

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Robert Anderluh**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Student:

Robert Anderluh

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Draženu Lončaru na potpori pruženoj pri izradi rada.

Robert Anderluh



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Robert ANDERLUH** Mat. br.: 0035195170

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **BRZO POVEĆANJE SNAGE TERMOENERGETSKOG BLOKA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **FAST THERMAL POWER PLANT OUTPUT INCREASE**

Opis zadatka:

Varijabilna proizvodnja vjetrolektrana postavlja složenije zahtjeve na pogon konvencionalnih postrojenja ponajprije u smislu fleksibilnijeg odziva. Kratkotrajna obustava dovodjenja pare iz nereguliranih turbinskih oduzimanja u niskotlačne zagrijače napojne vode predstavlja jednu od mjera brzog povećanja snage termoenergetskog bloka kod koje se u cilju izbjegavanja hlađenja vode u napojnom spremniku privremeno obustavlja i protok kondenzata.

U okviru rada potrebno je:

1. Izvesti matematički model dinamike termohidrauličkih procesa u kondenzatoru i napojnom spremniku termoenergetskog bloka snage 210 MW u opisanim uvjetima
2. Simulacijom matematičkog modela odrediti brzinu promjene razine kondenzata u kondenzatoru i napojne vode u spremniku
3. Odrediti očekivano povećanje snage bloka uslijed zatvaranja nereguliranih turbinskih oduzimanja u dvije pogonske točke, na 100 % i 80 % opterećenja

U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:  
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 24. veljače 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.  
**3. rok:** 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.  
**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Udjeli obnovljivih izvora .....	1
1.2. Intermitencija .....	2
2. BRZO POVEĆANJE SNAGE TERMOENERGETSKOG BLOKA .....	6
2.1. Načini brze promjene snage termoelektrane .....	7
2.2. <i>Kondenzat stop</i> .....	10
3. TEHNIČKI OPIS ANALIZIRANOG OBJEKTA .....	15
3.1. Tehnički opis modeliranih elemenata .....	15
3.1.1. Kondenzator .....	15
3.1.2. Napojni spremnik .....	17
3.2. Pogonske točke .....	18
4. MATEMATIČKI MODEL.....	21
4.1. Porast snage.....	21
4.2. Dinamika porasta snage .....	23
4.3. Porast razine kondenzata u spremniku kondenzata.....	25
4.4. Smanjenje razine napojne vode u spremniku napojne vode .....	28
5. PRIKAZ SIMULACIJA I RASPRAVA REZULTATA.....	31
5.1. Prikaz porasta snage .....	31
5.2. Prikaz dinamike porasta snage .....	32
5.3. Prikaz porasta razine kondenzata u spremniku kondenzata.....	34
5.4. Prikaz smanjenja razine napojne vode u spremniku napojne vode.....	38
5.5. Zaključak.....	42

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Struktura proizvodnje električne energije u RH [1] .....	1
Slika 2.	Udjeli u potrošnji primarne energije u EU i Hrvatskoj [2].....	2
Slika 3.	Brzina vjetra u Novalji [3].....	3
Slika 4.	Opterećenje elektroenergetskog sustava i udjeli obnovljivih izvora u proizvodnji kroz mjesec, 2010. (prvi prikaz) i predviđanja za 2020. (drugi prikaz) [4] .....	4
Slika 5.	Proizvodni kapaciteti za potrebe Republike Hrvatske u sastavu HEP grupe [1] ....	5
Slika 6.	Električna energija [1] .....	5
Slika 7.	Udjeli raznih metoda u povećanju snage [6] .....	7
Slika 8.	Porast snage koordiniranim vođenjem [7].....	9
Slika 9.	Visokotlačni "bypass" [4] .....	9
Slika 10.	Shematski prikaz metode ugradnje toplinskih spremnika toplog i hladnog kondenzata [4] .....	10
Slika 11.	Procesna shema parnoturbinskog postrojenja .....	12
Slika 12.	Skica kondenzatora analiziranog postrojenja .....	16
Slika 13.	Crtež spremnika kondenzata analiziranog postrojenja .....	16
Slika 14.	Skica napojnog spremnika.....	18
Slika 15.	Prikaz dijela postrojenja relevantnog za kondenzat stop.....	21
Slika 16.	Odziv porasta snage zatvaranjem oduzimanja prema otplinjivaču .....	24
Slika 17.	Modelska shema spremnika kondenzata .....	27
Slika 18.	Modelska shema napojnog spremnika .....	29
Slika 19.	Prikaz dinamike porasta snage za 86% opterećenja .....	33
Slika 20.	Prikaz dinamike porasta snage za 100% opterećenja .....	33
Slika 21.	Porast razine kondenzata za 86% opterećenja.....	35
Slika 22.	Porast razine kondenzata za 100% opterećenja.....	36
Slika 23.	Smanjenje razine vode u napojnom spremniku za 86% opterećenja .....	39
Slika 24.	Smanjenje razine vode u napojnom spremniku za 100% opterećenja .....	40

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Neki pogonski podaci .....	19
Tablica 2. Podaci za izračun učinkovitosti turbine.....	20
Tablica 3. Parametri prijenosnih funkcija procesa prekidanja oduzimanja.....	25
Tablica 4. Porast snage postrojenja, u postotku .....	31
Tablica 5. Porast snage postrojenja [MW] .....	31
Tablica 6. Vremena punjenja spremnika kondenzata [s] .....	37
Tablica 7. Vremena pražnjenja napojnog spremnika [s].....	41

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$P_{ti}$	W	Snaga $i$ -tog turbinskog stupnja
$m_{pi}$	kg/s	Protok pare kroz $i$ -ti turbinski stupanj
$h_{p(i-1)}$	J/kgK	Entalpija prije $i$ -tog turbinskog stupnja
$h_{pi}$	J/kgK	Entalpija poslije $i$ -tog turbinskog stupnja
$\eta_i$	/	Iskoristivost $i$ -tog turbinskog stupnja
$\eta_j$	/	Iskoristivost $j$ -tog turbinskog paketa
$OPT$	/	Opterećenje postrojenja
$P$	MW	Snaga postrojenja
$D_t$	kg/s	Dotok svježje pare
$D_{mp}$	kg/s	Dotok pare iz međupregrijača
$P_{mp}$	bar	Tlak međupregrijanja
$P_{kon}$	bar	Tlak u kondenzatoru
$D_{zi}$	kg/s	Protok pare odvođene iz turbine prema $i$ -tom zagrijaču napojne vode
$D_{otpl}$	kg/s	Protok pare odvođene iz turbine prema napojnom spremniku/otplinjivaču
$h_{zi}$	J/kgK	Entalpija pare koja se odvodi prema $i$ -tom zagrijaču napojne vode
$h_{otpl}$	J/kgK	Entalpija pare koja se odvodi prema napojnom spremniku/otplinjivaču
$h_{kon}$	J/kgK	Entalpija pare koja ulazi u kondenzator
$POST$	%	Postotak ostvarivanja <i>kondenzat stopa</i>
$K$	MW	Pojačanje
$\tau$	s	Vremenska konstanta
$M_K$	kg	Masa kondenzata u spremniku kondenzata
$m_{uK}$	kg/s	Ulazni maseni protok u kondenzator
$m_{iK}$	kg/s	Izlazni maseni protok iz kondenzatora
$h_K$	m	Razina kondenzata u kondenzatoru
$\rho_K$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća kondenzata u kondenzatoru
$A_K$	m <sup>2</sup>	Površina horizontalnog presjeka spremnika kondenzata
$M_{NS}$	kg	Masa vode u napojnom spremniku
$m_{uNS}$	kg/s	Ulazni maseni protok u napojni spremnik
$m_{iNS}$	kg/s	Izlazni maseni protok iz napojnog spremnika
$h_{NS}$	m	Razina vode u napojnom spremniku
$\rho_{NS}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća vode u napojnom spremniku
$L$	m	Dužina napojnog spremnika
$D$	m	Promjer napojnog spremnika
$S$	m <sup>2</sup>	Bočna površina spremnika ispod razine površine vode



## SAŽETAK

U današnjim uvjetima energetske tranzicije, odnosno povećanja udjela obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije, traže se rješenja koja će postojeće proizvodne kapacitete učiniti fleksibilnijima. Oni moraju omogućiti potporu energetskej tranziciji prema obnovljivim izvorima energije, odnosno amortizirati problem intermitencije obnovljivih izvora.

U radu je stavljen fokus na termoelektrane s parnoturbinskim ciklusom, dan je pregled načina brze promjene njihove snage te je analizirana potencijalna primjena metode "*kondenzat stop*" na primjeru postrojenja nominalne snage 210 MW.

Ključne riječi: obnovljivi izvori energije, intermitencija, električna energija, termoelektrana, termoenergetsko postrojenje, fleksibilnost, snaga, *kondenzat stop*

## SUMMARY

In today's conditions of energy transition and increased penetration of renewable energy sources in the market, solutions that make existing production capacities more flexible are pursued. They are expected to balance the problem of renewable energy intermittency.

This paper focuses on thermal power stations with a steam-driven turbine. An overview of rapid power change methods has been presented and a potential application of the "*condensate stop*" method has been analysed on the example of a 210 MW thermal power station.

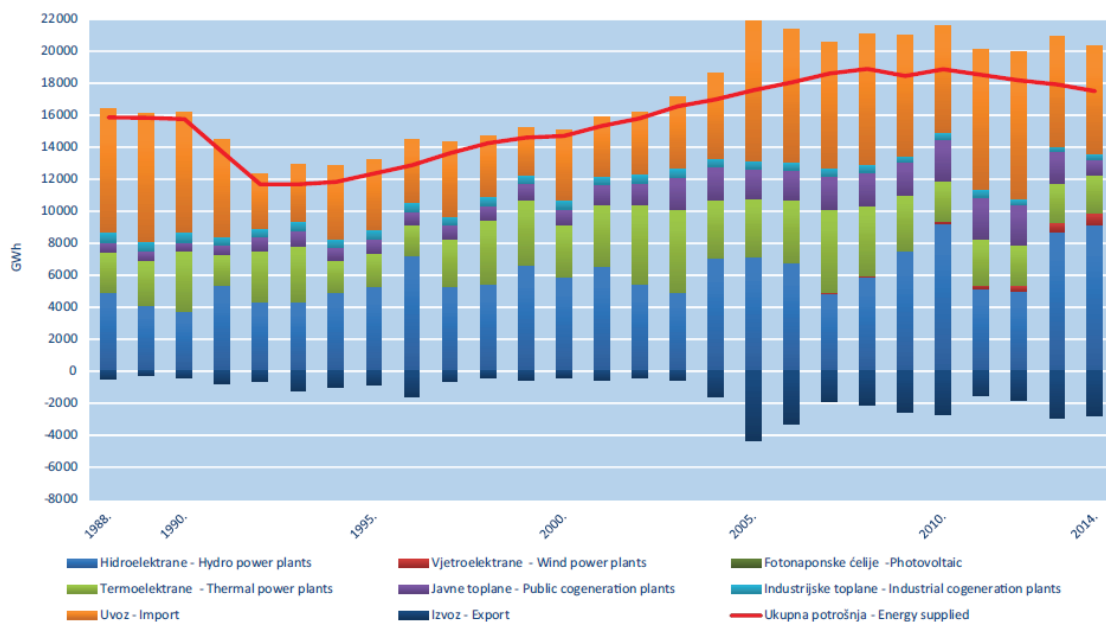
Key words: renewable energy sources, intermittency, electric energy, thermal power station, plant, flexibility, power, *condensate stop*

## 1. UVOD

Povećanje udjela obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije, odnosno intermitencija s kojom ju oni proizvode, nameću nove zahtjeve na postojeće proizvodne kapacitete, kako u svijetu, tako i u Hrvatskoj. Termoelektrane pogonjene fosilnim gorivima, izgrađene u svrhu pokrivanja baznog opterećenja, će se morati prilagoditi novim uvjetima na tržištu, što podrazumijeva njihovu fleksibilnu proizvodnju. Nameću se nova pitanja, ona o tehničkoj izvedivosti fleksibilizacije termoenergetskih postrojenja, kao i o utjecaju te fleksibilizacije na ekonomičnost i ekološku prihvatljivost rada termoenergetskih postrojenja.

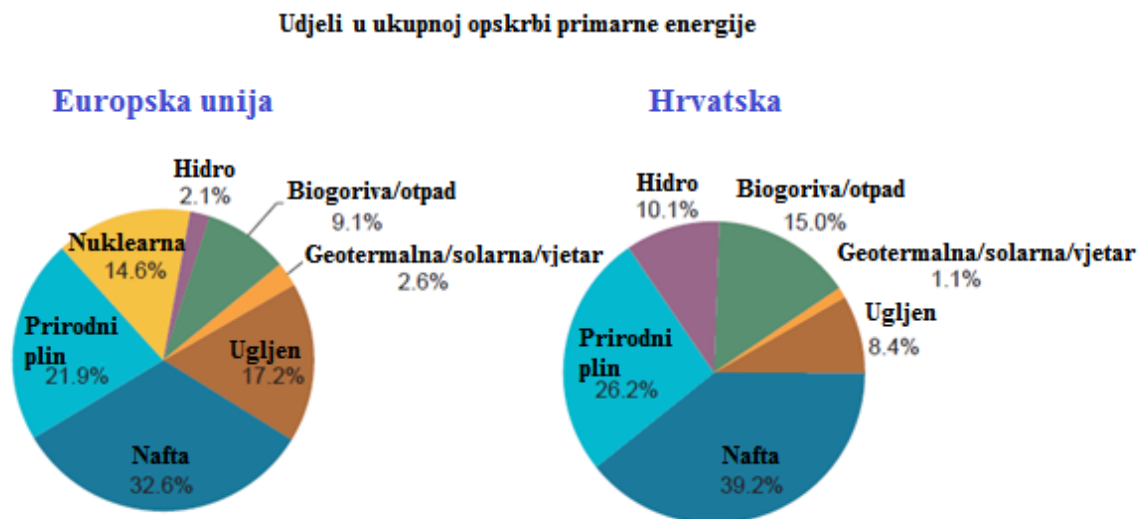
### 1.1. Udjeli obnovljivih izvora

Grafički prikaz strukture proizvodnje električne energije u Hrvatskoj kroz godine (do 2014.) dan je na Slika 1. Iz nje se vidi da intermitentni obnovljivi izvori, fotonaponske ćelije i vjetroelektrane, još zauzimaju razmjerno malen, ali rastući tržišni udio.



