

# Regulacija razine u bubnju u izvanprojektnim uvjetima

---

**Pokrivka, Patrik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:195126>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Patrik Pokrivka**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar, dipl. ing.

Dr. sc. Ante Marušić, dipl. ing.

Student:

Patrik Pokrivka

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Draženu Lončaru i asistentu dr.sc. Anti Marušiću na pruženoj pomoći u izradi ovog rada. Posebice se zahvaljujem profesoru na strpljivosti i potpori u trenucima kada sam sumnjao u svoje sposobnosti. Veliko hvala roditeljima i sestri na nesebičnoj i bezuvjetnoj podršci tijekom dosadašnjeg studija i života. Na kraju, hvala mojoj djevojci na razumijevanju tijekom pisanja ovog rada.

Patrik Pokrivka



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove.



Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Patrik Pokrivka** JMBAG: **0035219425**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Regulacija razine u bubnju u izvanprojektinim uvjetima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Drum level control in off-design conditions**

Opis zadatka:

U optočnim generatorima pare protok napojne vode reguliran je u funkciji održavanja razine kapljevine u bubnju na zadanoj vrijednosti. Pored signala mjerenja razine kapljevine, u regulacijskom krugu se kao pomoćni signali koriste i signal protoka pothladene kapljevine te signal protoka pregrijane pare. Regulacija razine kapljevine u bubnju projektirana je za automatsku prilagodbu protoka napojne vode različitim intenzitetu loženja kako kod promjene opterećenja i pogona na nazivnoj snazi tako i kod pokretanja te obustave pogona. U izvanprojektinim pogonskim uvjetima, poput lokalnog toplinskog preopterećenja cijevi predgrijača napojne vode, u regulacijski krug uvode se dodatni poremećaji koji mogu prouzročiti neželjena pogonska stanja.

U okviru rada potrebno je:

1. Opisati koncepte regulacije razine kapljevine u primjeni u optočnim generatorima pare;
2. Izvesti pojednostavljeni matematički model dinamike procesa promjene razine kapljevine u bubnju generatora pare nazivnih parametara: 50 t/h protoka svježe pare izlaznog stanja 320 °C i 15 bar;
3. Simulirati odzive matematičkog modela procesa spregnutog s modelom regulacijskog kruga razine kapljevine u projektinim pogonskim stanjima;
4. Simulirati pojavu toplinskog preopterećenja predgrijača i analizirati njen utjecaj na djelovanje regulacije razine kapljevine u bubnju.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadali:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Dr. sc. Ante Marušić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
1.1. <i>MATLAB</i> <sup>®</sup> .....	1
1.2. XSteam.....	1
2. KONCEPTI REGULACIJE RAZINE KAPLJEVINE U BUBNJU OPTOČNIH GENERATORA PARE .....	2
2.1. Određivanje razine kapljevine u bubnju .....	2
2.2. Ciljevi regulacije i njezin utjecaj na razinu kapljevine u bubnju.....	3
2.3. <i>On-off</i> regulacija .....	5
2.4. Jednokomponentna regulacija razine kapljevine .....	6
2.5. Dvokomponentna regulacija razine kapljevine.....	7
2.6. Trokomponentna regulacija razine kapljevine.....	9
3. MATEMATIČKI MODEL BUBNJA OPTOČNOG GENERATORA PARE.....	12
3.1. Shematski prikaz bubnja generatora pare .....	12
3.2. Matematički model bubnja generatora pare.....	13
3.2.1. Masena bilanca bubnja.....	13
3.2.2. Energetska bilanca bubnja .....	15
3.2.3. Cirkulacija vode u isparivačkim cijevima.....	16
3.2.4. Određivanje visina razine kapljevine u bubnju.....	16
3.2.5. Protok pare prema pregrijaču.....	17
4. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJE.....	18
4.1. Odziv sustava bez regulacije.....	18
4.2. Odziv sustava s regulacijom .....	20
4.2.1. Jednokomponentna regulacija.....	20
4.2.2. Dvokomponentna regulacija .....	24
4.2.3. Trokomponentna regulacija .....	25
4.2.4. Direktna usporedba koncepata regulacije .....	28
5. UTJECAJ POJAVE TOPLINSKOG PREOPTEREĆENJA EKONOMAJZERA NA DJELOVANJE REGULACIJE .....	30
5.1.1. Utjecaj na jednokomponentnu regulaciju .....	30
5.1.2. Utjecaj na dvokomponentnu regulaciju .....	31
5.1.3. Utjecaj na trokomponentnu regulaciju.....	33
6. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36
PRILOZI.....	37

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Jednostavno mjerenje razinu u bubnju [3] .....	3
Slika 2.	Poželjni odnosi regulacijskih parametara [3] .....	4
Slika 3.	Utjecaj promjene odnosa regulacijskih parametara [3] .....	5
Slika 4.	Shematski prikaz jednokomponentne regulacije razine kapljevine u bubnju .....	6
Slika 5.	Odziv jednokomponentne regulacije [3] .....	7
Slika 6.	Shematski prikaz dvokomponentne regulacije razine kapljevine u bubnju .....	8
Slika 7.	Odziv dvokomponentne regulacije u idealnim uvjetima [3] .....	9
Slika 8.	Odziv dvokomponentne regulacije pri promjenjivom tlaku [3] .....	9
Slika 9.	Shematski prikaz trokomponentne regulacije razine kapljevine u bubnju .....	10
Slika 10.	Odziv trokomponentne regulacije [3] .....	11
Slika 11.	Pojednostavljeni shematski prikaz rada bubnja optoćnog generatora pare .....	12
Slika 12.	Simulink shema sustava bez regulacije .....	19
Slika 13.	Odziv sustava bez regulacije na povećanje protoka pare .....	19
Slika 14.	Odziv sustava bez regulacije na smanjenje protoka para .....	20
Slika 15.	Jednokomponentna regulacija razine kapljevine u bubnju .....	21
Slika 16.	PI regulator razine kapljevine u bubnju .....	21
Slika 17.	Promjena razine kapljevine u bubnju pri povećanju protoka pare za 5% s .....	22
Slika 18.	Promjena protoka napojne vode pri povećanju protoka pare za 5% s .....	22
Slika 19.	Promjena visine kapljevine u bubnju za različite parametre $K_p$ .....	23
Slika 20.	Promjena visine kapljevine u bubnju za različite parametre $K_p$ .....	24
Slika 21.	Dvokomponentna regulacija razine kapljevine u bubnju .....	25
Slika 22.	Promjena visine kapljevine za različite parametre $K_{mpp}$ .....	25
Slika 23.	Trokomponentna regulacija razine kapljevine u bubnju .....	26
Slika 24.	Promjena razine kapljevine u bubnju pri povećanju protoka pare za 5% s .....	27
Slika 25.	Promjena protoka napojne vode pri skokovitom povećanju protoka pare za 5% s .....	27
Slika 26.	Promjena protoka napojne vode za različite koncepte regulacije .....	28
Slika 27.	Promjena razine kapljevine u bubnju za različite koncepte regulacije .....	29
Slika 28.	Odziv tlaka i razine kapljevine na povećanje preopterećenja ekonomajzera .....	30
Slika 29.	Odziv protoka napojne vode i pare pri toplinskom preopterećenju, jednokomponentna regulacija .....	31
Slika 30.	Odziv tlaka i razine na toplinsko preopterećenje, dvokomponentna regulacija ....	32
Slika 31.	Odziv protoka napojne vode i pare pri toplinskom preopterećenju, .....	32
Slika 32.	Odziv tlaka i razine kapljevine na povećanje preopterećenja ekonomajzera .....	33
Slika 33.	Odziv protoka napojne vode i pare pri toplinskom preopterećenju, .....	34

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1 Geometrijske karakteristike bubnja..... 18



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_b$	$m^2$	površina poprečnog presjeka bubnja
$D_{bub}$	$m$	promjer bubnja
$E$	$J$	energija
$h_{eko}$	$kJ/kg$	specifična entalpija napojne kapljevine nakon ekonomajzera
$h_{isp}$	$kJ/kg$	specifična entalpija mokre pare iz isparivača
$h'$	$kJ/kg$	specifična entalpija vrele kapljevine
$h''$	$kJ/kg$	specifična entalpija suhozasićene pare
$K$	$m^3/s$	koeficijent proporcionalnosti
$L_{bub}$	$m$	duljina bubnja
$M$	$kg$	masa vode unutar bubnja
$M'$	$kg$	masa vrele kapljevine unutar bubnja
$M''$	$kg$	masa suhozasićene pare unutar bubnja
$m_{eko}$	$kg/s$	protok kapljevine iz ekonomajzera
$m_{isp}$	$kg/s$	protok vode u isparivačkim cjevima
$m_{preg}$	$kg/s$	protok suhozasićene pare prema pregrijaču
$m_{opt}$	$kg/s$	protok cirkulacije kapljevine
$O_{broj}$	-	optočni broj
$P_{bub}$	$bar$	tlak u bubnju
$P_{kond}$	$bar$	tlak u kondenzatoru
$T_{ulaz\_meko}$	$^{\circ}C$	Ulazna temperatura u ekonomajzerske cijevi
$t$	$s$	vrijeme
$V'$	$m^3$	volumen kapljevine u bubnju
$V''$	$m^3$	volumen suhozasićene pare u bubnju
$V_{total}$	$m^3$	ukupni volumen bubnja
$y$	$m$	razina vode u bubnju
$x$	-	udio pare
$\rho$	$kg/m^3$	gustoća pare/kapljevine
$\rho'$	$kg/m^3$	gustoća vrele kapljevine
$\rho''$	$kg/m^3$	gustoća suhozasićene pare
$\dot{\Omega}_{eko}$	$W$	toplinski tok oslobođen u ekonomajzeru
$\dot{\Omega}_{isp}$	$W$	toplinski tok oslobođen u isparivaču

---

**SAŽETAK**

U radu je modeliran proces i simulirano je djelovanje različitih koncepata regulacije razine kapljevine u bubnju optočnih generatora pare. U prvom djelu završnog rada teorijski se razmatraju koncepti regulacije koji se zatim primjenjuju na izvedeni model dinamike procesa promjene razine kapljevine u bubnju. Sve simulacije su izvedene u računalnom programu *MATLAB*<sup>®</sup> i njegovom dodatku *Simulink* koji služi za modeliranje dinamičkih sustava. U završnom djelu rada promatra se utjecaj toplinskog preopterećenja predgrijača na djelovanje regulacije razine kapljevine u bubnju.

Ključne riječi: dinamika; regulacija; bubanj; razina

---

**SUMMARY**

This thesis deals with research and simulation of different concepts of fluid level control in steam drums. In the first part of thesis different theoretical concepts are considered, which are then applied to simplified mathematical model of the dynamics of the changing liquid level in the steam drum. All simulations were performed in *MATLAB*<sup>®</sup> software package and addition *Simulink program*, which is used to model dynamic systems. In the final part of thesis, the impact of thermal overload in economizers on fluid level control in the drum is observed.

Key words: dynamics; control; drum; level

## 1. UVOD

Optočni generatori pare su vodocijevni generatori pare s bubnjem koji služe za proizvodnju vodene pare kojom se najčešće pogoni parna turbina i/ili pokrivaju potrebe za tehnološkom parom u industrijskim procesima. Za razliku od protočnih generatora pare, optočni su izvedeni s bubnjem u kojem se mokra para iz isparivača razdvaja na paru koja struji prema pregrijaču od kapljevine koja se vraća u isparivačke cijevi. Cirkulacija kroz isparivačke cijevi može biti prirodna zbog razlike u gustoći vrela kapljevine i mokre pare ili prisilna kada se za osiguravanje potrebnog protoka koristi cirkulacijska pumpa. Kako bi ostvarili željeni protok i tlak pare prema pregrijaču i turbini u svakom trenutku, nužan je automatski sustav regulacije koji će uz ostvarivanje željenog protoka i tlaka osiguravati stabilan rad sustava bez prevelikih oscilacija koji osigurava siguran i dugotrajan rad cijelog postrojenja. Od iznimne je važnosti da automatski sustav regulacije osigura stabilan pogon postrojenja i u izvanprojektim uvjetima. Svrha ovog rada je upoznavanje s različitim konceptima regulacije razine kapljevine te odabir najpovoljnijeg koncepta kako bi postrojenje moglo funkcionirati na optimalnom nivou.

### 1.1. *MATLAB*<sup>®</sup>

*MATLAB*<sup>®</sup> (*Matrix Laboratory*) je programski jezik visoke razine, odnosno jezik s visokom razinom apstrakcije, koji čini interaktivno okruženje za numeričke proračune, vizualizacije i programiranje. *MATLAB* se primjenjuje u analizi i obradi te vizualizaciji podataka, razvoju algoritama i aplikacija, modeliranju i simulacijama, različitim matematičkim proračunima te raznim drugim područjima. Unutar *MATLAB-a*<sup>®</sup> su unaprijed ugrađene funkcije i alati koji znatno ubrzavaju proces rješavanja problema. Osim unaprijed definiranih funkcija, korisnik može i sam razvijati vlastite alate i funkcije ili doraditi postojeće. [1]

### 1.2. *XSteam*

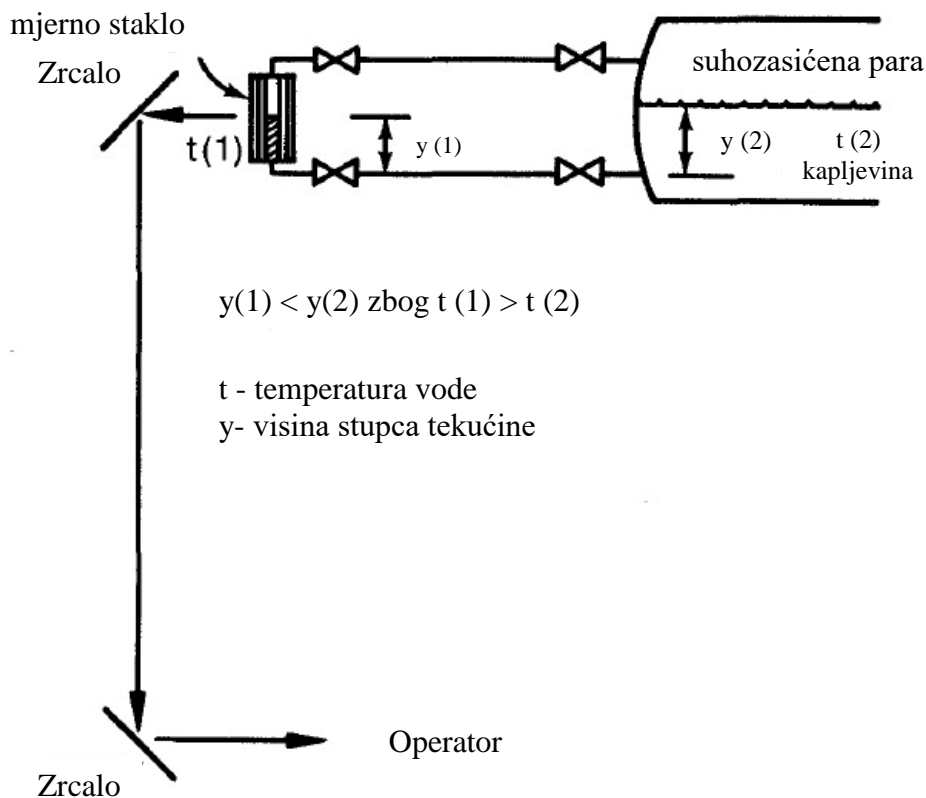
*XSteam* je programska biblioteka koja se koristi unutar programskog paketa *MATLAB*<sup>®</sup> i njegovog dodatka *Simulink*. To su zapravo toplinske tablice u kojima se nalaze tablične vrijednosti svojstava vode. Preko poznavanja jedne ili dvije fizikalne veličine možemo doći do fizikalne vrijednosti koju ne znamo, kao i kod korištenja klasičnih fizičkih toplinskih tablica.

