

# Određivanje parametara PID regulatora za vođenje temperature u šaržnom reaktoru na temelju podataka simuliranog testa na skok

---

Čulina, Matea

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:866031>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-20**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**ODREĐIVANJE PARAMETARA PID REGULATORA ZA VOĐENJE  
TEMPERATURE U ŠARŽNOM REAKTORU NA TEMELJU  
PODATAKA SIMULIRANOG TESTA NA SKOK**

**DIPLOMSKI RAD**

**MATEA ČULINA**

**Matični broj: 267**

**Split, listopad 2020.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET  
DIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE  
ZAŠTITA OKOLIŠA**

**ODREĐIVANJE PARAMETARA PID REGULATORA ZA VOĐENJE  
TEMPERATURE U ŠARŽNOM REAKTORU NA TEMELJU  
PODATAKA SIMULIRANOG TESTA NA SKOK  
DIPLOMSKI RAD**

**MATEA ČULINA**

**Matični broj: 267**

**Split, listopad 2020.**

**UNIVERSITY OF SPLIT**  
**FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY**  
**GRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY**  
**ENVIRONMENTAL PROTECTION**

**DETERMINATION OF PID CONTROLLER PARAMETERS FOR  
TEMPERATURE CONTROL IN BATCH REACTOR BASED ON  
SIMULATED STEP TEST DATA**

**DIPLOMA THESIS**

**MATEA ČULINA**

**Parent number: 267**

**Split, October 2020**

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište u Splitu

Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu

Diplomski studij kemijske tehnologije

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo

Tema rada je prihvaćena na 28. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta

Mentor: Dr. sc. Antonija Čelan, znanstvena suradnica

### ODREĐIVANJE PARAMETARA PID REGULATORA ZA VOĐENJE TEMPERATURE U ŠARŽNOM REAKTORU NA TEMELJU PODATAKA SIMULIRANOG TESTA NA SKOK

Matea Čulina, 267

**Sažetak:** Cilj ovog rada bio je analizirati različite metode ugađanja PID regulatora na temelju podataka simuliranog testa na skok za proces vođenja temperature u šaržnom reaktoru. Za procese u kojima je vođena veličina temperatura, potrebno je s velikom pozornošću pratiti odziv procesa i rezultate ugađanja regulatora. Takvi procesi najčešće zahtijevaju da temperatura dolazi u radnu točku brzo i bez ikakvih prebačaja i oscilacija. Povećanje temperature ubrzava kemijsku reakciju što, u konačnici, može negativno utjecati na kvalitetu proizvoda. Odabiru najpogodnije metode ugađanja PID regulatora, ne može se pristupiti bez prikupljenog znanja o procesu. Karakterizacija procesa se provela korištenjem programskih paketa *Simcet 9.2*. (u kojem je proveden test na skok) i *Pitops 7* (u kojem su određeni parametri modela). Ugađanje regulatora je provedeno u modulu *Pitops-PID* pri čemu su primijenjene klasična *Ziegler-Nichols* metoda te *Pitops* metode. Rezultati su pokazali da se najstabilniji i najbrži odziv uz minimalan prebačaj dobije kod *Pitops ITAE* metode.

**Ključne riječi:** vođenje procesa, šaržni reaktor, temperatura, model, PID regulator, ugađanje

**Rad sadrži:** 67 stranica, 55 slika, 12 tablica, 22 literaturne reference

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Sastav Povjerenstva za obranu:**

1. Izv. prof. dr. sc. Sandra Svilović – predsjednik
2. Izv. prof. dr. sc. Ivana Smoljko - član
3. Dr. sc. Antonija Čelan, znanstvena suradnica – član mentor

**Datum obrane:** (30. listopad 2020.)

**Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta Split, Ruđera Boškovića 35.**

## BASIC DOCUMENTATION CARD

DIPLOMA THESIS

**University of Split**  
**Faculty of Chemistry and Technology Split**  
**Graduate study of Chemical technology**  
**Scientific area: Technical Sciences**  
**Scientific field: Chemical Engineering**

Thesis subject was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 28

**Mentor:** PhD Antonija Čelan, research associate

### **DETERMINATION OF PID CONTROLLER PARAMETERS FOR TEMPERATURE CONTROL IN BATCH REACTOR BASED ON SIMULATED STEP TEST DATA**

Matea Čulina, 267

**Abstract:** The aim of this paper was to analyze different tuning methods of PID controllers based on simulated step test data for the process of temperature control in a batch reactor. For processes in which the temperature is the controlled variable, it is necessary to closely monitor the process response and the results of controller tuning. Such processes usually require for the temperature to reach the setpoint quickly and without overshoots and oscillations. Increasing the temperature accelerates the chemical reaction which, ultimately, can negatively affect the quality of the product. Prior to selection of PID tuning method, process should be characterized. Process characterization was accomplished using *Simcet 9.2* (in which step test was performed) and *Pitops 7* (in which the model parameters were determined) software packages. PID controller tuning was performed in the *Pitops-PID* module using the classical *Ziegler-Nichols* method and the *Pitops* methods. The results showed that the most stable and fastest response with minimal overshoot was obtained with the *Pitops ITAE* method.

**Keywords:** process control, batch reactor, temperature, model, PID controller, tuning

**Thesis contains:** 67 pages, 55 figures, 12 tables, 22 references

**Original in:** Croatian

#### **Defence committee:**

1. PhD Sandra Svilović, associate professor – chair person
2. PhD Ivana Smoljko, associate professor – member
3. PhD Antonija Čelan, research associate – member supervisor

**Defence date:** (October 30<sup>th</sup> 2020.)

**Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in** Library of Faculty of Chemistry and Technology Split, Ruđera Boškovića 35.

*Diplomski rad je izrađen u Zavodu za kemijsko inženjerstvo, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom dr. sc. Antonije Čelan, u razdoblju od lipnja do listopada 2020. godine.*

*Veliku zahvalnost dugujem mentorici dr. sc. Antoniji Čelan na velikoj pomoći, savjetima i strpljenju pri izradi ovog diplomskog rada.*

*Hvala mojim prijateljima i kolegama što su mi uljepšali ovo razdoblje života.*

*Veliko hvala mojoj obitelji koja je uvijek bila uz mene, u sretnim i tužnim trenucima i bez koje sve što sam postigla do sada ne bi bilo moguće.*

*Iznad svega hvala i slava Bogu!*



## ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

U simulacijskom procesu vođenja temperature u šaržnom reaktoru s protokom pare kao upravljanom varijablom, odrediti parametre modela procesa te provesti ugađanje PID regulatora.

1. Pomoću računalnog programa *Simcet 9.2.* napraviti tzv. skok na test (engl. *step test*), u otvorenom regulacijskom krugu te pratiti promjenu vrijednosti izlazne veličine procesa (odziv) s procesnim vremenom.
2. Na temelju odziva procesa, grafički odrediti parametre primijenjenih modela procesa.
3. Odrediti parametre modela procesa uz upotrebu računalnog programa *Pitops 7.* Usporediti slaganje nekoliko primijenjenih tipova modela procesa sa simuliranim podacima odziva procesa.
4. Provesti ugađanje PID regulatora u programu *Pitops 7* korištenjem *Ziegler-Nichols* metoda te *Pitops* metoda (*Pitops IAE*, *Pitops ISE*, *Pitops ITAE*, *Pitops RO*).
5. Iz dobivenih rezultata zaključiti koja metoda ugađanja regulatora je najpogodnija.

## SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je analizirati različite metode ugađanja PID regulatora na temelju podataka simuliranog testa na skok za proces vođenja temperature u šaržnom reaktoru. Za procese u kojima je vođena veličina temperatura, potrebno je s velikom pozornošću pratiti odziv procesa i rezultate ugađanja regulatora. Takvi procesi najčešće zahtijevaju da temperatura dolazi u radnu točku brzo i bez ikakvih prebačaja i oscilacija. Povećanje temperature ubrzava kemijsku reakciju što, u konačnici, može negativno utjecati na kvalitetu proizvoda. Odabiru najpogodnije metode ugađanja PID regulatora se ne može pristupiti bez prikupljenog znanja o procesu. Karakterizacija procesa se provela korištenjem programskih paketa *Simcet 9.2*. (u kojem je proveden test na skok) i *Pitops 7* (u kojem su određeni parametri modela). Ugađanje regulatora je provedeno u modulu *Pitops-PID* pri čemu su primijenjene klasična *Ziegler-Nichols* metoda te *Pitops* metode. Rezultati su pokazali da se najstabilniji i najbrži odziv uz minimalan prebačaj dobije kod *Pitops ITAE* metode.

Ključne riječi: vođenje procesa, šaržni reaktor, temperatura, model, PID regulator, ugađanje

## SUMMARY

The aim of this paper was to analyze different tuning methods of PID controllers based on simulated step test data for the process of temperature control in a batch reactor. For processes in which the temperature is the controlled variable, it is necessary to closely monitor the process response and the results of controller tuning. Such processes usually require for the temperature to reach the setpoint quickly and without overshoots and oscillations. Increasing the temperature accelerates the chemical reaction which, ultimately, can negatively affect the quality of the product. Prior to selection of PID tuning method, process should be characterized. Process characterization was accomplished using *Simcet 9.2* (in which step test was performed) and *Pitops 7* (in which the model parameters were determined) software packages. PID controller tuning was performed in the *Pitops-PID* module using the classical *Ziegler-Nichols* method and the *Pitops* methods. The results showed that the most stable and fastest response with minimal overshoot was obtained with the *Pitops ITAE* method.

Keywords: process control, batch reactor, temperature, model, PID controller, tuning

## Sadržaj

<b>UVOD</b> .....	1
<b>1.OPĆI DIO</b> .....	2
<b>1.1. Vođenje procesa i regulacijski krug</b> .....	2
1.1.1. Procesne veličine .....	2
1.1.2. Osnovni dijelovi regulacijskog kruga .....	3
<b>1.2. Šaržni reaktor</b> .....	5
1.2.1. Osnovne karakteristike .....	5
1.2.2. Bilanca tvari u šaržnom reaktoru .....	7
1.2.3. Sustav za zagrijavanje ili hlađenje šaržnog reaktora .....	8
1.2.4. Utjecaj temperature na procese u šaržnom reaktoru .....	11
1.2.5. Vođenje temperature u šaržnom reaktoru .....	13
<b>1.3. Razvoj dinamičkog modela procesa</b> .....	20
1.3.1. Model procesa prvog reda .....	21
1.3.2. Model procesa drugog reda .....	23
1.3.3. Model integrirajućeg procesa .....	25
<b>1.4. Regulatori</b> .....	28
1.4.1. Djelovanje regulatora .....	28
1.4.1.1. Proporcionalno djelovanje regulatora .....	28
1.4.1.2. Integracijsko djelovanje regulatora .....	29
1.4.1.3. Derivacijsko djelovanje regulatora .....	29
1.4.2. PID regulator .....	30
<b>1.5. Metode ugađanja PID regulatora</b> .....	32
1.5.1. Ziegler-Nichols metode ugađanja regulatora .....	32
1.5.1.1. Metoda ruba stabilnosti .....	32
1.5.1.2. Metoda prijenosne funkcije .....	34
1.5.2. <i>Pitops</i> metode ugađanja PID regulatora .....	35
<b>2. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	37
<b>2.1. Opis procesa</b> .....	37
<b>2.2. Karakterizacija procesa uz upotrebu računalnog programa <i>Simcet 9.2.</i></b> .....	38
<b>2.3. Grafička procjena parametara procesa</b> .....	40
<b>2.4. Karakterizacija procesa uz upotrebu računalnog programa <i>Pitops 7</i></b> .....	42
<b>2.5. Ugađanje PID regulatora korištenjem računalnog programa <i>Pitops 7</i></b> .....	44
<b>3. REZULTATI I RASPRAVA</b> .....	47

<b>3.1. Rezultati grafičkog određivanja parametara procesa .....</b>	<b>47</b>
<b>3.2. Rezultati parametara modela procesa korištenjem programa <i>Pitops 7</i> .....</b>	<b>50</b>
<b>3.3. Rezultati simulacijskog ugađanja PID regulatora.....</b>	<b>53</b>
3.3.1. Određivanje parametara PID regulatora <i>Ziegler-Nichols</i> metodom .....	53
3.3.2. Određivanje parametara PID regulatora <i>Pitops</i> metodama .....	57
<b>4. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>65</b>
<b>5. LITERATURA .....</b>	<b>66</b>

## UVOD

Važnosti vođenja svakog procesa u industriji su povećanje produktivnosti, ostvarivanje što većeg prinosa i kvalitete proizvoda, postizanje određene razine sigurnosti te smanjenje ukupnih troškova. Da bih se ostvarili navedeni ciljevi, potrebno je ostvariti kvalitetno vođenje procesa.

Vođenje temperature u šaržnom reaktoru predstavlja izazov jer je većina procesa temperaturno osjetljiva. Temperatura ima vrlo velik utjecaj na kemijske reakcije u reaktoru stoga je nužno omogućiti brzo zagrijavanje ili hlađenje do željene vrijednosti temperature bez pojave oscilacija i prebačaja.

Za optimalan rad procesa automatskog vođenja temperature jako je važno ugađanje parametara regulatora. Različite metode ugađanja regulatora omogućavaju da se na temelju određenih parametara modela procesa odrede optimalne vrijednosti parametara proporcionalnog, integralnog i derivacijskog djelovanja. Odabir određene metode ugađanja regulatora može znatno utjecati na krajnji cilj.

U ovom radu je analizirano određivanje parametara PID regulatora za proces vođenja temperature u šaržnom reaktoru na temelju podataka simuliranog testa na skok.

## 1. OPĆI DIO

### 1.1. Vođenje procesa i regulacijski krug

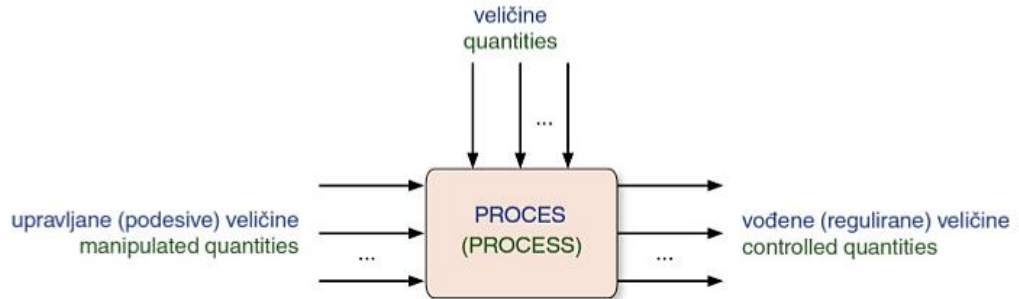
Vođenje procesa se definira kao djelovanje na neki tehnološki proces kako bi se jedna ili više procesnih veličina održala na željenoj vrijednosti. Automatsko vođenje procesa proizvodnje rezultira:

- povećanjem produktivnosti,
- povećanjem prinosa,
- većom razinom sigurnosti,
- osiguranjem kvalitete proizvoda,
- osiguranjem uniformnosti kvalitete proizvoda neovisno o šarži,
- smanjenjem troškova proizvodnje.<sup>1</sup>

#### 1.1.1. Procesne veličine

Za razumijevanje regulacije, odnosno vođenja procesa, važno je poznavati tri pojma vezana za sve vođene procese a to su: **vođena varijabla** (engl. *controlled variables*), **upravljana varijabla** (engl. *manipulated variables*) i **poremećaji** (engl. *disturbances*) (slika 1). Vođene veličine su veličine koje treba regulirati ili održavati na željenoj vrijednosti. One predstavljaju posljedicu promjena u procesu i sustavno gledano nazivaju se izlazne veličine ili varijable (engl. *outputs*). Izlazne varijable karakteriziraju vladanje procesa koje se manifestira kao promjena akumulacije tvari i/ili energije. To su najčešće protok, razina, tlak, temperatura, sastav i dr. Upravljane veličine su veličine koje se u procesu mijenjaju kako bi se utjecalo na vođenu varijablu. Nazivaju se još i ulaznim veličinama (engl. *inputs*) i karakterizira ih stanje tokova tvari i/ili energije koji su mogući uzrok promjene akumulacije tvari i/ili energije.<sup>2</sup>

Poremećaji utječu na proces te njihovo djelovanje rezultira udaljavanjem vođene varijable od radne točke. Za svaku vođenu varijablu zadaje se stanovita vrijednost koja se naziva referentna vrijednost, a u praksi se često naziva radna točka (engl. *setpoint*).<sup>1</sup> Cilj svake regulacije je zadržavanje željene vrijednosti vođene varijable promjenom vrijednosti upravljane varijable unatoč djelovanju poremećaja.<sup>3</sup>

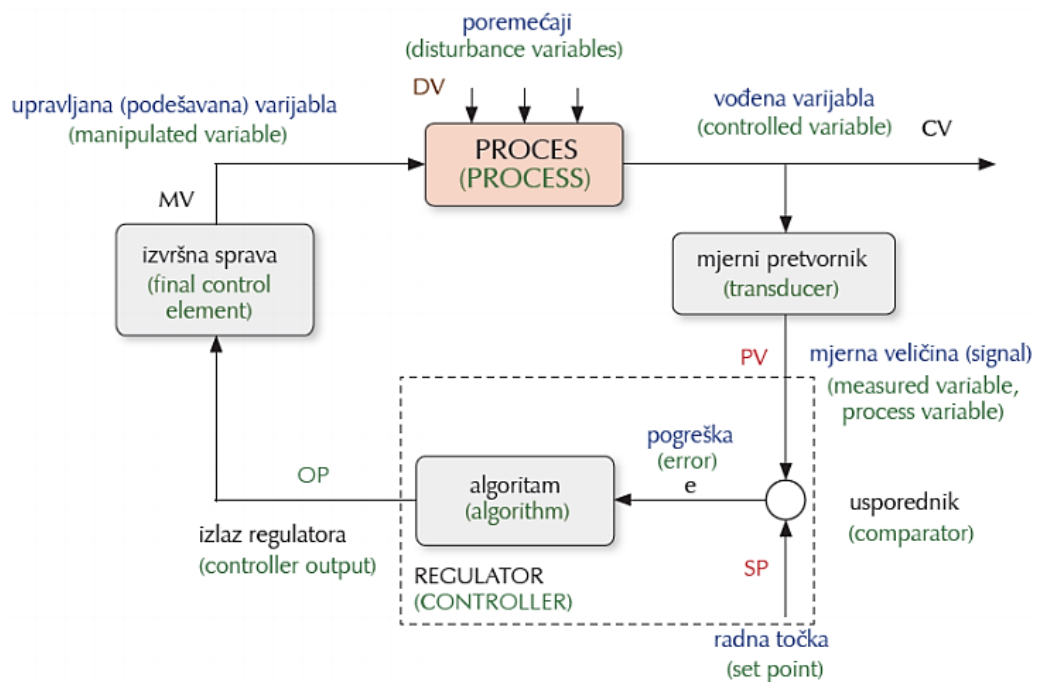
Slika 1. Procesne veliĉine<sup>2</sup>

### 1.1.2. Osnovni dijelovi regulacijskog kruga

Regulacijski krug se sastoji se od ĉetiri temeljna elementa:

- proces,
- mjerni pretvornik,
- regulator,
- izvršna sprava,

koji se prikazuju regulacijskim krugom kako je prikazano na slici 2.

Slika 2. Regulacijski krug<sup>4</sup>



Mjerni pretvornik (engl. *transducer*) je uređaj koji pretvara izmjerenu (mjernu) veličinu u standardizirani mjerni signal. Kvalitetu pretvorbe mjerene veličine u mjerni signal karakteriziraju prijenosne značajke mjernih pretvornika. Za vođenje procesa preciznost i ponovljivost su važnije od točnosti. Ostale prijenosne značajke mjernih pretvornika su linearnost, osjetljivost, prag osjećanja, obnovljivost i histereza.<sup>1</sup>

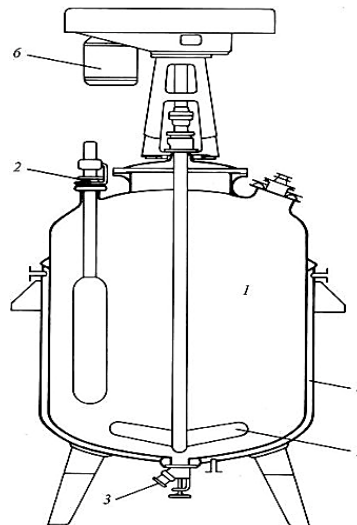
Regulator (engl. *controller*) je uređaj koji prima signal mjernog pretvornika, uspoređuje ga s referentnom veličinom, tj. radnom točkom (engl. *setpoint*) te na temelju te razlike, tj. pogreške (engl. *error*) računa izlazni signal (engl. *output*). Ovisno o potrebnoj energiji za pojačanje signala i prema vrsti izlaznog signala iz regulatora, regulatori se dijele na: direktne, pneumatske, hidrauličke, mehaničke, električne i kombinirane.<sup>2</sup>

Treći osnovni uređaju u regulacijskom krugu je izvršna sprava koja pretvara izlazni signal regulatora u procesnu varijablu. Odnosno, signal izlaza regulatora se šalje izvršnoj spravi kojom se podešava upravljana varijabla. U većini slučajeva izvršna sprava je regulacijski ventil, a upravljana veličina protok.<sup>1</sup>

## 1.2. Šaržni reaktor

Šaržni reaktor je najčešće zatvorena posuda valjkastog ili kotlastog oblika s miješalicom i sustavom, odnosno plaštom, za grijanje ili hlađenje. Proizvodi se od čelika, nehrđajućeg čelika, čelika obloženog staklom, stakla ili od različitih legura. Kapljevinu i krute tvari se obično uvode pri vrhu reaktora, a ispuštaju se na dnu reaktora. Plinovi i pare izlaze pri vrhu reaktora.<sup>5</sup>

Šaržni reaktor se često koristi u industriji, uglavnom za reakcije u kapljevitj fazi, za proizvodnju manjih količina produkata na umjerenim tlakovima i temperaturama. Procesi u kojima je potrebna stroga kontrola proizvoda kao i oni u kojima se često mijenja proizvodnja određene vrste proizvoda prema zahtjevima tržišta, kao što je farmaceutska proizvodnja, proizvodnja boja, kozmetička proizvodnja i dr., uglavnom se provode u šaržnom reaktoru. Osim naziva šaržni reaktor, koristi se još i izraz kotlasti reaktor (engl. *batch reactor*).<sup>5</sup> Na slici 3 prikazani su glavni dijelovi šaržnog reaktora.