Slika 1. Struktura proizvodnje električne energije u RH [1]

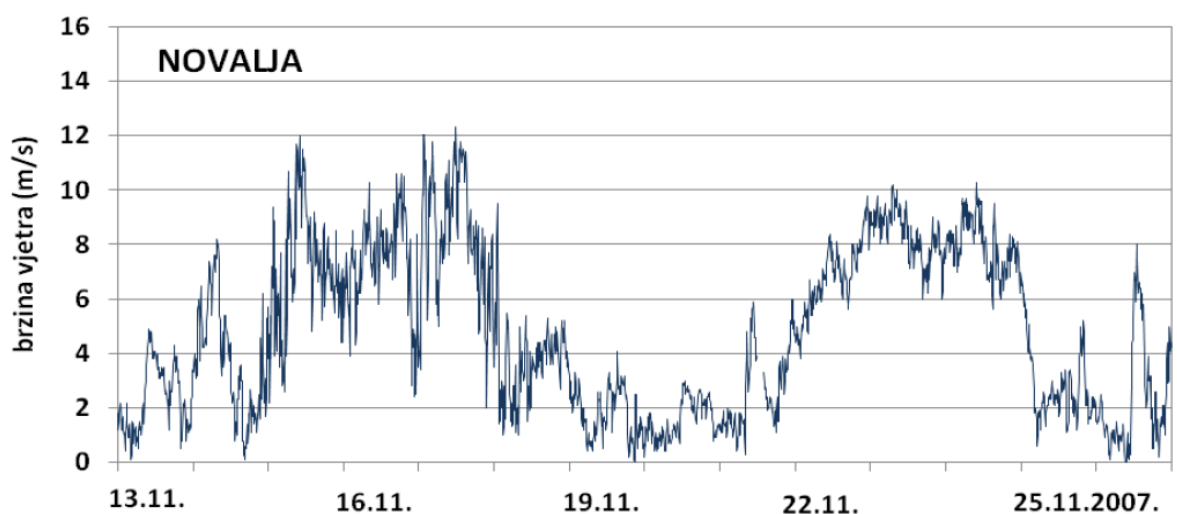
U cijeloj Europskoj uniji je situacija nešto povoljnija za obnovljive izvore energije, što se vidi iz Slika 2., koja opisuje udjele pojedinih primarnih izvora energije u ukupnoj potrošnji Europske unije i Hrvatske.



Slika 2. Udjeli u potrošnji primarne energije u EU i Hrvatskoj [2]

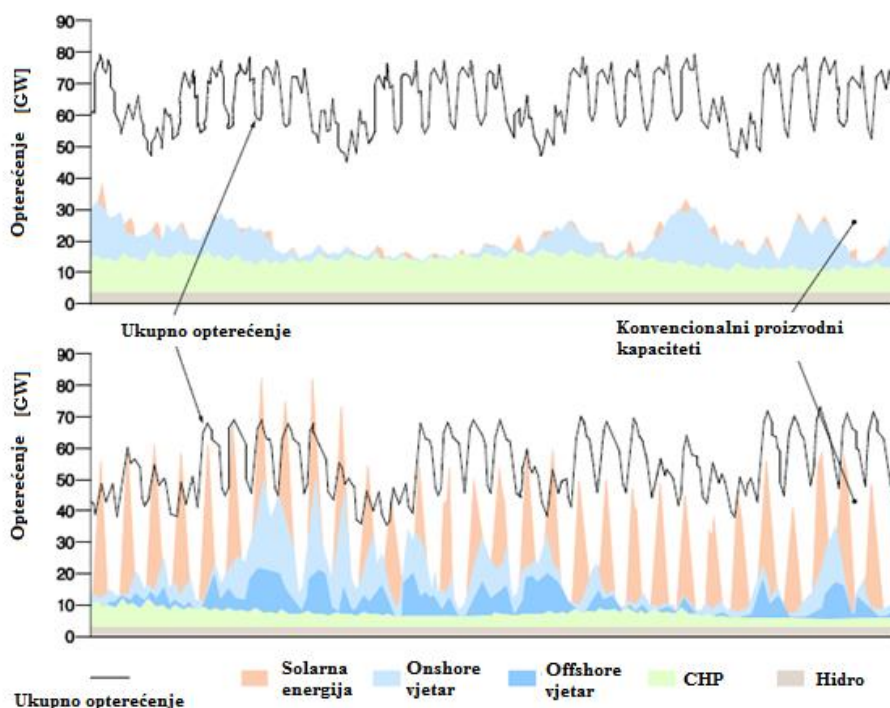
## 1.2. Intermitencija

Intermitencija proizvodnje električne energije obnovljivih izvora je jedno od njihovih najznačajnijih obilježja te otvara puno inženjerskih pitanja. Teška predvidivost proizvodnje je posljedica težine točnog predviđanja insolacije i točnog predviđanja brzina vjetra. Primjer vremenske promjene brzine vjetra na području Novalje je prikazan na Slika 3.



Slika 3. Brzina vjetra u Novalji [3]

Takvi uvjeti pred postojeće konvencionalne proizvođače električne energije stavljaju zahtjeve da se prilagode skokovitim promjenama snage koje se od njih traže. To znači da ti konvencionalni izvori moraju biti što fleksibilniji proizvođači, odnosno moraju biti u mogućnosti što brže promijeniti iznos snage koju daju u elektroenergetski sustav. Promjena ukupnog opterećenja elektroenergetskog sustava i udjela obnovljivih izvora u proizvodnji kroz mjesec na primjeru njemačkog elektroenergetskog sustava je prikazan na Slika 4.



**Slika 4.** Opterećenje elektroenergetskog sustava i udjeli obnovljivih izvora u proizvodnji kroz mjesec, 2010. (prvi prikaz) i predviđanja za 2020. (drugi prikaz) [4]

U ovom radu se razmatra pitanje brzog povećanja snage termoelektrana s parnoturbinskim ciklusom loženim na fosilna goriva. Termoelektrane predstavljaju značajan dio hrvatskog elektroenergetskog sustava te bi svaki način njihove fleksibilizacije bio dobrodošao u predstojećim energetske promjenama. Udio termoelektrana u raspoloživoj snazi HEP grupe je prikazan na Slika 5., a udio u proizvedenoj električnoj energiji na Slika 6.

Kapaciteti za proizvodnju električne energije Electricity generation capacity	Raspoloživa snaga Available power (MW)	Udio Share (%)
Hidroelektrane (HE) Hydro power plants (HPP)	2 188,5	52,0
Termoelektrane (TE) Thermal power plants (TPP)	1 479	35,2
TE Plomin d.o.o. (B) TE Plomin Ltd.	192	4,6
<b>Ukupno u Republici Hrvatskoj Total in the Republic of Croatia</b>	<b>3 857,7</b>	<b>91,7</b>
Nuklearna elektrana Krško (NE Krško) – 50% Nuclear power plant Krško (NPP Krško) – 50%	348	8,3
<b>UKUPNO TOTAL</b>	<b>4 205,7</b>	<b>100</b>

Slika 5. Proizvodni kapaciteti za potrebe Republike Hrvatske u sastavu HEP grupe [1]

		2009.	2010.	2011.	2012.	2013.	2014.
		<b>GWh</b>					
<b>Proizvodnja</b>	<b>Production</b>	13456,0	14902,1	11372,0	10755,3	14052,2	13553,8
-hidroelektrane	-hydro power plants	7493,3	9232,3	5161,7	4999,1	8727,0	9124,3
-vjetro elektrane	-wind power plants	54,2	139,1	201,0	328,7	517,3	730,0
-fotonaponske ćelije	-photovoltaic	0,1	0,1	0,1	2,4	11,3	35,20
-termoelektrane	-thermal power plants	3422,2	2494,8	2876,6	2513,1	2501,2	2374,3
-javne toplane	-public cogeneration plants	2090,3	2589,0	2620,7	2529,2	1968,8	951,8
-industrijske toplane	-industrial cogeneration plants	395,9	446,8	511,9	382,8	326,6	338,2
Uvoz	Import	7580,7	6682,4	8729,9	9230,8	6845,3	6777,1
Izvoz	Export	2577,5	2714,5	1574,3	1799,7	2975,9	2824,2
<b>Ukupna potrošnja</b>	<b>Energy supplied</b>	<b>18459,2</b>	<b>18870,0</b>	<b>18527,6</b>	<b>18186,4</b>	<b>17921,6</b>	<b>17506,7</b>
<b>Gub.prijenosa i distribucije</b>	<b>Transmiss. and distribution losses</b>	<b>2018,8</b>	<b>2021,9</b>	<b>1830,7</b>	<b>1886,8</b>	<b>1944,1</b>	<b>1763,5</b>

Slika 6. Električna energija [1]

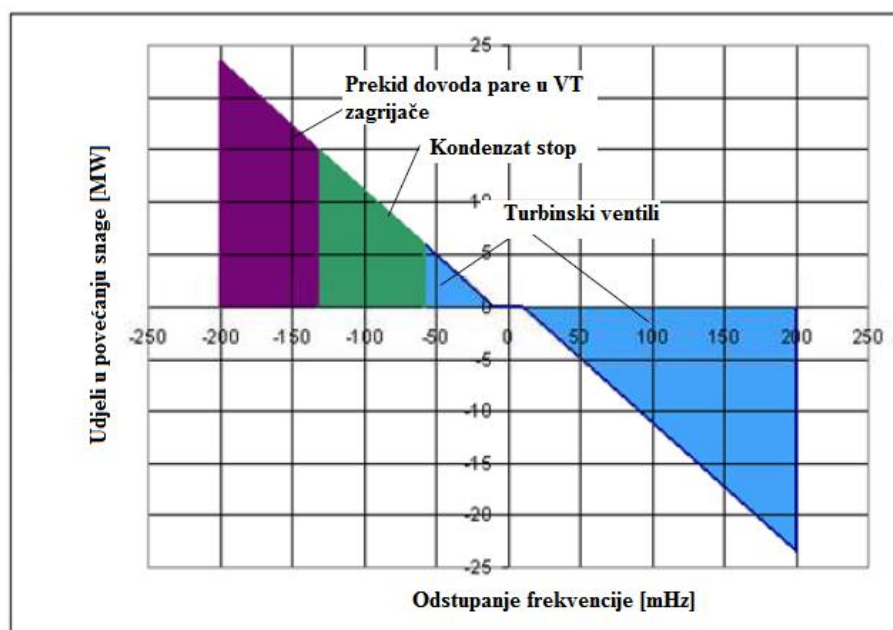
## 2. BRZO POVEĆANJE SNAGE TERMOENERGETSKOG BLOKA

Kako bi se osigurala potrebna razina kvalitete regulacije snage termoenergetskog bloka, potrebno je zadovoljiti mnoge tehničke specifičnosti koje karakteriziraju termoenergetska postrojenja. Temperature, tlakovi, protok goriva, napojne vode i sl. su parametri čijim se mijenjanjem mogu postizati različiti izlazni rezultati koje od postrojenja očekujemo. Problematična je činjenica što termoenergetska postrojenja uglavnom nisu predviđena, naročito ona stara, za brze i česte promjene snage te se, u skladu s time, prethodno navedeni parametri često, iz tehničkih i ekonomskih razloga, u radu postrojenja ne mogu ili ne smiju brzo mijenjati.

Brze i učestale promjene temperature i tlakova opterećenja raznih dijelova postrojenja mogu voditi do pojava poput oscilatornih naprezanja i zamora materijala, temperaturnog puzanja i sl. Na primjer, dolazi do loma uslijed zamora materijala ekonomajzerskih stijenki i nižih dijelova cijevi u ložištu generatora pare, degradacije svojstava materijala pregrijačkih elemenata, pucanja turbinskih lopatica itd. [5]. Čak i ako stavimo na stranu dugoročne štetne utjecaje na trajnost postrojenja, vremenski gradijent snage postrojenja ostvariv uobičajenim načinima promjene snage jednostavno nije moguće povećati iznad određene razine, određene svojstvima postrojenja.

Na Slika 7. je prikazan jedan od načina rješenja problema brze regulacije snage termoenergetskog bloka. Udjeli raznih metoda povećanja snage su raspodijeljeni ovisno o odstupanju frekvencije elektroenergetske mreže. Pri tome se za stabiliziranje povećane frekvencije (smanjenje snage postrojenja) koristi prigušivanje turbinskih ventila, kao i kod malog pada frekvencije (povećanje snage postrojenja). Pri srednjem padu frekvencije se koristi metoda *kondenzat stop*, dok se kod najvećih padova frekvencije koristi metoda prekida dovoda pare u visokotlačne zagrijače [6].