## 2. KONCEPTI REGULACIJE RAZINE KAPLJEVINE U BUBNJU OPTOČNIH GENERATORA PARE

Održavanje što konstantnije razine kapljevine u bubnju optočnih generatora pare je od izrazite važnosti za normalno funkcioniranje postrojenja. Ako je razina kapljevine u bubnju previsoka, može doći do neželjenog potapanja uređaja za odvajanje pare. S druge strane, preniska razina kapljevine utječe na protok cirkulacijske vode u isparivačkim cijevima u kojim može doći do pregaranja samih cijevi što izravno utječe na rad postrojenja. Da bi se izbjegle negativne posljedice, koristi se sustav koji regulira razinu kapljevine na zadanu vrijednost. Zatvoreni regulacijski krug se sastoji od senzora koji mjeri razinu kapljevine te šalje signal u PID (proporcionalno-integralni-derivacijsku) regulator koji regulira protok napojne vode otvaranjem i zatvaranjem ventila. Takav najjednostavniji sustav regulacije može pokazati značajne oscilacije i nedostatke prilikom promjenjivog intenziteta opterećenja generatora pare zbog pojave ekspanzije i kontrakcije volumena parnih mjehurića (*eng. Shrink and swell effect*) koji su posljedica promjene tlaka u bubnju. Kako bi se održavala što konstantnija razina kapljevine potrebno je uvesti pomoćne signale kojima će se spriječiti osciliranje razine.

### 2.1. Određivanje razine kapljevine u bubnju

U bubnjevima isparivača optočnih generatora pare postoje tri glavne funkcije nadzora razine kapljevine u bubnju. Jedna od njih je kontrola razine kapljevine u bubnju kako bi se osigurao potreban dotok napojne vode. Druga funkcija je da se u slučaju preniske razine kapljevine u bubnju šalje signal koji prekida izgaranje goriva zbog sigurnosnih razloga i opasnosti od pregaranja cijevi i ispada postrojenja iz pogona. Treća funkcija je slučaj kada razina kapljevine prijeđe gornju dopuštenu granicu. Tada alarm javlja operatoru da je potrebno isključiti dobavu vode. Iako ono nije obvezano, korištenje sustava koje daju informaciju kada je kapljevina prekoračila granicu smanjuje mogućnost prenošenja kapljica vode s parom i potencijalnu opasnost od hidrauličkog udara u parnom dijelu cjevovoda [2]. Za osnovno mjerenje razine se najčešće koristi mjerni stalak vodokaza koji je povezan na bubanj isparivača, kao na Slika 1, koji radi na principu spojenih posuda. Prilikom ovakvog načina mjerenja razine doći će do određene mjerne greške zbog niže temperature kondenzata u mjernom staklu od onog u bubnju i cirkulacije vode između bubnja i donjeg kolektora. Kako bi se njezin utjecaj smanjio za mjerenje razine se koriste i neki drugi uređaji poput diferencijalnog osjetnika tlaka s kojim se preciznije može ustanoviti prava vrijednost razine kapljevine u bubnju [3].



Slika 1. Jednostavno mjerenje razine u bubnju [3]

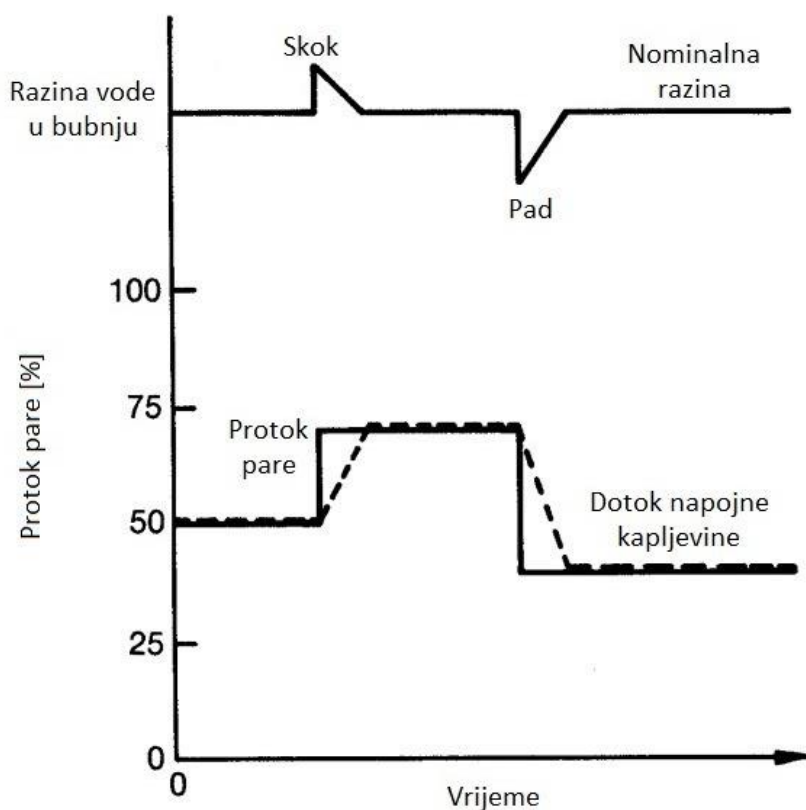
## 2.2. Ciljevi regulacije i njezin utjecaj na razinu kapljevine u bubnju

Regulacijski sustav treba održavati konstantu razinu kapljevine u bubnju bez obzira na vanjske utjecaje. Regulacija mora ispuniti sljedeće zahtjeve [3]:

- održavanje razine kapljevine u bubnju na projektiranoj vrijednosti
- smanjenje međudjelovanja s sustavom regulacije izgaranja
- osiguravanje glatkih promjena bez prevelikih oscilacija u slučaju promjene opterećenja
- održavanje ravnoteže između protoka suhozasićene pare i napojne vode
- kompensiranje promjene tlaka napojne vode bez utjecaja na održavanu razinu vode

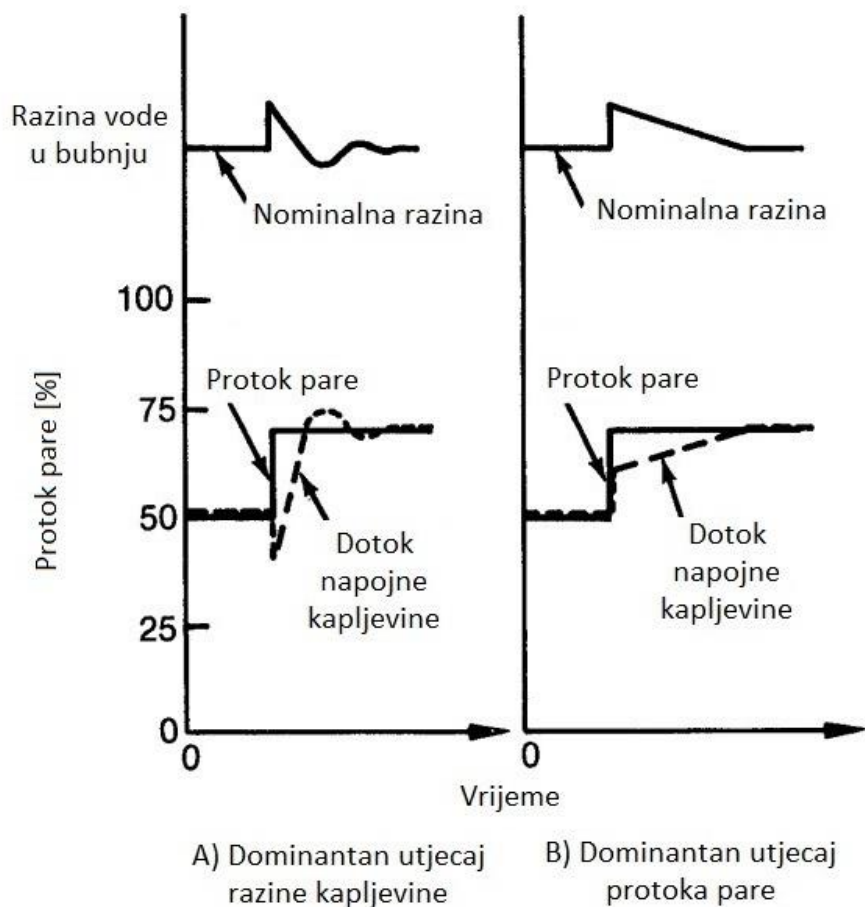
Od velike važnosti je uklanjanje međudjelovanja sustava regulacije razine kapljevine u bubnju i sustava regulacije izgaranja kako bi se osigurao protok željene pare prema pregrijaču i konstantan tlak. [3]

Kako bi sustav regulacije kvalitetno osiguravao razinu kapljevine u bubnju potrebno je na kvalitetan način odrediti utjecaj međusobno oprečnih veličina na regulaciju. Prilikom porasta protoka pare doći će do povećanja protoka napojne vode u bubanj kako bi se nadomjestio povećan odvod pare. S druge strane, zbog porasta razine kapljevine koji je posljedica pojave ekspanzije volumena parnih mjehurića (*eng. swell effect*) zbog pada tlaka prilikom povećanja protoka pare, protok napojne vode prema bubnju bi se trebao smanjiti. Na slici 2 ilustriran je poželjan odnos između parametara koji utječu na regulaciju. Prilikom povećanja protoka pare, dotok napojne vode se postupno povećava i osigurava glatku promjenu bez prevelikih oscilacija.



Slika 2. Poželjni odnosi regulacijskih parametara [3]

Na slici 3 su prikazani slučajevi u kojima utjecajni parametri nisu dobro usklađeni te negativno utječu na kvalitetu regulacije. Ako je dominantan utjecaj razine kapljevine kod povećanja protoka pare prema pregrijaču doći će do trenutnog smanjenja dotoka napojne vode što će u konačnici rezultirati s porastom razine kapljevine iznad projektirane visine. Kada je dominantniji utjecaj protok pare doći će do naglog skoka dotoka napojne vode koji će u konačnosti prouzrokovati produljenje trajanja prijelazne pojave.



Slika 3. Utjecaj promjene odnosa regulacijskih parametara [3]

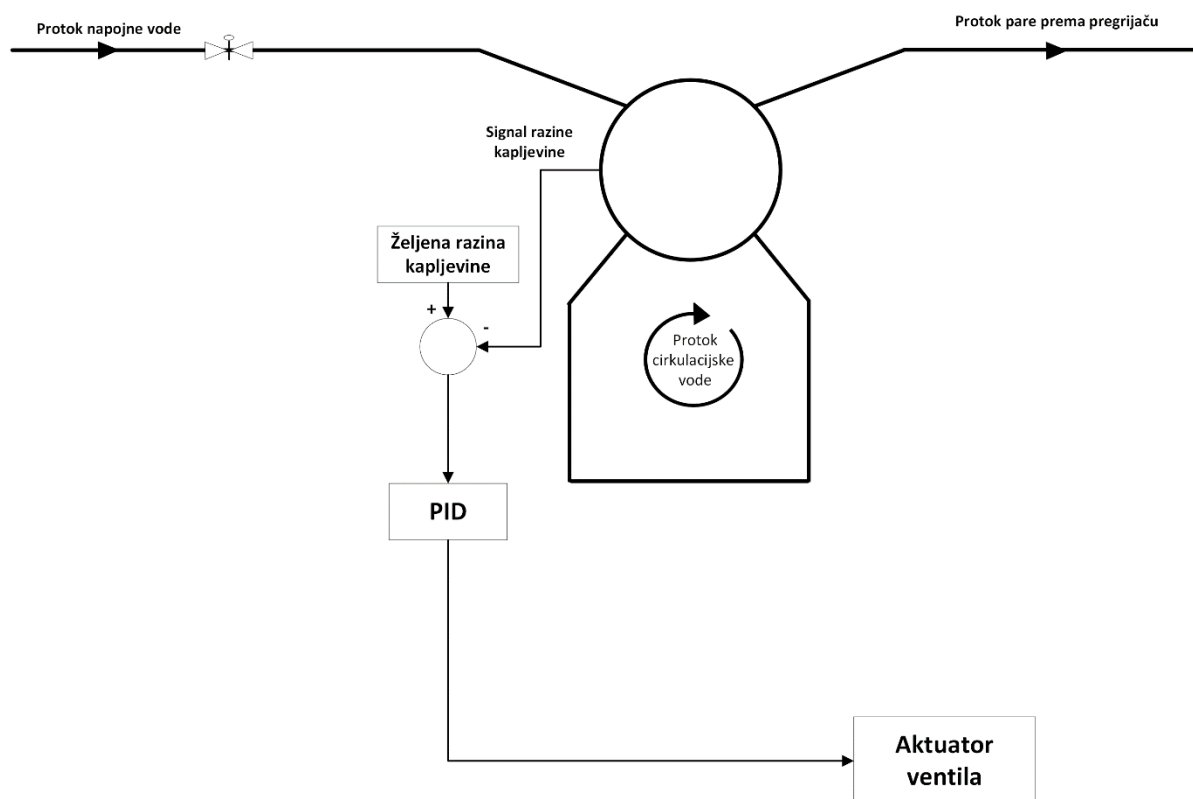
### 2.3. On-off regulacija

Najjednostavniji oblik regulacije kapljevine je takozvana „on-off“ regulacija. Ona funkcionira tako da se razina kapljevine u bubnju drži između zadanih granica. Kad razina kapljevine dosegne gornju granicu, pumpa napojne vode se isključuje te razina kapljevine počinje padati. Kada razina padne na donju granicu pumpa se ponovno uključuje. Ovakav način regulacije nije pogodan za reguliranje razine kapljevine unutar bubnja iz više razloga. Prvi od razloga je taj što u trenucima kada je pumpa isključena ne postoji protok vode kroz ekonomajzer. Zbog toga postoji opasnost od pojave hidrauličkog udara u ekonomajzerskim cijevima zbog mogućeg formiranja parnog čepa. Nadalje, takav rad uzrokuje slabiju učinkovitost izmjenjivača. [3]

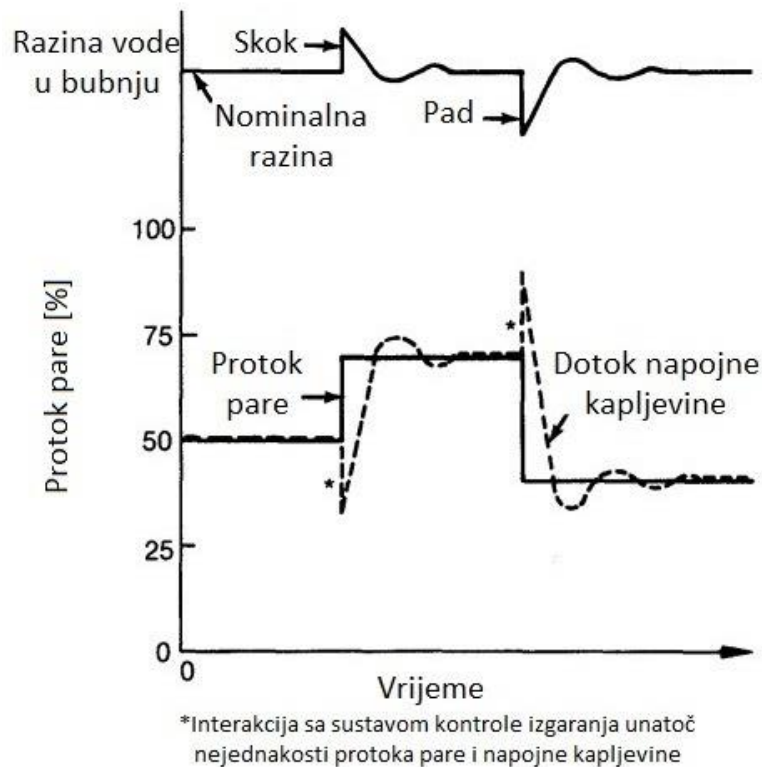


## 2.4. Jednokomponentna regulacija razine kapljevine

Jednokomponentna regulacija je jednostavna metoda regulacije razine kapljevine koja regulira razinu kapljevine pomoću signala izmjerene razine kapljevine u bubnju. Termohidraulički i termostatski kontrolni uređaji koji se sastoje od senzora razine kapljevine koji uspoređuje izmjerenu vrijednost s željenom razinom kapljevine u bubnju te šalje signal u PI regulator iz kojeg signal odlazi prema ventilu koji mijenja otvorenost ventila napojne vode. Iako je jednostavna, jednokomponentna regulacija se može koristiti samo kod isparivača s malo promjenjivim opterećenjem i velikom zalihom vode kod kojeg nije toliko izražen *shrink and swell* efekt [4], [5]. Naime, kod jednokomponentne regulacije dolazi do smanjenja dotoka napojne vode u trenutku kada se poveća protok pare zbog prividnog skoka u razini kapljevine kao posljedica *swell* efekta. Takva regulacija dovodi do oscilacija i dugog potrebnog vremena za stacioniranje razine. Uređaji koji reguliraju dotok napojne vode kao što su ventili ili pumpe moraju imati linearnu ovisnost između protoka i vrijednosti primljenog regulacijskog signala. Također, karakteristika pumpe mora biti takva da pri manjim odstupanjima pumpa može brzo promijeniti brzinu vrtnje kako bi se održavao potrebnii tlak. [3]