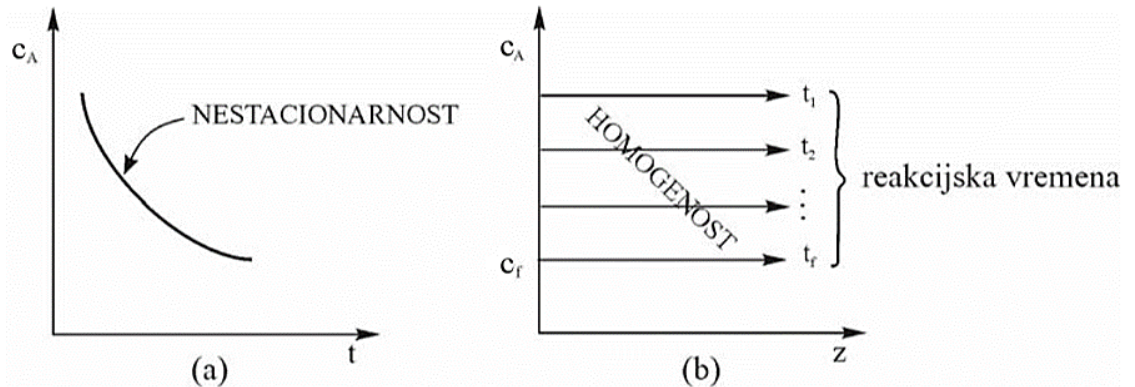


Slika 3. Presjek šaržnog reaktora (1 - procesni prostor, 2 - ulaz reakcijske smjese, 3 - izlaz produkta, 4 - plašt, 5 - miješalica, 6 - motor)<sup>6</sup>

### 1.2.1. Osnovne karakteristike

Najvažnije dvije karakteristike idealnog šaržnog reaktora su: nestacionarnost i homogenost. Homogenost podrazumijeva da se u takvom reaktoru ostvaruje približno idealno miješanje, što znači da su vrijednosti svih parametara približno iste u bilo kojoj

točki reakcijskog prostora. Kotlasti reaktor spada u grupu nestacionarnih reaktora, jer se sastav reaktanata i brzina reakcije mijenjaju tijekom odvijanja reakcije. Režim rada je diskontinuiran jer se pri punjenju reaktora kao i pri pražnjenju proizvoda prekida rad reaktora.<sup>5</sup>



Slika 4. Karakteristike idealnog šaržnog reaktora<sup>5</sup>

Na slici 4 prikazane su karakteristike šaržnog reaktora gdje je  $c_A$  - koncentracija limitirajućeg reaktanta  $A$ ,  $t$  - reakcijsko vrijeme i  $z$  - položaj u reaktoru.

Šaržni reaktori su prilagodljiviji promjeni reakcijskih uvjeta od kontinuiranog načina vođenja reakcije, odnosno protočnog kotlastog reaktora i cijevnih reaktora. Najznačajniji razlozi tome su:

- dodavanje reaktanata lako se može količinski i vremenski programirati,
- temperatura se također može lako mijenjati, odnosno programirati za vrijeme reakcije tako da bude optimalna s obzirom na selektivnost jednog produkta,
- vrijeme trajanja reakcije lako se može mijenjati u vrlo širokim granicama, a što ima posredan utjecaj i na izvedbu prijenosa topline.<sup>11</sup>

Pogodan je za provođenje procesa u kojima je potrebno duže vrijeme kontakta reaktanata, odnosno gdje je brzina kemijske reakcije mala. U kotlastim reaktorima uglavnom se proizvode manje količine produkata po radnom ciklusu pa njihovi volumeni nisu veliki. Izuzetak su reaktori za dobivanje nekih polimera u suspenziji, volumena do 30 m<sup>3</sup>.<sup>11</sup>

Također, često se koriste na početku proizvodnje određenog produkta, odnosno smatraju se vrstom testnog reaktora. Kasnije se veće proizvodne jedinice, obično protočni kotlasti

reaktori ili cijevni reaktori projektiraju na osnovu dobivenih znanja u radu s kotlastim reaktorom.<sup>11</sup>

### 1.2.2. Bilanca tvari u šaržnom reaktoru

Za postavljanje bilance tvari, za limitirajući reaktant A u šaržnom reaktoru koristi se volumen cijelog reaktora, jer je sastav reakcijske smjese u svakom trenutku po cijelom volumenu ujednačen.<sup>5</sup> Kako se tijekom reakcije u reaktor ništa ne dovodi niti iz njega odvodi, bilanca tvari za reaktant A glasi:

$$\begin{array}{c} \nearrow \text{O} \quad \nearrow \text{O} \\ \text{IZLAZ} + \text{ULAZ} = \text{NASTAJANJE} + \text{AKUMULACIJA} \\ \text{NASTAJANJE} = - \text{AKUMULACIJA} \end{array}$$

Odnosno, matematički prikazano:

$$(-r_A) \cdot V = -\frac{dn_A}{dt} \quad (1)$$

gdje je:

$-r_A$  - brzina kemijske reakcije [ $\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-3}$ ],

V - volumen [ $\text{m}^3$ ],

$n_A$  - množina tvari [mol],

t - vrijeme [s].

Brzina reakcije je jednaka:

$$(-r_A) = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dn_A}{dt} \quad (2)$$

uvođenjem pojma konverzije:

$$X_A = \frac{n_{A_0} - n_A}{n_{A_0}} \quad (3)$$

te integriranjem jednadžbe 2 dobije se opća jednadžba koja pokazuje vrijeme potrebno da bi se postigao stupanj konverzije:

$$t = n_{A_0} \int_0^{x_A} \frac{dx_A}{(-r_A) \cdot V} \quad (4)$$

gdje je:

$x_A$  - konverzija [%],

$n_{A_0}$  - množina tvari na ulasku u reaktor [mol].

### 1.2.3. Sustav za zagrijavanje ili hlađenje šaržnog reaktora

Sirovina unutar šaržnih reaktora obično oslobađa ili apsorbira toplinu tijekom prerade. Kako bi se sadržaj reaktora zadržao na željenoj temperaturi, toplinu treba dodati ili ukloniti pomoću medija koji prolazi kroz plašt ili cijevi koje, u većini slučajeva, okružuju šaržni reaktor. Brz odgovor na opterećenja grijanja i hlađenja i pravilno vođenje temperature plašta presudni su za uspješan rad šaržnog reaktora.<sup>7</sup>



Slika 5. Šaržni reaktor s plaštom<sup>8</sup>

Tipično kućište reaktora, kao na slici 5, okruženo je plaštom kroz koji cirkulira medij za prijenos topline. Veće posude imaju više točaka ubrizgavanja medija za prijenos topline radi bolje raspodjele medija za prijenos topline unutar plašta.

U kemijskoj i farmaceutskoj industriji obično se preferira vanjski rashladni plašt jer se tako olakšava čišćenje reaktora. Učinkovitost plašta može se definirati pomoću 3 parametra:

- vrijeme odziva promjene temperature plašta,
- ujednačenost temperature plašta,
- stabilnost temperature plašta.<sup>9</sup>

Koeficijent prijenosa topline također je važan parametar. Međutim, treba napomenuti da veliki šaržni reaktori s vanjskim rashladnim plaštom imaju stroga ograničenja prijenosa topline prema dizajnu. Teško je postići iznos veći od 100 W/L čak i uz idealne uvjete prijenosa topline. Nasuprot tome, kontinuirani reaktori mogu isporučiti kapacitet hlađenja veći od 10 000 W/L. Dakle, za procese s vrlo visokim toplinskim opterećenjem postoje bolja rješenja od šaržnih reaktora.<sup>7,9</sup>

Brz odziv procesa vođenja temperature u šaržnom reaktoru te ravnomjerno grijanje i hlađenje plašta posebno su važni za procese kristalizacije ili operacije u kojima su proizvod ili proces izuzetno temperaturno osjetljivi. Postoji nekoliko tipova šaržnih reaktora s obzirom na način hlađenja, odnosno zagrijavanja.<sup>8</sup>

### **1. Šaržni reaktor s jednim vanjskim plaštom (engl. *Single external jacket*)**

Ovakav dizajn sastoji se od vanjskog plašta koji okružuje reaktor (slika 5). Medij za prijenos topline teče unutar plašta. Ovo je najstariji dizajn sustava za zagrijavanje ili hlađenje i ima svojih ograničenja. Na velikim reaktorima može proći dosta vremena da se prilagodi temperatura medija u rashladnom plaštu. Izmiješanost medija za prijenos topline u plaštu također je daleko od idealne što rezultira neujednačenim prijenosom topline. Osim toga, kod ovakvog reaktora može doći do stvaranja toplih ili hladnih točaka, a koje su posljedica oscilacije temperature medija na ulazu u plašt.<sup>7</sup>

### **2. Šaržni reaktor s poluzavojnicom (engl. *Half coil jacket*)**

Poluzavojnica se izrađuje zavarivanjem cijevi oko vanjskog dijela posude kako bi se stvorio polukružni kanal kroz koji potječe medij za prijenos topline. Kod velikog reaktora može se koristiti nekoliko poluzavojnica za transport medija (slika 6). Prednost ovakvog oblika sustava za grijanje ili hlađenje je što se omogućava brže kretanje medija koje je poželjno za dobru regulaciju temperature. Također, omogućuje se dobra raspodjela medija za prijenos topline, čime se izbjegavaju problemi neujednačenog grijanja ili hlađenja između stjenki reaktora i dna posude. Kao i kod reaktora s plaštom, ulazni medij je osjetljiv na velike oscilacije temperatura.<sup>7,9</sup>

Slika 6. Šaržni reaktor s poluzavojnicom<sup>7</sup>

### 3. Šaržni reaktor s plaštom s konstantnim protokom (engl. *Constant flux cooling jacket*)

Ovakav oblik reaktora nedavno je razvijen. Reaktor nije građen od samo jednog plašta, već ima niz od 20 ili više malih kanala. Svaki od ovih kanala je cijev zavarena oko stjenke reaktora, a povezana je klipnim ventilom s više ulaza (slika 7). Ventil djeluje tako da po potrebi otvara i zatvara ove kanale. Područje prijenosa topline učinkovito se kontrolira promjenom broja zavojnica stoga se u sustavu može mijenjati snaga grijanja ili hlađenja pri konstantnom toplinskom toku plašta. Kod šaržnog reaktora s plaštom s konstantnim protokom, odziv temperature na promjenu upravljane veličine je brz zbog kratke duljine kanala, a kojim medij za prijenos topline protječe velikom brzinom. Kao kod reaktora s poluzavojnicom, tok grijanja/hlađenja je ujednačen.<sup>9,10</sup>

Slika 7. Šaržni reaktor s plaštom s konstantnim protokom<sup>10</sup>

#### 1.2.4. Utjecaj temperature na procese u šaržnom reaktoru

Vođenje temperature u šaržnom reaktoru predstavlja izazov jer je većina procesa temperaturno osjetljiva. Temperatura ima veliki utjecaj na brzinu reakcije. Povišenjem temperature povećava se broj sudara u reakciji, odnosno postiže se više energetska stanje.<sup>11</sup> Veza između brzine reakcije i temperature najbolje je opisana Arrheniusovom jednačinom:

$$k = Ar \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (5)$$

gdje je:

$k$  - konstanta brzine reakcije [var.],

$Ar$  - Arrheniusova značajka [var.],

$E_A$  - energija aktivacije [ $\text{J mol}^{-1}$ ],

$t$  - temperatura [K],

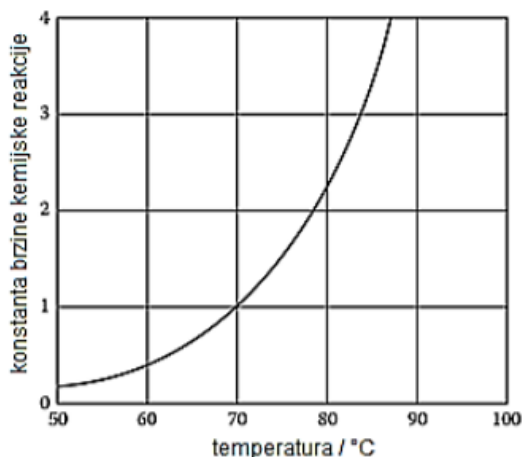
$R$  - opća plinska konstanta [ $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ].

Mjerna jedinica za Arrheniusovu značajku i konstantu brzine reakcije može varirati ovisno o redu reakcije.

Jednačina ima veliko značenje u praksi jer se iz vrijednosti energije aktivacije, koja je prikazana u jednačini, može procijeniti koliki će biti utjecaj temperature na brzinu kemijske reakcije. Ukoliko je energija aktivacije veća, reakcija je osjetljivija na temperaturnu promjenu.

Promjena temperature utječe na brzinu kemijske reakcije u reaktoru, a kako je vidljivo na slici 8 konstanta brzine kemijske reakcije,  $k$ , eksponencijalno raste s povećanjem temperature.





Slika 8. Grafički prikaz promjene brzine kemijske reakcije s temperaturom<sup>12</sup>

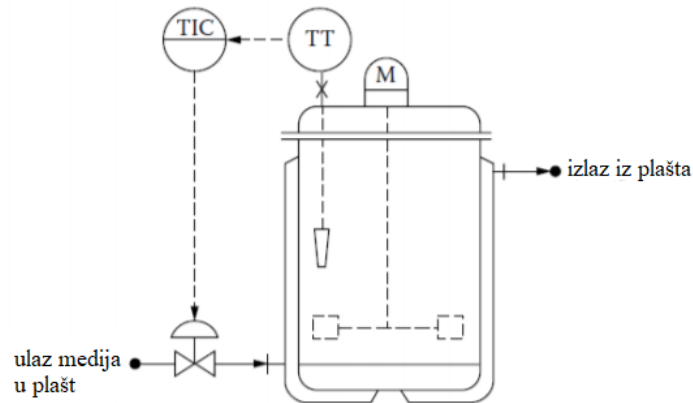
Najveći problem predstavljaju egzotermne reakcije jer se kod takvih reakcija oslobađa velika količina topline. Oslobođenu toplinu je potrebno odvesti da ne bi došlo do burnih reakcija koje mogu dovesti čak i do eksplozije. Važno je obratiti pozornost i na najmanje poremećaje ukoliko oni mogu izazvati povećanje brzine kemijske reakcije.<sup>12</sup> Upravo zbog svega navedenog vrlo je važno regulirati temperaturu u šaržnom reaktoru.

Ciljevi vođenja temperature u šaržnom reaktoru su brzo postizanje željene vrijednosti temperature i to po mogućnosti bez oscilacija. Odnosno, potrebno je omogućiti brzo zagrijavanje ili hlađenje do nove radne točke (bez oscilacija i bez prebačaja) te osigurati stabilan odziv na poremećaje.<sup>3</sup>

### 1.2.5. Vođenje temperature u šaržnom reaktoru

Razlikuje se više načina vođenja temperature u šaržnom reaktoru, a odabir najboljeg ovisi o karakteristikama pojedinog sustava.

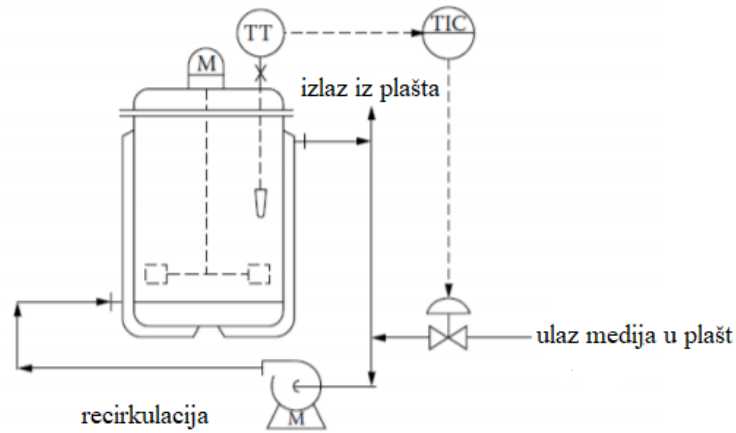
- **Jednostavno vođenje temperature**



Slika 9. Najjednostavniji oblik vođenja temperature u šaržnom reaktoru<sup>3</sup>

Kod jednostavnog vođenja temperature (slika 9), regulator upravlja protokom medija za prijenos topline u plaštu na temelju informacije o vrijednosti izmjerene temperature koju regulatoru šalje mjerni instrument. Ova metoda vođenja nije poželjna zbog ranije opisanih oscilacija temperature medija u plaštu koji mogu uzrokovati tople ili hladne točke u smjesi reaktora. Nadalje, razlike u vremenu zadržavanja medija u plaštu uzrokuju i promjene mrtvog vremena zbog čega je potrebno ponovno namještanje parametara regulatora. Smanjenje protoka medija za prijenos topline uzrokuje pad Reynoldsove značajke, odnosno smanjenje brzine prijenosa topline.<sup>3</sup>

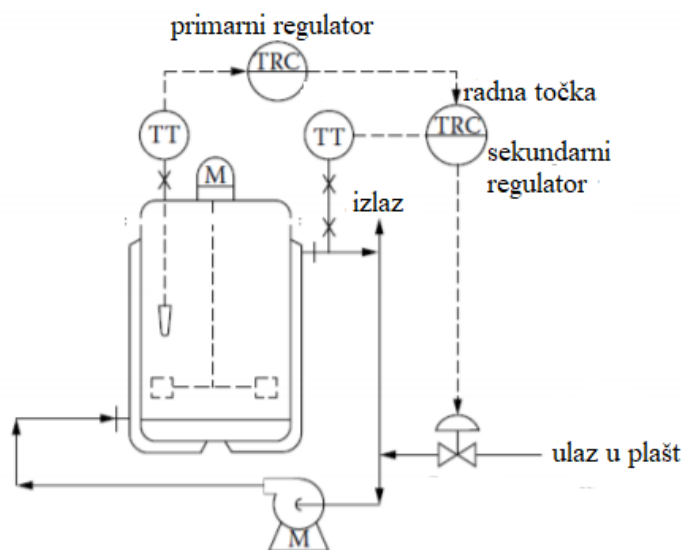
- **Jednostavno vođenje temperature s recirkulacijom medija za prijenos topline**



Slika 10. Vođenje temperature s recirkulacijom u šaržnom reaktoru<sup>3</sup>

Uvođenjem recirkulacije rješava se problem nejednolične temperature medija za prijenos topline te se osigurava konstantno mrtvo vrijeme plašta i visok koeficijent prijenosa topline.<sup>3</sup> Jednostavno vođenje temperature s recirkulacijom prikazano je na slici 10.

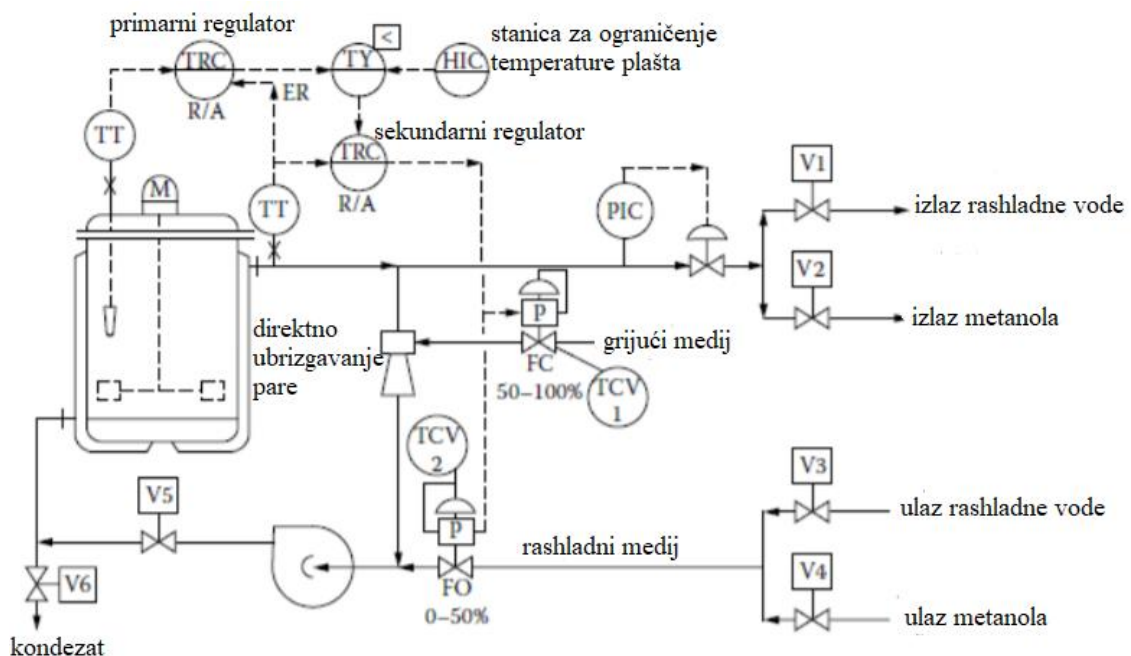
- **Kaskadno vođenje temperature**



Slika 11. Kaskadno vođenje temperature u šaržnom reaktoru<sup>3</sup>

Osnovna ideja kaskadnog vođenja (engl. *cascade control*) je smjestiti jedan regulacijski krug unutar drugog. Na slici 11 primarni (engl. *master*) regulator, na temelju izmjerene temperature, zadaje radnu točku sekundarnom (engl. *slave*) regulatoru koji upravlja ventilom kojim se regulira protok medija za prijenos topline. Sekundarni regulator ima ulogu ispraviti poremećaje kako oni ne bi utjecali na temperaturu u reaktoru, ubrzati odziv primarnog kruga i održavati temperaturu na izlazu iz plašta jer se na taj način uklanja nelinearnost sustava iz primarnog kruga.<sup>3</sup>

- **Kaskadno i podijeljeno vođenje temperature**



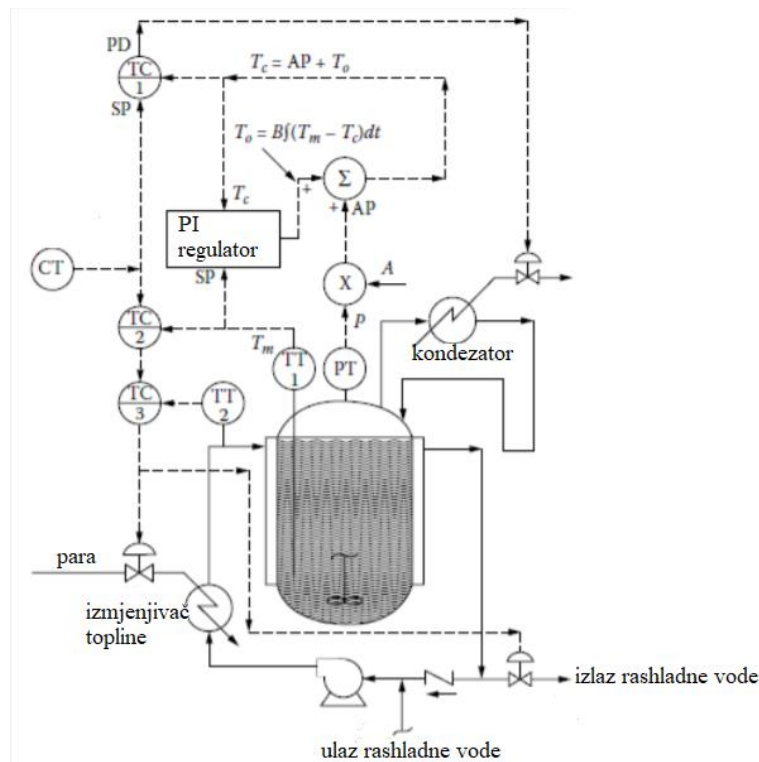
Slika 12. Kaskadno i podijeljeno vođenje temperature u šaržnom reaktoru<sup>3</sup>

Kaskadno vođenje temperature u kombinaciji s podijeljenim vođenjem prikazano je na slici 12. U ovakvom tipu vođenja koriste se dvije vrste rashladnog medija, metanol i rashladna voda, ali i vodena para kao grijajući medij ako je potrebno brzo podignuti temperaturu u reaktoru. Razlikujemo i dva regulacijska kruga, primarni i sekundarni. Primarni regulator i u ovom slučaju zadaje radnu točku sekundarnom regulatoru. Signal sekundarnog regulatora se dijeli na dva izvršna elementa, odnosno ventila. Ako je odziv regulatora u rasponu od 0 do 50%, signal se šalje na regulacijski ventil rashladnog medija

(TCV2). Ako je odziv u rasponu od 50 do 100% signal se šalje na regulacijski ventil grijućeg medija (TCVI). Da ne bi došlo do miješanja rashladne vode i metanola, koriste se dva ventila (V3 i V4).<sup>3</sup>

Ovakav tip vođenja može još kombinirati i s postavljanjem ograničenja temperature na medij za prijenos topline u plaštu, odnosno radna točka sekundarnog regulatora ima ograničenje kako temperatura plašta ne bi prešla limit. Ograničenje temperature se koristi kad je sustav osjetljiv na visoke temperature ili kad visoka temperatura negativno utječe na konačan produkt.

