021./2022.

[4] N. Bolf, Kaskadna regulacija, predavanje iz kolegija: Mjerenja i vođenje procesa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, akademska godina 2021./2022.

[5] PITOPS PID, User manual, PICONROL SOLUTIONS, LLC, 2018.

[6] PITOPS TFI, User manual, PICONROL SOLUTIONS, LLC, 2018.

[7] SIMCET, User manual, PICONROL SOLUTIONS, LLC, 2018.