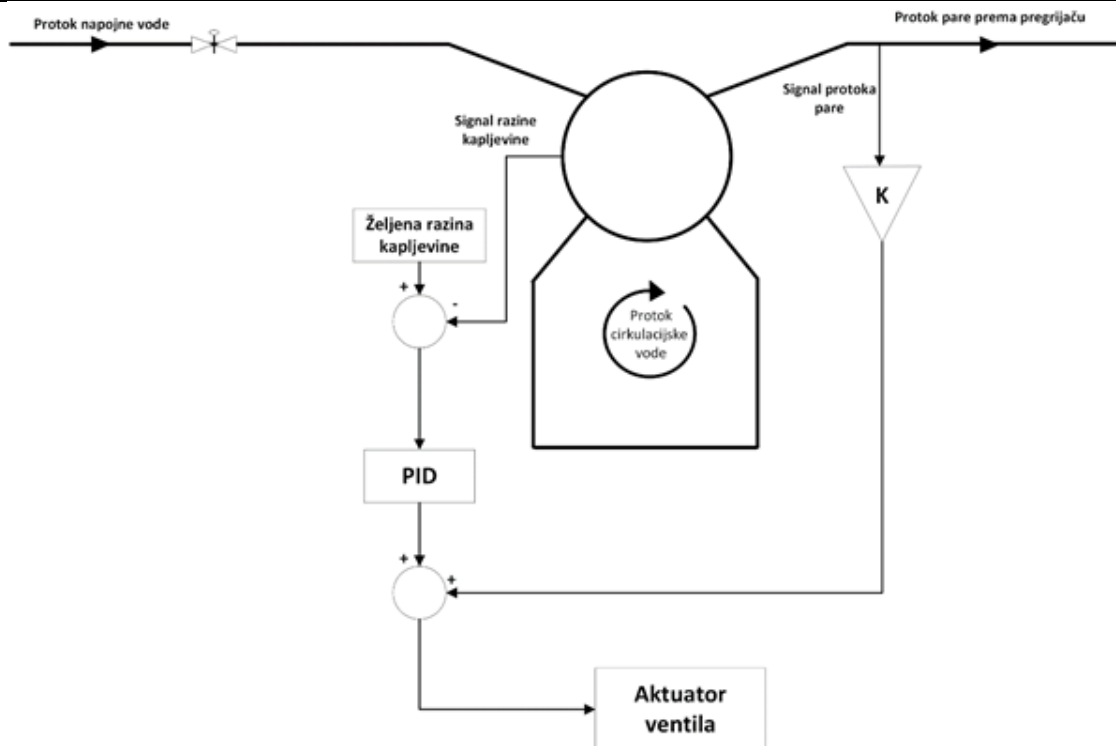
Slika 4. Shematski prikaz jednokomponentne regulacije razine kapljevine u bubnju



Slika 5. Odziv jednokomponentne regulacije [3]

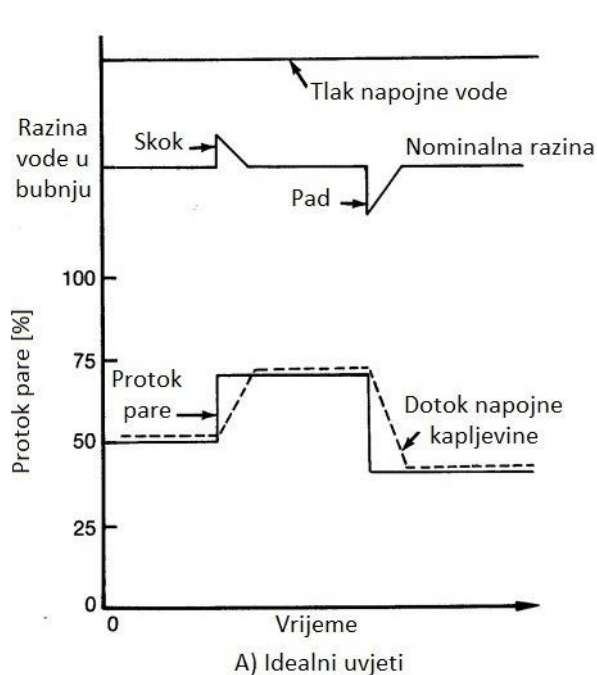
## 2.5. Dvokomponentna regulacija razine kapljevine

Kako bi se pokušali smanjiti nedostaci jednokomponentne regulacije, u dvokomponentnoj regulaciji signalu razine kapljevine u bubnju dodaje se signal protoka pare koji unaprijed predviđa potrebno povećanje dotoka napojne vode. Regulacijska petlja se sastoji od proporcionalnog člana u kojeg ulazi signal odstupanja razine kapljevine od nominalne razine te unaprijednog djelovanja (*eng. Feedforward control*) kojeg omogućuje signal protoka pare prema pregrijaču. Shematski prikaz dvokomponentne regulacije je vidljiv na slici 6.

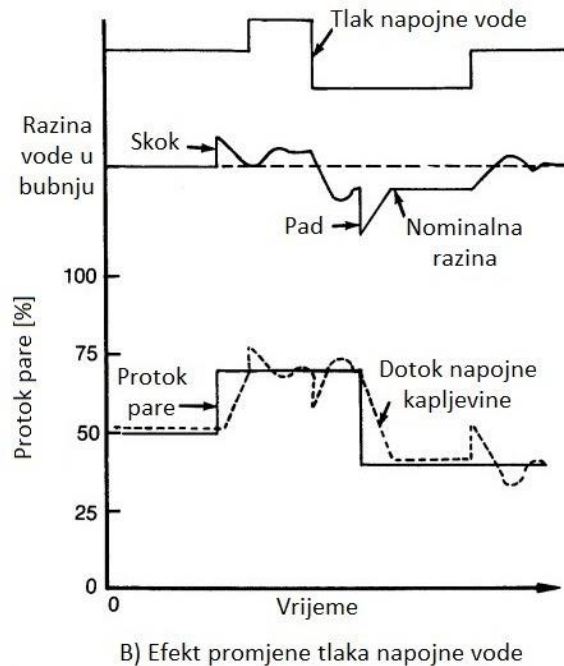


**Slika 6. Shematski prikaz dvokomponentne regulacije razine kapljevine u bubnju**

Na slici 7 su parametri regulacije odabrani tako da se međusobno oprečni signali protoka pare i razine kapljevine poništavaju sve dok se razina vode ne kreće vraćati na nominalnu vrijednost. Na taj način je onemogućena početna nagla napojne vode kao u jednokomponentnoj regulaciji što za posljedicu ima glađi profil dotoka napojne vode i osigurava precizniju i bržu regulaciju razine kapljevine uz manje oscilacije. Iako će dvokomponentna regulacija postići sve željene ciljeve regulacije u slučaju promjenjivog tlaka napojne vode doći će do neželjenih oscilacija zbog promjene odnosa između dotoka napojne vode i protoka pare prema pregrijaču vidljivih na slici 8 [3]. Zbog toga se nivo razine kapljevine stacionira na vrijednosti koja nije nominalna razina kapljevine u bubnju kako bi se uskladili ulazni i izlazni maseni protoci. Kao rješenje ovog problema se nameće sustav trokomponentne regulacije.



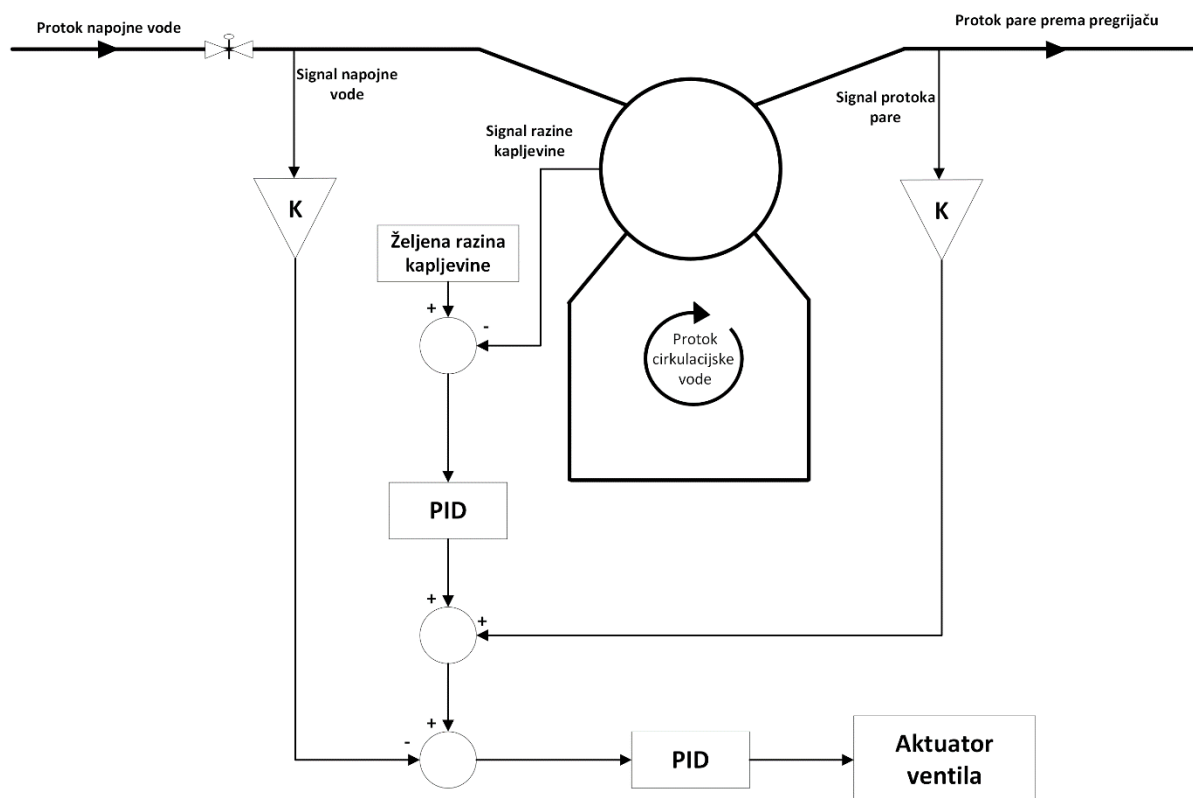
Slika 7. Odziv dvokopomentne regulacije u idealnim uvjetima [3]



Slika 8. Odziv dvokomponentne regulacije pri promjenjivom tlaku [3]

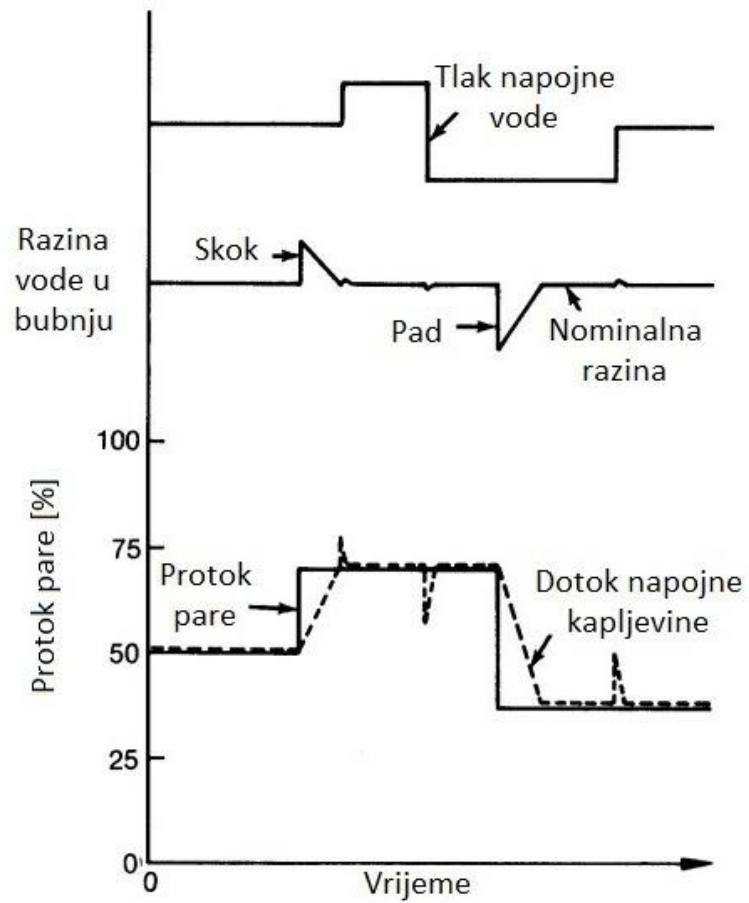
## 2.6. Trokomponentna regulacija razine kapljevine

Trokoponentna regulacija razine kapljevine u bubnju je najkorišteniji koncept regulacije u postrojenjima koji omogućuje napredniju regulaciju od prethodnih sustava. Uz signale razine kapljevine u bubnju i protoka pare u trokoponentnu regulaciju se dodaje i signal protoka napojne vode. On se dodaje u regulacijski krug kako bi se smanjio nepredvidljivi signal koji regulira otvorenost ventila napojne vode u odnosu na protok napojne vode prema bubnju. S tim dodatnim signalom regulacijski krug više nema problem s promjenjivim tlakom napojne vode. Postoji više načina kako složiti trokomponentni regulacijski krug. Jedan od načina je kaskadna regulacija prikazana na slici 9.