- **Vođenje temperature kompenzacijom tlaka**

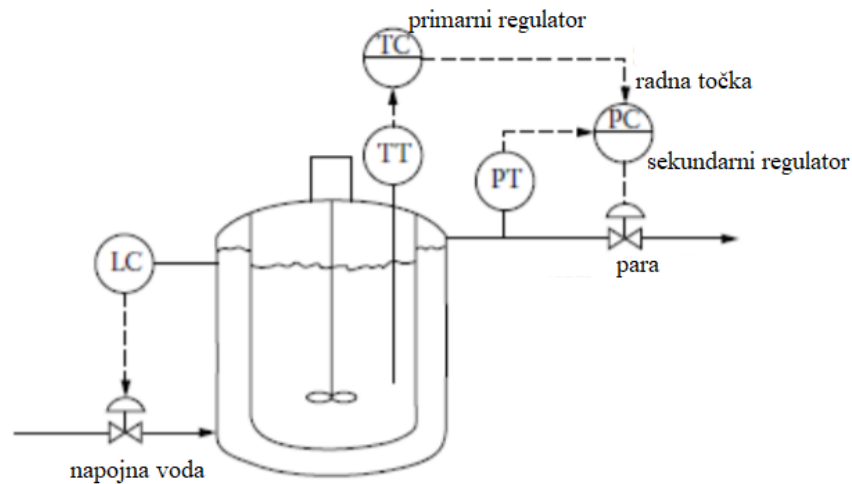


Slika 13. Vođenje temperature kompenzacijom tlaka u šaržnom reaktoru<sup>3</sup>

Vođenje temperature kompenzacijom tlaka se koristi za procese u kojima se reakcije odvijaju u plinovitoj fazi. Tlak u reaktoru je funkcija temperature tako da tlak može dati trenutne informacije o promjeni temperature. Dobiveni podaci se potom mogu koristiti za ubrzavanje reakcije. Ovakva metoda vođenja koristi se većinom za polimerizacijske

procesu. U takvim reaktorima koeficijent prijenosa topline je mali, a javljaju se velike promjene u oslobađanju topline pa klasično kaskadno vođenje to ne može kompenzirati. Vođenje temperature pod tlakom prikazano je na slici 13.<sup>3</sup>

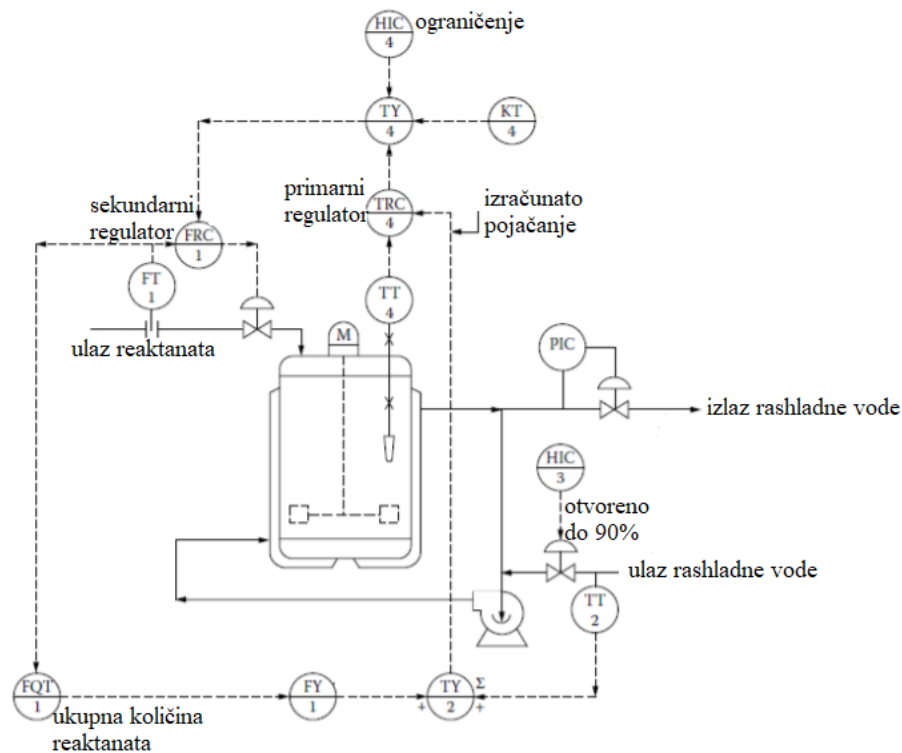
- **Vođenje temperature pomoću vruće vode u plaštu**



Slika 14. Vođenje temperature pomoću vruće vode u plaštu šaržnog reaktora<sup>3</sup>

U procesima koji su osjetljivi na promjenu temperature i tlaka, odnosno u kojima je potrebno stabilno uklanjanje viška topline koristi se vruća voda u plaštu koja može ukloniti višak topline iz reaktora bez promjene temperature plašta. Vođenje je klasično kaskadno (slika 14). Primarni regulator regulira temperaturu u reaktoru i zadaju radnu točku sekundarnom regulatoru. Vođena veličina sekundarnog regulatora je tlak u plaštu.<sup>3</sup>

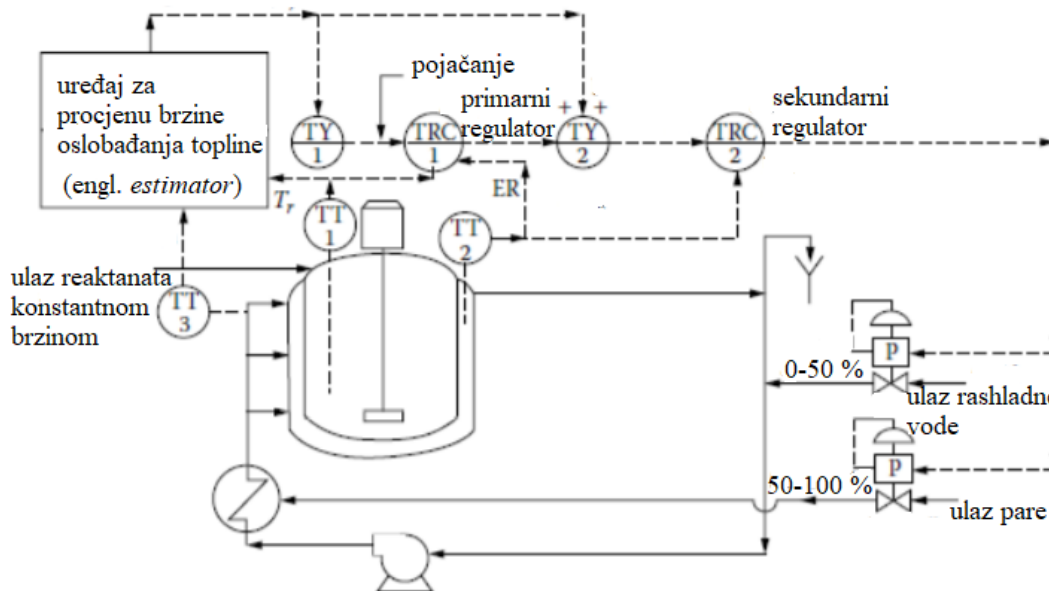
- Vođenje temperature brzinom dodavanja reaktanata



Slika 15. Vođenje temperature u šaržnom reaktoru brzinom dodavanja reaktanata<sup>3</sup>

Vođenje temperature brzinom dodavanja reaktanata koristi se kod procesa u kojima je velika brzina reakcije, kratko vrijeme zadržavanja i niska koncentracija reaktanata. Vođenje je kaskadno, primarni regulator regulira temperaturu i zadaje radnu točku sekundarnom regulatoru koji upravlja protokom reaktanata. U početku procesa statička osjetljivost procesa je visoka jer je koncentracija reaktanata visoka, a koncentracija produkta niska. Tijekom odvijanja reakcije opada koncentracija reaktanta, a koncentracija produkata se povećava što rezultira smanjenjem statičke osjetljivosti procesa. S obzirom na to da statička osjetljivost procesa opada (za dobro vođenje trebala bi biti konstantna) potrebno je proporcionalno povećavati statičku karakteristiku regulatora. Takvu zadaću ima *FYI* (uređaj za mjerenje omjera) koji mjeri dodanu količinu reaktanta te na temelju toga proporcionalno povećava pojačanje regulatora. Princip vođenja temperature brzinom dodavanja reaktanta prikazan je na slici 15.<sup>3</sup>

- Vođenje temperature na temelju modela procesa



Slika 16. Vođenje temperature u šaržnom reaktoru na temelju modela procesa<sup>3</sup>

Vođenje temperature na temelju modela procesa (slika 16) primjenjuje se kada je reakcija prilično egzotermna (oslobađa se velika količina topline) i kada postoji mogućnost pojave odbjeglije reakcije (engl. *runway reaction*). Da bi se model potpuno razvio potrebno je opisati sljedeće:

- utjecaj medija za prijenos topline na temperaturu u reaktoru,
- utjecaj temperature na kinetiku reakcije,
- utjecaj brzine reakcije na temperaturu.

Vođenje je kaskadno s povratnom vezom, ali uređaj koji procjenjuje brzinu oslobađanja topline (engl. *heat transfer estimator*) unaprijednom vezom šalje procjenu sekundarnom regulatoru. Ako vrijednost oslobođene topline naraste, *estimator* povećava pojačanje regulatora čime opada vrijednost statičke osjetljivosti procesa. Uloga primarnog regulatora je da povratnom vezom ispravlja pogreške unaprijednog modela.<sup>3</sup>

Za bolje razumijevanje navedenih procesa vođenja temperature u šaržnom reaktoru, odnosno za određivanje optimalnih uvjeta rada procesa važno je poznavati model procesa.



### 1.3. Razvoj dinamičkog modela procesa

Poznavanje nekog procesa koji je predmet vođenja, izražava se najčešće matematičkim modelima. Takav model daje uvid u ponašanje procesa te omogućava predviđanje njegovog ponašanja u budućnosti.

S obzirom na pristup matematičkom modeliranju procesa, modele dijelimo na teorijske modele, empirijske modele i poluempirijske modele.<sup>1</sup>

Teorijski modeli razvijeni su na temelju kemijskih, fizikalnih i bioloških zakonitosti te opisuju fizikalno vladanje procesa. Razvoj ovakvog tipa modela je dugotrajan i skup, a procjena parametara modela složenijih procesa problematična.<sup>1</sup>

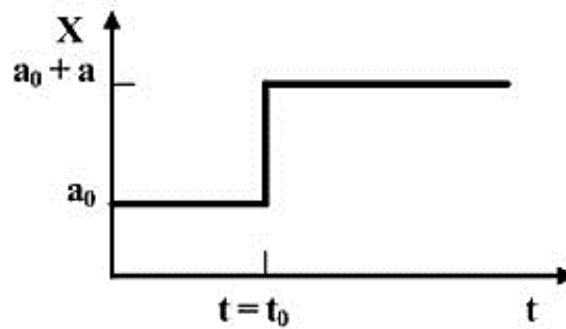
Empirijski modeli su razvijeni na temelju provedenih eksperimenata, odnosno, podaci se dobiju mjerenjem ulaznih i izlaznih veličina. Jednostavniji su za razvoj od teorijskih, ali ih nije jednostavno ekstrapolirati.<sup>1</sup>

Poluempirijski modeli su kombinacija teorijskog i empirijskog modela.

Ovisno o tome opisuju li se procesi u stacionarnom ili nestacionarnom stanju, razlikujemo statičke i dinamičke modele procesa.

Dinamičkim modelima procesa se opisuju procesi u nestacionarnom stanju, gdje se vrijednosti varijabli mijenjaju tijekom vremena, a izražavaju se diferencijalnim jednadžbama, odnosno odgovarajućim prijenosnim funkcijama. Dinamički model procesa prikazuje vezu između ulaza (pobude) i izlaza (odziva) procesa, tj. pokazuje kako će se izlazna veličina mijenjati s vremenom ako se ulazna veličina promjeni npr. skokomično.

Vrlo praktičan način razvijanja dinamičkog modela procesa je na temelju provedbe testa na skok (engl. *step test*). Testom na skok se izaziva skokomična promjena (slika 17) upravljane (ulazne) veličine u otvorenom regulacijskom krugu i prati se odziv vođene (izlazne) veličine tijekom procesnog vremena.<sup>1</sup>

Slika 17. Skokomična pobuda upravljane veličine procesa <sup>13</sup>

Većina industrijskih procesa može se opisati trima dinamičkim modelima procesa i to:

- modelom procesa prvog reda,
- modelom procesa drugog reda,
- integrirajućim modelom procesa.

### 1.3.1. Model procesa prvog reda

Proces prvog reda (engl. *first-order process*) je jedan od oblika dinamičkog odziva procesa. Izazivanjem skokomične pobude ulazna veličina trenutno poprima novu vrijednost. Kod analize odziva prati se prijelaz iz početnog u konačno (novo ustaljeno) stanje. Matematički se opisuje diferencijalnom jednačinom prvog reda<sup>1</sup>:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = K \cdot u \quad (6)$$

gdje je:

$y$  – odziv [var.],

$u$  – pobuda [var.],

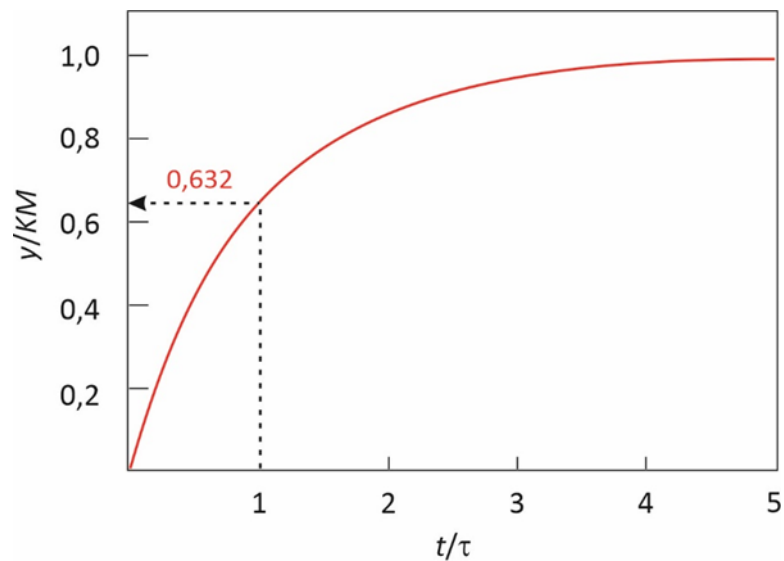
$\tau$  - vremenska konstanta [s],

$K$  - statička osjetljivost procesa [var.].

Jedinice odziva,  $y$ , pobude,  $u$ , i statičke osjetljivosti procesa,  $K$ , ovise o vrsti procesa koji se karakterizira.

Statička osjetljivost procesa pokazuje koliko će se ukupno promijeniti ulazna veličina za određenu promjenu izlazne veličine.<sup>14</sup>

Karakteristični odziv procesa prvog reda na skokomičnu promjenu ulazne veličine prikazan je na slici 18.



Slika 18. Odziv procesa prvog reda ( $M$  - iznos pobude)<sup>14</sup>

Dinamički odziv karakterizira vremenska konstanta (engl. *time constant*). Vremenska konstanta predstavlja vrijeme potrebno da odziv poprimi 63,2% konačne vrijednosti. Što je veća vremenska konstanta, to je odziv procesa sporiji. Brzina odziva maksimalna je u trenutku kad dođe do promjene ulazne veličine i u nastavku kontinuirano opada. U tablici 1. dane su numeričke vrijednosti odziva na skokomičnu promjenu.<sup>14</sup>

Tablica 1. Numeričke vrijednosti odziva na skokomičnu promjenu

$t/\tau$	1	2	3	4	5
$y(t)$	0,632	0,864	0,950	0,982	0,993

Vremenska konstanta je mjera brzine odziva. Što je veća vremenska konstanta, to je odziv sporiji.

### 1.3.2. Model procesa drugog reda

Neki procesi se ne mogu opisati modelom prvog reda. Tada se koriste modeli drugog reda (engl. *second-order process*) kod kojih se najveća brzina odziva ne javlja odmah već nakon nekog vremena pa odzivna krivulja ima karakterističan oblik slova S.<sup>1</sup>

Procesi višeg reda javljaju se kada je nekoliko procesa prvog reda serijski povezano ili kada je regulator spojen serijski s ostalim dijelovima regulacijskog kruga. Također, procesi višeg reda javljaju se uslijed djelovanja sile na tijela ili tekućine i kada su veličine procesa raspodjeljene.<sup>1</sup>

Proces drugog reda karakteriziraju dvije vremenske konstante,  $\tau_1$  i  $\tau_2$ .

Jednadžba procesa drugog reda:

$$\tau^2 \frac{d^2y}{dt^2} + 2\zeta\tau \frac{dy}{dt} + y = K \cdot u \quad (7)$$

gdje je:

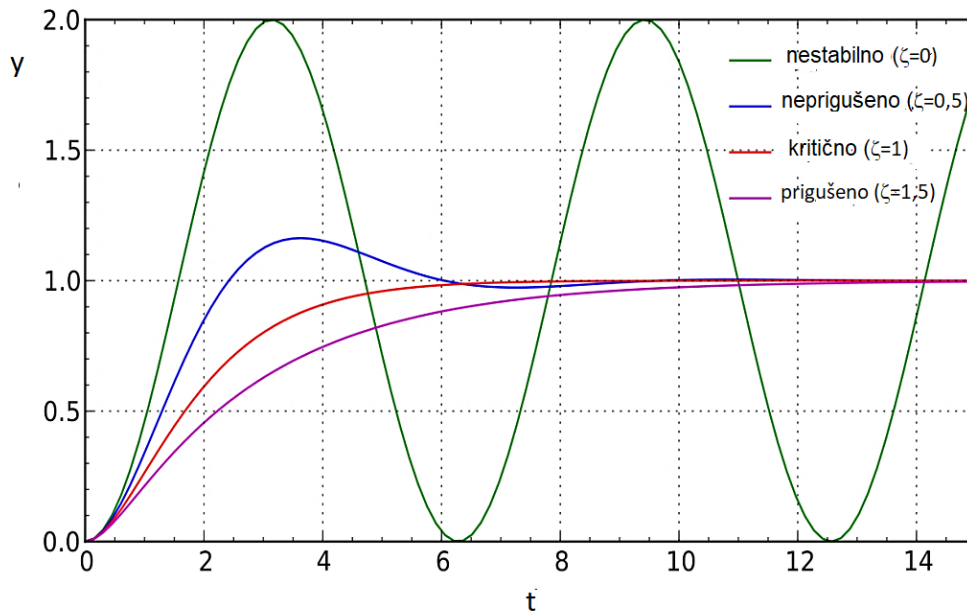
$$\tau = \sqrt{\tau_1 + \tau_2} \quad (8)$$

Odziv procesa drugog reda ovisi o koeficijentu prigušenja,  $\zeta$  (engl. *damping coefficient*).