Slika 7. Udjeli raznih metoda u povećanju snage [6]

## 2.1. Načini brze promjene snage termoelektrane

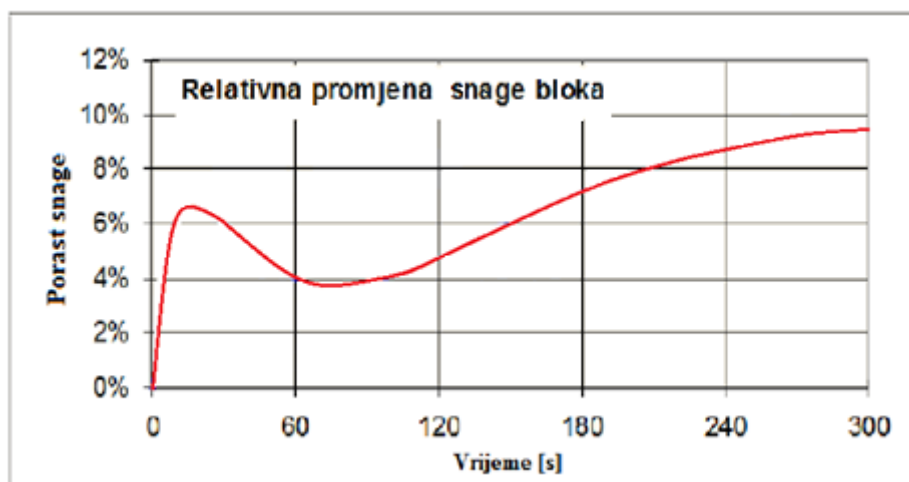
U stacionarnom pogonu, snaga postrojenja je određena toplinskim tokom koji se izgaranjem goriva oslobađa u ložištu generatora pare te je proporcionalna dotoku goriva u ložište. To čini promjenu dotoka goriva temeljnim načinom na koji možemo postići dugotrajnu promjenu snage bloka i njeno stacioniranje u nekoj novoj pogonskoj točki. U samim trenucima u kojima se odvija promjena snage bloka, pogonsko stanje je nestacionarno i praćeno je procesima akumulacije energije i mase u pojedinim dijelovima postrojenja. Povećanjem ili smanjenjem dotoka goriva u ložište se postiže povećanje ili smanjenje proizvodnje pare u generatoru pare te posljedično i povećanje ili smanjenje protoka pare kroz turbinu, odnosno snage turbogeneratora. [7]

Proces povećanja snage postrojenja povećanjem dotoka goriva u ložište je relativno spor proces. Od trenutka u kojem se počinje povećavati dotok goriva do trenutka u kojem se primjećuje početak porasta snage turbogeneratora prolazi više od tridesetak sekundi, a vrijeme do dostizanja željene snage se mjeri u minutama [7]. Uzrok postojanju opisane vremenske zadržke odziva je toplinska tromost generatora pare. Ukratko, pri povećanju dotoka goriva u ložište se povećava toplinski tok između dimnih plinova i stijenki vodeno-parnog trakta. Dio

nastalog povećanja toplinskog toka se pohranjuje u cijevnom sustavu generatora pare, a samo se preostali dio prenosi parom u turbinu. [7]

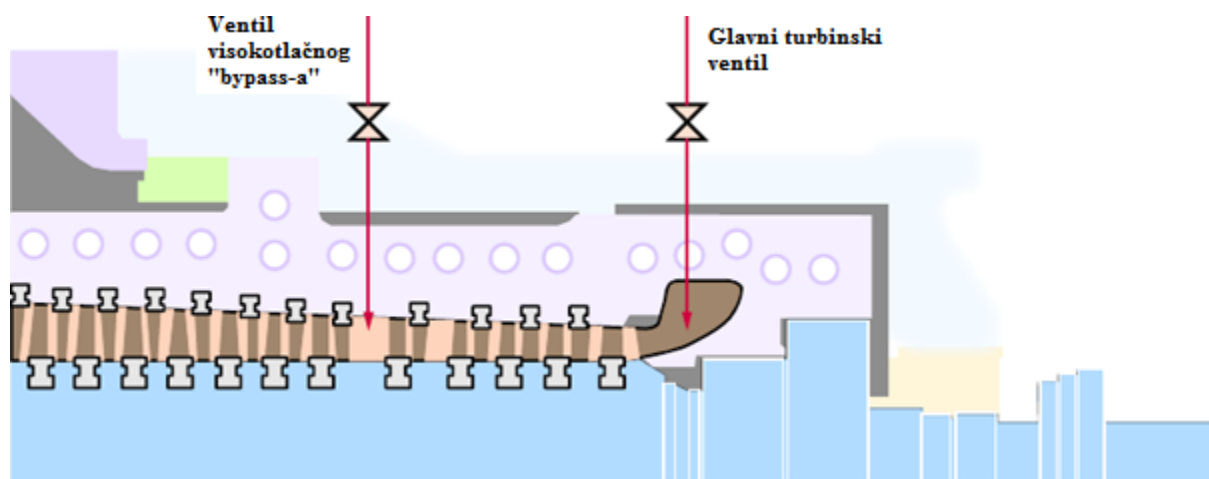
Opisanoj tromosti postrojenja se može doskočiti na način da iskoristimo svojstvo akumulativnosti postrojenja, odnosno da ga promatramo kao kratkoročnog spremnika energije. Energija akumulirana u postrojenju se može upotrijebiti npr. na način da upotrijebimo paru akumuliranu u postrojenju i akumulaciju u spremniku napojne vode. Te upotrebe akumulirane mase i energije radi povećanja snage postrojenja se nazivaju kratkoročne ili primarne mjere. To su one koje rješavaju problem vremenske zadržske, odnosno tromosti generatora pare. Sekundarne mjere su one koje povećavaju proizvodnju pare, odnosno povećanje toplinskog toka u ložištu i prijelaz na novo stacionarno stanje povećane snage [8].

Energija i masa akumulirane u parnom volumenu generatora pare i prostora između pregrijača pare i turbinskih ventila se mogu upotrijebiti na način da se otvore turbinski ventili, što uzrokuje trenutani prirast protoka pare kroz turbinu te time i snage postrojenja. U slučaju da se ne poveća dotok goriva u ložište, a time i dotok pare u akumulacioni parni volumen, masa i tlak te pare će se kroz vrijeme zbog povećanog protoka kroz turbinu smanjiti, što će imati za posljedicu i kasnije smanjenje (odnosno vraćanje na početni iznos) privremeno povećanog protoka pare kroz turbinu te time i snage postrojenja. Stoga, ako želimo postići trajno povećanje snage, otvaranje turbinskih ventila mora biti popraćeno i povećanjem dotoka goriva u ložište. Takav način promjene snage postrojenja se zove koordinirano vođenje [7]. Dakle, početno povećanje snage postrojenja se može postići primarnom mjerom otvaranja turbinskih ventila, a dugotrajno povećanje snage se osigurava sekundarnom mjerom povećanja dotoka goriva u ložište [8]. Odziv povećanja snage koordiniranim vođenjem je prikazan na Slika 8.



Slika 8. Porast snage koordiniranim vođenjem [7]

Još jedna metoda brzog povećanja snage je visokotlačni "bypass" [4]. Prikazan je na Slika 9. Kada je "bypass" otvoren, dodatna para na visokom tlaku se dovodi u visokotlačni dio turbine, nekoliko turbinskih stupnjeva iza ulaza svježje pare, čime se povećava protok pare kroz turbinu. Ova metoda daje kratkotrajno povećanje snage i do 1%/s [4]. U stacionarnom pogonskom stanju je "bypass" potpuno zatvoren.

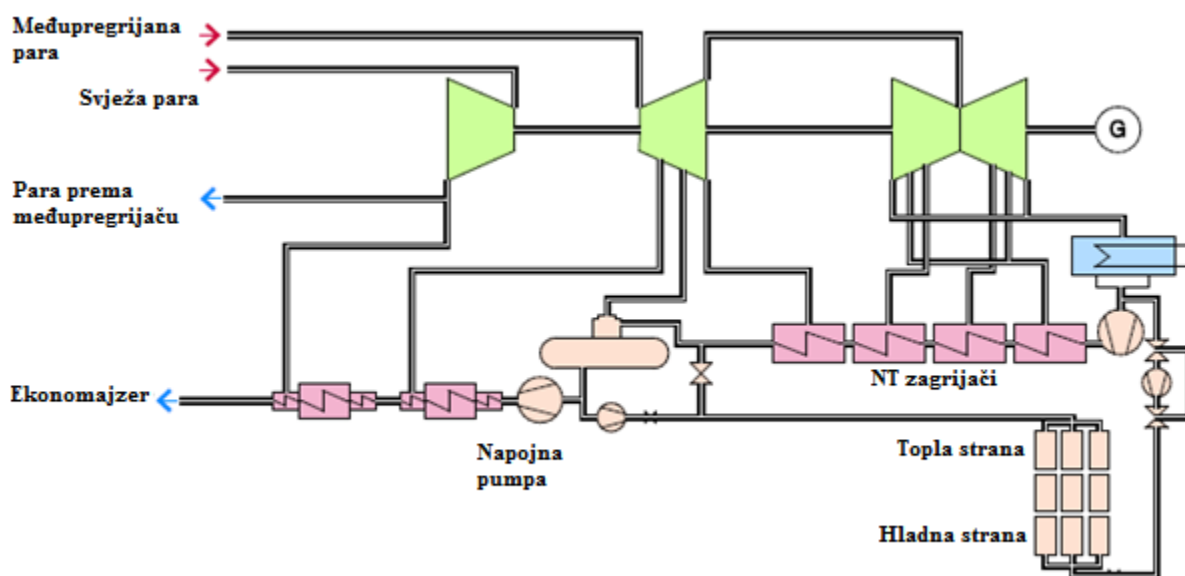


Slika 9. Visokotlačni "bypass" [4]

Treba spomenuti i metodu djelovanja na turbinska oduzimanja pare, mjeru brzog povećanja snage preusmjeravanjem kroz turbinu pare koja se u stacionarnom režimu rada oduzima turbini i vodi prema zagrijačima napojne vode i otplinjivaču [9]. *Kondenzat stop* je jedna od tih metoda te će se detaljnije obraditi u točki 2.2. Kod *kondenzat stopa* djelujemo na

turbinska oduzimanja prema niskotlačnim zagrijačima vode i otplinjivaču. Osim na niskotlačna, možemo djelovati i na visokotlačna turbinska oduzimanja prema visokotlačnim zagrijačima napojne vode.

Mjera brzog povećanja snage čiji je princip sličan kao i kod *kondenzat stopa* je ugradnja toplinskih spremnika [4]. Princip je sličan utoliko što se također zasniva na povećanju protoka pare kroz niskotlačni dio turbine, ali, za razliku od *kondenzat stopa*, do akumulacije vodene mase ne dolazi u kondenzatoru i napojnom spremniku (objašnjeno u točki 2.2.), već u zasebnim toplinskim spremnicima hladne i tople vode, koji se pune i prazne ovisno o tome odvija li se u zadanom trenutku proces povećanja ili smanjenja snage postrojenja. Shematski prikaz dan je na Slika 10.



Slika 10. Shematski prikaz metode ugradnje toplinskih spremnika toplog i hladnog kondenzata [4]

## 2.2. Kondenzat stop

Električna snaga na generatoru je izravno razmjerna snazi na parom pogonjenoj turbini, a koja se sastoji od više turbinskih stupnjeva. Snaga svakog zasebnog turbinskog stupnja se može izraziti jednadžbom (1):

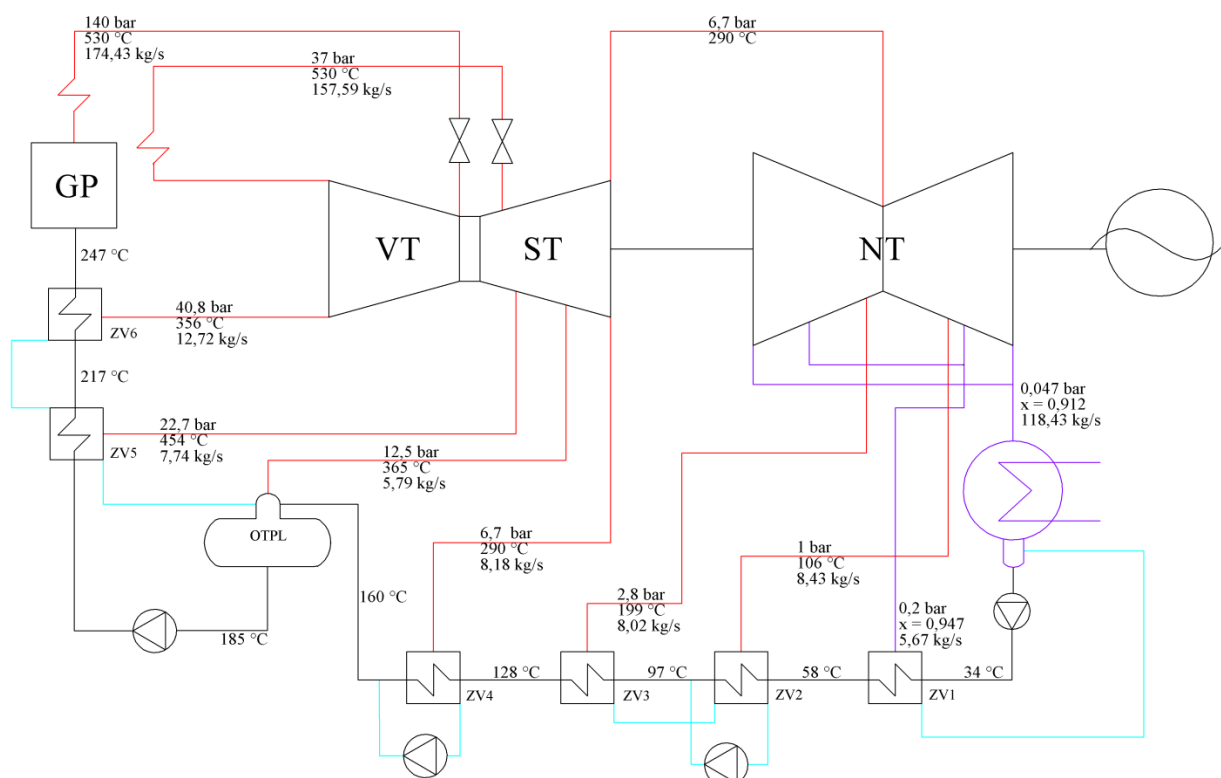
$$P_{ti} = m_{pi} \cdot (h_{p(i-1)} - h_{pi}) \cdot \eta_i \quad (1)$$