**Slika 9. Shematski prikaz trokomponentne regulacije razine kapljevine u bubnju**

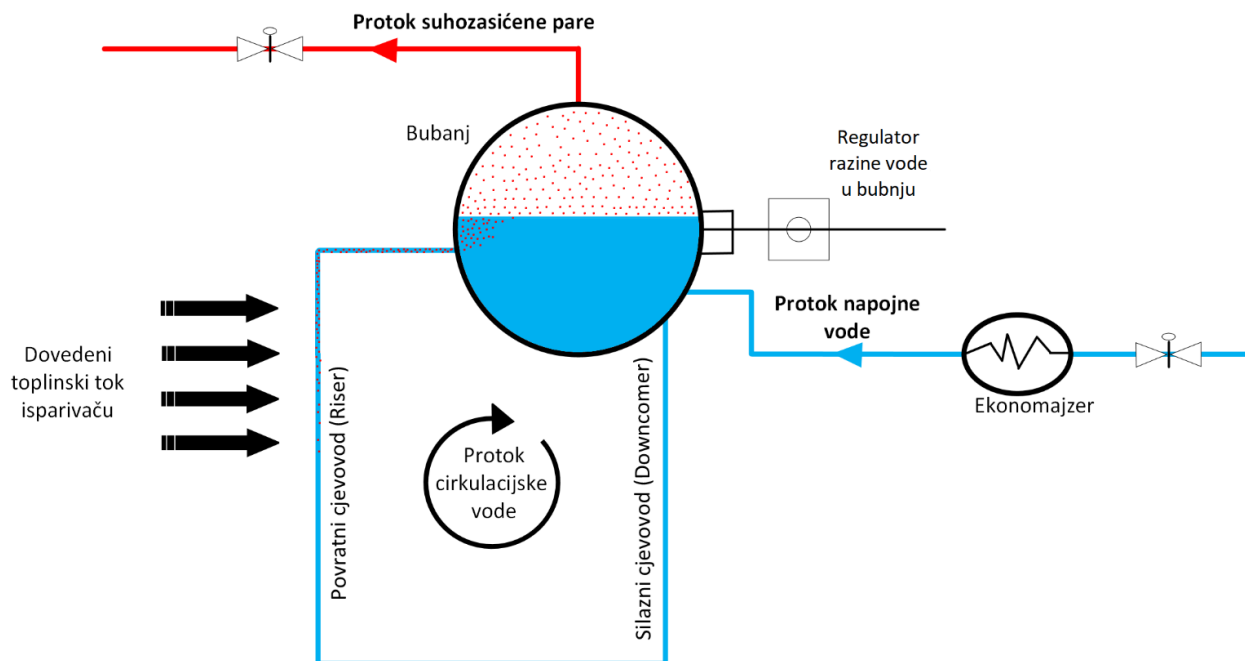
Kako bi regulacijski krug ispravno funkcionirao, nužno je uskladiti i ispravno odrediti odnose između regulacijskih parametara. Na slici 10 je prikazana regulacija razine kapljevine s ispravnom određenim parametrima. Trokomponentnom regulacijom se postiže najbrža regulacija s najmanjim oscilacijama razine kapljevine i kao takva predstavlja optimalan način regulacije u termoenergetskim postrojenjima.



Slika 10. Odziv trokomponentne regulacije [3]

### 3. MATEMATIČKI MODEL BUBNJA OPTOČNOG GENERATORA PARE

#### 3.1. Shematski prikaz bubnja generatora pare



Slika 11. Pojednostavljeni shematski prikaz rada bubnja optočnog generatora pare

Na slici 11 je prikazan pojednostavljeni shematski prikaz bubnja generatora pare s prirodnom cirkulacijom. U bubanj ulazi napojna voda koja se zagrijava prolazeći kroz ekonomajzer na temperaturu nekoliko stupnjeva ispod temperature zasićenja. Napojna voda prije ulaska u generator pare mora biti pravilno pripremljena. Priprema napojne vode se sastoji od filtriranja, otplinjavanja i demineralizacije. Bez nje bi sigurno došlo do taloženja soli i nečistoća na ogrjevne površine zbog čega bi nastupila korozija i oštećenje cijevi. Kroz isparivačke cijevi struji voda koja prima toplinski tok od dimnih plinova te počinje isparavati. U bubanj iz isparivačkih cijevi ulazi mokra para. Suhozasićena para prolazi kroz ciklonske separatore te izlazi iz bubnja prema pregrijaču. Preostala vrela kapljevina ponovno ulazi u isparivačke cijevi i proces se ponavlja. Protok vode kroz isparivačke cijevi se ne postiže pomoću pumpe, već je za to zaslužna sila uzgona zbog koje voda cirkulira sustavom. Generatori pare s prirodnom cirkulacijom se rjeđe ugrađuju u usporedbi s generatorima pare sa pumpom zbog teže regulacije protoka, ali su s druge strane u izvedbi i pogonu jeftiniji. Također, bubnjevi s cirkulacijskom regulacijom se koriste isključivo pri nižim tlakovima procesa jer jedino tada postoji dovoljno velika razlika između gustoće vrela kapljevina na ulazu i mokre kapljevina na izlazu koja

osigurava dovoljno veliku uzgonsku silu za svladavanje gravitacije i linijskih gubitaka uz održavanje potrebnog protoka. Povećanjem tlaka dolazi do smanjenja razlike između gustoće pare i vrele kapljevine što znači da se pri višim tlakovima mora koristiti pumpa. Također, cirkulacijska voda je zaslužna za hlađenje materijala isparivačkih cijevi. U stacionarnom stanju, protok cirkulacijske vode je jednak  $1/x$ , gdje  $x$  predstavlja sadržaj pare u mokroj kapljevine.

### 3.2. Matematički model bubnja generatora pare

U sklopu zadatka potrebno je izvesti pojednostavljeni matematički model dinamike promjene razine kapljevine u bubnju optoćnog generatora pare sa prirodnom cirkulacijom vode. Kako bi se na što jednostavniji, ali dovoljno točan i precizan način izveo model uzete su u obzir sljedeće pretpostavke:

- a) Jednodimenzijnsko strujanje unutar cijevi
- b) Zanimarivanje linijskih i lokalnih gubitaka
- c) Zanimarivanje izmjene topline s okolišem
- d) Sva toplina oslobođena izgaranjem se bez posrednika predaje vodi/pari
- e) Zanimarivanje promjene potencijalne energije fluida

Matematički model sustava se temelji na osnovnim zakonima dinamike fluida; zakonu očuvanja mase i zakonu očuvanja energije.

#### 3.2.1. Masena bilanca bubnja

Promjena mase vode unutar bubnja jednaka je razlici između ulaznog i izlaznog masenog toka.

$$\frac{dM}{dt} = m_{ulazno} - m_{izlazno} \quad (1)$$

Na slici slici 11 možemo vidjeti da u bubanj ulazi maseni protok napojne vode  $m_{eko}$  i protok mokre pare iz isparivača  $m_{isp}$ , dok iz bubnja izlazi protok suhozasićene pare prema pregrijaču  $m_{preg}$  i protok vrele kapljevine prema silaznom cjevovodu isparivača  $m_{opt}$



$$\frac{dM}{dt} = m_{eko} + m_{isp} - m_{preg} - m_{opt} \quad (2)$$

U povratnom dijelu isparivačkih cijevi (*eng. Riser*) voda se zagrijava toplinskim tokom kojeg vrući dimni plinovi predaju vodi. Na ulasku u bubanj voda se sastoji od kapljevite i parne faze gdje  $x$  označuje udio suhozasićene pare u mokroj pari.

$$m_{isp} = x \cdot m_{isp} + (1 - x) \cdot m_{isp} \quad (3)$$

Kroz silazni dio isparivačkih cijevi (*eng. Downcomer*) cirkulira protok vrele kapljevine iz isparivača i protok napojne vode iz ekonomajzera.

$$m_{opt} = m_{eko} + (1 - x) \cdot m_{isp} \quad (4)$$

Tada jednažbu očuvanja mase za bubanj možemo napisati u obliku:

$$\frac{dM}{dt} = m_{eko} + [xm_{isp} + (1 - x)m_{isp}] - m_{preg} - [m_{eko} + (1 - x)m_{isp}] \quad (5)$$

S obzirom da je volumen kojeg zauzima konstantan i jednak volumenu bubnja  $V_{total}$ , iz prethodne diferencijalne jednažbe možemo izraziti odrediti gustoću vode u bubnju.

$$\frac{d(\rho V_{total})}{dt} = m_{eko} + [xm_{isp} + (1 - x)m_{isp}] - m_{preg} - [m_{eko} + (1 - x)m_{isp}] \quad (6)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V_{total}} \{m_{eko} + [xm_{isp} + (1 - x)m_{isp}] - m_{preg} - [m_{eko} + (1 - x)m_{isp}]\} \quad (7)$$

### 3.2.2. Energetska bilanca bubnja

Energetska bilanca vode unutar bubnja jednaka je razlici ulaznih i izlaznih entalpija.

$$\frac{dE}{dt} = m_{eko}h_{eko} + m_{isp}h_{isp} - m_{preg}h'' - m_{opt}h' \quad (8)$$

Prije ulaska u bubanj, napojna voda prolazi kroz ekonomjzerske površine u kojem prima toplinu od dimnih plinova. Temperatura napojne vode nakon ekonomajzera je nekoliko stupnjeva niža od temperature zasićenja kako bi se osigurala zaštita od oštećenja ekonomajzerskih cijevi.

$$h_{eko} = \frac{\Phi_{eko}}{m_{eko}} + h_{ulaz} \quad (9)$$

Voda prolaskom kroz povratni dio isparivačkih cijevi prima toplinski tok od vrućih dimnih plinova te ulazi u bubanj s povećanom entalpijom:

$$h_{isp} = \frac{\Phi_{isp}}{m_{isp}} + h' \quad (10)$$

Kada se navedeni izrazi uvrste u energetska bilancu dobije se izraz:

$$\rho V \frac{dh}{dt} + h \frac{dM}{dt} = m_{eko}h_{eko} + [xm_{isp}h'' + (1-x)m_{isp}h'] - m_{preg}h'' - [m_{eko}h_{eko} + (1-x)m_{isp}h'] \quad (11)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho V} \{m_{eko}h_{eko} + [xm_{isp}h'' + (1-x)m_{isp}h'] - m_{preg}h'' - [m_{eko}h_{eko} + (1-x)m_{isp}h'] - h \frac{dM}{dt}\} \quad (12)$$

Tlak u bubnju je funkcija gustoće i entalpije vode koja se nalazi u bubnju. Iznos tlaka je moguće izračunati pozivanjem dodatka *Xsteam* za programski paket *MATLAB*<sup>®</sup>.

$$p_{bub} = XSteam \cdot ('p_{hrho}', h, rho) \quad (13)$$

### 3.2.3. Cirkulacija vode u isparivačkim cijevima

Protok vode koji cirkulira kroz isparivačke cijevi je ovisan o temperaturi, odnosno tlaku unutar bubnja te je modeliran pomoću pojednostavljenog izraza [7] :

$$m_{isp} = K \cdot \sqrt{\rho' - \rho_{isp}} \quad (14)$$

Gdje je  $\rho'$  gustoća vrele kapljevine na ulazu u isparivačke cijevi, a  $\rho_{isp}$  gustoća mokre kapljevine na izlasku iz isparivačkih cijevi. Pošto je gustoća mokre kapljevine na izlasku iz cijevi manja od gustoće vrele kapljevine na ulazu uspostaviti će se protok vode kroz isparivač suprotan od djelovanja gravitacije.  $\rho'$  i  $\rho_{isp}$  su funkcije tlaka te se mogu odrediti pozivajući funkciju *XSteam* u Matlab-u:

$$\rho' = XSteam \cdot ('rhoL\_p', p_{bub}) \quad (15)$$

$$\rho'' = XSteam \cdot ('rhoV\_p', p_{bub}) \quad (16)$$

$$\rho_{isp} = XSteam \cdot ('rho\_ph', p_{bub}, h_{isp}) \quad (17)$$

$K$  je koeficijent proporcionalnosti koji je određen tako da jednadžba (14) zadovoljava nominalni protok u stacionarnom stanju. Navedeni izraz dobro opisuje promjenjivi protok vode kroz isparivačke cijevi u području oko zadanih početnih uvjeta.

### 3.2.4. Određivanje visina razine kapljevine u bubnju

Cijeli volumen bubnja je ispunjen mokrom parom, pri čemu je pri dnu kapljevine, a iznad nje suhozasićena para. Do volumena pare i kapljevine možemo doći preko izraza:

$$M = M' + M'' \quad (18)$$

$$V = V' + V'' \quad (19)$$

$$\rho \cdot V = \rho' \cdot V' + \rho'' \cdot V'' \quad (20)$$

Kombinacijom gore navedenih jednadžbi dolazimo do konačnih izraza za volumen kojeg zauzimaju suhozasićena para i vrela kapljevina:

$$V'' = \frac{V \cdot (\rho - \rho')}{(\rho'' - \rho')} \quad (21)$$

$$V' = V - V'' \quad (22)$$

Kako je za izradu ovog modela pretpostavljen uspravno postavljen cilindrični bubanj, dolazimo do izraza za razinu kapljevine unutar bubnja:

$$y = \frac{V' \cdot 4}{d^2 \cdot \pi} \quad (23)$$

### 3.2.5. Protok pare prema pregrijaču

Protok pare prema pregrijaču je modeliran kao protok kroz ventil jednadžbom (24) u kojoj je  $p_{kond}$  tlak kondenzacije nakon pregrijača i turbine, a konstanta  $K$  (koja obuhvaća površinu svijetlog presjeka ventila i koeficijent protjecanja) je izračunata tako da jednažba (24) zadovoljava protok pare u stacionarnom stanju.

$$m_{pp} = K \cdot \sqrt{p_{bub} - p_{kond}} \quad (24)$$

## 4. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJE

Simulacija sustava rađena je u programskom paketu *MATLAB*<sup>®</sup> i u njega ugrađenog grafičkog programskog sučelja *Simulink* koji se koristi za simulaciju i analizu dinamičkih sustava.

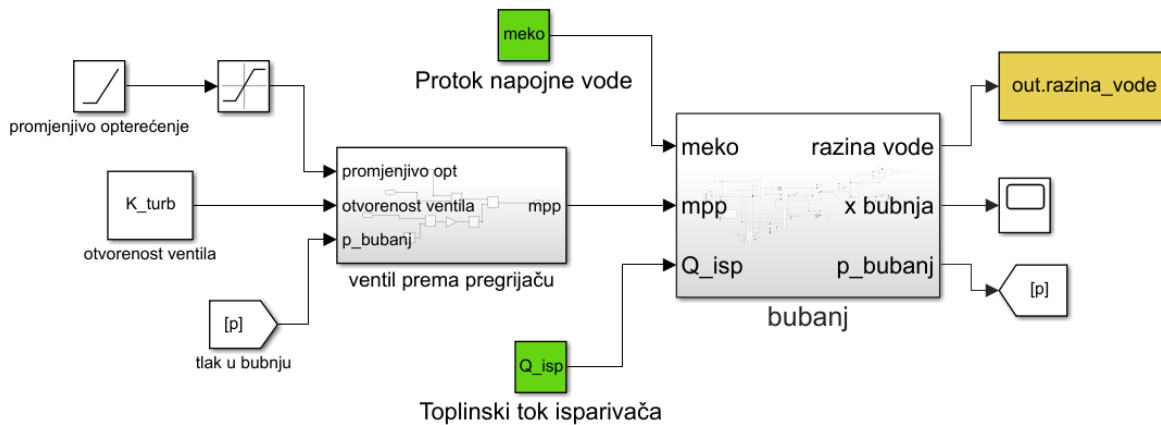
U isparivaču generatora pare na otpadnu toplinu potrebno je u stacionarnom stanju proizvoditi suhozasićenu paru nazivnih parametara; 50 t/h protoka svježje pare pri tlaku od 15 bar-a. Nakon izlaska iz bubnja, para odlazi prema pregrijaču gdje se pregrijava na temperaturu od 320 °C. Napojna voda ulazi u ekonomajzer s temperaturom 120,7 °C te se grije toplinskim tokom koji predaju vrući dimni plinovi u iznosu od 6,333 MW [6] i nakon toga ulazi u bubanj. Iz bubnja u isparivačke cijevi ulazi vrela kapljevina koja prima toplinski tok od dimnih plinova u iznosu od 25,206 MW [6] pri čemu dio vode isparava te nakon odvajanja suhozasićena para izlazi iz bubnja, dok preostali dio vode ulazi u bubanj kao vrela kapljevina te se vraća u isparivačke cijevi. Visina kapljevine u bubnju u stacionarnim uvjetima iznosi 2,2093 m pri čemu volumen kapljevine zauzima oko 45 % ukupnog volumena unutar bubnja.