Ako je:

- $\zeta > 1$  vladanje procesa je prigušeno (engl. *overdamped*),
- $\zeta = 1$  vladanje procesa je kritično (engl. *critically damped*),
- $0 \leq \zeta < 1$  vladanje procesa je neprigušeno (engl. *underdamped*),
- $\zeta < 0$  proces je nestabilan.<sup>1</sup>

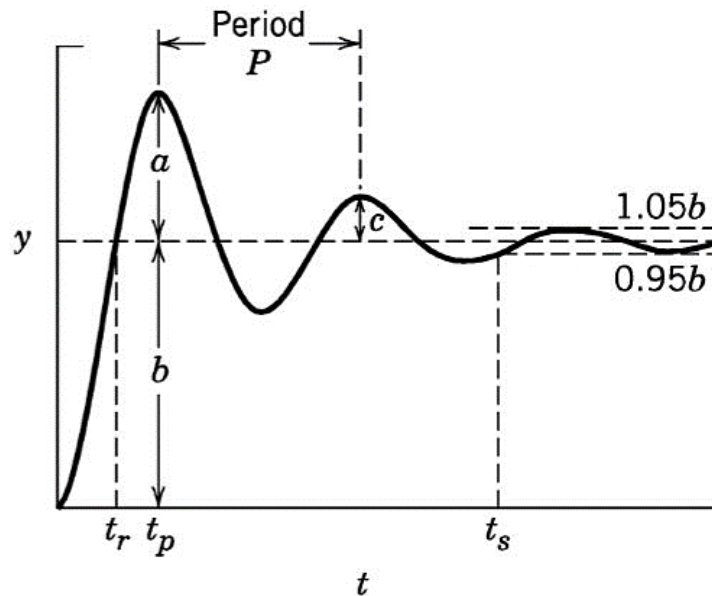
Na slici 19 prikazani su odzivi neprigušenih procesa drugog reda i odzivi prigušenih i kritično prigušenih procesa drugog reda.



Slika 19. Odzivi procesa drugog reda ovisno o koeficijentu prigušenja<sup>15</sup>

Karakteristike odziva neprigušenog procesa drugog reda na skokomičnu promjenu ulaznog signala (slika 20.) su:

- vrijeme rasta,  $t_r$  - vrijeme potrebno da vrijednost izlaza ( $y$ ) prvi put dosegne vrijednost novog ustaljenog stanja,
- vrijeme do prvog maksimuma,  $t_p$  - vrijeme potrebno da vrijednost izlaza ( $y$ ) prvi put dosegne maksimalnu vrijednost,
- vrijeme smirivanja,  $t_s$  - vrijeme potrebno da vrijednost izlaza ( $y$ ) dosegne i ostane unutar  $\pm 5\%$  od konačne vrijednosti novog ustaljenog stanja,
- nadvišenje ili prebačaj (engl. *overshoot*) -  $OS = \frac{a}{b}$  (omjer prekoračenja i radne točke),
- omjer nestajanja (engl. *decay ratio*) -  $DR = \frac{c}{a}$  (omjer dva prekoračenja radne točke),
- period oscilacije,  $P$  – vrijeme između dva sukcesivna pika na krivulji.<sup>1</sup>



Slika 20. Karakteristike neprigušenog odziva procesa drugog reda<sup>1</sup>

Ako je vladanje procesa neprigušeno odziv karakteriziraju nadvišenje i oscilacije. Što je koeficijent prigušenja veći, manja su nadvišenja, ali je zato odziv sporiji.

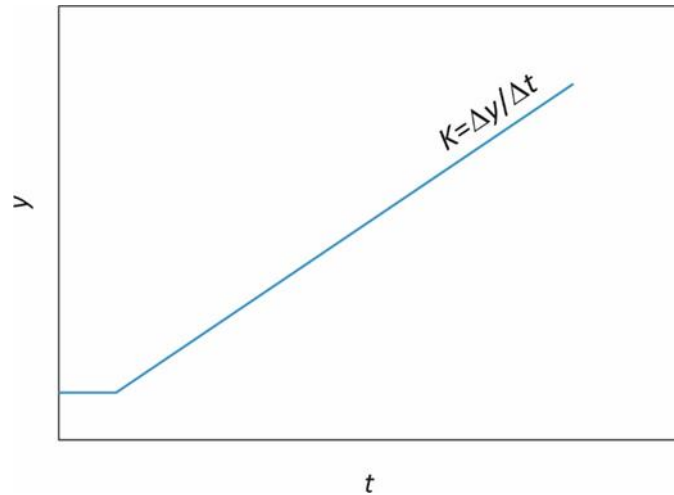
### 1.3.3. Model integrirajućeg procesa

Integrirajući procesi nemaju statičku karakteristiku u uobičajenom smislu. Odziv integrirajućeg procesa prikazan je na slici 21.<sup>1</sup>

Jednadžba integrirajućeg procesa:

$$\frac{dy}{dt} = K \cdot u; K = \text{kont.} \quad (9)$$

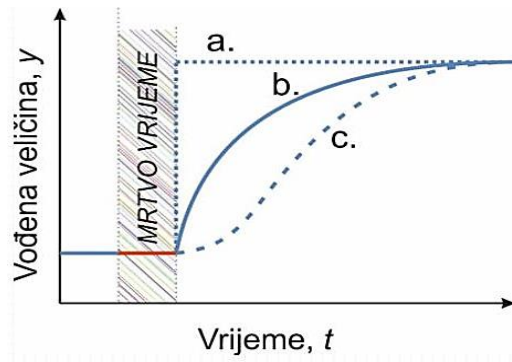
Na slici 21 je vidljivo da odziv integrirajućeg procesa ne dolazi u novo ustaljeno stanje jer  $y(t)$  nastavlja rasti.

Slika 21. Odziv integrirajućeg procesa<sup>14</sup>

Kod integrirajućih procesa, statička osjetljivost,  $K$ , predstavlja nagib pravca (brzinu promjene izlazne veličine), a ne odnos ulaza i izlaza kao što je to slučaj u procesima prvog i drugog reda. Zbog očitih razloga, vremenska konstanta se ne može odrediti.

Ustaljeno stanje u integrirajućim procesima moguće je postići samo ako se izazove impulsna pobuda ulazne veličine pri kojoj ulazna se veličina vraća u početno stanje. Primjer takvog procesa je kontrola razine u spremnicima.<sup>14</sup>

Kod dinamike procesa na odzivnim krivuljama često se može uočiti mrtvo vrijeme,  $\theta$ , (engl. *dead time*) koje se definira kao vrijeme potrebno da se pojavi odziv na promjenu ulazne veličine. Jedan je od najvećih problema kod vođenja procesa jer za vrijeme mrtvog vremena nema nikakvog odziva. Ako nema odziva, nema informacije na temelju koje bi započelo korekcijsko djelovanje. Stoga, ako je mrtvo vrijeme veće, vođenje će biti otežano. U krajnjim slučajevima se može dogoditi da je takav proces nemoguće voditi. Pojava mrtvog vremena prikazana je na slici 22.<sup>1,2</sup>



Slika 22. Mrtvo vrijeme (a- čisto mrtvo vrijeme, b- mrtvo vrijeme s odzivom prvog reda, c- mrtvo vrijeme s odzivom drugog reda)<sup>1</sup>

Mrtvo vrijeme može se izmjeriti jednostavno mjereći vrijeme koje prođe od promjene ulaza do pojave odziva.<sup>1</sup> Najčešće se javlja u kombinaciji s odzivom drugog reda.

Poznavanje modela procesa ključno je za ugađanje regulatora. Prije nego što se odaberu najbolje vrijednosti parametara regulatora, treba sagledati statičko i dinamičko vladanje procesa. Kad se regulator namjesti, statička osjetljivost će ukazati na to koje bi optimalno pojačanje trebalo za regulator, a vremenska konstanta i mrtvo vrijeme odrediti će koje su optimalne vrijednosti integracijskog i derivacijskog vremena. Drugim riječima, odabir parametara regulatora ovisit će o karakteristikama procesa.



## 1.4. Regulatori

Regulator je uređaj koji prima signal mjernog pretvornika, uspoređuje ga s referentnom veličinom, odnosno, radnom točkom (engl. *setpoint*) te na temelju te razlike, tj. pogreške (engl. *error*) računa izlazni signal regulatora (engl. *controller output*).<sup>1</sup> Ovisno o vrsti izlaznog signala razlikujemo elektronički (digitalni), pneumatski, mehanički ili hidraulički regulator. Danas se uglavnom upotrebljavaju digitalni regulatori.<sup>2</sup> Razlikuju se i tri djelovanja regulatora, a to su proporcionalno, integracijsko i derivacijsko djelovanje regulatora.

### 1.4.1. Djelovanje regulatora

#### 1.4.1.1. Proporcionalno djelovanje regulatora

Najjednostavniji regulator je regulator s proporcionalnim djelovanjem (engl. *proportional action*). Izlazna veličina regulatora proporcionalna je signalu pogreške. Proporcionalno djelovanje je prisutno kod svih vrsta kontinuiranih regulatora.

Kod proporcionalnog djelovanja izlaz regulatora, odnosno, upravljana veličina je u linearnoj vezi s ulazom regulatora, odnosno, pogreškom što je prikazano u jednadžbi:

$$OP = K_c \cdot e \quad (10)$$

gdje je:

$K_c$  – pojačanje regulatora [var.],

$e$  – pogreška [%].

Pojačanje regulatora pokazuje koliko će se promijeniti izlazna veličina regulatora s obzirom na ulaz, a pogreška predstavlja odstupanje izmjerene vrijednosti vođene veličine od radne točke.<sup>1</sup>

Proporcionalni regulator djeluje samo kada dođe do pogreške te reagira na pogrešku bez zadržke. Najlakše ga je ugoditi od svih regulatora jer je potrebno ugoditi samo jedan parametar,  $K_c$ . Pojačanje regulatora,  $K_c$ , se može prilagođavati kako bi izlaz regulatora bio osjetljiv na razliku željene i izmjerene veličine, tj. na pogrešku.<sup>2</sup>

Predznak pojačanja regulatora se može prilagođavati pri čemu predznak ukazuje na smjer promjene vođene varijable ( $y$ ) s obzirom na promjenu signala pogreške ( $e$ ).

Proporcionalno djelovanje je stabilno i vrlo brzog odziva. Nedostatak mu je preostalo regulacijsko odstupanje (engl. *offset* ili *steady-state error*) koje predstavlja razliku između željene i stvarne tj. izmjerene vrijednosti vođene veličine.<sup>1</sup>

#### 1.4.1.2. Integracijsko djelovanje regulatora

Integracijsko djelovanje (engl. *integral action* ili *reset*) predstavlja integraciju signala pogreške,  $e$ . Vrijednost upravljane veličine,  $OP$ , se mijenja onom brzinom koja je proporcionalna pogrešci,  $e$ . To znači da ako je odstupanje dvostruko veće od prethodne vrijednosti, izvršna sprava (npr. regulacijski ventil) će se kretati dvostruko brže. Ako odstupanja tj. pogreške nema (vođena varijabla je u radnoj točki), izvršna sprava miruje. U ustaljenom stanju integracijsko djelovanje uklanja preostalo regulacijsko odstupanje.<sup>2</sup>

Integracijsko djelovanje uzima u obzir povijest pogreške, odnosno koliko dugo i koliko daleko je tijekom procesnog vremena vođena veličina bila „daleko” od radne točke.

Integracijsko djelovanje se u praksi veže s proporcionalnim pa vrijedi:

$$OP = K_c e + \frac{K_c}{\tau_i} \int e dt \quad (11)$$

gdje je:

$\tau_i$  - integracijska konstanta [s].

Prednost integracijskog djelovanja je što uklanja preostalo regulacijsko odstupanje, međutim ono uvodi u sustav potencijalnu nestabilnost.<sup>1</sup>

#### 1.4.1.3. Derivacijsko djelovanje regulatora

Derivacijsko djelovanje (engl. *derivative action*) predviđa buduće ponašanje signala pogreške s obzirom na brzinu promjene pogreške.<sup>2</sup> Derivacijsko djelovanje nikad

ne dolazi samostalno, a ukoliko dolazi u kombinaciji s proporcionalnim djelovanjem, za izlaz regulatora vrijedi:

$$OP = K_c e + K_c \tau_d \frac{de}{dt} \quad (12)$$

gdje je:

$\tau_d$  – derivacijska konstanta [s].

Derivacijsko djelovanje uvodi prethođenje (engl. *leading action*) u iznosu  $\tau_d$ . Prethođenjem se sprečavaju velika odstupanja vođene varijable od radne točke, odnosno, kompenzira se zadržka i unosi stabilnost u sustav pa je moguće povećati vrijednost  $K_c$  kako bi se smanjilo preostalo regulacijsko odstupanje. Derivacijsko djelovanje se većinom primjenjuje na procese u kojima se javlja velika zadržka.<sup>1,2</sup>

Pri uvođenju derivacijskog djelovanja potrebno je voditi računa o mjernom sustavu. Naime, ako se u mjernom sustavu javljaju šumovi potrebno je filtrirati signal kako derivacijsko djelovanje šumove ne bi pojačalo.<sup>2</sup>

#### 1.4.2. PID regulator

Proporcionalno-integracijsko-derivacijski regulator je regulator s tri djelovanja (engl. *three mode controller*). Najsofisticiraniji je regulator za vođenje povratnom vezom. Koristi se u više od 97 % slučajeva.<sup>2</sup> Najbolji je za regulaciju tromih procesa, a to su u procesnoj industriji najčešće temperatura i koncentracija.

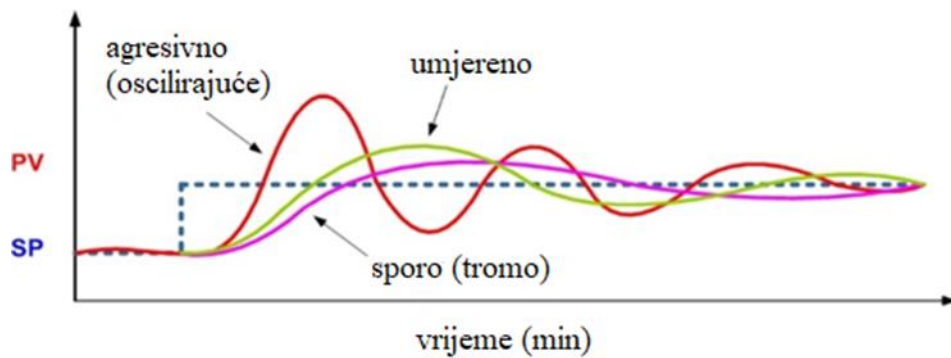
Jednadžba PID regulatora glasi:

$$OP = K_c e + \frac{K_c}{\tau_i} \int e dt + K_c \tau_d \frac{de}{dt} \quad (13)$$

Prednosti PID regulatora su brz odziv, uklanjanje preostalog regulacijskog odstupanja, poznato djelovanje regulatora, jednostavan je za održavanje, robustan i idealan za širok raspon primjena ukoliko se ispravno ugodu.<sup>1</sup>

Glavni nedostatak PID regulatora je činjenica da je njegovo ugađanje najsloženije s obzirom na to da je potrebno odrediti vrijednosti tri parametra. Za dobro ugađanje PID regulatora potrebno je odrediti optimalne vrijednosti parametara regulatora, a to su pojačanje regulatora,  $K_c$ , integracijsko vrijeme,  $\tau_i$  i derivacijsko vrijeme,  $\tau_d$ . Najčešće namještanje parametara regulatora postaje kompromis između dva krajnja regulacijska djelovanja, a to su:

- vrlo stabilan sustav, ali i vrlo spor u regulacijskom odgovoru (na slici 23 označeno sporo/tromo),
- sustav s vrlo brzim, ali i nestabilnim regulacijskim odgovorom, koji često rezultira i dodatnim oscilacijama izlaznog signala<sup>16</sup> (na slici 23 označeno agresivno).



Slika 23. Prikaz različitih vrsta odziva vođene varijable<sup>2</sup>

## 1.5. Metode ugađanja PID regulatora

Ugađanje parametara regulatora jako je važno za optimalan rad regulacijskog kruga i procesa. Različite metode ugađanja regulatora omogućavaju da se na temelju određenih parametara procesa u otvorenom ili zatvorenom regulacijskom krugu odrede optimalne vrijednosti parametara proporcionalnog, integralnog i derivacijskog djelovanja.

Općenito se metode ugađanja parametara regulatora mogu podijeliti na: eksperimentalne, analitičke, frekvencijske, metode položaja korijena i optimiranje parametara.<sup>2</sup>

### 1.5.1. Ziegler-Nichols metode ugađanja regulatora

Ziegler-Nichols metode predstavljaju eksperimentalni način određivanja parametara regulatora. Dvije metode su Ziegler i Nichols predložili 1942. godine, a to su metoda ruba stabilnosti u zatvorenom regulacijskom krugu i metoda prijenosne funkcije u otvorenom regulacijskom krugu.<sup>17</sup>

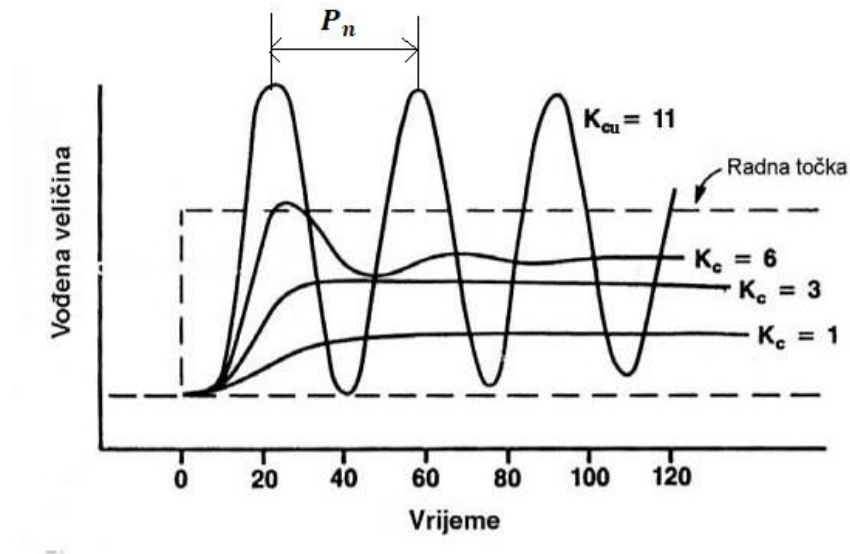
*„Navedenim metodama parametri regulatora se određuju prema graničnom pojačanju i periodu oscilacija na granici stabilnosti sustava s proporcionalnim regulatorom ili na temelju aproksimacije ponašanja procesa prijenosnom funkcijom s mrtvim vremenom i jednom vremenskom konstantom.“<sup>17</sup>*

#### 1.5.1.1. Metoda ruba stabilnosti

Ugađanje regulatora metodom ruba stabilnosti koristi se u postrojenjima gdje nije opasno dovoditi regulacijske sustave do ruba stabilnosti. Ova metoda temelji se na graničnom pojačanju regulatora u zatvorenom regulacijskom krugu. Granično pojačanje je najveća dopuštena vrijednost pojačanja u kojoj regulacijski krug oscilira, odnosno maksimalno pojačanje prije nego što sustav postane nestabilan. Postupak ugađanja regulatora ovo metodom sastoji se od tri koraka<sup>2</sup>:

1. Potrebno je isključiti integracijsko i derivacijsko djelovanje.
2. Vrijednost pojačanja,  $K_C$ , odnosno proporcionalnog djelovanja povećava se u malim koracima sve dok krug ne počne oscilirati. Na slici 24 prikazano je

djelovanje pojačanja regulatora. Vidljivo je da se pojačanjem regulatora vrijednost vođene varijable približava radnoj točki, ali se povećavaju i oscilacije.



Slika 24. Karakteristične odzivne krivulje ovisno o vrijednosti pojačanja regulatora<sup>2</sup>

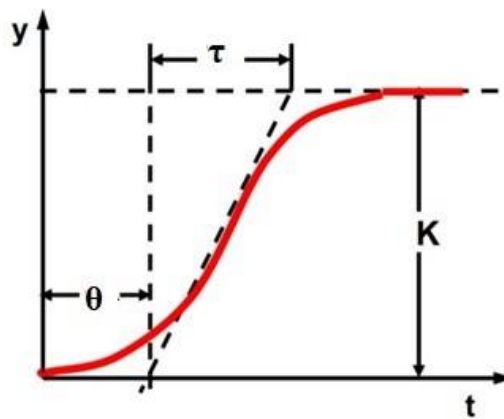
- Zabilježiti pojačanje koje daje tu graničnu oscilaciju,  $K_{cu}$  te odrediti period osciliranja,  $P_n$ . Potom se određuju parametri regulatora iz graničnog koeficijenta pojačanja regulatora,  $K_{cu}$  i perioda graničnih oscilacija,  $P_n$ , prema relacijama danim u tablici 2.<sup>17</sup>

Tablica 2. Vrijednosti parametara regulatora prema Ziegler-Nichols metodi ruba stabilnosti.<sup>18</sup>

Tip regulatora	Vrijednosti parametara regulatora		
	$K_C$	$1/\tau_i$	$\tau_d$
<b>P</b>	$0,5K_{cu}$	-	-
<b>PI</b>	$0,4K_{cu}$	$1,2P_n$	-
<b>PID</b>	$0,6K_{cu}$	$2P_n$	$0,125P_n$

### 1.5.1.2. Metoda prijenosne funkcije

U procesima koje nije moguće dovesti do ruba stabilnosti, koristi se metoda prijenosne funkcije. Ovakva metoda zasniva se na odzivu procesa na skokomičnu promjenu izlaza regulatora. Potrebno je prvo postaviti regulator u ručni rad (otvoreni regulacijski krug) i pričekati da se izlazna varijabla ustali. Kad je proces stabilan izaziva se skokomična promjena upravljane veličine. Dobivena krivulja odziva predstavlja prijenosnu funkciju procesa. Iz te funkcije određene su tri veličine, a to su statička osjetljivost procesa,  $K$ , mrtvo vrijeme,  $\theta$  i vremenska konstanta,  $\tau$ . Dobiveni parametri se određuju povlačenjem tangente u točki infleksije na odzivnoj krivulji (slika 25).<sup>17</sup>



Slika 25. Određivanje parametara procesa iz kojih se mogu odrediti postavke regulatora<sup>18</sup>

Prema parametrima procesa dobivenima iz odzivne krivulje mogu se odrediti parametri regulatora korištenjem izraza danima u tablici 3.