- $P_{ti}$  – snaga stupnja
- $m_{pi}$  – protok pare kroz stupanj
- $(h_{p(i-1)} - h_{pi})$  – razlika entalpija prije i poslije stupnja
- $\eta_i$  – stupanj iskoristivosti turbinskog stupnja

Jedan od načina povećanja snage koji se ovom formulom nameće je povećanje protoka pare kroz turbinu, odnosno kroz pojedinačne turbinske stupnjeve. To je fizikalni mehanizam na kojem se zasniva *kondenzat stop*, mjera povećanja gradijenta snage termoenergetskih parnoturbinskih postrojenja čija se primjena analizira u ovom radu.

*Kondenzat stop* jedna je od metoda povećanja gradijenta snage postrojenja koristeći energiju koja je u danom trenutku akumulirana u postrojenju [8], dakle radi se o primarnoj mjeri povećanja snage. Ta metoda se može ostvarivati simultano sa koordiniranim vođenjem, odnosno u trenutku kada želimo povećati snagu, otvaramo turbinske ventile kako bismo povećali dotok svježje pare u turbinu te zatvaranjem ventila na turbinskim oduzimanjima smanjujemo ili potpuno prekidamo dotok pare iz turbine prema niskotlačnim zagrijačima vode i otplinjivaču te na taj način povećavamo protok pare kroz turbinu.

P = 210 MW



Slika 11. Procesna shema parnoturbinskog postrojenja

Na primjeru postrojenja na Slika 11., vidimo da bi se *kondenzat stopom* ukupna količina pare koja prolazi kroz srednjetačni i niskotlačni dio turbine i ulazi u kondenzator povećala za zbroj masenih protoka pare koja se u stacionarnom pogonu odvodi prema niskotlačnim zagrijačima vode "ZV1", "ZV2", "ZV3", "ZV4" i napojnom spremniku s otplinjivačem "OTPL". To bi direktno povećalo snagu postrojenja.

Drugi bitan efekt koji se postiže preusmjeravanjem pare kroz niskotlačne stupnjeve turbine je taj da prestaje zagrijavanje kondenzata u dijelu između kondenzatora i napojnog spremnika/otplinjivača. Taj efekt bi u slučaju nastavljenog normalnog protoka kondenzata iz kondenzatora prema napojnom spremniku uzrokovao pad temperature kondenzata koji ulazi u napojni spremnik. Taj pad temperature želimo izbjeći sa ciljem smanjivanja oscilacije temperature vode u napojnom spremniku kako se ne bi ostvarila nepoželjna pojava zamora materijala i lošeg odvijanja procesa otplinjavanja.

Radi sprječavanja temperaturnih oscilacija i povoljnog odvijanja otplinjavanja protok kondenzata iz kondenzatora se smanjuje ili prekida djelovanjem na pumpu na izlazu iz kondenzatora.

Prekid protoka kondenzata iz kondenzatora je uzrok dvama bitnim događajima u postrojenju: razina kondenzata u kondenzatoru počinje rasti, a razina napojne vode u spremniku napojne vode počinje opadati. Oba događaja su posljedica zakona očuvanja mase. Razina kondenzata raste jer se kondenzat prestaje odvoditi iz kondenzatora dok para nastavlja nadolaziti u kondenzator iz turbine, a zbog preusmjerenja pare koja je dosad odlazila prema zagrijačima vode, to radi čak i većim protokom nego prije *kondenzat stopa*. Razina napojne vode u napojnom spremniku pada jer se protok ulaznog kondenzata smanjuje, kao i dotok pare iz turbine, dok protok napojne vode na izlazu iz spremnika napojne vode ostaje isti kao i prije početka *kondenzat stopa*.

Te značajke procesa treba uzeti u obzir pri izvođenju *kondenzat stopa* te ga sukladno s njima pažljivo modelirati. Upravo modeliranje tih činjenica je i svrha izrade ovog rada. Dakle, osnovni ciljevi su izračun porasta snage kojeg možemo postići uporabom *kondenzat stopa* te matematički opis popratnih događaja akumulacije mase u kondenzatoru i napojnom spremniku. Opisom zbivanja u kondenzatoru i napojnom spremniku možemo doći do zaključaka o maksimalnom trajanju *kondenzat stopa* u pogonu, odnosno vremenski ga ograničiti tako da razina kondenzata u kondenzatoru ne prekorači određenu vrijednost, dok razina vode u napojnom spremniku ne smije pasti ispod određene razine.

Gornju granicu do koje razina kondenzata smije narasti definirano gornjim rubom spremnika kondenzata, odnosno spojem spremnika kondenzata s ostatkom kondenzatora.

Pustimo li da razina kondenzata naraste na još veću vrijednost, postoji opasnost da kondenzat dopre do razine na kojoj se nalaze kondenzatorske cijevi s rashladnom vodom, a to je pojava koju želimo izbjeći radi povoljnog odvijanja procesa kondenzacije.

Donju granicu razine vode u napojnom spremniku definiramo na trećini promjera napojnog spremnika. Ako je razina vode u napojnom spremniku preniska, postoji opasnost od njegovog "isušivanja". To svakako pri ostvarivanju *kondenzat stopa* želimo izbjeći.

Razlika *kondenzat stopa* s obzirom na metodu ugradnje termalnih spremnika, opisanu u točki 2.1., je to što je za njegovu primjenu u postojećim postrojenjima potrebna manja količina dodatne tehnološke opreme. Umjesto ugradnje termalnih spremnika, za odvijanje procesa povećanja snage kao spremnike koristimo kondenzator i spremnik napojne vode.



### 3. TEHNIČKI OPIS ANALIZIRANOG OBJEKTA

Postrojenje na čijem je primjeru analizirano ostvarivanje *kondenzat stopa* je kondenzacijska termoelektrana s jednim protočnim generatorom pare i jednom kondenzacijskom turbinom, izgrađena 2000. godine. Kao pogonsko gorivo služi kameni ugljen, a nominalna snaga postrojenja je 210 MW električne energije. Procesna shema postrojenja je već ranije prikazana na Slika 11.

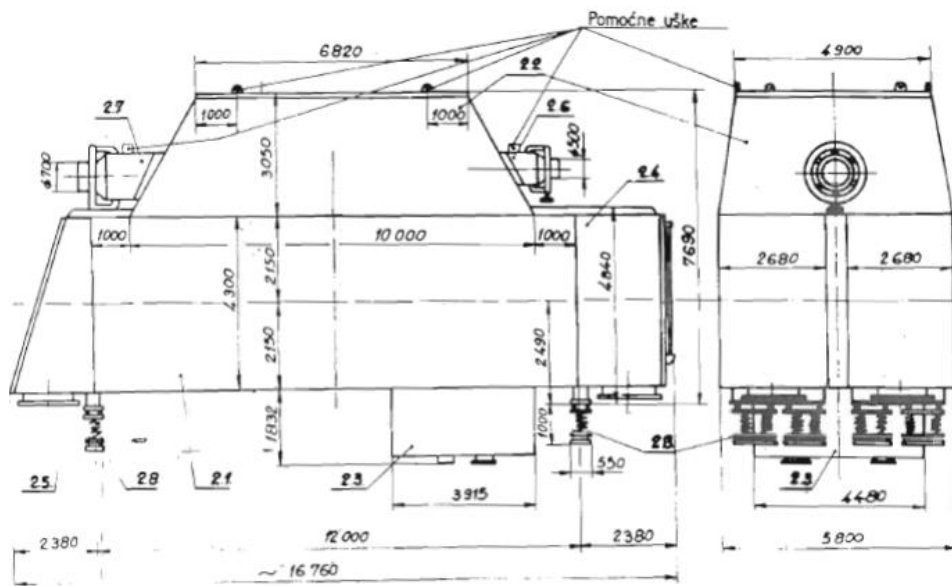
#### 3.1. Tehnički opis modeliranih elemenata

U radu su modelirani kondenzator, odnosno njegov "*hotwell*" (spremnik kondenzata), i napojni spremnik/otplinjivač.

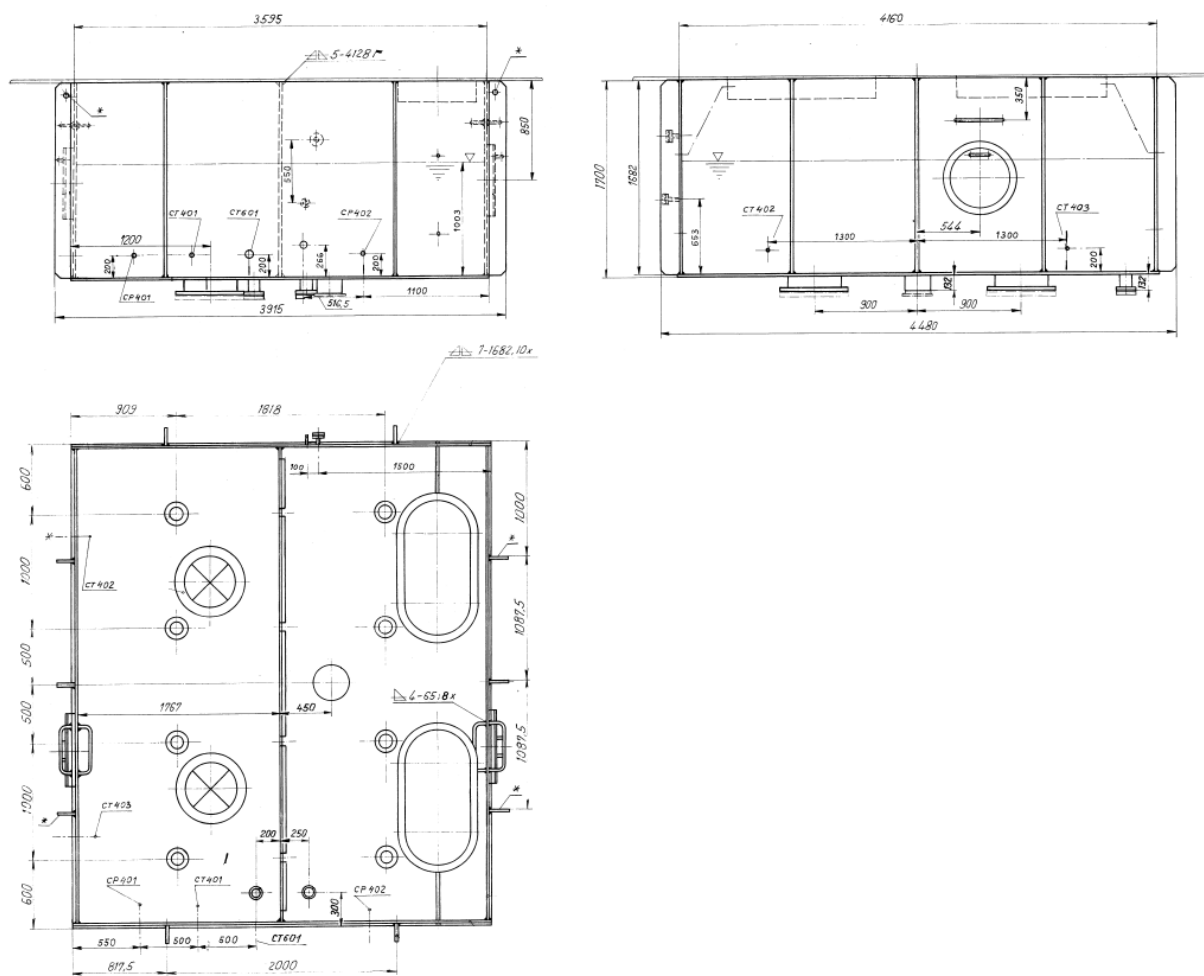
##### 3.1.1. Kondenzator

Kondenzator je jedan od elemenata termoenergetskih postrojenja te je njegova glavna svrha omogućiti kondenzaciju i ponovnu uporabu mokre pare koja izlazi iz turbine. Kada se ta para ne bi upotrebljavala na taj način, morali bismo ju na ulazu u generator pare nadomještati svježom vodom. To bi predstavljalo veliku potrošnju vode, oko 100 kg/s (na primjeru analiziranog postrojenja), te velik trošak za kemijsku pripremu demineralizirane vode, koja je nužna pretpostavka za povoljan rad postrojenja. Također, u kondenzatoru se održava podtlak (u stacionarnom režimu oko 0,05 bara apsolutnog tlaka) što znači da je pad tlaka u turbini veći nego što bi bio kada bi na izlazu iz turbine bio atmosferski tlak, a veći pad tlaka na turbini znači i veću snagu turbine.