**Tablica 1 Geometrijske karakteristike bubnja**

	Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
Promjer bubnja	$D_{bub}$	1.2	m
Polumjer bubnja	$R$	0.6	m
Površina bubnja	$A_b$	1.13098	m <sup>2</sup>
Duljina bubnja	$L_{bub}$	4.5	m
Volumen bubnja	$V_{total}$	5.08938	m <sup>3</sup>

### 4.1. Odziv sustava bez regulacije

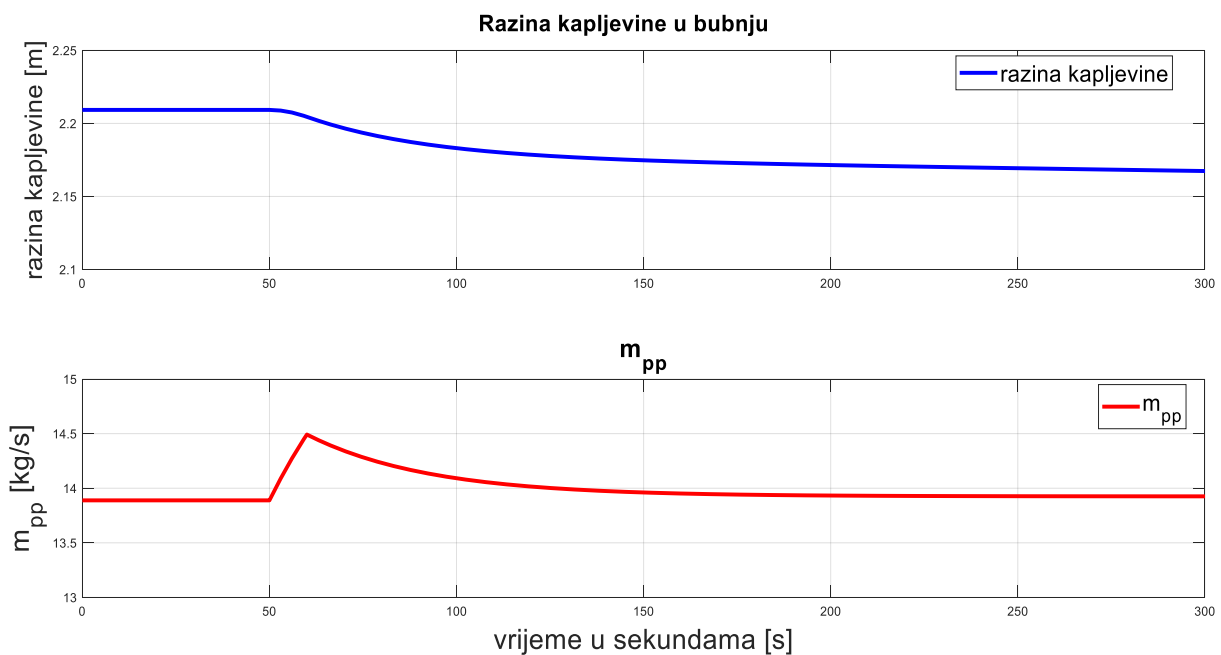
Na slici 12 je prikazana modelska shema sustava otvorenog kruga bez regulacije.



**Slika 12. Simulink shema sustava bez regulacije**

Na slici 13 prikazan je odziv sustava bez regulacije prilikom povećanja protoka pare za 5% postupnim linearnim otvaranjem ventila u 50 sekundi.

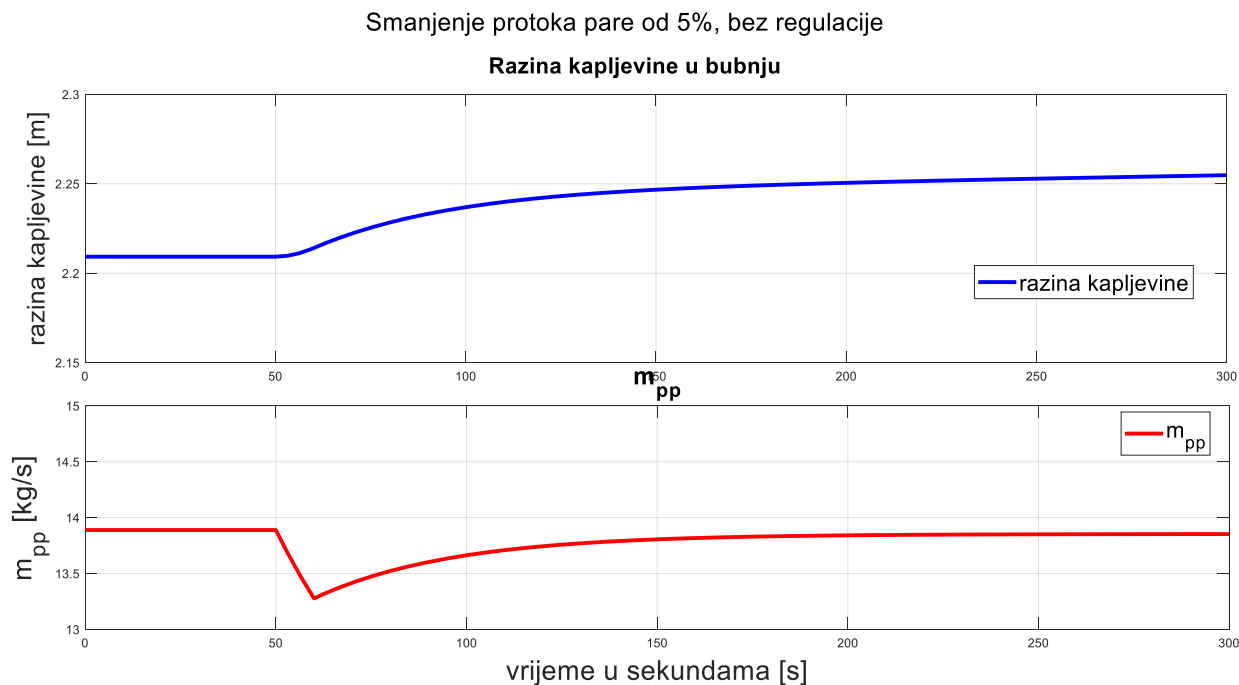
Povećanje protoka pare od 5%, bez regulacije



**Slika 13. Odziv sustava bez regulacije na povećanje protoka pare**

Iz slike je vidljivo da u 50 sekundi dolazi do pada razine kapljevine u sustavu zbog povećanog protoka pare. Taj povećani protok pare smanjuje tlak u bubnju zbog kojeg dio kapljevine u bubnju isparava te dolazi do smanjenja razine kapljevine unutar bubnja. Kako u bubnju pada tlak, tako pada i protok pare prema pregrijaču.

Na slici 14 prikazan je odziv sustava bez regulacije prilikom smanjenja protoka pare za 5% brzim linearnim pritvaranjem ventila u pedesetoj sekundi.



**Slika 14. Odziv sustava bez regulacije na smanjenje protoka para**

Iz slike je vidljivo da u 50 sekundi dolazi do skoka razine kapljevine koji je uzrokovan smanjenjem protoka suhozasićene pare i kondenzacijom jednog dijela pare unutar bubnja zbog povišenja tlaka.

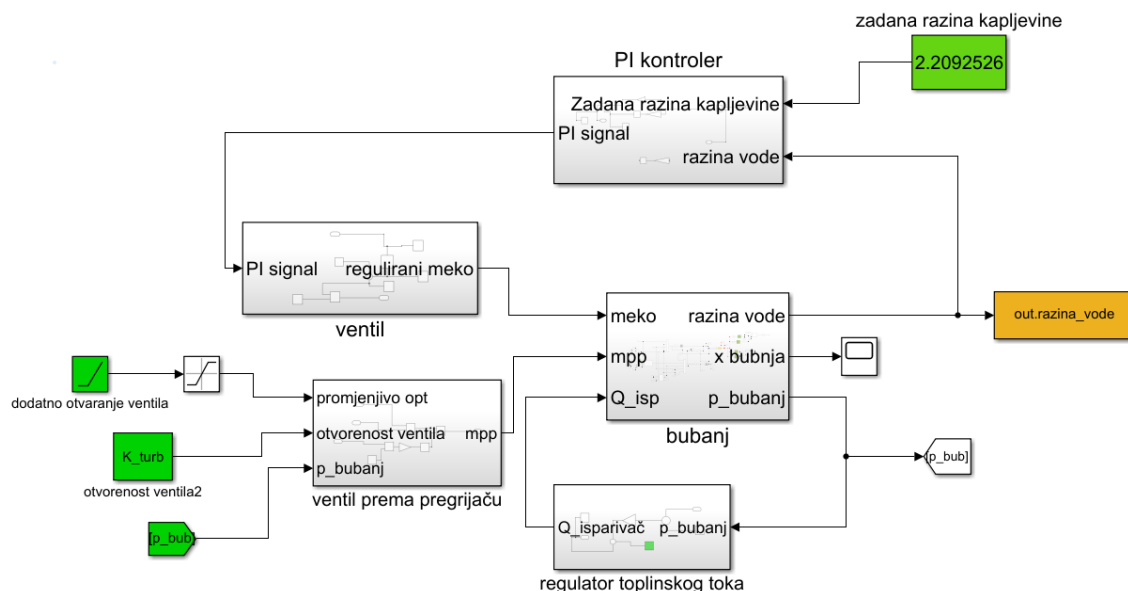
## 4.2. Odziv sustava s regulacijom

Kako bi se osigurao nesmetan rad prilikom promjene opterećenja proizvodnje pare, nužno je koristiti regulacijski sustav koji će održavati razinu kapljevine u bubnju na projektiranoj razini. Kako postoji više koncepata regulacije razine kapljevine, kao što je opisano u poglavlju 2, ispitat će se djelovanje svakog od navedenih.

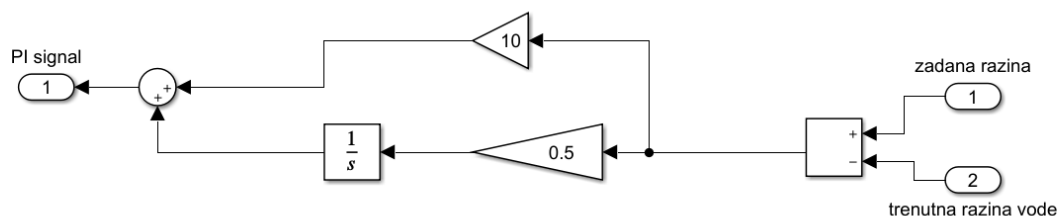
### 4.2.1. Jednokomponentna regulacija

Na slici 15 je prikazana *Simulink* shema jednokomponentne regulacije razine kapljevine u bubnju. Jednokomponentna regulacija sastoji se od signala razine kapljevine koji nakon uspoređivanja

izmjerene razine s nominalnom razinom ulazi PI regulator koji šalje signal aktuatoru ventila koji zatim regulira dotok napojne vode. Regulator toplinskog toka se koristi u funkciji održavanja željenog tlaka pare u bubnju.



Slika 15. Jednokomponentna regulacija razine kapljevine u bubnju



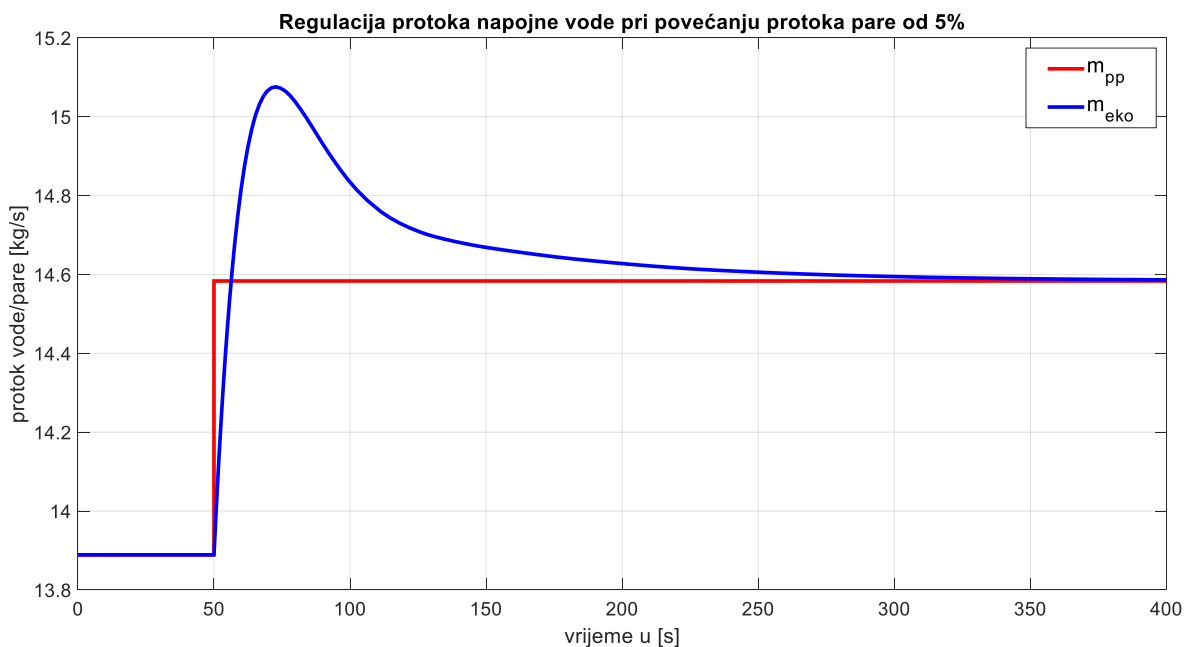
Slika 16. PI regulator razine kapljevine u bubnju

Odabrani parametri regulatora su  $K_p = 10$  i  $K_i = 0.5$ . Na Slici 17 je prikazana promjena razine kapljevine u bubnju prilikom povećanja protoka pare za 5%. Nakon prvotnog pada razine kapljevine dolazi do otvaranja ventila i povećanja protoka napojne vode. Nakon 300 sekundi od poremećaja dolazi do stacioniranja razine kapljevine na prvotnu razinu, kao i izjednačavanja protoka  $m_{eko}$  i  $m_{pp}$ . Promjena protoka napojne vode i pare je prikazana na slici 18.