Tablica 3. Vrijednosti parametara regulatora prema *Ziegler-Nichols* metodi prijenosne funkcije.<sup>18</sup>

Tip regulatora	Vrijednosti parametara regulatora		
	$K_C$	$1/\tau_i$	$\tau_d$
<b>P</b>	$\tau/(\theta \cdot K)$	-	-
<b>PI</b>	$0,9\tau/(\theta \cdot K)$	$0,3/\theta$	-
<b>PID</b>	$1,2\tau/(\theta \cdot K)$	$0,5/\theta$	$0,5/\theta$

### 1.5.2. Pitops metode ugađanja PID regulatora

U računalnom programskom paketu *Pitops 7* ponuđene su četiri metode za ugađanje PID regulatora a to su:

- *Pitops IAE* (engl. *integrated absolute error*) metoda ugađanja regulatora kod koje je kriterij ugađanja minimum integrirane apsolutne pogreške,
- *Pitops ISE* (engl. *integrated square error*) metoda ugađanja regulatora kod koje je kriterij ugađanja minimum integrirane kvadratne pogreške,
- *Pitops ITAE* (engl. *integrated time absolute error*) metoda ugađanja regulatora kod koje je kriterij ugađanja minimum integrirane apsolutne pogreške u određenom vremenu,
- *Pitops RO* (engl. *reduced overshoot*) metoda ugađanja regulatora koja rezultira stabilnijim ugađanjem uz niže pojačanje regulatora čime se smanjuje prebačaj preko točke.<sup>19</sup>

Da bi program pa tako i modeli dobro funkcionirali, potrebno je voditi računa o određenim uvjetima:

- važno je zadati radnu točku procesa;
- smetnje i šumove kod prijenosnih funkcija procesa prvog i drugog reda potrebno je što više otkloniti;



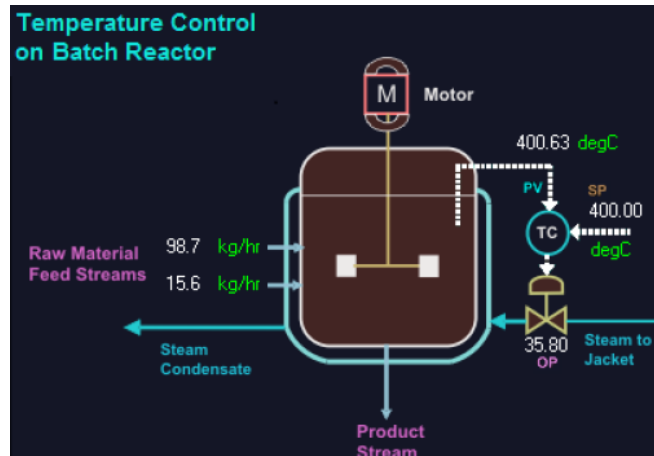
- parametri PID regulatora prije početka ugađanja moraju biti stabilni, bez oscilacija. Ugađanje može biti neuspješno ako su početni parametri PID regulatora vrlo agresivni (nestabilni, oscilirajući). Kako bi utvrdili je li parametri PID regulatora agresivni potrebno je analizirati simulacijske grafove koji prikazuju ovisnost vođene veličine (*PV*) o vremenu, ovisnost upravljane veličine (*OP*) o vremenu i ovisnost vrijednosti parametara regulatora o vremenu. Analizirajući grafove mijenjaju se parametri regulatora za dobivanje što uspješnijeg ugađanja PID regulatora, odnosno ugađanje kod kojeg je pogreška minimalna.<sup>19</sup>

Pridržavanjem navedenih uvjeta veće su šanse za uspješnije ugađanje PID regulatora.

## 2. EKSPERIMENTALNI DIO

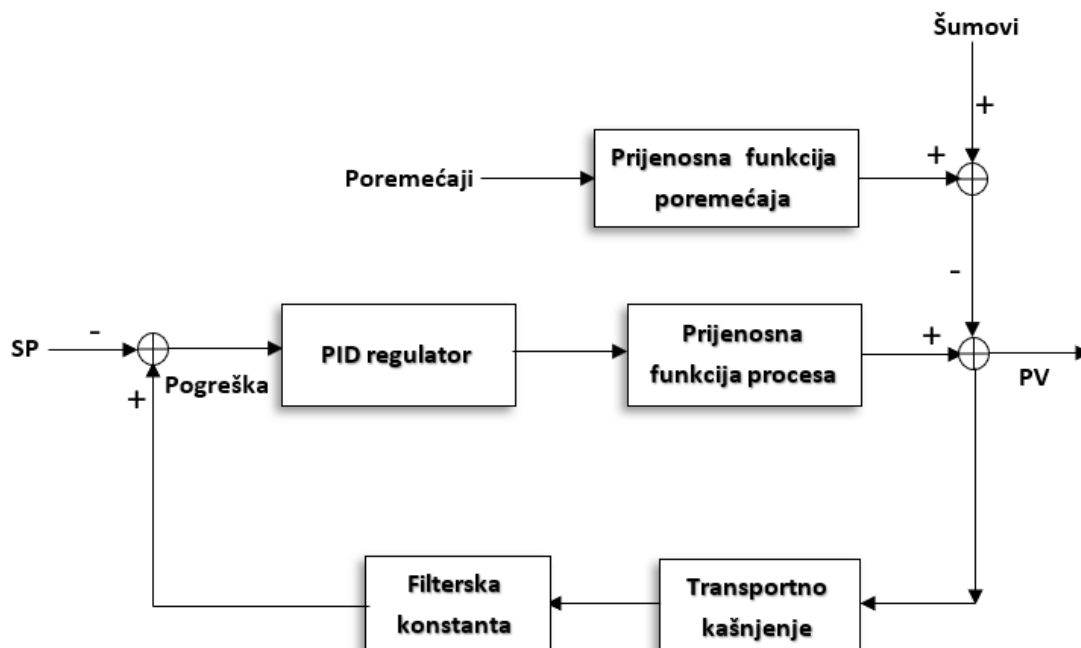
### 2.1. Opis procesa

U ovom radu je simuliran proces vođenja temperature u šaržnom reaktoru (engl. *temperature control on batch reactor*)<sup>20</sup> koji je prikazan na slici 26.



Slika 26. Proces vođenja temperature u šaržnom reaktoru iz programa *Simcet 9.2*.

Na slici 27 prikazan je blok dijagram regulacijskog kruga.



Slika 27. Blok dijagram regulacijskog kruga

U blok dijagramu, *PV* je oznaka za procesnu, odnosno vođenu varijablu, a *SP* predstavlja radnu točku.

Metoda vođenja koja je prikazana na blok dijagramu je jednostavno vođenje u kojem temperatura predstavlja vođenu varijablu, dok je protok pare u plaštu upravljana varijabla. Temperatura se mjeri mjernim instrumentom koji šalje signal regulatoru temperature (*TC*). Na temelju informacije o vrijednosti izmjerene temperature, regulator računa odstupanje temperature od radne točke i korigira to odstupanje otvaranjem/zatvaranjem pneumatskog ventila za protok pare u plašt.

## **2.2. Karakterizacija procesa uz upotrebu računalnog programa *Simcet 9.2*.**

Ugađanju regulatora ne može se pristupiti bez prethodnog određivanja statičkih i dinamičkih karakteristika procesa. Kako bi se navedene veličine odredile, potrebno je provesti ispitivanje u otvorenom regulacijskom krugu i to promjenom upravljane varijable u pozitivnom i negativnom smjeru. Karakteristike koje je potrebno odrediti su statička osjetljivost procesa,  $K$ , vremenska konstanta,  $\tau$ , i mrtvo vrijeme,  $\theta$ .

Kako bi se odredile tražene karakteristike procesa, u računalnom programu *Simcet 9.2* je proveden test na skok.

U prvom koraku, potrebno je prebaciti regulator u ručni rad (engl. *manual mode*), skokomično promijeniti upravljaju veličinu (protok pare u plaštu reaktora) i potom pratiti odziv procesa, odnosno promjenu vrijednosti vođene varijable (temperatura u reaktoru) tijekom procesnog vremena.

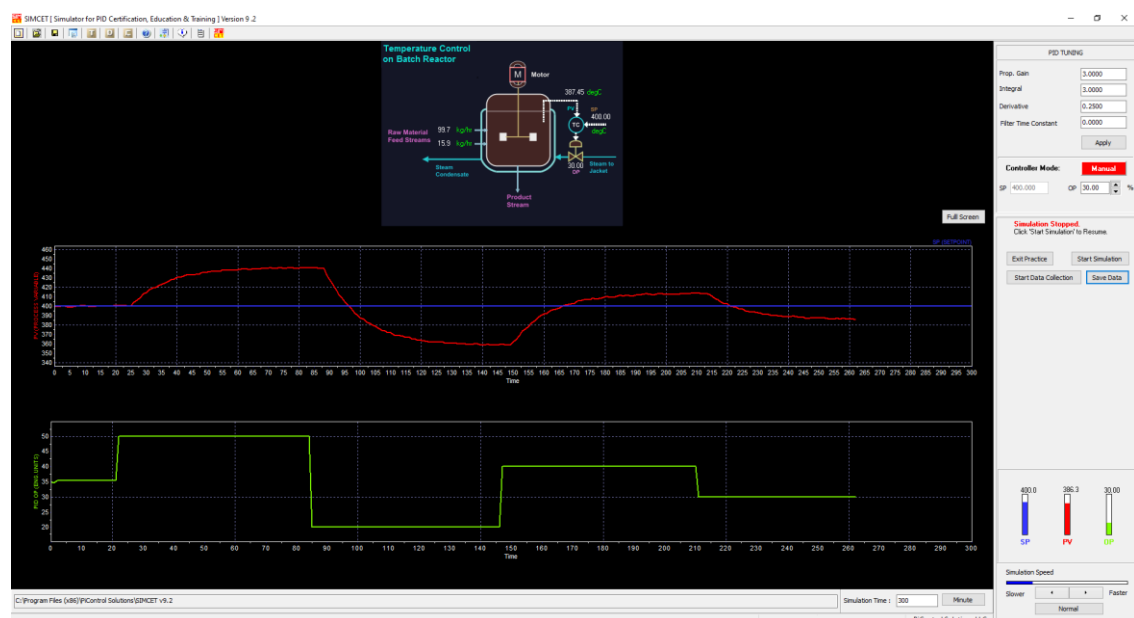
Simulacijsko vrijeme (engl. *simulation time*) postavljeno je na 200 minuta.

Protok pare se mijenja otvaranjem-zatvaranjem pneumatskog ventila u određenom postotku.

U tablici 4 prikazane su vrijednosti promjene upravljane veličine, odnosno otvorenosti ventila (*OP*), a prikaz provedbe testa na skok u računalnom programu *Simcet 9.2* vidljiv je na slici 28.

Tablica 4. Promjene vrijednosti otvorenosti ventila (*OP*)

Test na skok	Početni <i>OP</i> , %	Konačni <i>OP</i> , %
1	35	50
2	50	20
3	20	40
4	40	30



Slika 28. Provedba testa na skok s ciljem karakterizacije procesa

Tijekom testa na skok potrebno je prikupiti podatke što je moguće učiniti pritiskom na funkcije „*Start data collection*“ te „*Save data*“.

Nakon što su podaci sačuvani potrebno ih je unijeti u Excel. Podaci u Excelu se grupiraju u kolone s oznakama *Sample*, *CV*, i *MV*. Kolona „*Sample*“ predstavlja vrijeme u kojem su snimani podaci i to u onim jedinicama koje su navedene u programu *Simcet 9.2*. U *CV* koloni napisane su vrijednosti vođene varijable, a kolona *MV* označava vrijednosti upravljane varijable.

Primjer takve tablice s procesnim podacima prikazan je na slici 29.

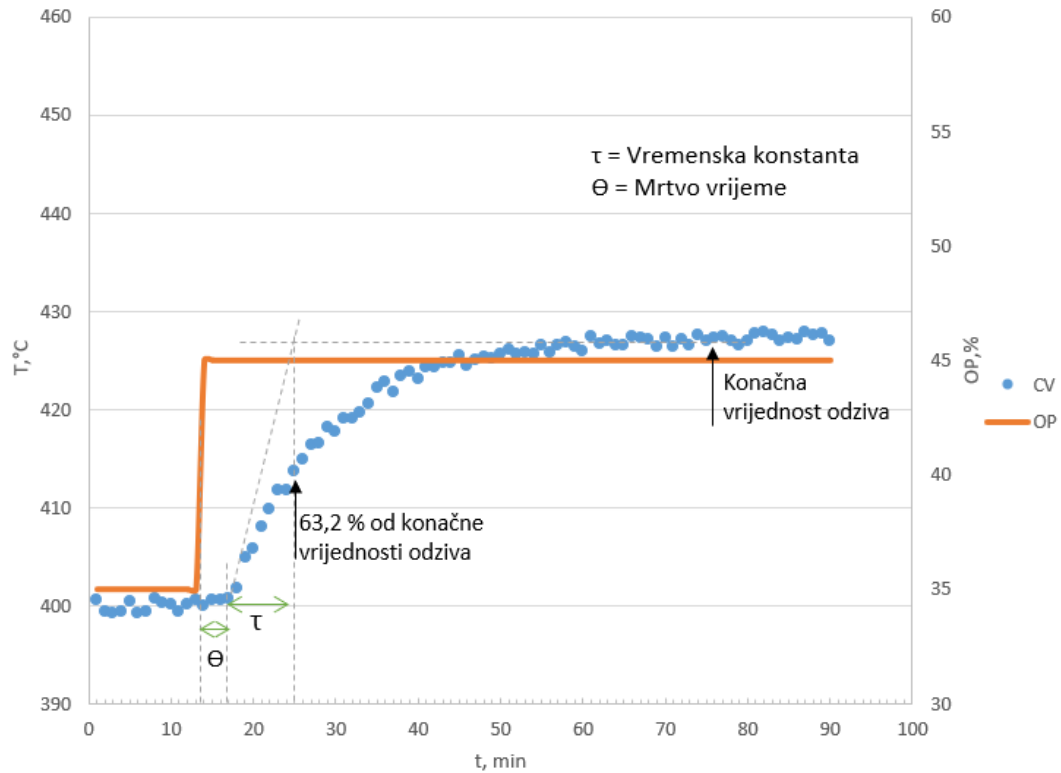
Sample	CV	MV
1	401,0440063	35
2	399,9690247	35
3	399,5983276	35
4	399,8334045	35
5	400,8065796	35
6	400,3403015	35
7	400,1837769	35
8	400,6013794	35
9	400,3063965	35
10	400,8500061	35
11	401,0445251	35
12	400,7416687	35
13	400,8160706	50
14	401,1524353	50
15	400,1669312	50
16	400,6977234	50
17	404,2901917	50
18	406,3763123	50

Slika 29. Procesni podaci dobiveni provedbom testa na skok

### 2.3. Grafička procjena parametara procesa

Parametre modela procesa je moguće procijeniti na temelju grafičkog prikaza odziva procesa na skokomičnu promjenu ulazne veličine.

Iz podataka dobivenih testom na skok u Excelu kreira se graf i odrede se vrijednosti statičke osjetljivosti procesa, vremenske konstante i mrtvog vremena. Kako bi se odredila vremenska konstanta procesa, bilo je potrebno u točki infleksije, odnosno u trenutku najveće brzine promjene odziva, povući tangentu. Iz sjecišta te tangente i pravca koji označava konačnu vrijednost odziva se potom očita vrijeme, a iz njega, kako je prikazano na slici 30 je moguće izračunati mrtvo vrijeme procesa te vremensku konstantu procesa.



Slika 30. Grafičko određivanje parametara modela procesa

Statička osjetljivost procesa se također može procijeniti na temelju grafičkog prikaza, i to korištenjem izraza:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{\Delta y}{M} \quad (14)$$

gdje je:

$K$  – statička osjetljivost procesa [ $^{\circ}\text{C}/\%$ ],

$y$  - vođena veličina [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$u$  - upravljana veličina [%],

$M$  – iznos pobude [%].

Potrebno je naglasiti da grafičko određivanje nije precizno te da se može samo procijeniti red procesa, te statičke i dinamičke karakteristike procesa.

## 2.4. Karakterizacija procesa uz upotrebu računalnog programa *Pitops 7*

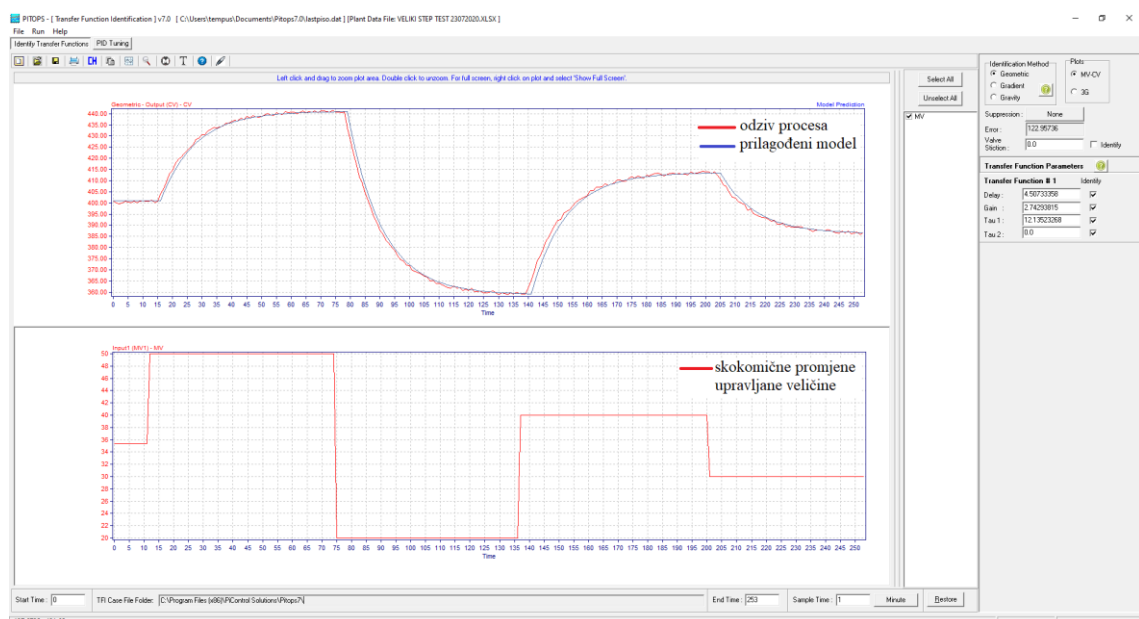
Parametri procesa mogu se odrediti uz upotrebu programskog paketa *Pitops 7* (*Multivariable closed-loop process transfer function dynamics system identification*). Programski paket se sastoji od dva integrirana modula - *Pitops-TFI* (identifikacija prijenosne funkcije) i *Pitops-PID* (PID i APC simulacija i optimizacija). APC je kratica za *advanced process control*.

*Pitops-TFI* je modul koji može uspješno identificirati parametre modela procesa koristeći kompletne podatke dobivene u zatvorenom ili otvorenom krugu, čak i u prisutnosti šuma i nenamjernih smetnji.<sup>21</sup>

Kako bi se pomoću ovog programa odredili parametri modela procesa, potrebno je učitati podatke prethodno dobivene testom na skok.

Kad su podaci učitani, na alatnoj traci potrebno je kliknuti na *TRANSFER FUNCTION MODEL ORDER* te odabrati odgovarajući red modela. Prvo se odabire model 1. reda, a kasnije i model 2. reda kako bi se usporedilo koji model je prikladniji i bolje opisuje odziv procesa. Kako bi se odredili parametri odabranog modela potrebno je na alatnoj traci kliknuti na *RUN-IDENTIFY* ili pritisnuti F6 na tipkovnici.

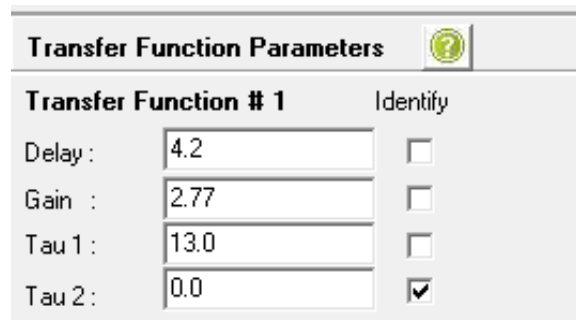
Rezultati će biti prikazani u prozoru kako je pokazano na slici 31.



Slika 31. Primjer određivanja parametara modela procesa pomoću programa *Pitops 7*

Parametre modela je moguće prilagođavati kako bi model bolje opisao eksperimentalne podatke nakon čega je potrebno na alatnoj traci kliknuti *SIMULATE* ili pritisnuti F5.

Parametri modela nakon prilagođavanja su prikazani u prozoru:



Transfer Function Parameters	
Transfer Function # 1	Identify
Delay :	4.2 <input type="checkbox"/>
Gain :	2.77 <input type="checkbox"/>
Tau 1 :	13.0 <input type="checkbox"/>
Tau 2 :	0.0 <input checked="" type="checkbox"/>

Slika 32. Primjer određenih parametara modela procesa

Važno je voditi računa da se mjerna jedinica simulacijskog vremena slaže sa simulacijskim vremenom u programu *Simcet 9.2*. stoga je ovdje postavljena na minute.

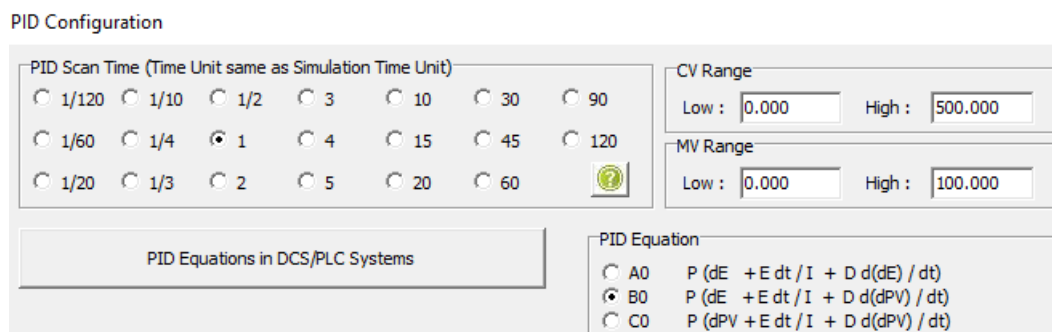


## 2.5. Ugađanje PID regulatora korištenjem računalnog programa *Pitops 7*

Nakon određivanja parametara modela procesa može se pristupiti ugađanju PID regulatora. Ugađanje regulatora provodi se u modulu *Pitops-PID*

Pristupanjem modulu *Pitops-PID*, prvo se namještaju postavke koje moraju biti u skladu s onima pri kojima je provedena simulacija, odnosno moraju se slagati *Simcet* i *Pitops* postavke kao npr. simulacijsko vrijeme koje u oba programa mora biti namješteno na minute.