Kako bi para koja dolazi iz turbine mogla kondenzirati, moramo odvoditi toplinu. To se u ovom slučaju postiže rashladnom morskom vodom. Kondenzator analiziranog postrojenja je prikazan na Slika 12., a njegov spremnik kondenzata na Slika 13.



Slika 12. Skica kondenzatora analiziranog postrojenja



Slika 13. Crtež spremnika kondenzata analiziranog postrojenja

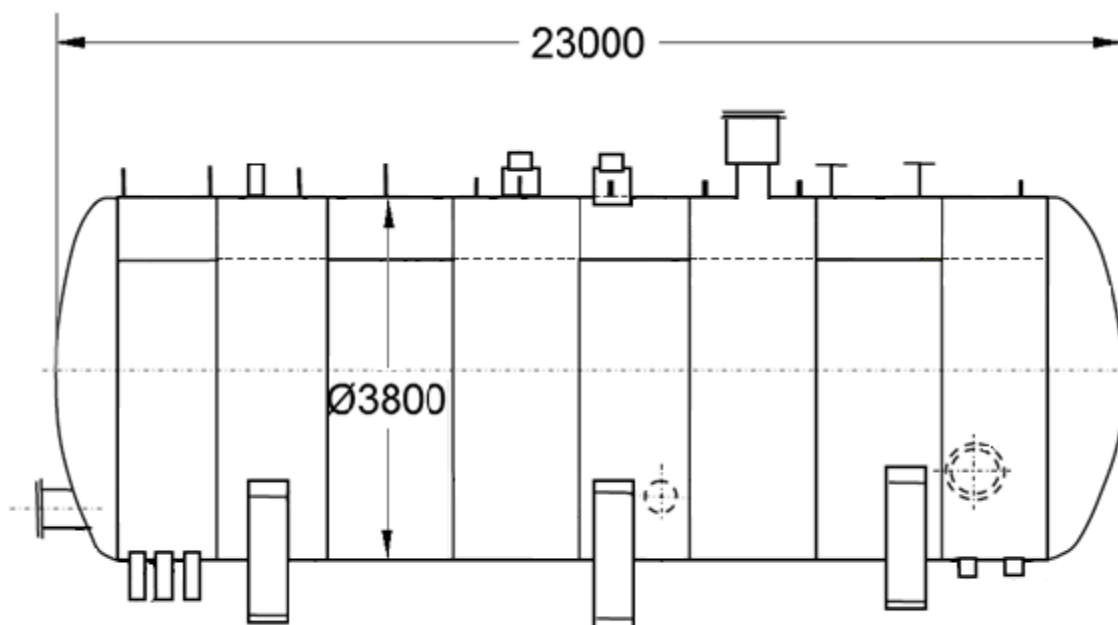
Prikazani kondenzator je površinski izmjenjivač topline koji se sastoji od četiri cijevna snopa sa ravnim rashladnim cijevima (s jednim prolazom). Kroz cijevi struji rashladna voda, protokom od oko 8000 kg/s, a na vanjskoj površini cijevi kondenzira para koja dolazi iz zadnjeg stupnja turbine. Plašt je pravokutnog presjeka, a s njegove prednje i stražnje strane se nalaze po dvije vodne komore u kojima se nalazi rashladna morska voda. S gornje strane plašta se nalazi grlo kondenzatora spojeno s ispušnim kućištem turbine. Na grlu kondenzatora se nalaze i uređaji za uvođenje pare iz mimovoda i iz voda za upuštanje. Na dnu plašta nalazi se spremnik kondenzata u kojem se u pogonu održava određena razina kondenzata, potrebna za dotok u kondenzatnu pumpu.

### **3.1.2. Napojni spremnik**

Napojni spremnik je jedan od elemenata termoenergetskih postrojenja te je njegova svrha skladištenje napojne vode koja se na izlazu iz spremnika napojnom pumpom šalje dalje prema generatoru pare [10]. U analiziranom postrojenju je ugrađen tip napojnog spremnika koji ujedno služi i kao otplinjivač (Stork). Svrha otplinjivača je da iz kondenzata (i dodatne svježe napojne vode) ukloni plinove (primarno kisik) koji bi u slučaju da ih se ne ukloni mogli biti štetni za generator pare, odnosno uzrokovati koroziju njegovih elemenata. Također, u otplinjivaču se odvija i predgrijavanje napojne vode, što je povoljno za stupanj iskoristivosti postrojenja.

Fizikalni proces otplinjavanja se temelji na Henryjevom i Daltonovom zakonu [11]. Henryjev zakon govori da je koncentracija plina otopljenog u kapljevine proporcionalna parcijalnom tlaku plina koji se nalazi iznad te kapljevine, a Daltonov zakon govori da je parcijalni tlak smjese plinova jednak zbroju parcijalnih tlakova svih njenih komponenata. Proces otplinjavanja se konkretno postiže prevođenjem pare oduzete iz turbine preko vode koju želimo otpliniti te njenim zagrijavanjem na temperaturu isparavanja, čime se postiže otpuštanje plinova otopljenih u vodi.

Napojni spremnik/otplinjivač analiziranog postrojenja je prikazan na Slika 14.



Slika 14. Skica napojnog spremnika

### 3.2. Pogonske točke

Podaci o radu postrojenja, odnosno podaci o tlakovima, temperaturama, protocima i sl. u raznim dijelovima postrojenja su dobiveni od osoblja termoelektrane. Neki od njih su prikazani u Tablica 1. Podaci potrebni za izračun učinkovitosti turbine, po jednadžbi (2), su prikazani u Tablica 2., a također su dobiveni od osoblja.

$$\eta_j = k \cdot OPT^r \quad (2)$$

Tablica 1. Neki pogonski podaci

Pogonska točka			1	2
$P$	Snaga postrojenja	MW	210,00	180,79
$OPT$	Opterećenje	/	100%	86%
$D_t$	Dotok svježe pare	kg/s	174,43	151,75
$D_{mp}$	Dotok pare iz međupregrijača	kg/s	157,59	131,30
$P_{mp}$	Tlak međupregrijanja	bar	37,08	31,73
$P_{kon}$	Tlak u kondenzatoru	bar	0,047	0,044
$D_{z1}$	Protok pare prema ZV1	kg/s	5,67	3,33
$D_{z2}$	Protok pare prema ZV2	kg/s	8,43	6,45
$D_{z3}$	Protok pare prema ZV3	kg/s	8,02	6,14
$D_{z4}$	Protok pare prema ZV4	kg/s	8,12	6,39
$D_{otpl}$	Protok pare prema otplinjivaču	kg/s	8,18	5,03
$D_{z5}$	Protok pare prema ZV5	kg/s	7,74	7,23
$D_{z6}$	Protok pare prema ZV6	kg/s	12,72	10,13

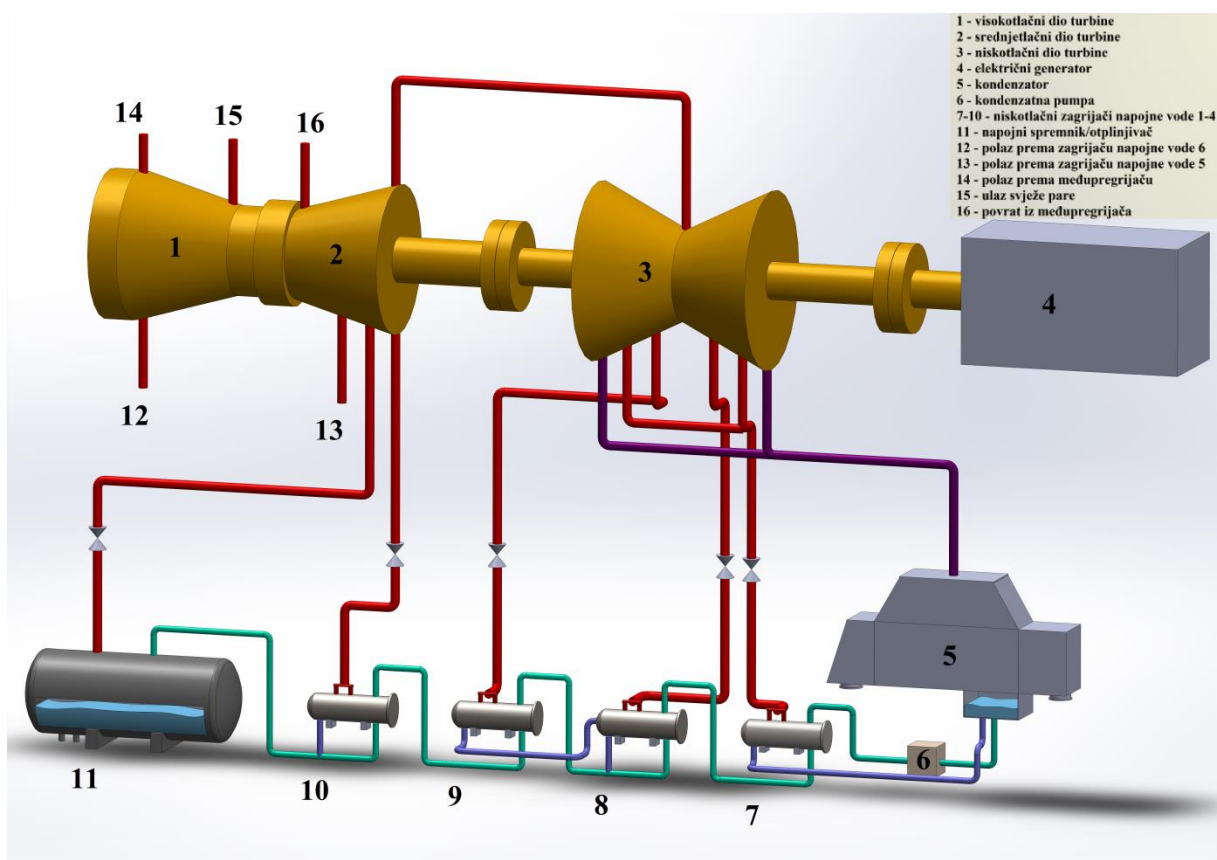
Tablica 2. Podaci za izračun učinkovitosti turbine

<b>Turbinska grupa</b>	<i>k</i>	<i>r</i>
1.	0,8576	0,02
2.	0,8576	0,02
3.	0,9122	0,02
4.	0,9122	0,02
5.	0,9122	0,02
6.	0,9122	0,02
7.	0,8576	0,02
8.	0,8576	0,02

## 4. MATEMATIČKI MODEL

Matematički model analiziranog slučaja opisuje nekoliko tehničkih problema:

- porast snage postrojenja
- porast razine kondenzata u spremniku kondenzata
- smanjenje razine napojne vode u spremniku napojne vode



Slika 15. Prikaz dijela postrojenja relevantnog za *kondenzat stop*

### 4.1. Porast snage

Porast snage postrojenja  $\Delta P$  se ostvaruje na račun povećanja protoka pare kroz srednjetačni i niskotlačni dio turbine. Ukupno raspoloživ porast snage ostvaren *kondenzat stopom* se računa zbrajanjem povećanja snage u svim relevantnim turbinskim paketima po sljedećoj jednadžbi:

$$\begin{aligned}
\Delta P = & [\eta_4 \cdot D_{otpl} \cdot (h_{otpl} - h_{z4}) + \\
& \eta_5 \cdot (D_{otpl} + D_{z4}) \cdot (h_{z4} - h_{z3}) + \\
& \eta_6 \cdot (D_{otpl} + D_{z4} + D_{z3}) \cdot (h_{z3} - h_{z2}) + \\
& \eta_7 \cdot (D_{otpl} + D_{z4} + D_{z3} + D_{z2}) \cdot (h_{z2} - h_{z1}) + \\
& \eta_8 \cdot (D_{otpl} + D_{z4} + D_{z3} + D_{z2} + D_{z1}) \cdot (h_{z1} - h_{kon})] \cdot POST \quad (3)
\end{aligned}$$

- $\Delta P$  – ukupni prirast snage
- $D_{otpl}$  – protok pare odvođene od turbine prema napojnom spremniku/otplinjivaču
- $D_{zi}$  – protok pare odvođene od turbine prema  $i$ -tom niskotlačnom zagrijaču napojne vode
- $h_{otpl}$  – entalpija pare koja se odvodi prema napojnom spremniku/otplinjivaču
- $h_{zi}$  – entalpija pare koja se odvodi prema  $i$ -tom niskotlačnom zagrijaču napojne vode
- $h_{kon}$  – entalpija pare koja iz turbine ulazi u kondenzator
- $\eta_j$  – stupanj iskoristivosti  $j$ -te turbinske grupe
- $POST$  – postotak ostvarivanja *kondenzat stopa*

Član  $POST$  označuje postotak kojim želimo ostvarivati *kondenzat stop*. Njegova gornja granična vrijednost je 100%, što označava potpuno zatvaranje ventila turbinskih oduzimanja te potpuno prekidanje protoka iz kondenzatora. Ta vrijednost odgovara najvećem povećanju snage koje se može postići *kondenzat stopom*, ali i najbržem punjenju spremnika kondenzata, odnosno najbržem pražnjenju spremnika napojne vode te najkraćem vremenu za kojeg možemo održavati *kondenzat stop*. Njegova donja granična vrijednost je 0%, a to znači izostanak *kondenzat stopa*, potpuno otvorene ventile turbinskih oduzimanja te uobičajen protok kondenzata iz kondenzatora.