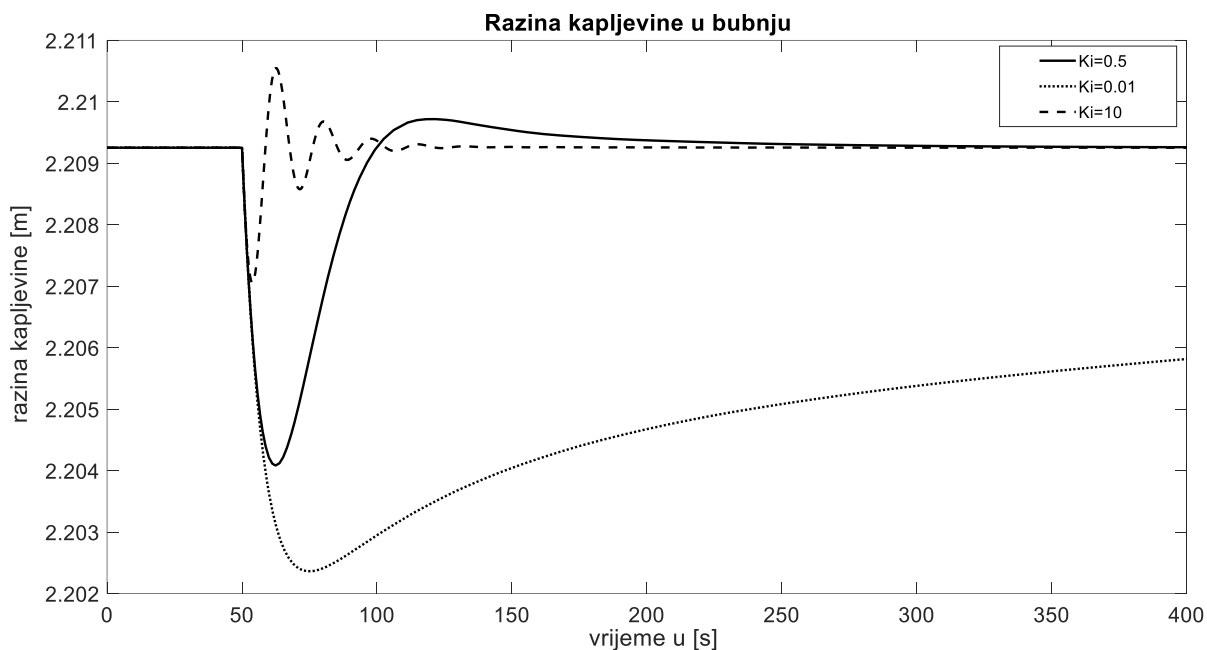


**Slika 17. Promjena razine kapljevine u bubnju pri povećanju protoka pare za 5% s jednokomponentnom regulacijom**



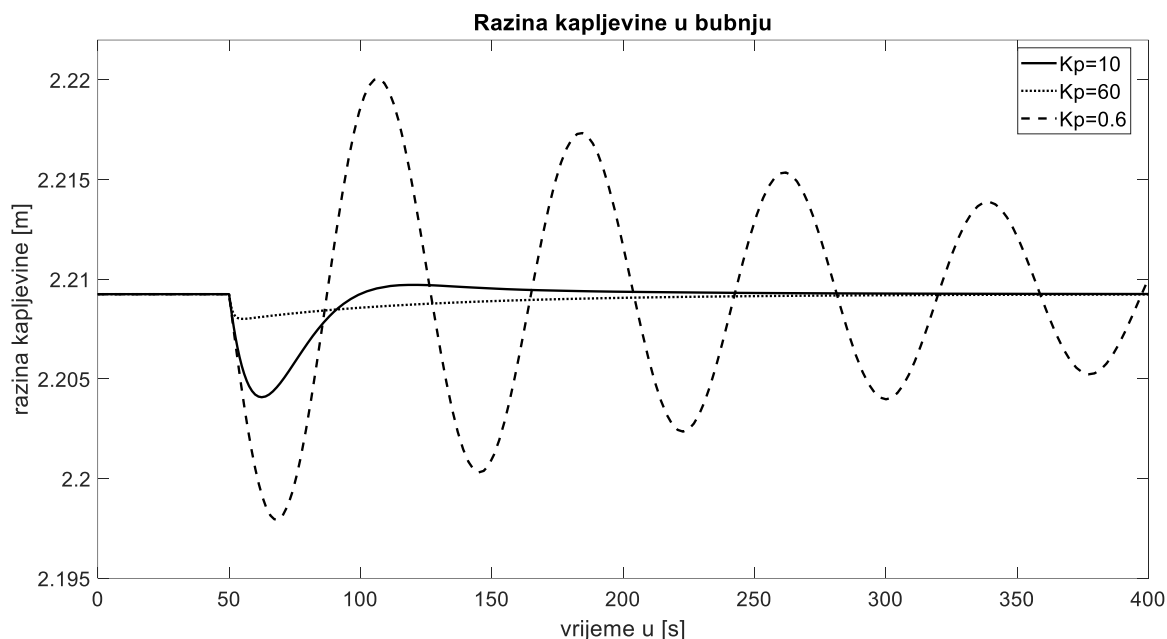
**Slika 18. Promjena protoka napojne vode pri povećanju protoka pare za 5% s jednokomponentnom regulacijom**

Slika 19 prikazuje promjenu razine kapljevine u bubnju za različite vrijednosti parametra regulacije  $K_i$ . Prilikom smanjivanja vrijednosti integracijskog djelovanja  $K_i$  na 0.01 razina



**Slika 19. Promjena visine kapljevine u bubnju za različite parametre  $K_p$**

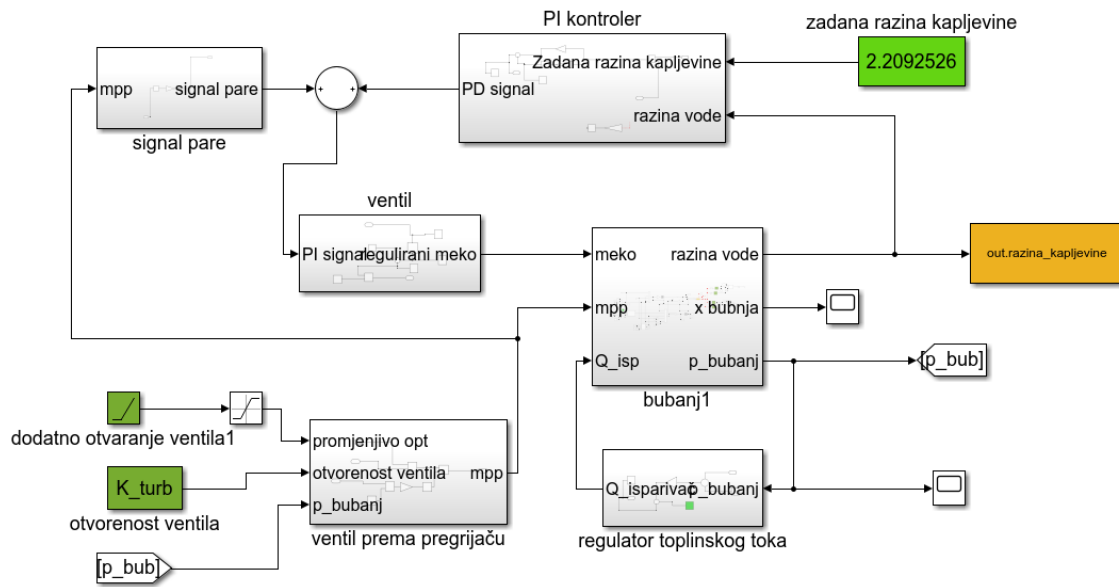
kapljevine u bubnju će se jako sporo približavati nominalnoj razini bubnja. Ako se parametar regulacije  $K_i$  poveća na 10 doći će do oscilacije razine kapljevine u bubnju i dotoka napojne vode zbog dominacije integracijskog djelovanja u odnosu na proporcionalno. Kako bi smo izbjegli neželjene odzive, potrebno je odrediti odgovarajuće vrijednosti parametara regulatora. Slika 20 prikazuje promjenu razine kapljive u bubnju za različite vrijednosti parametara regulacije  $K_p$ . Povećanjem vrijednosti proporcionalnog parametra  $K_p$  doći će do povećanja amplitude razine kapljevine u bubnju. Preveliko povećanje može izazvati nestabilnosti u sustavu. Smanjivanjem vrijednosti proporcionalnog parametra  $K_p$  na vrijednost od 0.6 do izražaja će doći nestabilno integracijsko djelovanje zbog kojeg dolazi do dugotrajnih neželjenih oscilacija razine kapljevine.



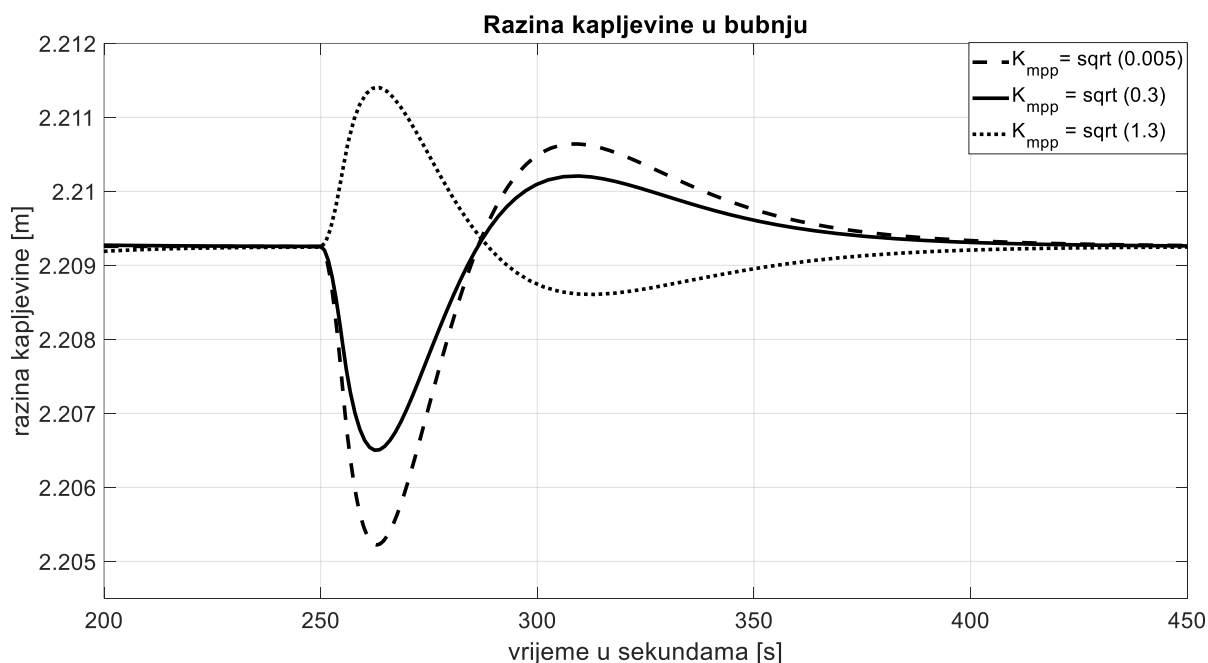
Slika 20. Promjena visine kapljevine u bubnju za različite parametre  $K_p$

#### 4.2.2. Dvokomponentna regulacija

Dvokomponentna regulacija razine kapljevine u bubnju je prikazana na slici 21. Signal regulacijskog odstupanja razine koji izlazi iz PI regulatora se korigira sa pozitivnim signalom protoka pare. Na taj način se omogućava predviđanje promjene razine kapljevine u bubnju na osnovi promjene protoka suhozasićene pare prema pregrijaču. Odabrani parametri regulatora su  $K_p = 10$ ,  $K_i = 0.4$ ,  $K_{mpp} = \sqrt{0.3}$ . Odnos između parametara regulatora je izuzetno bitan za stabilnost sustava kao što je vidljivo u prošlom odlomku. Kako se u dvokomponentnoj regulaciji signal iz PI regulatora korigira sa signalom protoka pare potrebno je ispravno odrediti parametar  $K_{mpp}$ . U slučaju prevelikog utjecaja signala pare doći će do naglih odziva i neželjenih oscilacija. Također, premali utjecaj signala pare ne pospješuje regulaciju i u tom slučaju se sustav ponaša jako slično jednokomponentnoj regulaciji. Na slici 22 je prikazana promjena razine kapljevine u bubnju za različite vrijednosti parametra  $K_{mpp}$  koja se slaže s iznad iznesenim tezama.



Slika 21. Dvokomponentna regulacija razine kapljevine u bubnju

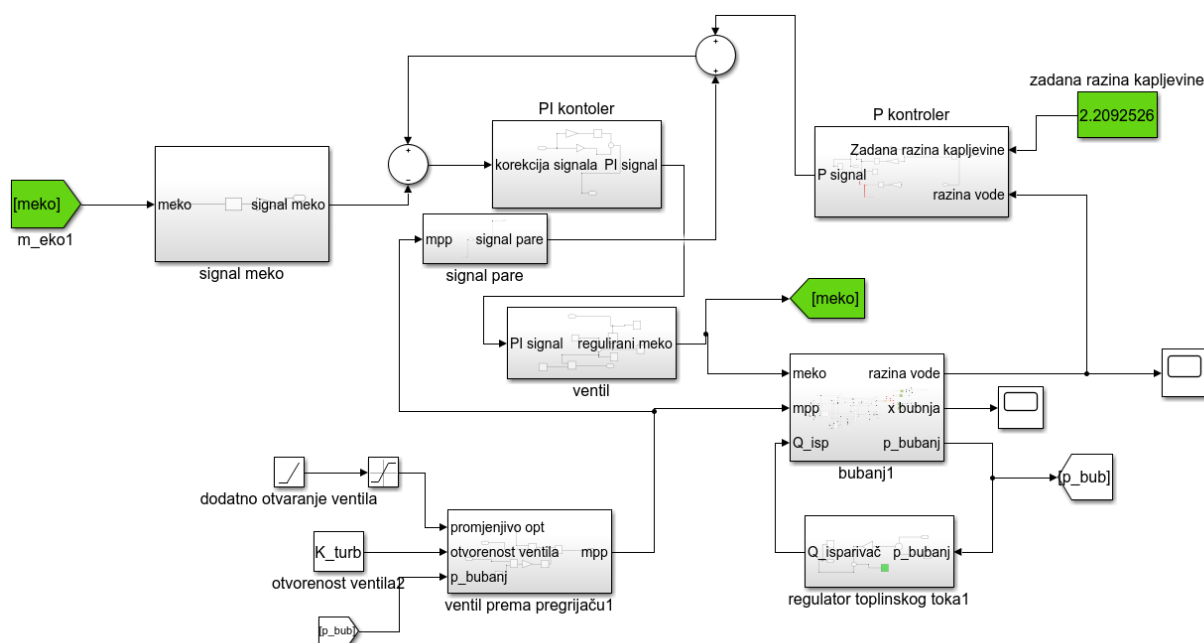


Slika 22. Promjena visine kapljevine za različite parametre  $K_{mpp}$

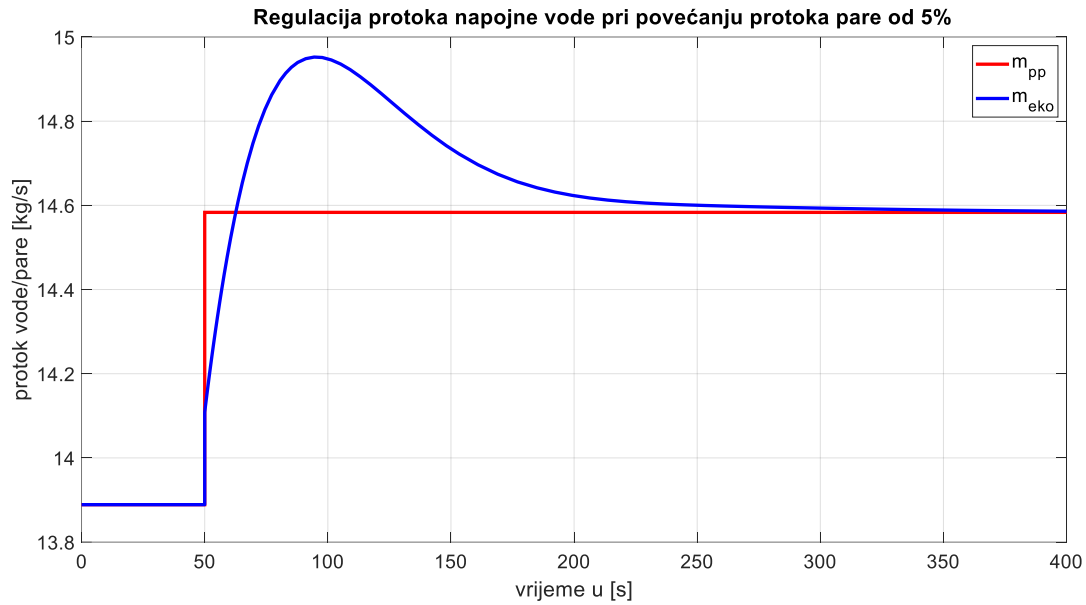
### 4.2.3. Trokomponentna regulacija

Trokomponentna regulacija razine kapljevine u bubnju prikazana je na slici 23. Signal regulacijskog odstupanja razine izlazi iz P (ili PD) regulatora te se korigira sa signalima protoka

pare i dotoka napojne vode pri čemu signal protoka pare ulazi u regulacijski sustav s plusom dok signal napojne vode ulazi s minusom. Na taj način signali protoka napojne vode i pare omogućuju korekciju protoka prije nego što je to vidljivo pomoću senzora razine kapljevine u bubnju, te na taj način ubrzavaju regulaciju. Na slici 25 je prikaz promjene protoka napojne kapljevine za slučaj povećanja protoka pare za 5% u 50 sekundi i održavanja tog protoka prema pregrijaču. Odabrani parametri regulatora su  $K_p = 1.1$ ,  $K_i = 0.2$ ,  $K_p = 5$ ,  $K_{meko} = K_{mpp} = \sqrt{0.3}$ . Zahvaljujući signalima protoka pare i napojne kapljevine dolazi do brzog skoka dotoka napojne vode koji s vremenom slabi i konačno se izjednači sa izlaznim protokom pare. Na slici 24 je prikazana promjena razine kapljevine u bubnju koja ne pokazuje prevelike oscilacije i s time utječe na relativno kratko vrijeme trajanja prijelazne pojave.