*PID SCAN TIME* je namješteno na 1 min. *CV RANGE* (opseg mjernog instrumenta) se postavi na (0-500)°C, a za *PID EQUATION* odabire se  $B_0$  jer je to najčešće korištena jednadžba ugađanja regulatora (slika 33).



Slika 33. Konfiguracija postavki za ugađanje regulatora

Prije odabira metode ugađanja, unose se vrijednosti parametara modela procesa koji su se prethodno odredili (na slici *transfer process function*), a zatim se promijeni vrijednost radne točke. U ovom radu je primjerice promijenjena sa 400 °C (*SP OLD*) na 430 °C (*SP NEW*) kako je prikazano na slici 34.

Promjena otvorenosti ventila (engl. *valve bump*) je namješten na 0.

Process Transfer Function

Delay : 4.2

Gain : 2.77

Tau1 : 13.0

Tau2 : 0.0

Select Transfer Function From: TF1

SP Old : 400.0

SP New : 430.0

SP ROC : 0.0

Valve Bump : 0.0

Valve Stiction : 0.0

PID Raw OP

**OP Limits**

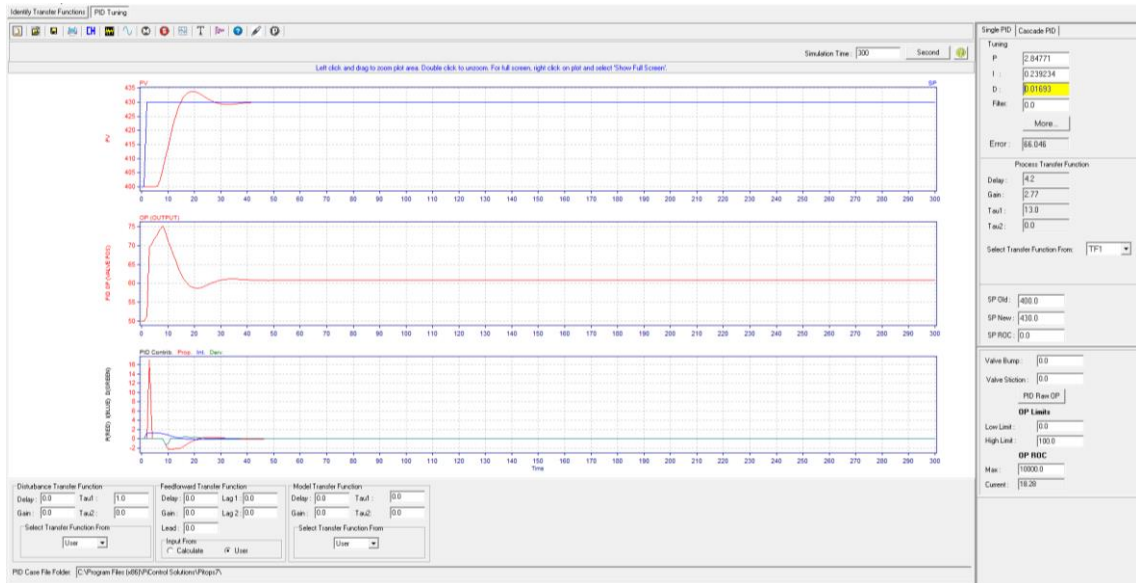
Low Limit : 0.0

High Limit : 100.0

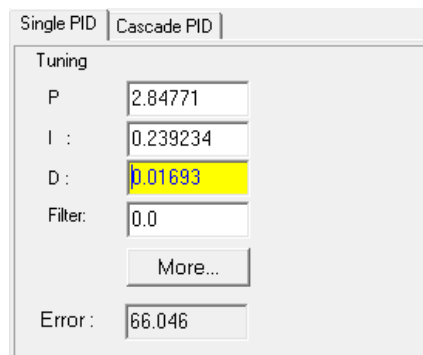
Slika 34. Primjer postavki koje prethode određivanju parametara regulatora

*Pitops 7* nudi više različitih metoda ugađanja, u ovom slučaju izabrane su *Ziegler-Nichols* metode te četiri metode razvijene specifično za ovaj računalni program (*Pitops IAE*, *Pitops ISE*, *Pitops ITAE*, *Pitops RO*).

Prvo se provodi ugađanje *Pitops*-ovim metodama i to s isključenim derivacijskim djelovanjem. Odabirom svake pojedinačne metode, dobivaju se vrijednosti parametara PID regulatora zajedno s pogreškom, a koji se prikazuju u prozoru:



Slika 35. Primjer ugađanja PID regulatora



Slika 36. Primjer prikaza rezultata određivanja parametara regulatora

Nakon što se provelo simulacijsko ugađanje s isključenim derivacijskim djelovanjem, provedeno je ugađanje s uključenim derivacijskim djelovanjem. Općenito se derivacijsko djelovanje pali kada je omjer mrtvog vremena i vremenske konstante,  $\theta/\tau$ , veći od 1,5 ili kad je vrijednost mrtvog vremena veća od 5. U ovom slučaju je taj omjer,  $\theta/\tau$ , iznosio 3,05, a vrijednost mrtvog vremena je 4,2 min.

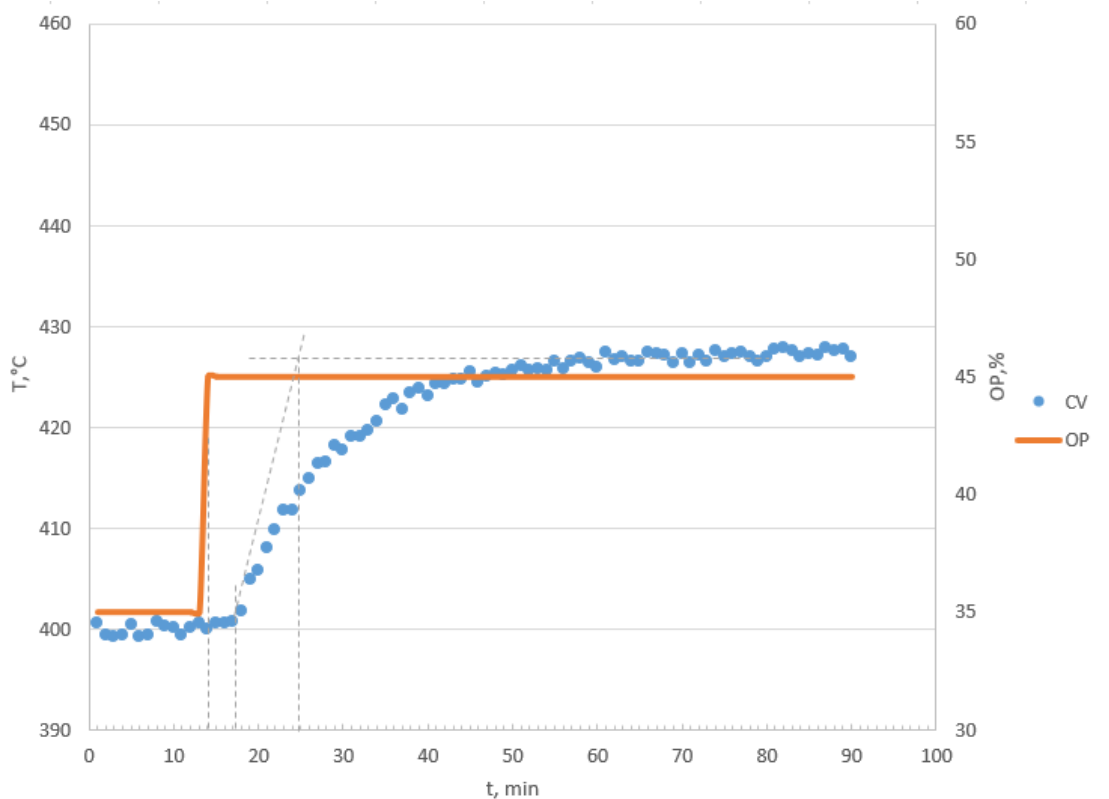
Slijedi simulacijsko ugađanje regulatora korištenjem *Ziegler-Nichols* metode. U ovom radu je korištena P regulacija, PI regulacija i PID regulacija.

Kako bi se odredili parametri regulatora prema navedenim metodama, bilo je potrebno slijediti sve prethodno opisane korake (unošenje parametara modela procesa, promjena vrijednosti radne točke te odabir metode ugađanja regulatora).

### 3. REZULTATI I RASPRAVA

#### 3.1. Rezultati grafičkog određivanja parametara procesa

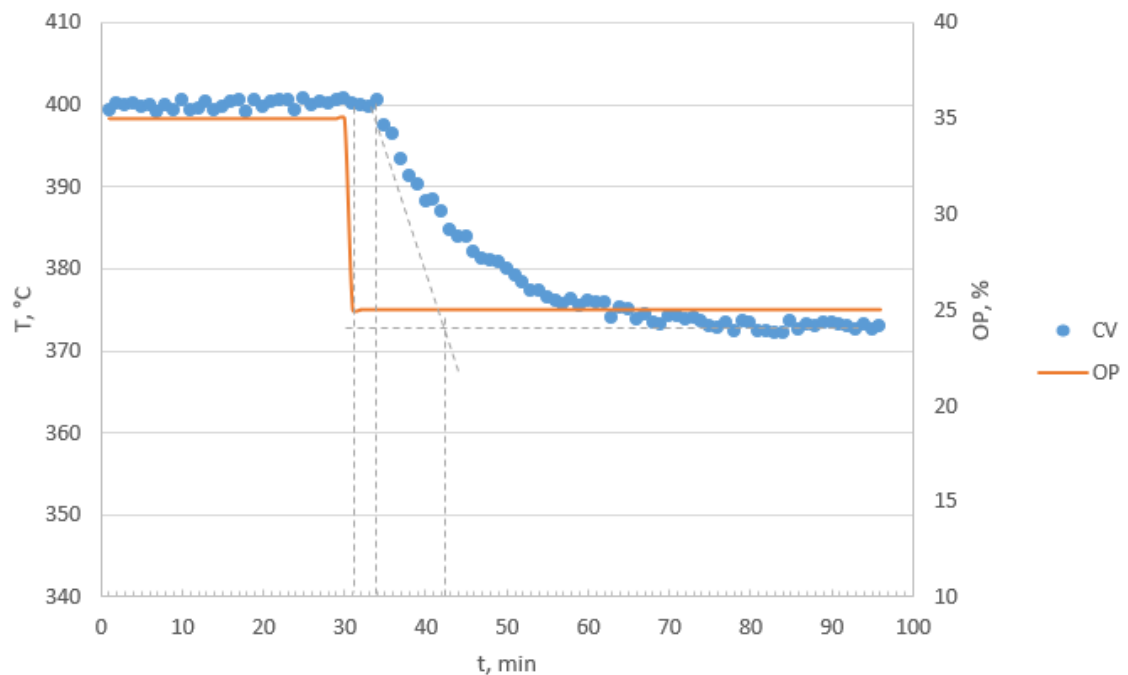
Iz podataka dobivenih provedbom testa na skok, vrijednosti parametara modela procesa (statička osjetljivost,  $K$ , vremenska konstanta,  $\tau$ , i mrtvo vrijeme,  $\Theta$ ) određene su grafičkim putem. Grafički prikaz odziva procesa u ovisnosti o vremenu na skokomičnu promjenu ulazne veličine ( $MV$ ) prikazani su na slikama 37 i 38 (po jedan odziv u pozitivnom smjeru i negativnom smjeru) dok su procijenjene vrijednosti parametara procesa dobivene grafičkim određivanjem prikazane u tablicama 5 i 6.



Slika 37. Odziv procesa na skokomičnu promjenu ulazne veličine u pozitivnom smjeru

Tablica 5. Rezultati grafičkog određivanja parametara modela procesa

Vremenska konstanta procesa, min	9
Mrtvo vrijeme procesa, min	3
Statička osjetljivost procesa, °C /%	2,7



Slika 38. Odziv procesa na skokomičnu promjenu ulazne veličine u negativnom smjeru

Tablica 6. Rezultati grafičkog određivanja parametara modela procesa

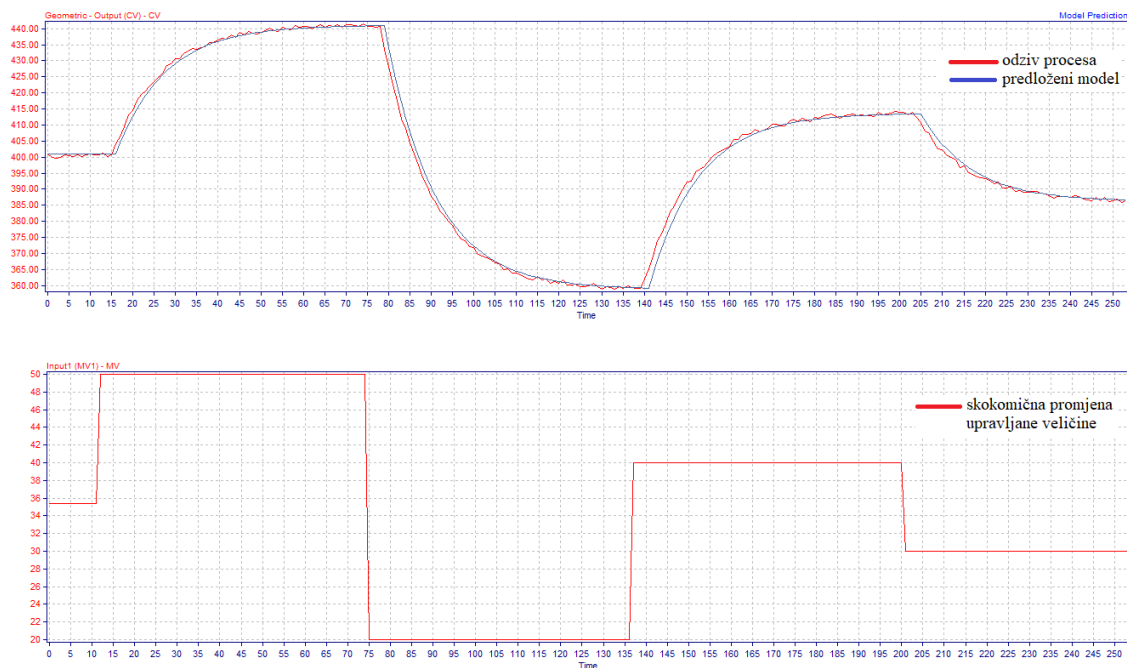
Vremenska konstanta procesa, min	8,5
Mrtvo vrijeme procesa, min	3
Statička osjetljivost procesa, °C /%	2,8

Iz slika grafova može se zaključiti da se radi o procesu prvog reda jer na skokomičnu promjenu odziv vođene varijable raste/pada do ustaljenja na novoj vrijednosti bez točke infleksije. Infleksija u odzivu vođene varijable je karakteristična za procese drugog reda. S obzirom na to da vrijednosti parametara modela procesa odstupaju, može se zaključiti da se na ovaj način – grafičkim određivanjem, isti mogu samo približno procijeniti.

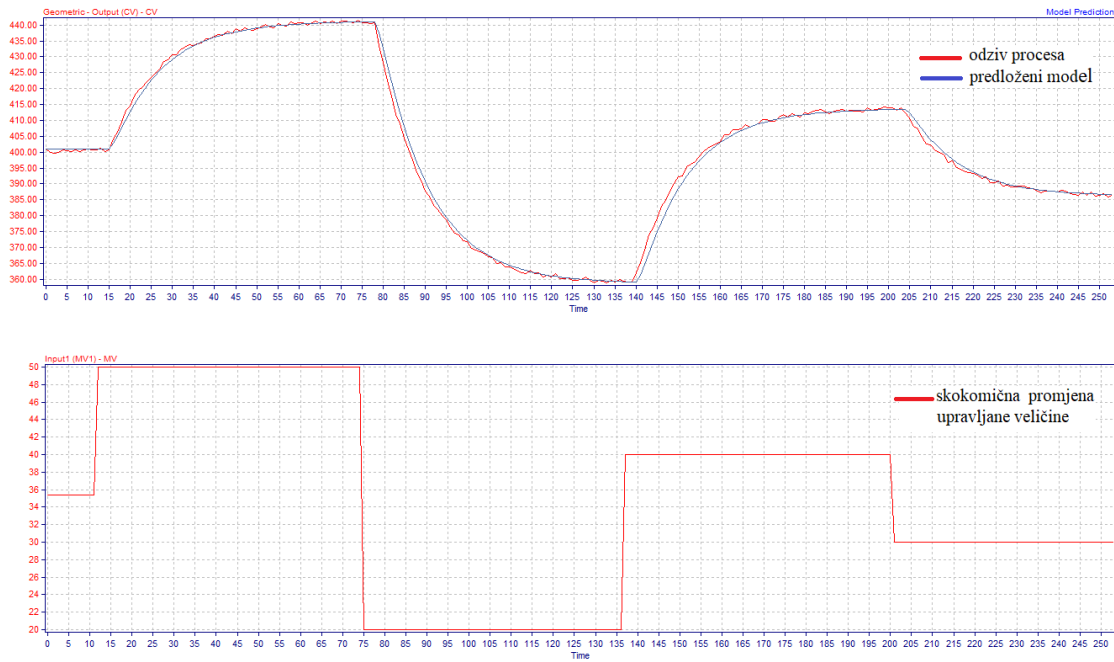
### 3.2. Rezultati parametara modela procesa korištenjem programa *Pitops 7*

Korištenjem programa *Pitops 7* i to modula *Pitops-TFI* u par koraka, kako je opisano u eksperimentalnom djelu, dobivene su vrijednosti parametara modela procesa. Simuliranje vrijednosti odziva procesa na skokomičnu promjenu pobude su opisane modelima procesa prvog i drugog reda.

Na slikama 39 i 40 prikazan je primjer prilagodbe simulacijskog modela prema modelu prvog i drugog reda. Iz slaganja krivulja procjenjuje se koji model više odgovara funkciji. U tablici 7 su prikazani rezultati provedbe testa na skok te su uspoređene vrijednosti parametara procesa za model prvog i drugog reda, da bi se moglo odrediti koji model bolje opisuje odziv procesa.



Slika 39. Odziv procesa (gore) na skokomične promjene upravljane veličine (dolje) s prikazanim modelom prvog reda



Slika 40. Odziv procesa (gore) na skokomične promjene upravljane veličine (dolje) s prikazanim modelom drugog reda

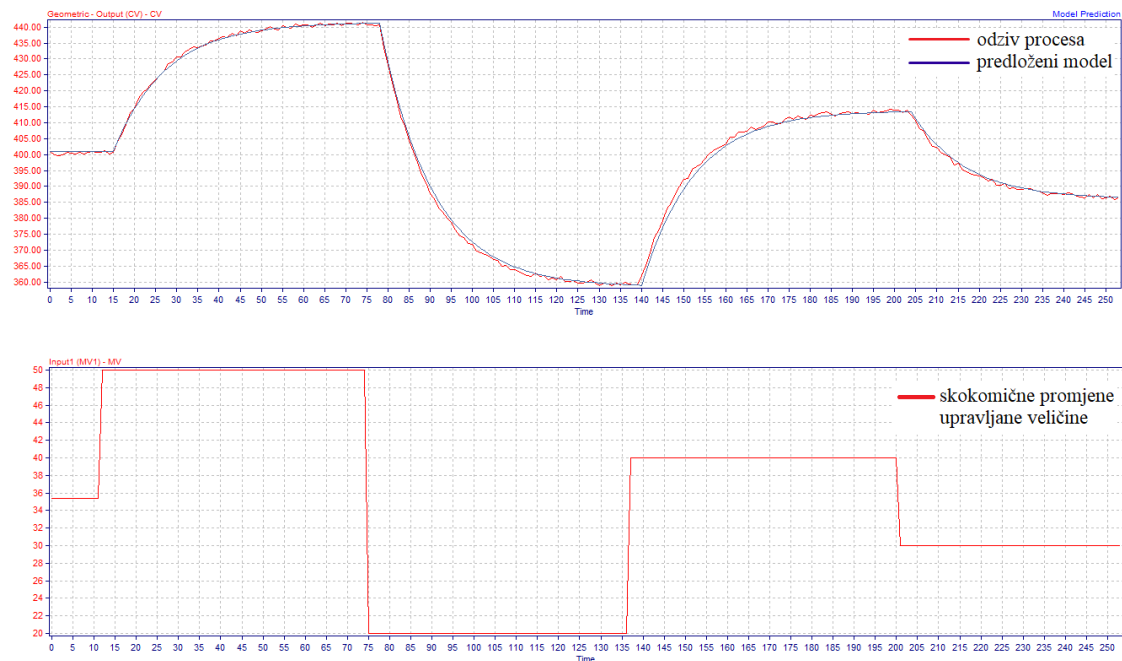
Tablica 7. Rezultati parametara modela procesa dobivenih pomoću programa *Pitops 7*

Parametri modela procesa 1.reda		Parametri modela procesa 2.reda	
Mrtvo vrijeme, min	4,51	Mrtvo vrijeme, min	4
Statička osjetljivost, °C/%	2,74	Statička osjetljivost, °C/%	2,75
Vremenska konstanta 1, min	12,12	Vremenska konstanta 1, min	24,13
Vremenska konstanta 2, min	0	Vremenska konstanta 2, min	13,10

S obzirom na to da se modelom prvog reda zadovoljavajuće opisuju simulirani podaci, isti je i odabran. Osim toga, korištenjem modela 2. reda neke od metoda ugađanja regulatora ne bi bilo moguće primijeniti.



Dobiveni model iz simulacijskih podataka se zatim prilagođavao kalibriranjem parametara procesa modelu prvog reda, kako bi se model što bolje slagao s odzivom procesa. Izgled odziva procesa prikazan je na slici 41, novi parametri modela procesa su prikazani u tablici 8.