Navedena jednadžba je rješavana uporabom računalnog programa MATLAB te su rezultati u dvije različite pogonske točke, sa različitim vrijednostima postotka ostvarivanja *kondenzat stopa*  $POST$ , prikazani u zaključnom dijelu rada. Njenim rješavanjem dobivamo uvid u konačno povećanje snage termoenergetskog postrojenja, ali ne i u dinamiku tog povećanja, odnosno vrijeme koje je potrebno da se povećanje snage ostvari.



## 4.2. Dinamika porasta snage

Dinamiku porasta snage postrojenja ćemo opisati pod pretpostavkom da se porast protoka pare u turbini, odnosno snage postrojenja, uslijed zatvaranja turbinskih oduzimanja ponaša poput proporcionalnog djelovanja prvog reda. Prijenosna funkcija proporcionalnog djelovanja prvog reda u svojoj strukturi sadrži dva parametra: pojačanje  $K$  i vremensku konstantu  $T$  te je sljedećeg oblika:

$$H(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1}$$

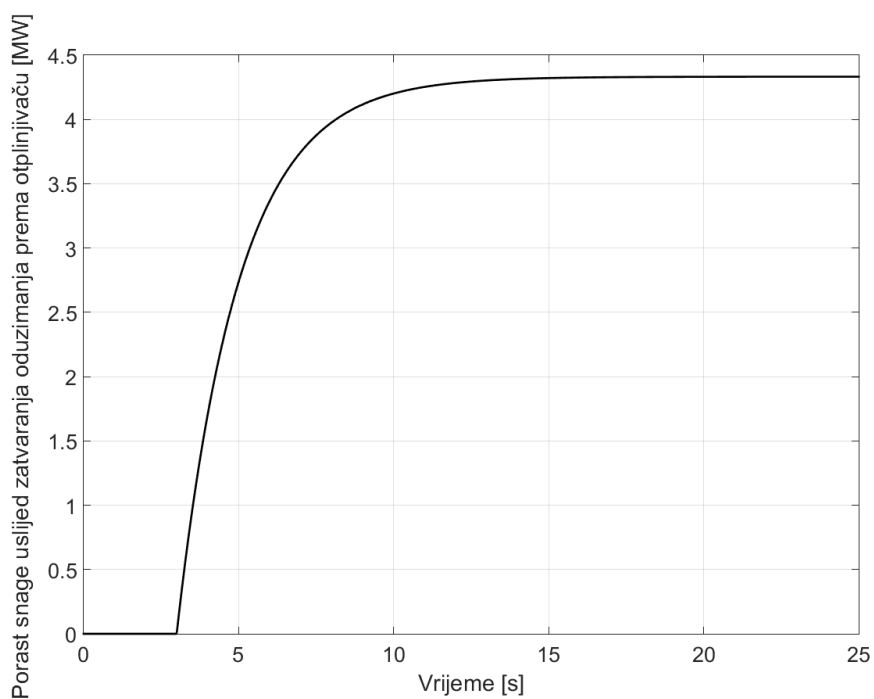
- $K$  – pojačanje
- $T$  – vremenska konstanta

Vrijednost pojačanja  $K$  odgovara asimptoti kojoj se izlazni signal proporcionalnog djelovanja približava, odnosno željenoj vrijednosti na koju će porasti snaga postrojenja, a vremenska konstanta  $T$  odgovara približno četvrtini vremena koje je potrebno izlaznom signalu da se približi vrijednosti asimptote sa manje od 2% odstupanja.

Pretpostavit ćemo da se procesi zatvaranja svakog turbinskog oduzimanja zasebno ponašaju poput proporcionalnog djelovanja prvog reda, sa zasebnim pojačanjima i vremenskim konstantama. Njihova pojačanja ćemo odrediti tako da izračunamo doprinos porastu snage zatvaranja svakog oduzimanja. Njihove vremenske konstante ćemo pretpostaviti s obzirom na njihov položaj na turbini. Pretpostavljanjem vremenskih konstanti procesa zatvaranja oduzimanja smo procijenili koliko je vrijeme potrebno da se povećan protok pare uslijed zatvaranja zasebnih oduzimanja propagira kroz turbinu. Također, zbog stlačivosti vodene pare pretpostavljamo da do povećanja protoka kroz turbinu zatvaranjem oduzimanja ne dolazi trenutno.

Ukupni odziv porasta snage ćemo dobiti zbrajanjem odziva porasta snage uslijed zatvaranja svih zasebnih oduzimanja.

Odziv porasta snage na zatvaranje zasebnog turbinskog oduzimanja je na Slika 16. prikazan na primjeru zatvaranja oduzimanja prema otplinjivaču za  $POST = 100\%$  pri 100% opterećenja postrojenja. Pojačanja i vremenske konstante zasebnih oduzimanja u tim uvjetima su navedeni u Tablica 3.



**Slika 16. Odziv porasta snage zatvaranjem oduzimanja prema otplinjivaču**

**Tablica 3. Parametri prijenosnih funkcija procesa prekidanja oduzimanja**

	$K$ [MW]	$T$ [s]
Otplinjivač	4,33	2
ZV4	5,02	1,7
ZV3	3,64	1,2
ZV2	2,48	0,8
ZV1	0,68	0,4

Opisani problem je rješavan računalnim programima MATLAB i Simulink te su rezultati u dvije različite pogonske točke, sa različitim vrijednostima postotka ostvarivanja *kondenzat stopa POST*, prikazani u zaključnom dijelu rada.

#### 4.3. Porast razine kondenzata u spremniku kondenzata

Porast razine kondenzata u spremniku kondenzata se modelirao bilancom mase u kondenzatoru. Ulazni maseni protok u kondenzator je onaj protok pare koji izlazi iz turbine prema kondenzatoru te povratni protok kondenzata iz zagrijača vode ZV1, a izlazni maseni protok je kondenzat (voda) koji se odvodi iz spremnika kondenzata. U stacionarnom stanju, zahvaljujući jednakosti ulaznih i izlaznih masenih protoka,  $m_{uK}$  i  $m_{iK}$ , vremenska derivacija mase kondenzata u spremniku je 0, odnosno masa kondenzata  $M_K$  je konstantna:

$$\frac{dM_K}{dt} = m_{uK} - m_{iK} = 0, \quad M_K = konst. \quad (4)$$

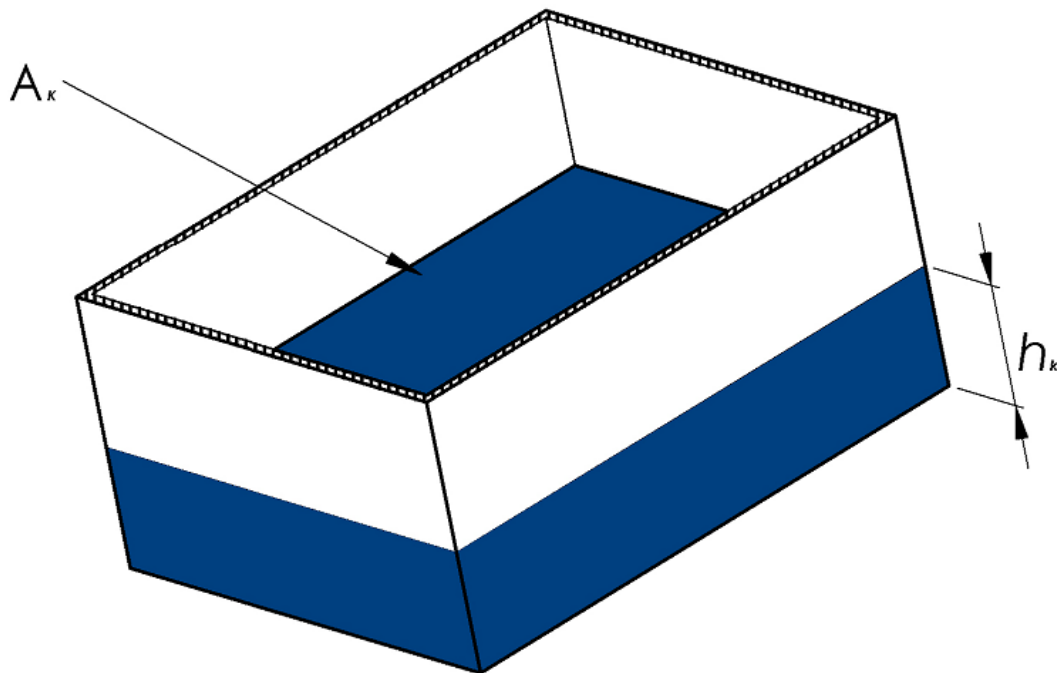
- $M_K$  – masa kondenzata u spremniku kondenzata
- $m_{uK}$  – ulazni maseni protok pare u kondenzator, protok pare iz turbine
- $m_{iK}$  – izlazni maseni protok iz kondenzatora, protok kondenzata iz kondenzatora

U trenutku pokretanja *kondenzat stopa* se ulazni maseni protok  $m_{uK}$  počinje povećavati, a izlazni protok  $m_{iK}$  se smanjuje. Te činjenice uzrokuju nestanak stacionarnog stanja i nastanak stanja u kojem je ulazni maseni protok veći od izlaznog te dolazi do akumulacije mase u kondenzatoru:

$$\frac{dM_K}{dt} = m_{uK} - m_{iK} > 0, M_K \neq konst. \quad (5)$$

Akumulaciju mase kondenzata u spremniku kondenzata poistovjećujemo sa porastom razine kondenzata  $h_K$  u spremniku kondenzata. Cilj ovog modeliranja je odrediti vrijeme koje će proteći od pokretanja *kondenzat stopa*, kada će se razina kondenzata nalaziti na nekoj početnoj vrijednosti, zatečenoj u stacionarnom pogonskom stanju, do trenutka kada će se, uslijed akumulacije kondenzata, razina kondenzata naći na razini koju smo definirali kao gornju graničnu, odnosno najvišu razinu. Ta razina će biti na gornjem rubu spremnika kondenzata na kondenzatoru. Jednadžbom (6) je opisana masa kondenzata u spremniku kondenzata, a jednadžbom (7) je opisana promjena razine kondenzata u spremniku s obzirom na dno spremnika:

$$M_K = \rho_K \cdot A_K \cdot h_K \quad (6)$$



Slika 17. Modelska shema spremnika kondenzata

$$\frac{dh_k}{dt} = \frac{1}{\rho_K \cdot A_K} (m_{uK} - m_{iK}) \quad (7)$$

- $h_K$  – razina kondenzata u spremniku kondenzata
- $\rho_K$  – gustoća kondenzata
- $A_K$  – površina horizontalnog presjeka spremnika kondenzata

Spremnik kondenzata je napravljen u obliku kvadra te njegovu površinu horizontalnog presjeka smatramo pravokutnom i konstantnom. U trenutku kada razina kondenzata prijeđe najvišu razinu u spremniku, kondenzat prelazi i u prostor ovijen unutarnjim plaštem kondenzatora te razina kondenzata raste sporije, što je posljedica veće površine horizontalnog presjeka unutarnjeg plašta kondenzatora od površine horizontalnog presjeka spremnika kondenzata.

U matematičkom modelu se bilanca energije ne uzima u obzir jer se pretpostavlja da se nastavlja kondenzacija pri sličnim uvjetima kao i prije pokretanja *kondenzat stopa*. Tlak kondenzacije je isti, kao i stanje pare koja ulazi u kondenzator iz turbine. Povećava se količina

pare koja kondenzira te se pretpostavkom prikladnog povećanja protoka rashladne vode kroz cijevi u kondenzatoru opravdava pretpostavka sličnih uvjeta kondenzacije.

Navedeni matematički model je unesen u računalni program MATLAB, odnosno dodatak Simulink, te su rezultati prikazani u zaključnom dijelu rada.