Slika 23. Trokomponentna regulacija razine kapljevine u bubnju



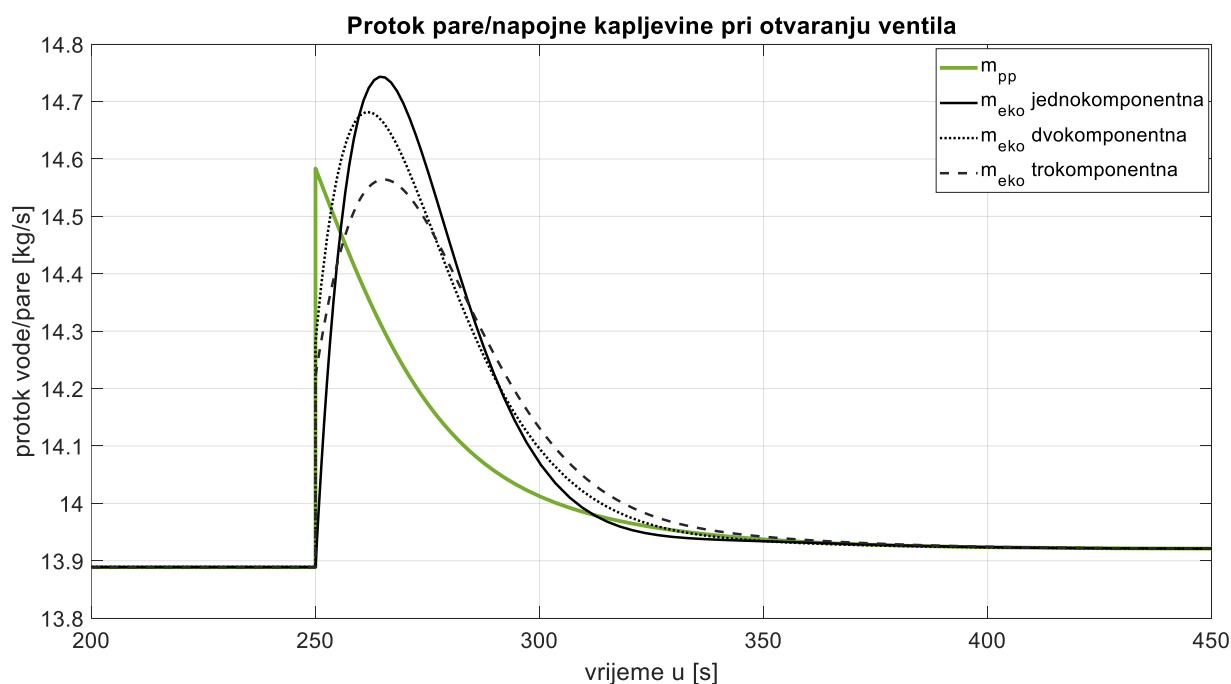
**Slika 25.** Promjena protoka napojne vode pri skokovitom povećanju protoka pare za 5% s trokomponentnom regulacijom



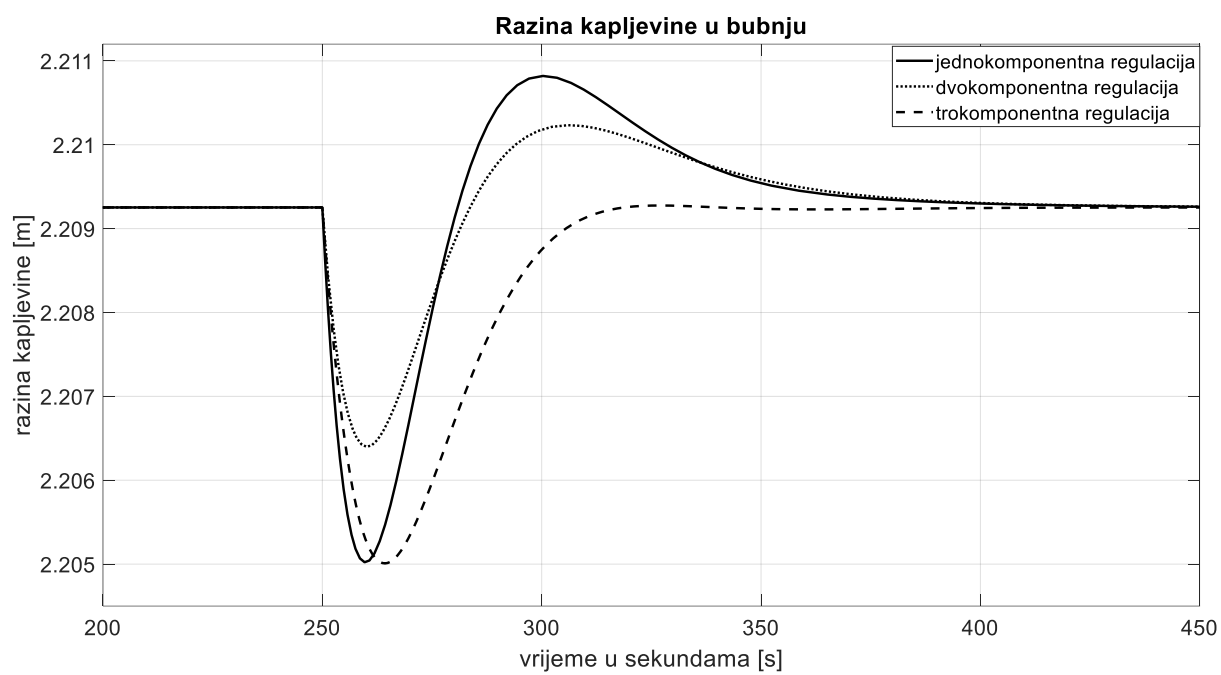
**Slika 24.** Promjena razine kapljevine u bubnju pri povećanju protoka pare za 5% s trokomponentnom regulacijom

#### 4.2.4. Direktna usporedba koncepata regulacije

Kako bi se najbolje vidjele razlike između koncepata regulacije razine kapljevine u bubnju model je s različitim konceptima regulacije podvrgnut istom poremećaju. Tijekom stacionarnog rada modeliranog postrojenja u 250 sekundi se gotovo trenutno otvara ventil parnog cjevovoda te dolazi do početnog povećanja protoka suhozasićene pare za 5%. Kako je povećan protok pare prema pregrijaču te pada entalpija vode u bubnju, doći će do pada tlaka zbog kojeg dio kapljevine unutar bubnja isparava te dolazi do smanjenja razine kapljevine unutar bubnja. Zbog pada tlaka u bubnju s vremenom se smanjuje protok pare. Na slikama 26 i 27 su prikazani odzivi sustava za različite koncepte regulacije. Odzivi su u skladu s opisanim teoretskim razmatranjem u poglavlju 2. Pomoću trokomponentne regulacije se postižu najmanje amplitude i oscilacije kako razine kapljevine u bubnju tako i dotoka napojne vode. Na drugom mjestu se nalazi dvokomponentna regulacija s nešto većim oscilacijama od trokomponentne, ali manjim u usporedbi s jednokomponentnom regulacijom. Međutim u simulaciji izrađenog modela jednostavnija jednokomponentna regulacija sasvim pristojno regulira razinu kapljevine unutar bubnja. Valja primijetiti da se u svim slučajevima sustav stacionira na nižem tlaku pri nešto većem protoku napojne kapljevine i suhozasićene pare u usporedbi sa stacionarnim uvjetima.



Slika 26. Promjena protoka napojne vode za različite koncepte regulacije



**Slika 27. Promjena razine kapljevine u bubnju za različite koncepte regulacije**

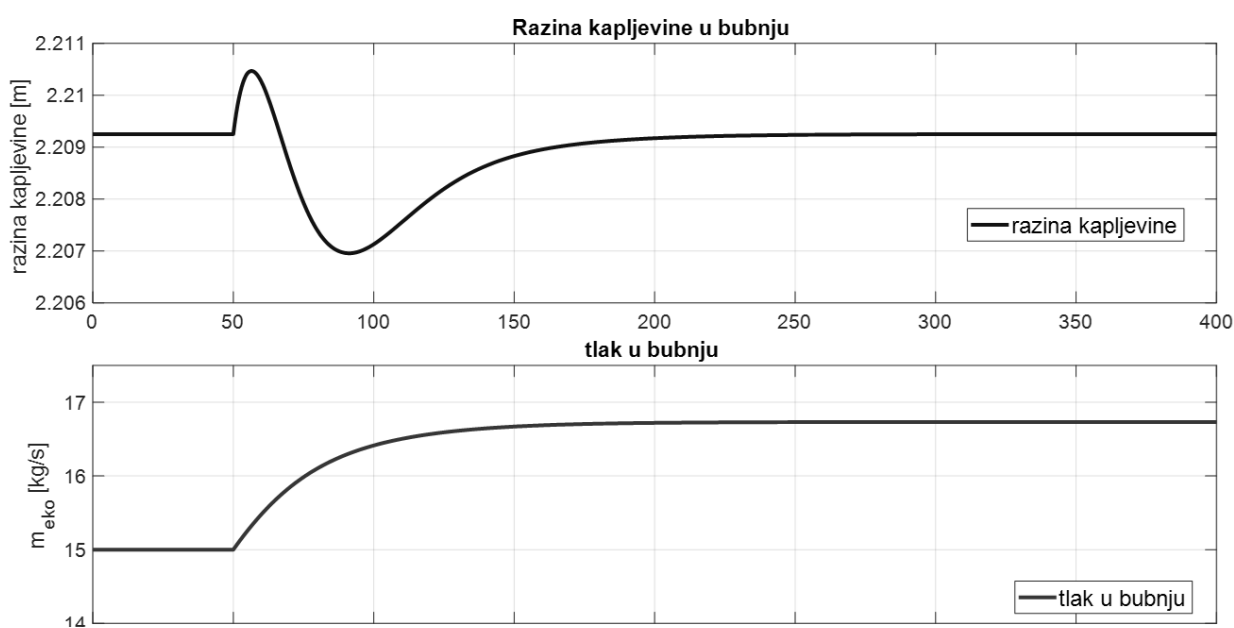


## 5. UTJECAJ POJAVE TOPLINSKOG PREEPTEREĆENJA EKONOMAJZERA NA DJELOVANJE REGULACIJE

U slučaju da u bubanj ulazi napojna kapljevina s entalpijom koja je veća od entalpije vrele kapljevine za taj tlak u bubanj će ulaziti mokra kapljevina sa sadržajem pare  $x$ . Kako je općenito pojava toplinskog preopterećenja ekonomajzera neželjena pojava zbog opasnosti od nastajanja hidrauličkog udara unutar cjevovoda zbog pojave parnog čepa potrebno je provjeriti kako ona utječe na regulaciju razine kapljevine u bubnju [5]. Do oštećivanja ekonomajzerskih cijevi najčešće dolazi kada se smanjuje dotok napojne pare u bubanj prilikom održavanja razine kapljevine u bubnju pritvaranjem ventila napojne kapljevine. Tada kroz cijevi prolazi manje kapljevine što povisuje mogućnost stvaranja pare i parnih čepova unutar cjevovoda ukoliko je temperatura na izlazu iz ekonomajzera bliska temperaturi zasićenja.

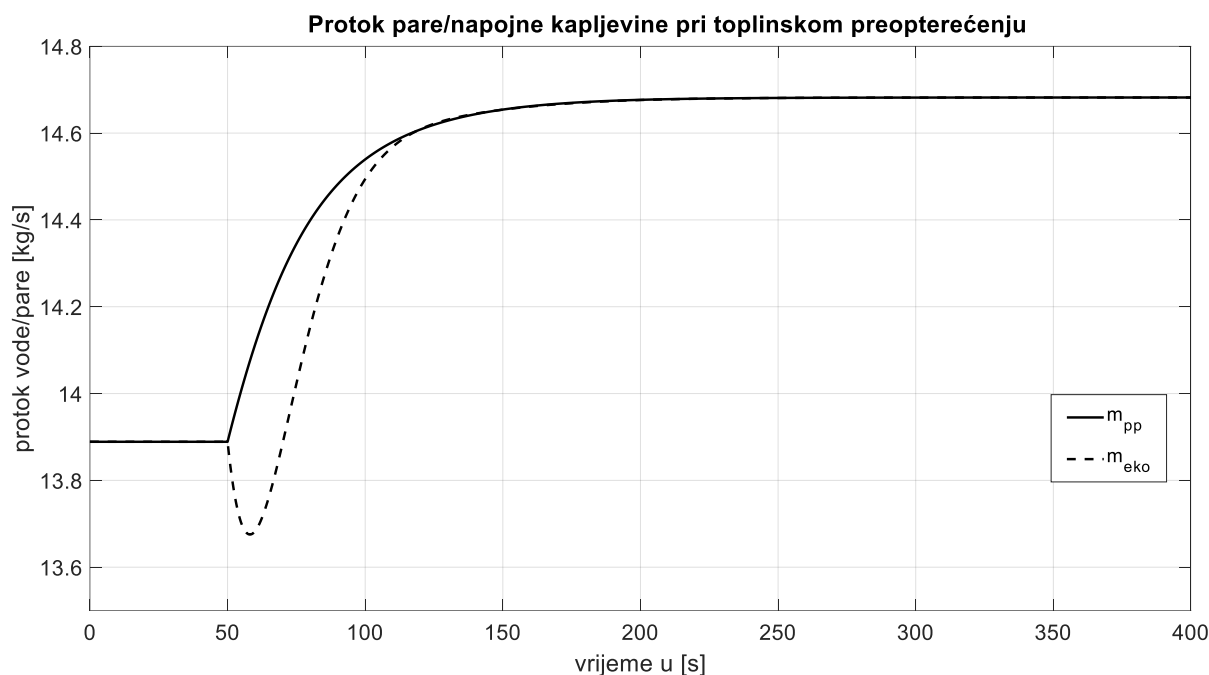
### 5.1.1. Utjecaj na jednokomponentnu regulaciju

Ako se poveća entalpija napojne kapljevine, bilo povećanjem ulazne temperature kapljevine na ulazu u ekonomajzer ili povećanjem predanog toplinskog toka od strane dimnih plinova, doći će do porasta tlaka u bubnju. Zbog porasta tlaka u bubnju protok suhozasićene pare prema pregrijaču će se početi povećavati. Istovremeno će doći do porasta razine kapljevina u bubnju zbog kondenzacije jednog dijela pare unutar bubnja zbog povišenja tlaka. Regulacijski sustav će prvotno smanjiti dotok napojne vode kako bi održao konstantnu razinu kapljevine u bubnju.



Slika 28. Odziv tlaka i razine kapljevine na povećanje preopterećenja ekonomajzera

Ubrzo nakon toga regulacijski sustav povećava dotok napojne kapljevine kako bi izjednačio protok kapljevine i pare. Nakon nekog vremena tlak će se stacionirati na novu vrijednost zbog povećane entalpije u bubnja. To povećanje tlaka će utjecati na povećanje stacionarnog protoka pare i napojne vode kako bi se održala željena razina kapljevine u bubnju.