Slika 41. Slaganje simulacijskog modela nakon prilagođavanja s modelom 1. reda

Tablica 8. Parametri modela procesa prilagođeni u programu *Pitops 7*

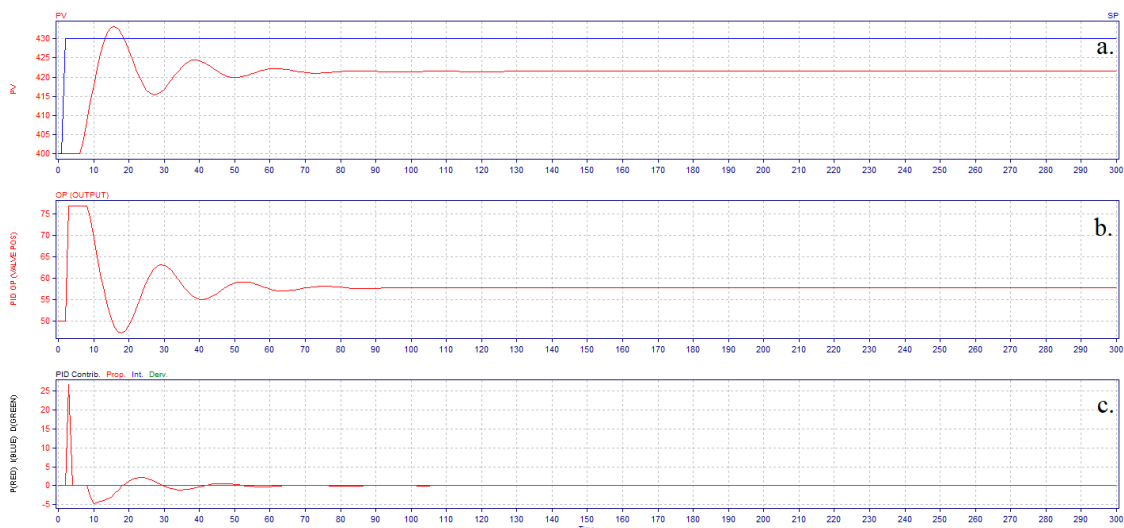
Parametri modela procesa	
Mrtvo vrijeme procesa, min	4,2
Statička osjetljivost procesa, °C/%	2,77
Vremenska konstanta procesa, min	13,0

### 3.3. Rezultati simulacijskog ugađanja PID regulatora

#### 3.3.1. Određivanje parametara PID regulatora *Ziegler-Nichols* metodom

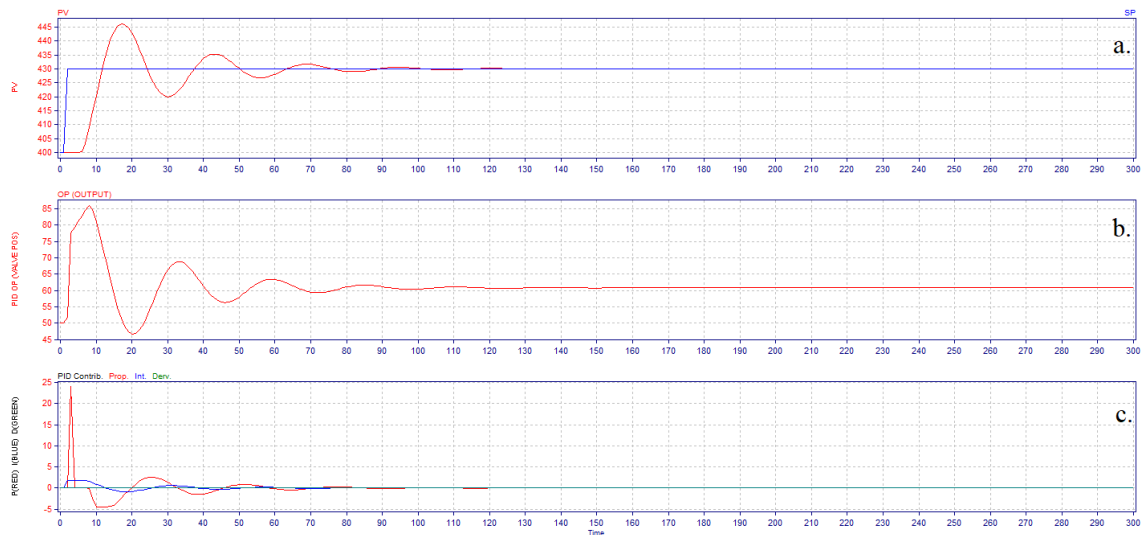
Nakon određivanja potrebnih podataka za ugađanje, parametri modela procesa se prenose u *Pitops-PID* modul gdje je primijenjeno nekoliko različitih metoda ugađanja. Na slikama od 42 do 44 prikazani su rezultati ugađanja *Ziegler-Nichols* metodom te se sagledava razlika između P regulacije, PI regulacije i PID regulacije, dok su u tablici 9 navedene određene vrijednosti parametara regulatora.

Na grafičkom prikazu (slika 42) vidljivo je da vođena varijabla temperatura ne dostiže vrijednost radne točke (a.). Razlog tome je preostalo regulacijsko odstupanje koje je karakteristično za P regulator. Povećanjem pojačanja regulatora,  $K_C$ , može se smanjiti odstupanje, ali proces potom postaje još nestabilniji.



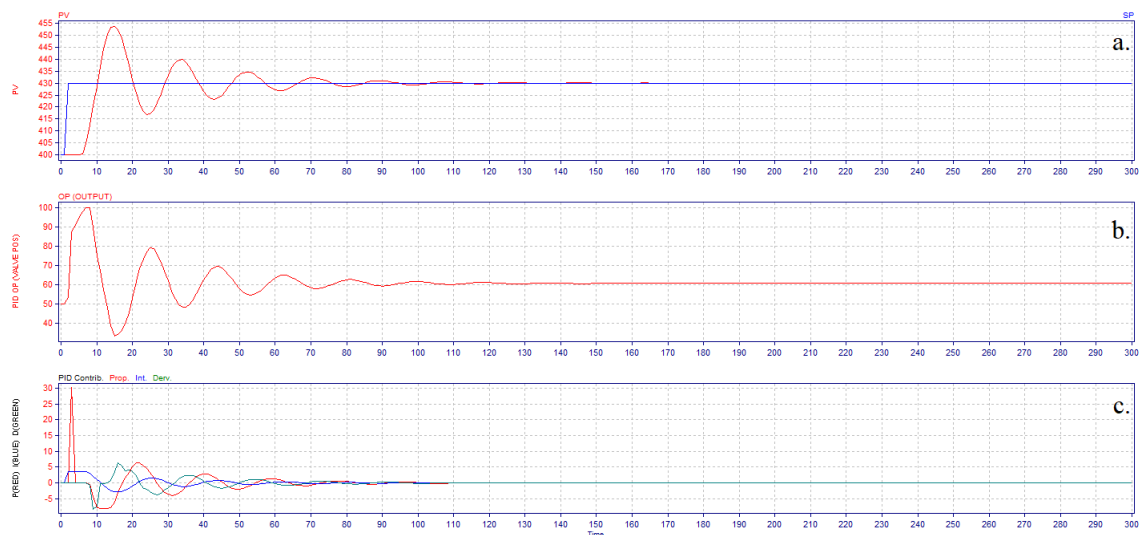
Slika 42. Ovisnost *PV* o vremenu (a.), ovisnost *OP* o vremenu (b.) ovisnost vrijednosti parametara regulatora o vremenu (c.) pri P regulaciji s *Ziegler-Nichols* metodom

Na grafičkom prikazu (slika 43) vidljivo je da se problem nedostizanja radne točke rješava uvođenjem integracijskog djelovanja koje otklanja preostalo regulacijsko odstupanje. Međutim, temperatura i dalje stiže do željene vrijednosti uz mnogo prebačaja i oscilacija.



Slika 43. Ovisnost  $PV$  o vremenu (a.), ovisnost  $OP$  o vremenu (b.) ovisnost vrijednosti parametara regulatora o vremenu (c.) pri PI regulaciji s *Ziegler-Nichols* metodom

Na grafičkom prikazu (slika 44). vidljivo je da temperatura dolazi sporo u radnu točku i to s mnogo prebačaja i oscilacija. Također, vidljive su i oscilacije u otvorenosti ventila.

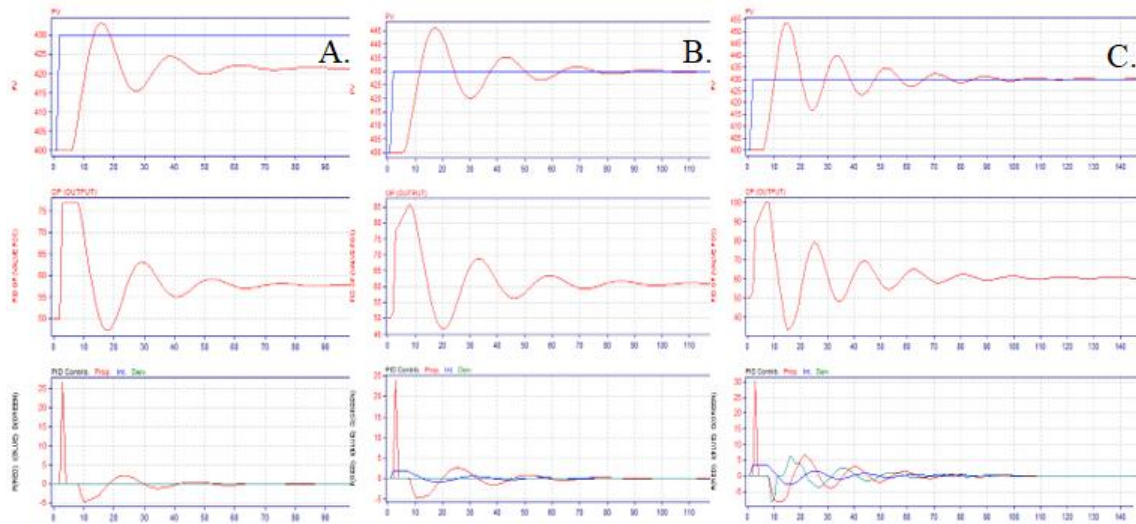


Slika 44. Ovisnost  $PV$  o vremenu (a.), ovisnost  $OP$  o vremenu (b.) ovisnost vrijednosti parametara regulatora o vremenu (c.) pri PID regulaciji s *Ziegler-Nichols* metodom

Tablica 9. Rezultati PID regulatora ugođeni uz pomoć *Ziegler-Nichols* metoda

	<b>Ziegler-Nichols metoda ugađanja regulatora</b>		
<b>Parametri PID regulatora</b>	<b>P regulacija</b>	<b>PI regulacija</b>	<b>PID regulacija</b>
<b>P</b>	4,469658	4,022692	5,028365
<b>I</b>	10000	13,86	8,4
<b>D</b>	0	0	2,1
<b>Pogreška</b>	538,817	113,987	129,591

Ukoliko se promotre vrijednosti parametara navedenih u tablici 9, vidljivo je da kod P regulacije *Ziegler-Nichols* metode vrijednost integracijskog djelovanja iznosi 10000, iako bi bilo logično pretpostaviti da, ako se radi o P regulaciji, vrijednosti integracijskog i derivacijskog djelovanja bi trebale iznositi nula. Naime, program postavlja vrijednost integracijskog djelovanja na vrlo veliki broj jer se na taj način integracijsko djelovanje toliko uspori da njegov doprinos ukupnom iznosu upravljane varijable (*OP*) postane zanemariv, što je što je zapravo gotovo jednako kao i da je integracijsko djelovanje isključeno.



Slika 45. Odzivi procesa kod *Ziegler-Nichols* metode ugađanja regulatora (P regulacija - A., PI regulacija - B., PID regulacija - C.)

Usporedbom sva tri djelovanja kod ove metode (slika 45), vidljivo je da se kod PI djelovanja postiže najbrži odziv, odnosno najbrže je došlo do ustaljenja procesa. Kod P djelovanja, temperatura ne dostiže radnu točku. Uspoređujući PI i PID djelovanje vidljivo je da se kod PI djelovanja javlja manje prebačaja (dva značajnija) te su oscilacije, kod promjene upravljane varijable, manje. Slijedom navedenog, PI djelovanje daje najkvalitetniji rezultat.

Međutim, vidljivo je da su kod sva tri djelovanja prisutni veliki prebačaji i oscilacije, što kod procesa vođenja temperature u šaržnom reaktoru najčešće nije poželjno. Naime, povećanje temperature, općenito, ubrzava kemijsku reakciju. Ako u šaržnom reaktoru ona prekorači radnu točku, to se može negativno odraziti na finalni produkt. Sukladno navedenom, ugađanje PID regulatora treba provesti da temperatura postepeno (bez prebačaja) dolazi u radnu točku. Također, potrebno je ukazati i na oscilacije u promjeni upravljane varijable, u ovom slučaju se radi o protoku pare kroz plašt. Otvaranje-zatvaranje ventila u kratkom vremenskom rasponu može rezultirati kvarom.<sup>22</sup>

Zbog navedenih razloga, *Ziegler-Nichols* metoda ugađanja PID regulatora ne odgovara procesu vođenja temperature u šaržnom reaktoru.

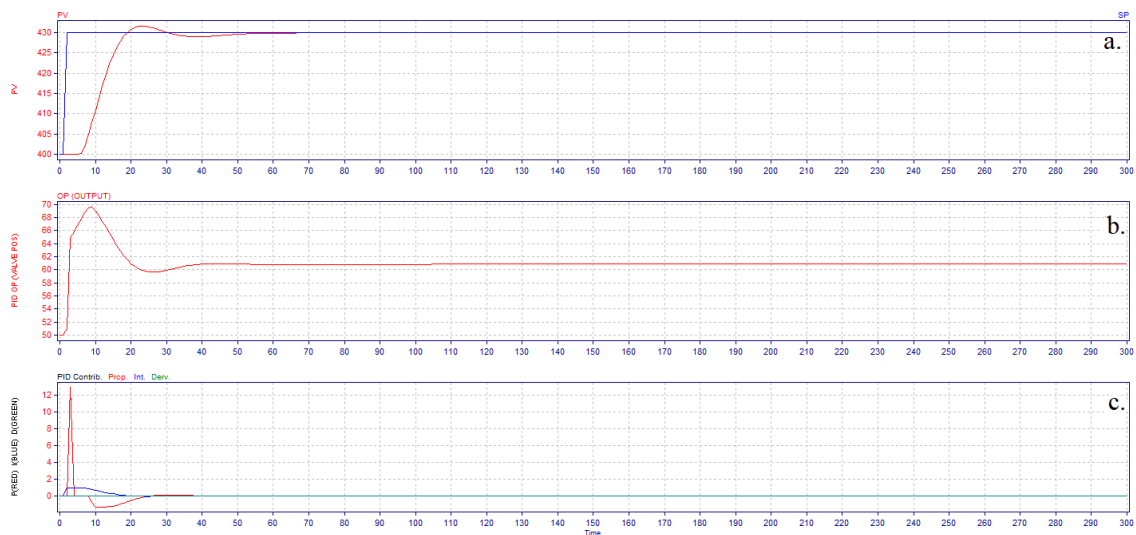
### 3.3.2. Određivanje parametara PID regulatora *Pitops* metodama

Sljedeće metode koje su se provele za određivanje parametara modela procesa su *Pitops* metode koje su specifično razvijene za navedeni računalni program.

- **Ugađanje s isključenim derivacijskim djelovanjem**

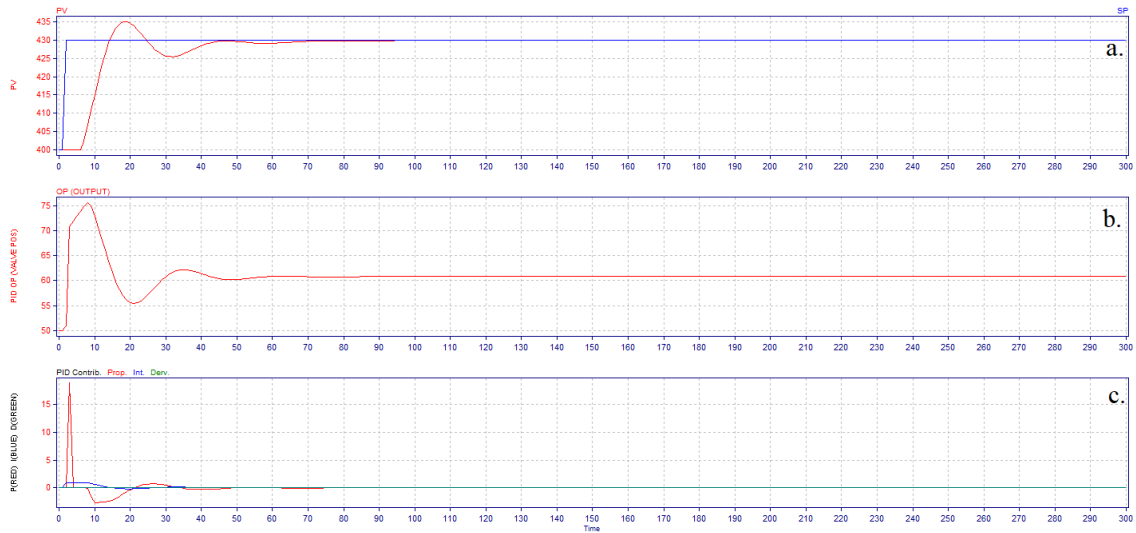
Na slikama od 46 do 49 prikazani su rezultati ugađanja PID regulatora (s isključenim derivacijskim djelovanjem) svakom pojedinom *Pitops* metodom, dok su u tablici 10 navedene određene vrijednosti parametara regulatora.

Na grafičkom prikazu (slika 46) vidljivo je da vođena temperatura dostiže vrijednost radne točke uz mali prebačaj te se vrijednost temperature brzo stabilizira (a.). Nema velikih i naglih promjena u otvorenosti ventila (b.).

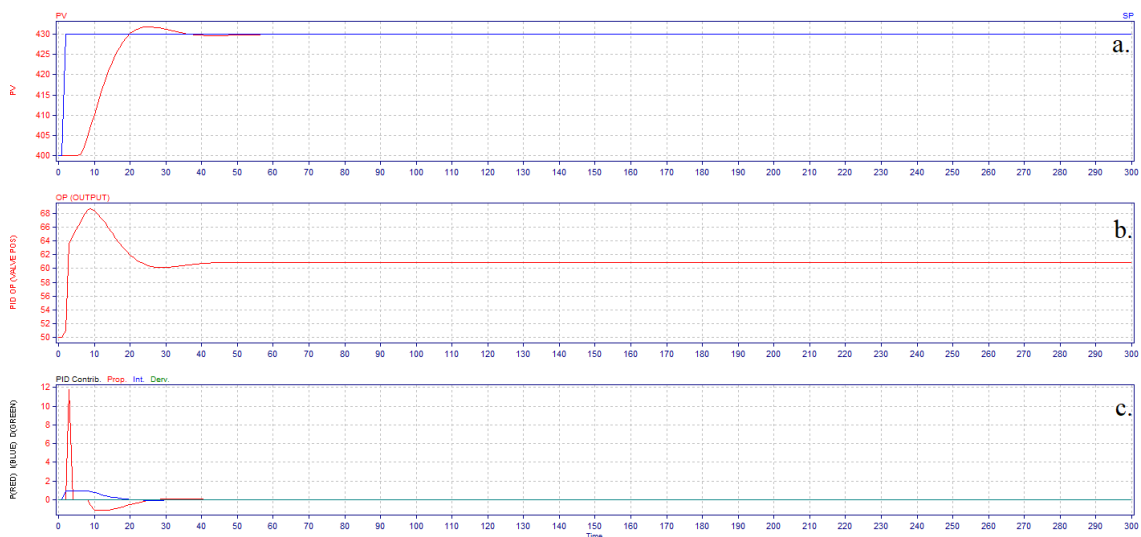


Slika 46. Ovisnost *PV* o vremenu (a.), ovisnost *OP* o vremenu (b.) ovisnost vrijednosti parametara regulatora o vremenu (c.) pri ugađanju regulatora s *Pitops IAE* metodom

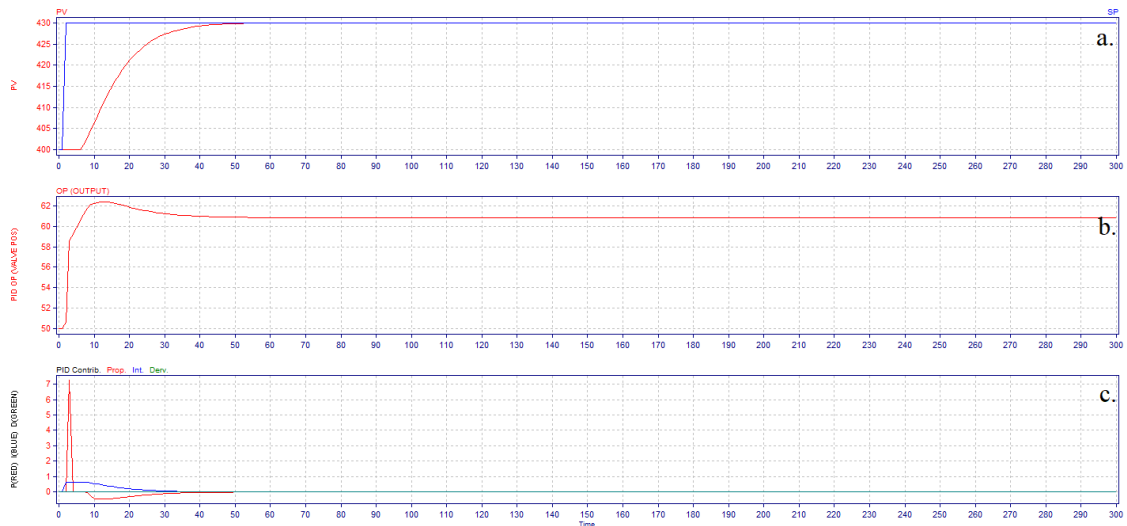
Na grafičkom prikazu (slika 47) vidljivo je da korištenjem metode *Pitops ISE* temperatura postigne željenu vrijednost uz dva nešto veća prebačaja i blage oscilacije. Na grafu (b.) vidljivo je da i dalje nema naglih promjena u otvorenosti ventila.



Na grafičkom prikazu (slika 48) vidljivo je da vođena varijabla temperatura brže dolazi u radnu točku (za razliku kod ugađanja kod *Pitops IAE* metode) uz mali prebačaj (a.). Nema velikih promjena u otvorenosti ventila (b.).



Na grafičkom prikazu (slika 49) vidljivo je da vođena sporo postiže željenu vrijednost, ali bez prebačaja (a.). Razlog tome je što *Pitops RO* metoda stvara ugađanje sa smanjenim pojačanjem regulatora,  $K_c$ , i time smanjuje prekoračenje radne točke. Nema velikih promjena u otvorenosti ventila (b.)