#### 4.4. Smanjenje razine napojne vode u spremniku napojne vode

Smanjenje razine napojne vode u napojnom spremniku se modelira bilancom mase u napojnom spremniku, slično kao i kod spremnika kondenzata. U stacionarnom pogonskom režimu, ulazni maseni protok u napojni spremnik je protok pare koji se dovodi iz turbine, kondenzat koji se dovodi iz kondenzatora te tok povratnog kondenzata iz zagrijača vode ZV5 i ZV6, a izlazni maseni protok je iznosom jednak ulaznom masenom protoku te se radi o napojnoj vodi koja se odvodi prema generatoru pare. Zahvaljujući jednakosti ulaznih i izlaznih masenih protoka,  $m_{uNS}$  i  $m_{iNS}$ , vremenska derivacija mase napojne vode u spremniku je 0, odnosno masa napojne vode  $M_{NS}$  je konstantna:

$$\frac{dM_{NS}}{dt} = m_{uNS} - m_{iNS} = 0, M_{NS} = konst. \quad (8)$$

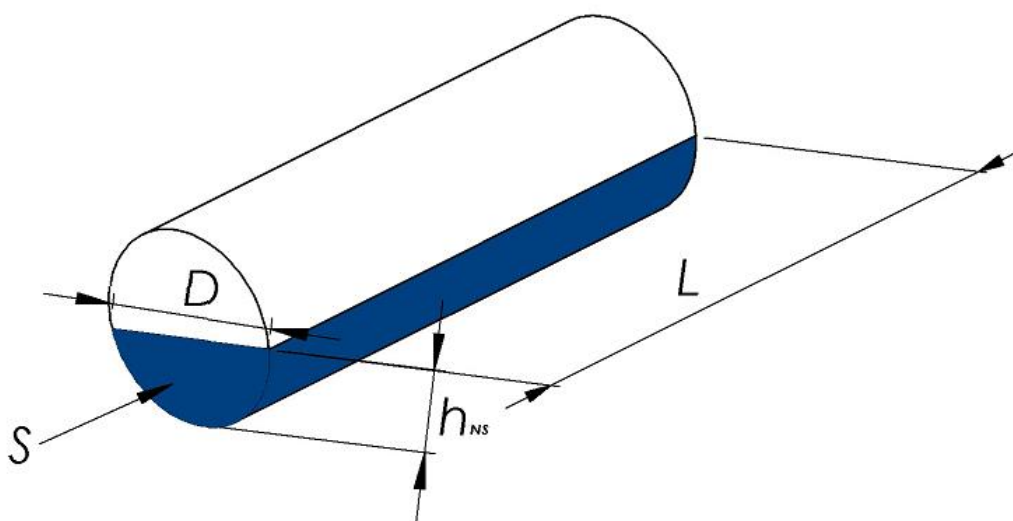
- $M_{NS}$  – masa vode u napojnom spremniku
- $m_{uNS}$  – ulazni maseni protok pare u napojni spremnik
- $m_{iNS}$  – izlazni maseni protok iz napojnog spremnika

U trenutku pokretanja *kondenzat stopa* se ulazni maseni protok  $m_{uNS}$  počinje smanjivati, a izlazni protok  $m_{iNS}$  ostaje konstantan. Te činjenice uzrokuju prestanak stacionarnog stanja i nastanak stanja u kojem je ulazni maseni protok manji od izlaznog te dolazi do smanjenja mase vode u napojnom spremniku:

$$\frac{dM_{NS}}{dt} = m_{uNS} - m_{iNS} < 0, M_{NS} \neq konst. \quad (9)$$

To smanjenje mase vode u napojnom spremniku znači pad razine vode, a cilj ovog modeliranja je odrediti vrijeme koje je potrebno da razina vode padne od neke razine koja će se zateći u pogonu u trenutku pokretanja *kondenzat stopa*, do neke niže razine koju ćemo definirati kao graničnu najnižu razinu. U ovom radu se pretpostavlja početna razina vode na pola promjera napojnog spremnika, a najnižu razinu definiramo kao onu koja se nalazi na 30% promjera napojnog spremnika, mjereno od dna napojnog spremnika. Jednadžbom (10) se opisuje masa vode u napojnom spremniku. Jednadžba kojom se opisuje smanjenje razine vode u spremniku je jednadžba koja opisuje promjenu razine kapljevine u šupljem horizontalnom cilindru, (11).

$$M_{NS} = \rho_{NS} \cdot S \cdot L \quad (10)$$



Slika 18. Modelska shema napojnog spremnika

$$\frac{dh_{NS}}{dt} = \frac{1}{2 \cdot \rho_{NS} \cdot L \cdot \sqrt{h_{NS}} \cdot \sqrt{D - h_{NS}}} (m_{uNS} - m_{iNS}) \quad (11)$$

- $h_{NS}$  – razina vode u napojnom spremniku
- $\rho_{NS}$  – gustoća vode u napojnom spremniku
- $L$  – dužina napojnog spremnika
- $D$  – promjer napojnog spremnika
- $S$  – bočna površina spremnika ispod razine površine vode

Kao i kod modeliranja kondenzatora, bilancu energije zanemarujemo te promatramo samo bilancu mase u napojnom spremniku.

Navedeni matematički model je unesen u računalni program MATLAB, odnosno dodatak Simulink, te su rezultati prikazani u zaključnom dijelu rada.



## 5. PRIKAZ SIMULACIJA I RASPRAVA REZULTATA

### 5.1. Prikaz porasta snage

U Tablica 4. i Tablica 5. vidimo dobivene poraste snage postrojenja u dvije pogonske točke; na 86% i na 100% opterećenja, odnosno na snagama od 180,79 MW i 210 MW. Također, izračunata su povećanja snage za različite vrijednosti parametra *POST*. Time smo dobili različite iznose povećanja snage, ovisno o intenzitetu povećanja snage koji želimo postići. Porasti snage su iskazani postotno u Tablica 4. (s obzirom na nominalnu snagu postrojenja) i u [MW] u Tablica 5.

**Tablica 4. Porast snage postrojenja, u postotku**

<i>POST</i> \ <i>OPT</i>	50%	75%	100%
86%	2,98%	4,47%	5,97%
100%	3,85%	5,77%	7,70%

**Tablica 5. Porast snage postrojenja [MW]**

<i>POST</i> \ <i>OPT</i>	50%	75%	100%
86%	5,39	8,08	10,47
100%	8,09	12,12	16,17

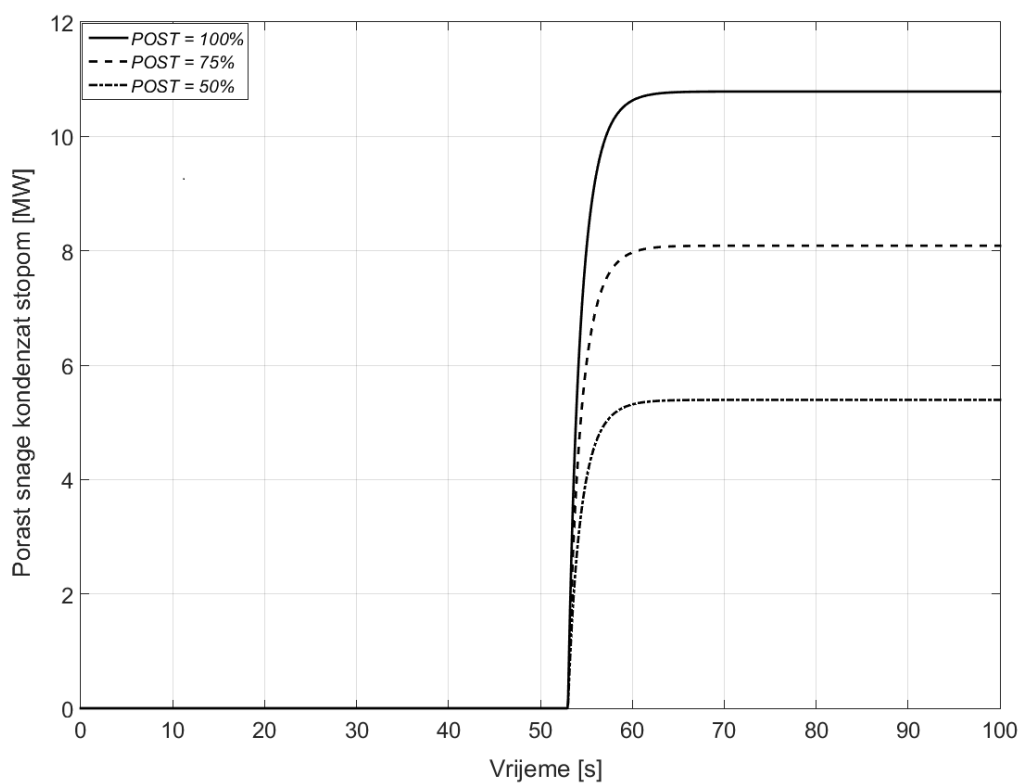
Primjećujemo da se veći porast snage postiže pri većem opterećenju, uz isti iznos parametra *POST*.

Također, pri istom opterećenju, povećanjem parametra *POST* se postiže povećanje ostvarivog porasta snage. Veza ta dva povećanja je linearna, što se može fizikalno objasniti time da parametar *POST* linearno smanjuje protoke pare iz turbine prema zagrijačima napojne vode te se ta para preusmjerava kroz turbinu, a povećanje protoka pare kroz turbinu linearno povećava snagu turbine. Do istog zaključka o linearnosti veze između parametra *POST* i povećanja snage postrojenja bismo mogli doći i jednadžbom (3), gdje je linearnost te veze lako uočiva.

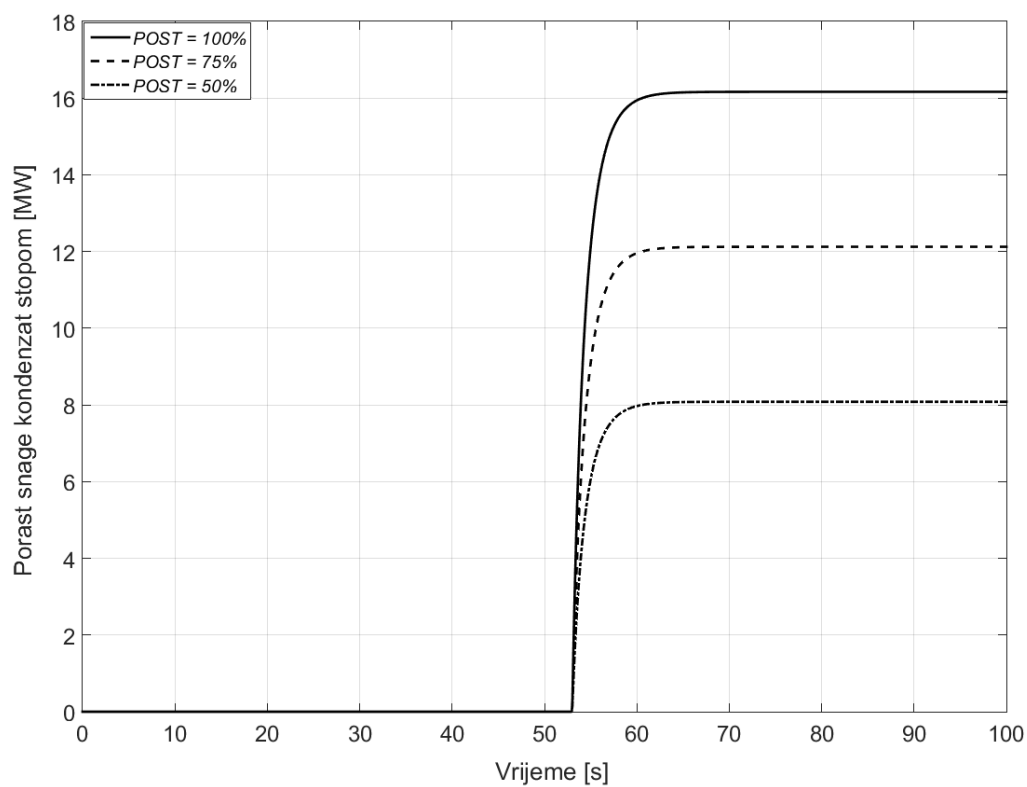
## 5.2. Prikaz dinamike porasta snage

Dinamika porasta snage postrojenja je prikazana za dva opterećenja postrojenja; 86% i 100%. Također je mijenjan i iznos parametra *POST*, on je bio iznosa 50%, 75% i 100%. Stacionarno stanje je održavano 50 sekundi, a nakon toga je 3 sekunde vremenske zadržke do trenutka početka porasta snage.

Rezultati su prikazani na Slika 19. i Slika 20. Puni porast snage se ostvaruje malo nakon 80. sekunde simulacije. Dakle, vidimo da snaga postrojenja raste do maksimalnog iznosa unutar vremena od približno 13 sekundi od početka *kondenzat stopa*.