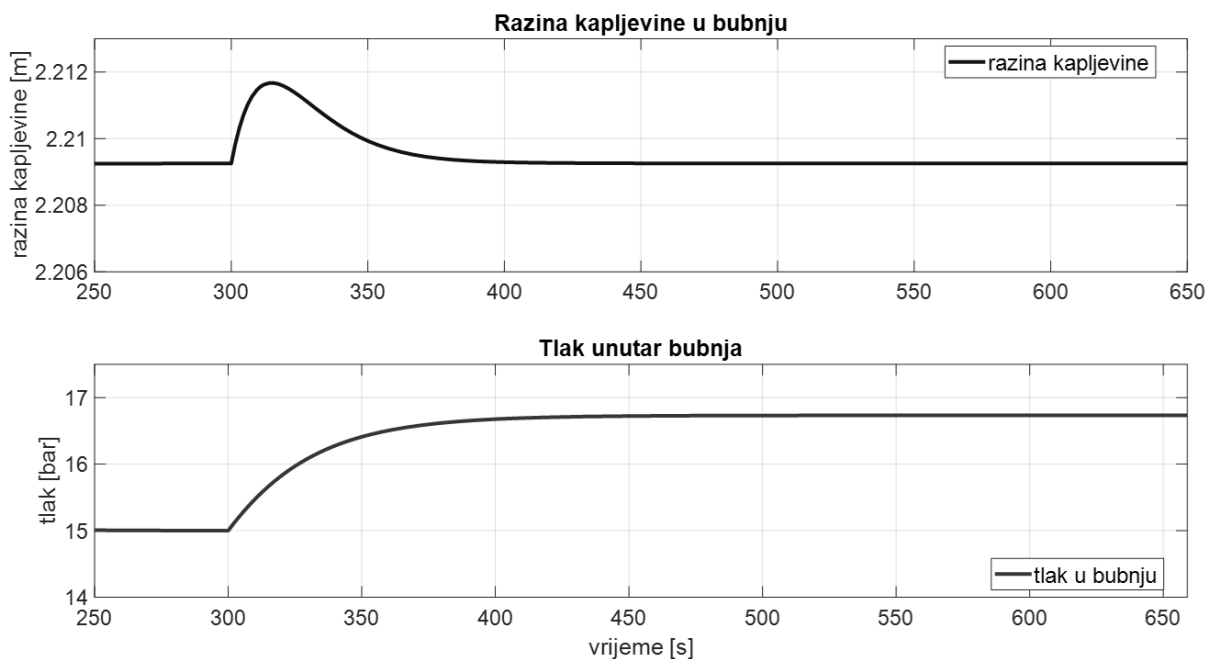


**Slika 29. Odziv protoka napojne vode i pare pri toplinskom preopterećenju, jednokomponentna regulacija**

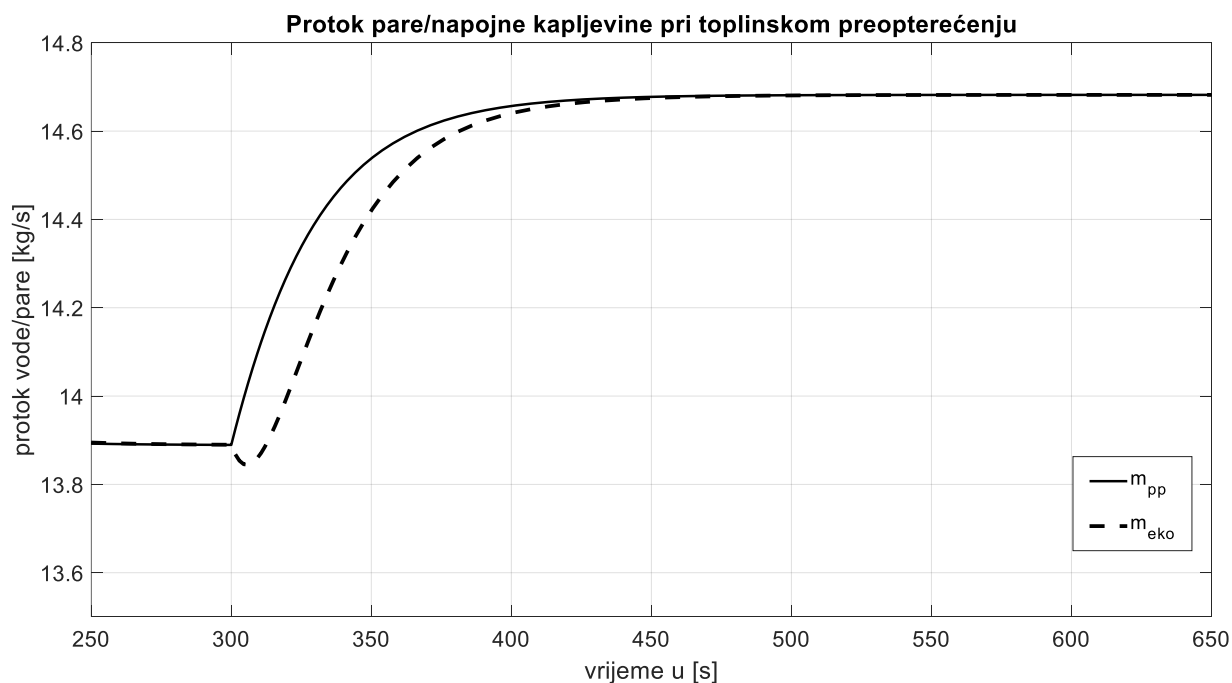
Na slikama 28 i 29 je prikazan odziv sustava sa istim regulacijskim parametrima kao i u poglavlju 4.2.1 na toplinsko preopterećenje. U 50 sekundi došlo je do povećanja sadržaja pare na izlazu iz ekonomajzera na 0.13. Odziv se ponaša prema zakonitostima objašnjenim iznad slike, te se može reći da pojava toplinskog preopterećenja predgrijača ne utječe previše na stabilnost regulacije i razinu kapljevine unutar bubnja.

### 5.1.2. Utjecaj na dvokomponentnu regulaciju

Kako dvokomponentna regulacija predviđa protok napojne kapljevine s obzirom na signal protoka koji korigira regulacijsko odstupanja razine može se očekivati bržu reakciju sustava na promjenu protoka pare. Na taj način prilikom uvođenja povećane identičnog poremećaja kao i u gornjem primjeru dolazi do manjeg pada dotoka napojne kapljevine u trenutku poremećaja.



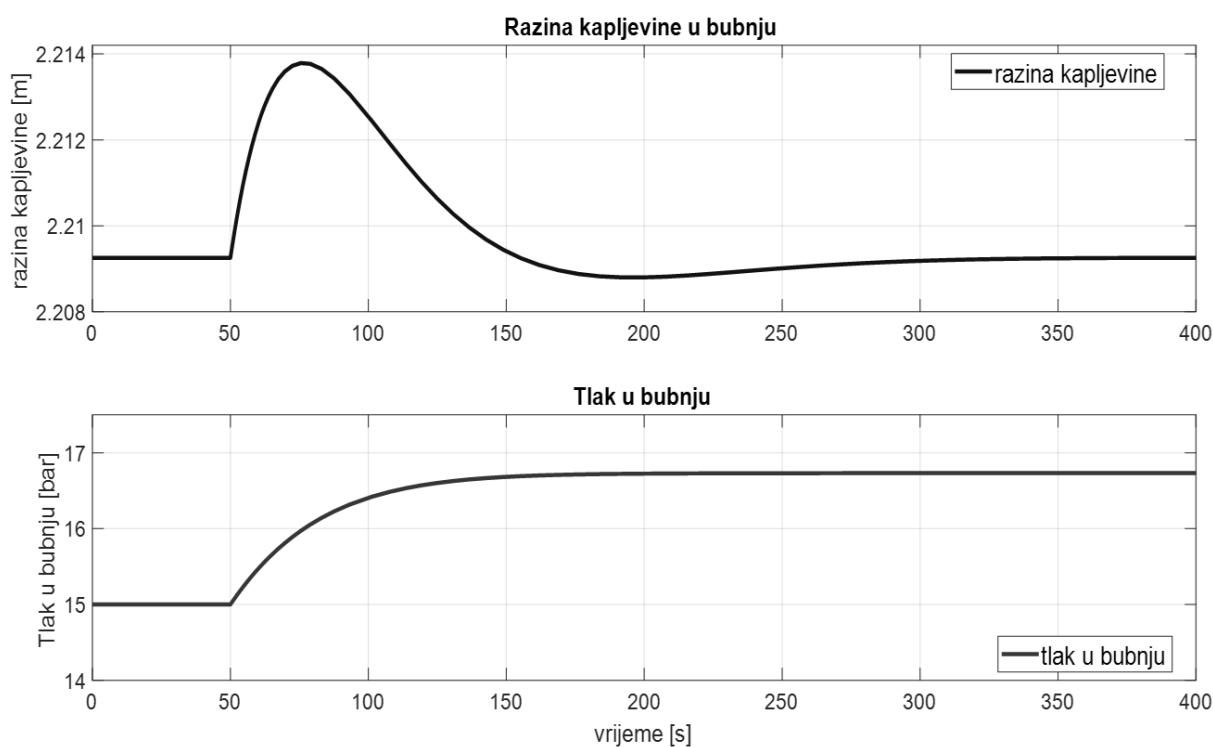
**Slika 30. Odziv tlaka i razine na toplinsko preopterećenje, dvokomponentna regulacija**  
 Krivulja protoka napojne vode će bolje pratiti promjenu protoka pare što će dovesti i do manjih oscilacija razine kapljevine u bubnju u odnosu na prijašnji primjer vidljivo na slici 31.



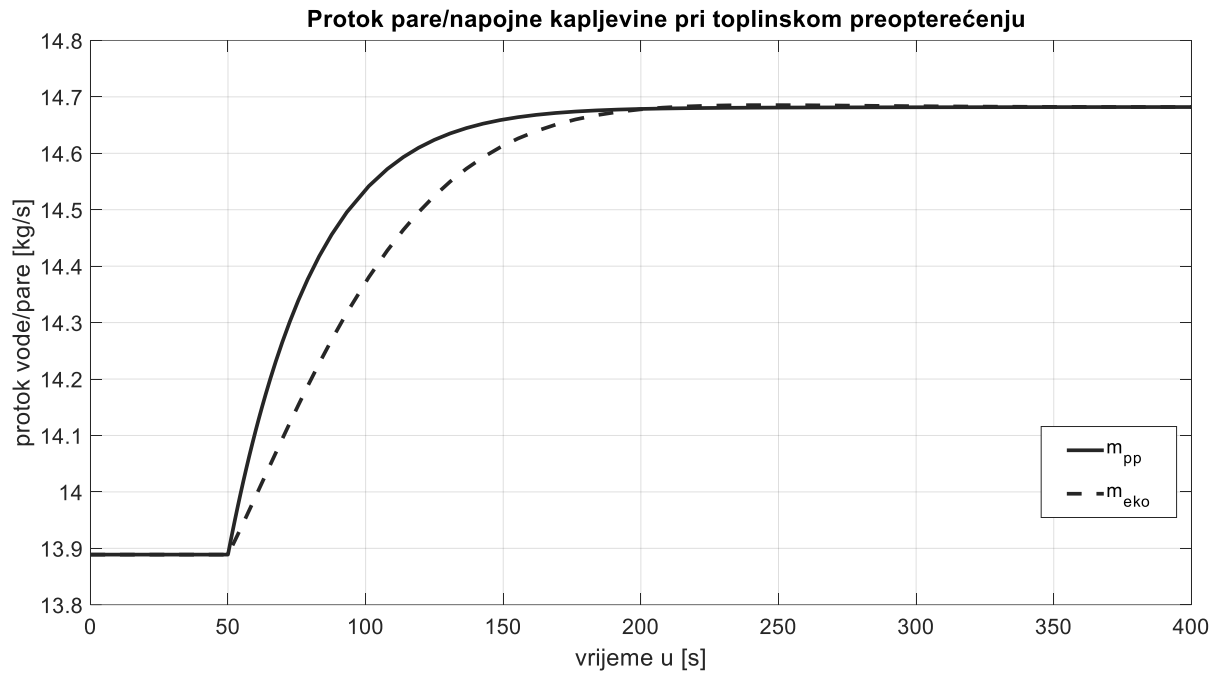
**Slika 31. Odziv protoka napojne vode i pare pri toplinskom preopterećenju, dvokomponentna regulacija**

### 5.1.3. Utjecaj na trokomponentnu regulaciju

Kako trokomponentna regulacija za regulaciju razine osim signala razine kapljevine koristi i signale protoka napojne kapljevine i pare prema pregrijaču može se očekivati drugačija reakcija sustava. Prilikom povećanja protoka pare zbog povećanog tlaka doći će i do povećanja protoka kapljevine jer regulacijski sustav na osnovu signala protoka napojne kapljevine i pare predviđa potrebno povećanje protoka napojne kapljevine i otvara ventil. Ovakva regulacija omogućava brzu, preciznu i glatku promjenu dotoka napojne vode i manje oscilacije razine kapljevine u bubnju. Na slici 33 je prikazana regulacija razine i vremenska promjena tlaka u bubnju za slučaj dotoka napojne vode s sadržajem pare od 0.13 u 50 sekundi.



Slika 32. Odziv tlaka i razine kapljevine na povećanje preopterećenja ekonomajzera



**Slika 33. Odziv protoka napojne vode i pare pri toplinskom preopterećenju, jednokomponentna regulacija**

Može se primjetiti da se sustav ponaša točno kako je opisano iznad slika te da pojava preopterećenja predgrijača ne utječe previše na stabilnost sustava i razinu kapljevine unutar bubnja. Također, trokomponentna regulacija pokazuje najmanje oscilacije i najveću točnost uspoređujući je s ostalim obrađenim konceptima te kao takva predstavlja optimalan način regulacije.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu su opisani različiti koncepti regulacije koji se primjenjuju prilikom regulacije razine kapljevine u bubnju optočnog generatora pare. Teorijsko obrađeni koncepti regulacije su primijenjeni na izrađeni model dinamike procesa promjene razine kapljevine u bubnju. Prema rezultatima simulacija, trokomponentna regulacija najbrže regulira razinu kapljevinu i to bez prevelikih oscilacija. Međutim, u izrađenom modelu i jednokomponentna regulacija daje dobre rezultate. Izrazito je bitno da se parametri regulacije, odnosno regulatora pravilno odrede. U slučajevima kada međusobni odnos između parametara regulacije nije zadovoljen dolazi do velikih oscilacija i nepravilnosti u regulaciji, a samim time i funkcioniranju postrojenja što želimo izbjeći pod svaku cijenu.

Toplinsko preopterećenje predgrijača je neželjena pojava zbog opasnosti od pregaranja cijevi ili čak pojave hidrauličkog udara koji može biti posljedica formiranja parnog čepa u slučajevima stvaranja pare u cijevima predgrijača. Kako bi se provjerilo kako ono utječe na samu regulaciju razine kapljevine provedene su simulacije pojave pare unutar cijevi predgrijača na ulazu u bubanj. Prema rezultatima simulacija preopterećenje predgrijača nije negativno utjecalo na regulaciju koja je uspješno održavala razinu kapljevine na bez većih oscilacija u razini. Trokomponentna regulacija je pokazala bolje rezultate od dvokomponentne i jednokomponentne ali može se reći da svi koncepti regulacije obavljaju svoj zadatak u skladu s ograničenjima izrađenog modela.

---

**LITERATURA**

- [1] Keser, R., Završni rad, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [2] <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/the-boiler-house/methods-of-detecting-water-level-in-steam-boilers>
- [3] Dukelow, S. G., The Controls of Boilers, 2nd Edition, Instrument Society of America, 1991.
- [4] <https://www.eurotherm.com/es/process-control-applications-es/boiler-drum-level-control/>
- [5] <https://patents.google.com/patent/US5419285A/en>
- [6] Irsag, Viktor., Završni rad, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [7] Halihal, Ali. (2018). Modeling and Control of Water Level in Boiler Drum for Nassiriyah Thermal Power Plant. Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering.

---

**PRILOZI**

- I. Dodatak: *Simulink* shema bubnja
- II. CD-R disc



Dodatak: Simulink shema bubnja