Slika 49. Ovisnost *PV* o vremenu (a.), ovisnost *OP* o vremenu (b.) ovisnost vrijednosti parametara regulatora o vremenu (c.) pri ugađanju regulatora s *Pitops RO* metodom

Tablica 10. Parametri PID regulatora ugođeni uz *Pitops* metode s isključenim derivacijskim djelovanjem

Parametri PID regulatora	Metode ugađanja regulatora			
	PITOPS IAE	PITOPS ISE	PITOPS ITAE	PITOPS RO
<b>P</b>	2,165853	3,133761	1,797901	1,07572
<b>I</b>	13,743827	17,680878	12,035404	10,730735
<b>D</b>	0	0	0	0
<b>Pogreška</b>	73,140	312,202	645,506	108,673

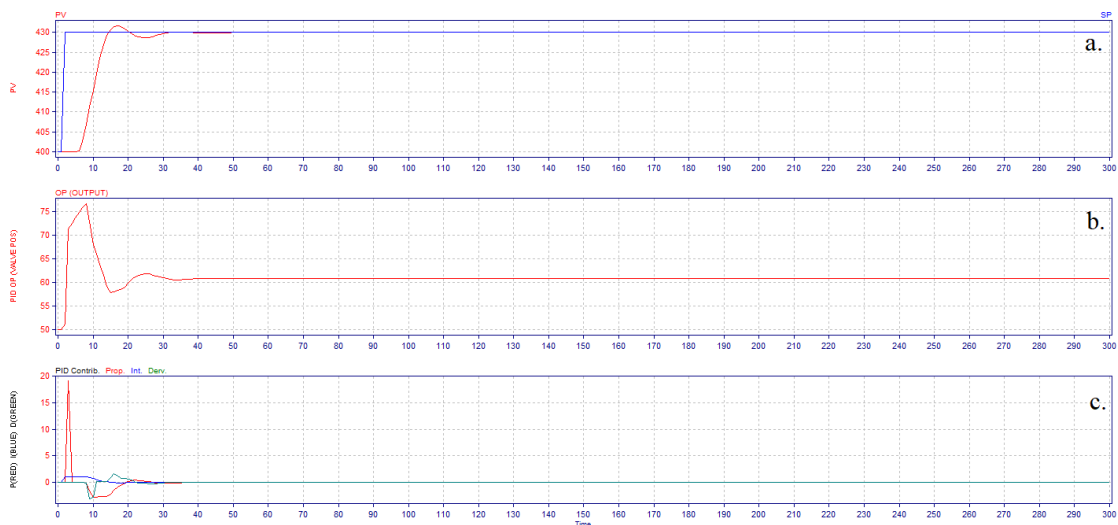


- **Ugađanje s uključenim derivacijskim djelovanjem**

Nakon ugađanja bez derivacijskog djelovanja, provedeno je ugađanje s uključenim derivacijskom djelovanjem. Općenito se derivacijsko djelovanje uključuje kad omjer mrtvog vremena i vremenske konstante,  $\Theta/\tau$ , iznosi više od 1,5 ili kad vrijednost mrtvog vremena iznosi više od 5. U ovom slučaju, odnos mrtvog vremena i vremenske konstante  $\Theta/\tau$  iznosi 3,05, a mrtvo vrijeme iznosi 4,2 min.

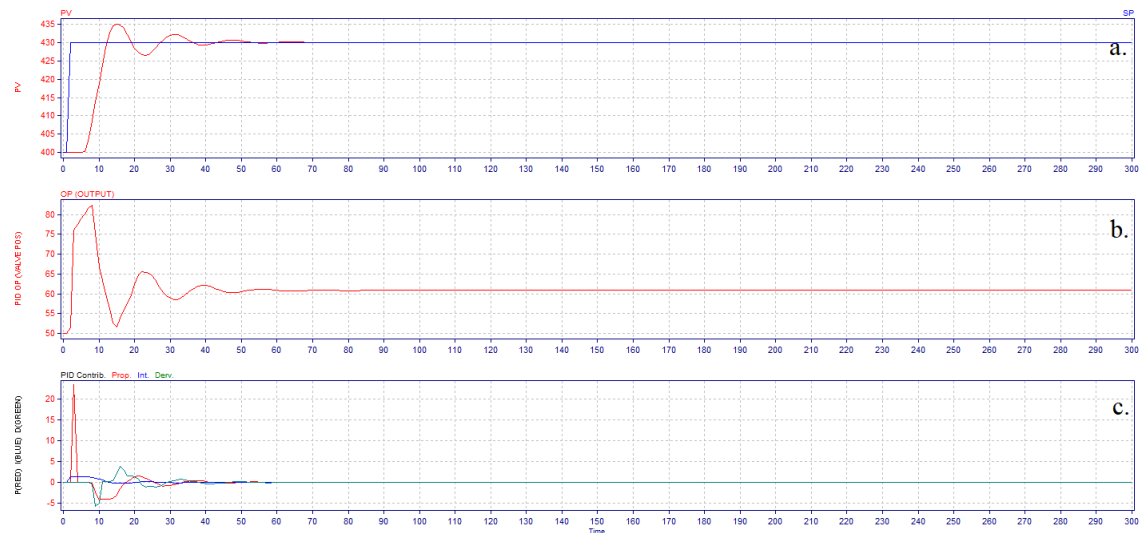
Na slikama od 50 do 53 prikazani su rezultati ugađanja *Pitops* metoda s uključenim derivacijskim djelovanjem, dok su u tablici 11 navedene određene vrijednosti parametara regulatora.

Na grafičkom prikazu (slika 50) vidljivo je da kod *Pitops IAE* metode uključivanjem derivacijskog djelovanja temperatura brže dostiže radnu točku, no i dalje su prisutni blagi prebačaji (a.). Uključivanje derivacijskog djelovanje nije uzrokovalo nagle i dugotrajne promjene otvorenosti ventila (b.).



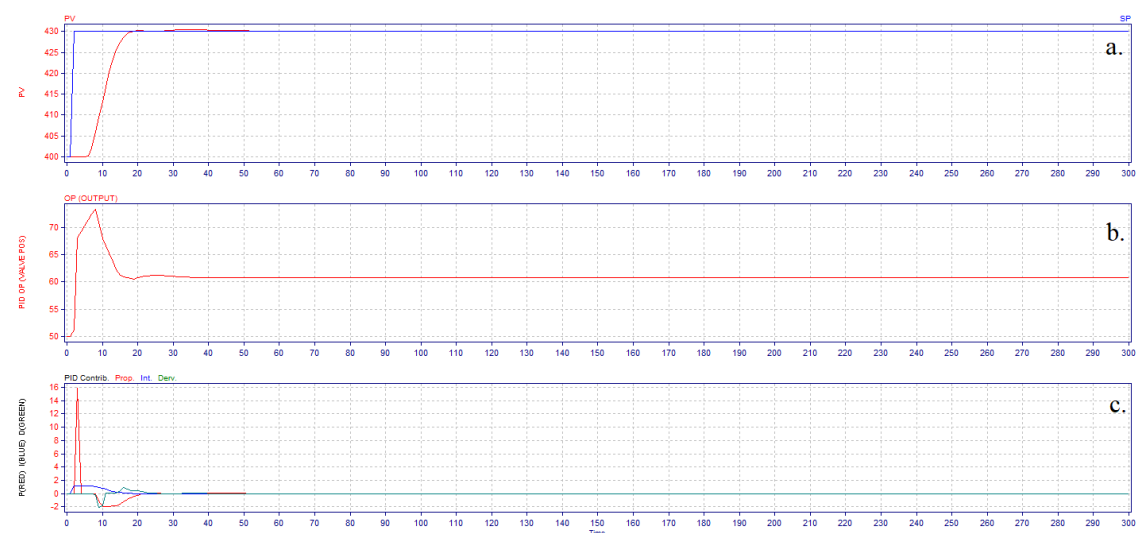
Slika 50. Ovisnost *PV* o vremenu (a.), ovisnost *OP* o vremenu (b.) ovisnost vrijednosti parametara regulatora o vremenu (c.) pri ugađanju regulatora s *Pitops IAE* metodom

Na grafičkom prikazu *Pitops ISE* metode (slika 51) vođena varijabla temperatura dolazi u radnu točku uz nešto jače oscilacije i veći broj prebačaja (a.). Pojavljuju se i blage oscilacije kod otvorenosti ventila (b.)



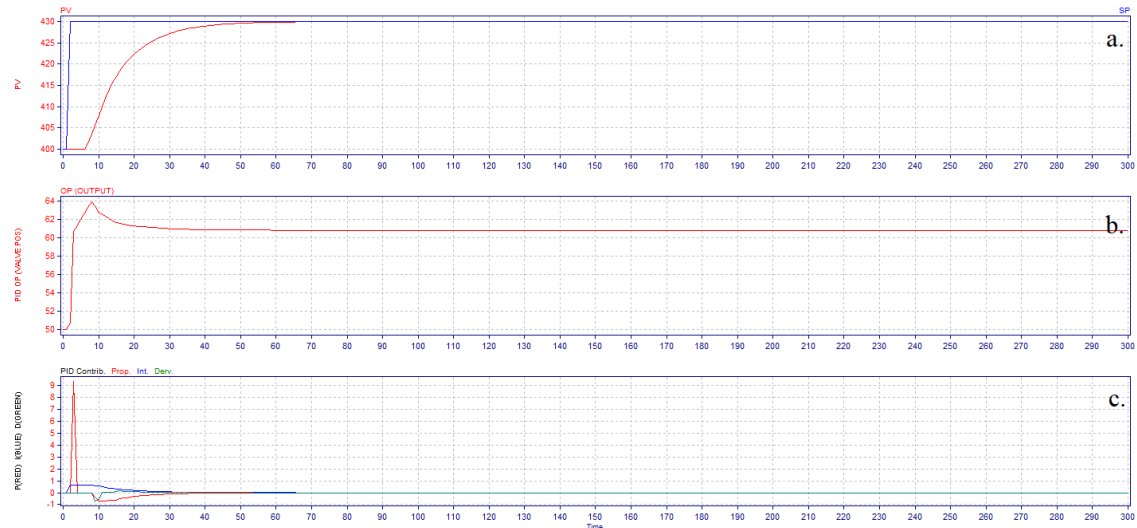
Slika 51. Ovisnost *PV* o vremenu (a.), ovisnost *OP* o vremenu (b.) ovisnost vrijednosti parametara regulatora o vremenu (c.) pri ugađanju regulatora s *Pitops ISE* metodom

Na grafičkom prikazu (slika 52) vidljivo je da provedbom *Pitops ITAE* metode s uključenim derivacijskim djelovanjem temperatura dostiže radnu točku znatno brže te uz minimalan prebačaj (a.). Nema velikih promjena u otvorenosti ventila (b.).



Slika 52. Ovisnost *PV* o vremenu (a.), ovisnost *OP* o vremenu (b.) ovisnost vrijednosti parametara regulatora o vremenu (c.) pri ugađanju regulatora s *Pitops ITAE* metodom

Na grafičkom prikazu (slika 53) vidljivo je da temperatura vrlo sporo dostiže vrijednost radne točke bez prebačaja i oscilacija (a.). Nema velikih promjena u otvorenosti ventila (b.)

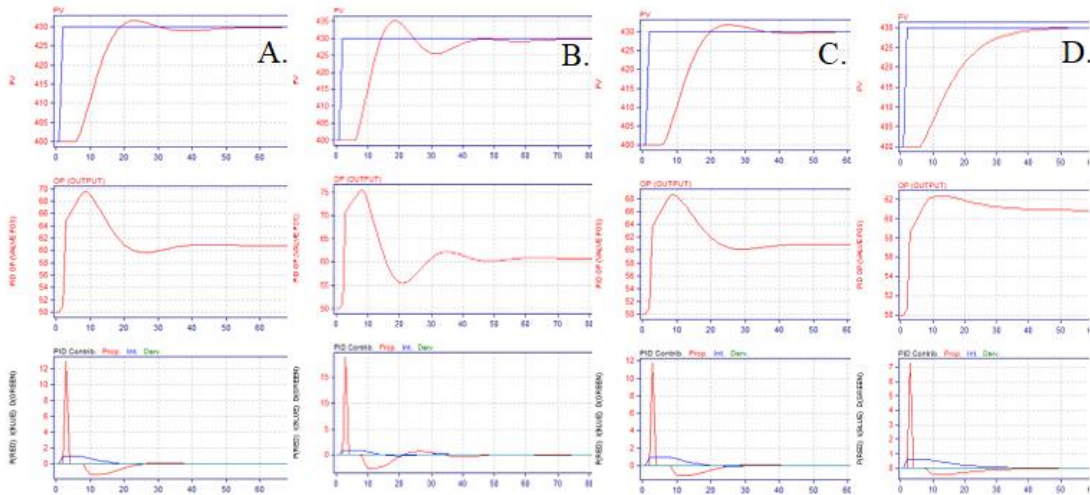


Slika 53. Ovisnost  $PV$  o vremenu (a.), ovisnost  $OP$  o vremenu (b.) ovisnost vrijednosti parametara regulatora o vremenu (c.) pri ugađanju regulatora s *Pitops RO* metodom

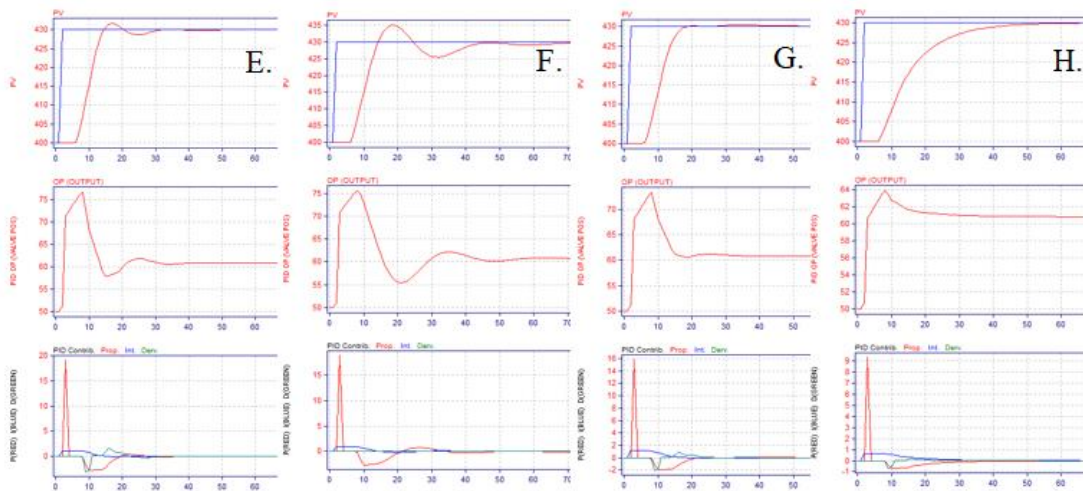
Tablica 11. Rezultati PID regulatora ugođeni uz *Pitops* metode s uključenim derivacijskim djelovanjem

	Metode ugađanja regulatora			
Parametri PID regulatora	PITOPS IAE	PITOPS ISE	PITOPS ITAE	PITOPS RO
<b>P</b>	2,305047	4,069804	1,934582	1,611405
<b>I</b>	12,994926	17,417978	12,268659	13,82917
<b>D</b>	0,750243	2,080524	0,475298	1,98711
<b>Pogreška</b>	68,584	300,158	584,625	93,024

Sagledavanjem izgleda odziva vođene varijable ( $PV$ ) i upravljane varijable ( $OP$ ) za svaku provedenu *Pitops* metodu ugađanja regulatora (slika 54 i slika 55) može se vidjeti koja metoda najbolje odgovara ovom procesu vođenja temperature u šaržnom reaktoru.



Slika 54. Odzivi procesa kod *Pitops* metoda s isključenim derivacijskim djelovanjem (*Pitops IAE* - A., *Pitops ISE* - B., *Pitops ITAE* – C., *Pitops RO* – D.)



Slika 55. Odzivi procesa kod *Pitops* metoda s uključenim derivacijskim djelovanjem (*Pitops IAE* - E., *Pitops ISE* - F., *Pitops ITAE* – G., *Pitops RO* – H.)

Kod ugađanja regulatora ne smije se zanemariti vrijeme potrebno da temperatura dostigne vrijednost radne točke. Važno je sagledati i pojavu oscilacija i brzinu odziva. Ugađanje nije kvalitetnije ako ima puno oscilacija, isto tako ako je i dugo vrijeme do postizanja radne točke, stoga je važno naći kompromis između stabilnosti procesa i brzine odziva.

Od svih navedenih metoda ugađanja PID regulatora jedino kod *Pitops RO* metode nema prebačaja u odzivu procesa. Međutim, odziv procesa je vrlo trom, odnosno potrebno je duže vrijeme do postizanja radne točke.

S druge strane, kod *Pitops ITAE* metode ugađanja regulatora pojavljuje se mali prebačaj koji je gotovo pa zanemariv, no odziv procesa je puno brži.

Uzimajući u obzir navedene razloge te sagledavanjem slika 54 i 55 može se zaključiti da *Pitops ITAE* metoda ugađanja s uključenim derivacijskim djelovanjem (slika 55, graf G.) daje najbolje rezultate jer vođena veličina temperatura dolazi u radnu točku brzo, uz minimalan prebačaj i bez oscilacija. Vrijednosti optimalnih parametara PID regulatora prikazani su u tablici 12.

Tablica 12. Vrijednosti parametara PID regulatora dobiveni korištenjem *Pitops ITAE* metode ugađanja regulatora

<b>P</b>	<b>1,934582</b>
<b>I</b>	<b>12,268659</b>
<b>D</b>	<b>0,475298</b>

#### 4. ZAKLJUČAK

S obzirom na prikazane rezultate može se zaključiti sljedeće:

- Grafičkim određivanjem parametara modela procesa (statička osjetljivost, vremenska konstanta i mrtvo vrijeme), ne mogu se dobiti precizne vrijednosti parametara, već se iste mogu samo procijeniti.
- Precizne vrijednosti parametara modela procesa određuju se u *Pitops-TFI* modulu. Odzivi procesa opisani su modelom prvog reda i modelom drugog reda. S obzirom na to da se modelom prvog reda zadovoljavajuće opisuju simulirani podaci, isti je i odabran.
- Kalibriranjem parametara modela, postignuto je bolje slaganje odziva procesa s predloženim modelom što pogoduje kvalitetnijem ugađanju PID regulatora.
- Nakon određivanja parametara PID regulatora različitim metodama može se ustvrditi da nije svejedno koju metodu ugađanja regulatora uzeti u obzir za ovakav tip procesa. Pa je tako nakon provedbe *Ziegler-Nichols* metode ugađanja regulatora i sagledavanjem dobivenih rezultata, vidljivo da ova metoda ne rezultira odzivom procesa traženih karakteristika zbog toga što temperatura sporo dolazi u radnu točku uz više prebačaja i oscilacija.
- Za ugađanje regulatora, korištene su i *Pitops* metode (*Pitops IAE*, *Pitops ISE*, *Pitops ITAE*, *Pitops RO*). Od svih navedenih metoda ugađanja PID regulatora jedino kod *Pitops RO* metode nema prebačaja u odzivu procesa, ali odziv procesa je vrlo trom.
- Metoda ugađanja PID regulatora koja je dala optimalan rezultat (brz odziv vođene veličine temperature, uz minimalan prebačaj i bez oscilacija te bez naglih promjena u otvorenosti ventila) je *Pitops ITAE* metoda.

## 5. LITERATURA

---

1. A. Čelan, Mjerenje i automatsko vođenje procesa\_predavanja\_PPT, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2019.
2. N. Bolf, Automatsko vođenje procesa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016, str. 3-68.
3. A. Kačunić, Regulacija temperature u šaržnim reaktorima, Seminarski rad, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2016, str. 2-16.
4. N. Bolf, Automatika, vođenje, upravljanje i regulacija procesa, Kem. Ind. 63 (7-8) (2014) 278–280. Doi: <https://hrcak.srce.hr/123798>
5. M. Maksimović, Hemijski reaktori, Tehnološki fakultet, Banja Luka, 2015. godine, str. 25-28.
6. URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=31166> (23. 4. 2020.)
- 7.URL:<http://www.cheresources.com/content/articles/heat-transfer/jacketed-vessel-design> (6. 5. 2020)
- 8.URL:[https://en.wikipedia.org/wiki/Batch\\_reactor#/media/File:Batch\\_reactor.2.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Batch_reactor#/media/File:Batch_reactor.2.jpg) (6. 5. 2020)
9. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Batch\\_reactor](https://en.wikipedia.org/wiki/Batch_reactor) (6. 5. 2020.)
- 10.URL:  
<https://web.archive.org/web/20070406201444/http://www.ashemorris.com/batch-technologies.aspx> (6. 5. 2020)
11. Z. Gomzi, Kemijski reaktori, Hinus, Zagreb, 1998, str 80-81, 347-350.
12. A. Tomić, Regulacija temperature u šaržnim reaktorima, Diplomski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2017, str 11.
13. R. Žanetić, R. Stipišić, Mjerni pretvornici u procesnoj industriji, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, 2005, str. 3.
14. A. Čelan, Dinamički modeli za analizu i vođenje procesa, Kem. Ind. 69 (9-10) (2020) 586–589. Doi: <https://hrcak.srce.hr/244375>
- 15.URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Second\\_order\\_transfer\\_function.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Second_order_transfer_function.svg) (2. 6. 2020.)
- 16.URL:<https://www.yumpu.com/xx/document/read/40179539/odabir-regulatora-za-odreaeni-proces-koji-se-a-3-4-eli-> (8. 6. 2020.)

17. P. Crnošija, B. Bošnjak, T. Bajžić, Sinteza parametara regulatora slijednih sustava primjenom metoda Ziegler-Nicholsa, Stručni rad, Fakultet elektronike i računarstva, Zagreb, 2005.

18. URL: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/46021834/pid-regulatori-univerzitet-u-novom-sadu> (20. 7. 2020.)

19. PITOPS-PDI Version 7, User manual, Copyright PiControl Solutions LLC, 2018.

20. SIMCET Version 9.2, User manual, Copyright PiControl Solutions LLC, 2018.

21. PITOPS-TFI Version 7, User manual, Copyright PiControl Solutions LLC, 2018.

22. URL: <https://blog.opticontrols.com/archives/77/comment-page-1>