Slika 19. Prikaz dinamike porasta snage za 86% opterećenja



Slika 20. Prikaz dinamike porasta snage za 100% opterećenja

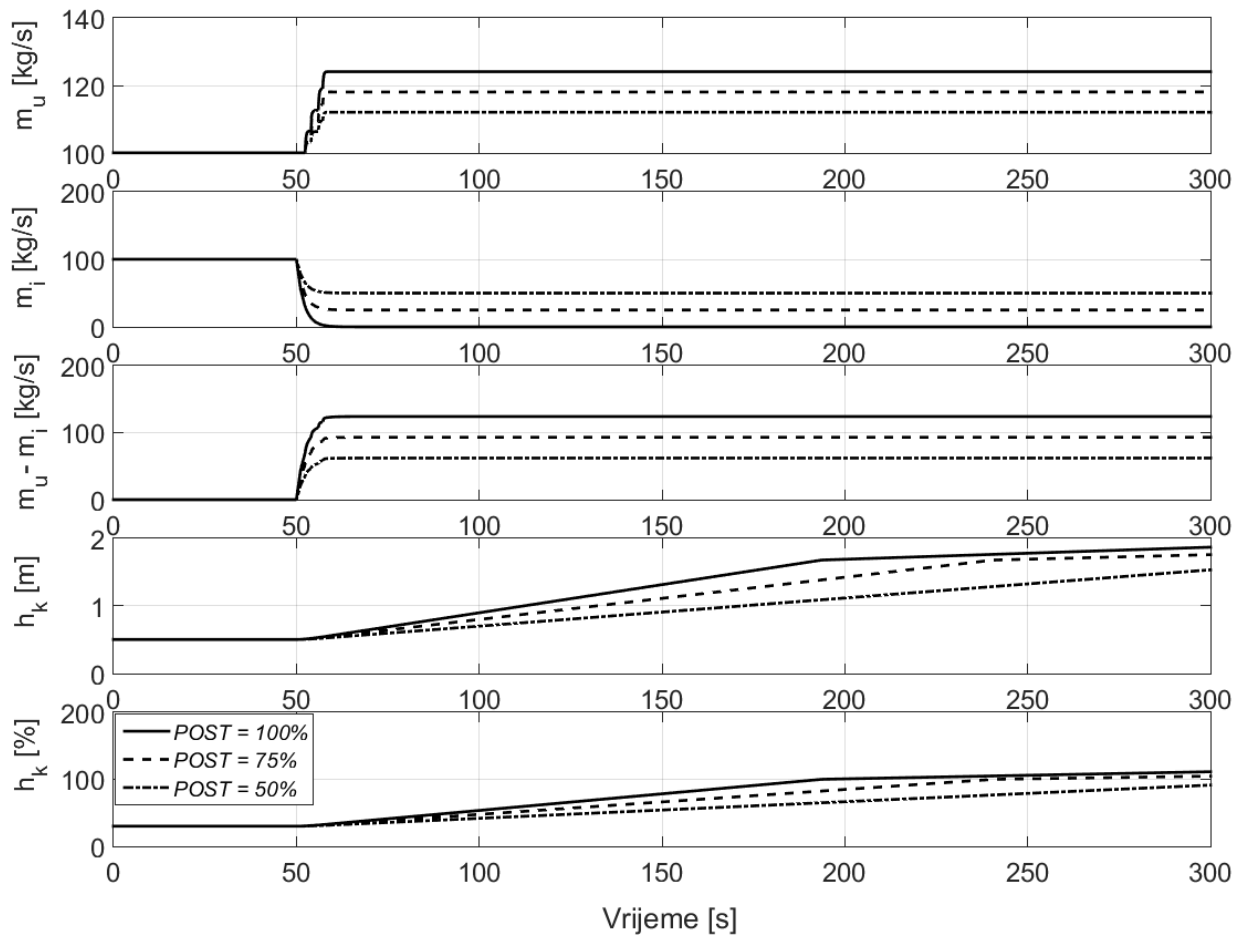
### 5.3. Prikaz porasta razine kondenzata u spremniku kondenzata

Porast razine kondenzata je također prikazan za dva opterećenja postrojenja; 86% i 100%. Također je mijenjan i iznos parametra *POST*, on je bio iznosa 50%, 75% i 100%. Prikazana je promjena ulaznih i izlaznih masenih tokova u spremnik kondenzata, njihova ukupna bilanca, porast razine kondenzata tokom odvijanja *kondenzat stopa* te postotni porast razine kondenzata (pri čemu 100% predstavlja razinu na kojoj se nalazi vrh spremnika kondenzata, odnosno njegov spoj sa ostatkom kondenzatora). Sve vrijednosti su izračunate u Simulinku, dok su dobiveni rezultati prikazani u programu MATLAB.

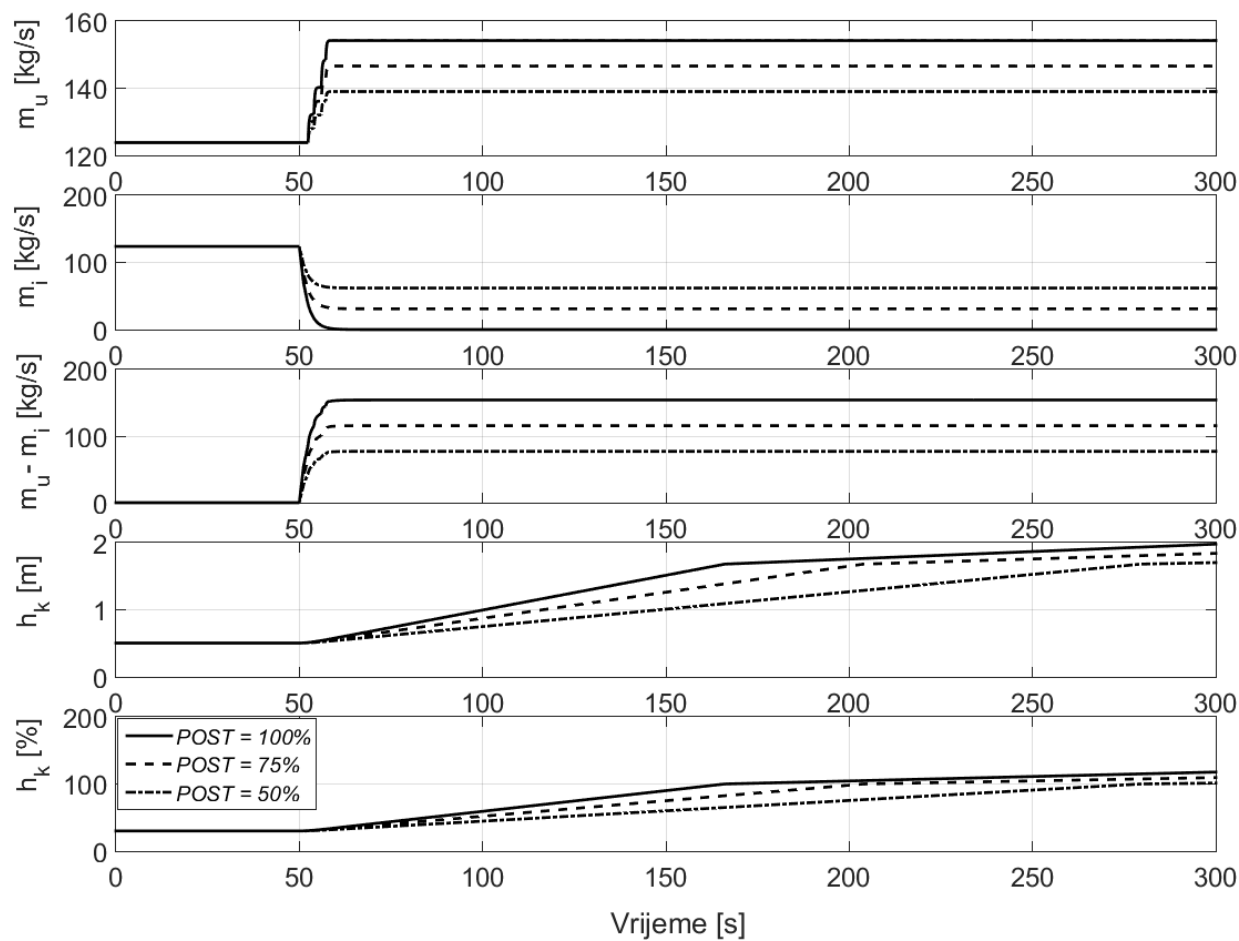
Do 50. sekunde je održavano stacionarno stanje, a u 50. sekundi je ono prestalo te je započelo odvijanje *kondenzat stopa*, dakle nastala je i neravnoteža u bilanci mase spremnika kondenzata.

Simulacija je rađena sa svrhom izračunavanja vremena koje je potrebno da kondenzat dosegne vrh spremnika kondenzata te je to vrijeme izračunato u Simulinku i navedeno za svako opterećenje i vrijednost parametra *POST* u Tablica 6.

Rezultati za 86% opterećenja su prikazani na Slika 21., a za 100% opterećenja na Slika 22.



Slika 21. Porast razine kondenzata za 86% opterećenja



Slika 22. Porast razine kondenzata za 100% opterećenja

Tablica 6. Vremena punjenja spremnika kondenzata [s]

<i>POST</i> \ <i>OPT</i>	50%	75%	100%
86%	284,8	190,7	143,7
100%	229,5	153,9	116,1

Primjećujemo da se pri većem opterećenju postrojenja, uz jednaku vrijednost parametra *POST* spremnik kondenzata napuni brže nego pri manjem opterećenju. To možemo fizikalno objasniti time da su ulazni i izlazni maseni protoci u kondenzator, kao i ulazni i izlazni protoci zagrijača napojne vode, približno proporcionalni opterećenju postrojenja. U slučaju manjeg opterećenja su manji, a u slučaju većeg opterećenja su veći. Iz toga proizlazi da se preusmjeravanjem protoka pare od zagrijača i otplinjivača prema kondenzatoru postiže brzina akumulacije kondenzata u spremniku kondenzatora koja je ovisna o tim protocima, odnosno o trenutnom opterećenju postrojenja.

Pri većoj vrijednosti parametra *POST* (na istom opterećenju postrojenja) se također postiže brže punjenje spremnika kondenzata nego pri manjim vrijednostima. To se može objasniti time da se pri većoj vrijednosti *POST* više pare preusmjerava kroz turbinu u kondenzator, a manje kondenzata se odvodi iz kondenzatora prema zagrijačima vode i napojnom spremniku, što uzrokuje bržu akumulaciju kondenzata.

#### 5.4. Prikaz smanjenja razine napojne vode u spremniku napojne vode

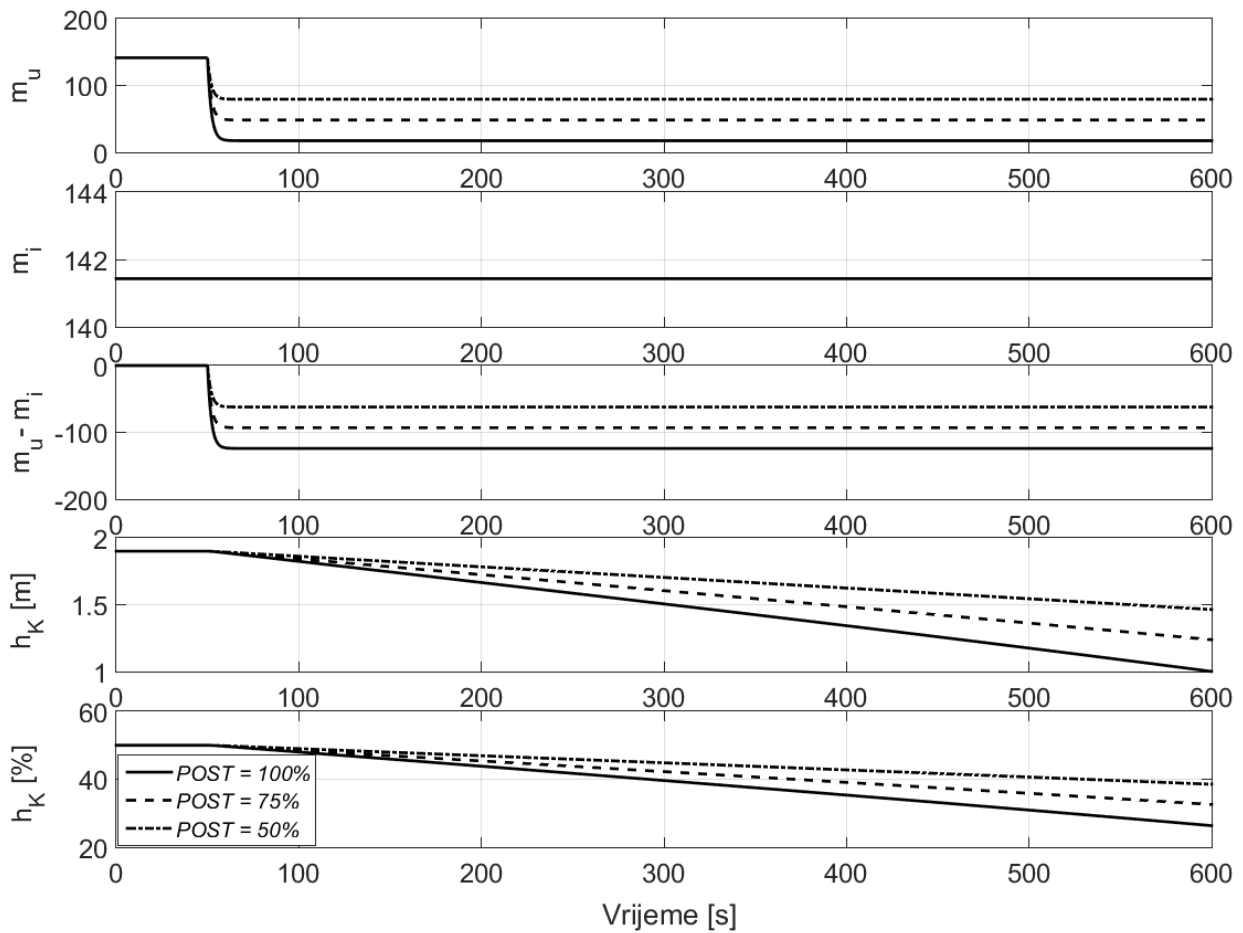
Smanjenje razine napojne vode u spremniku napojne vode je također prikazano za dva opterećenja postrojenja; 86% i 100%. Također je mijenjan i iznos parametra *POST*, on je bio iznosa 50%, 75% i 100%. Prikazana je promjena ulaznih i izlaznih masenih tokova u napojni spremnik, njihova ukupna bilanca, smanjenje razine napojne vode tokom odvijanja *kondenzat stopa* te postotno smanjene razine napojne vode (pri čemu 100% predstavlja razinu na kojoj se nalazi vrh napojnog spremnika, odnosno na 100% je razina vode jednaka promjeru spremnika). Sve vrijednosti su izračunate u Simulinku, dok su dobiveni rezultati prikazani u programu MATLAB.

Do 50. sekunde je održavano stacionarno stanje, a u 50. sekundi je ono prestalo te je započelo odvijanje *kondenzat stopa*, dakle nastala je i neravnoteža u bilanci mase napojnog spremnika.

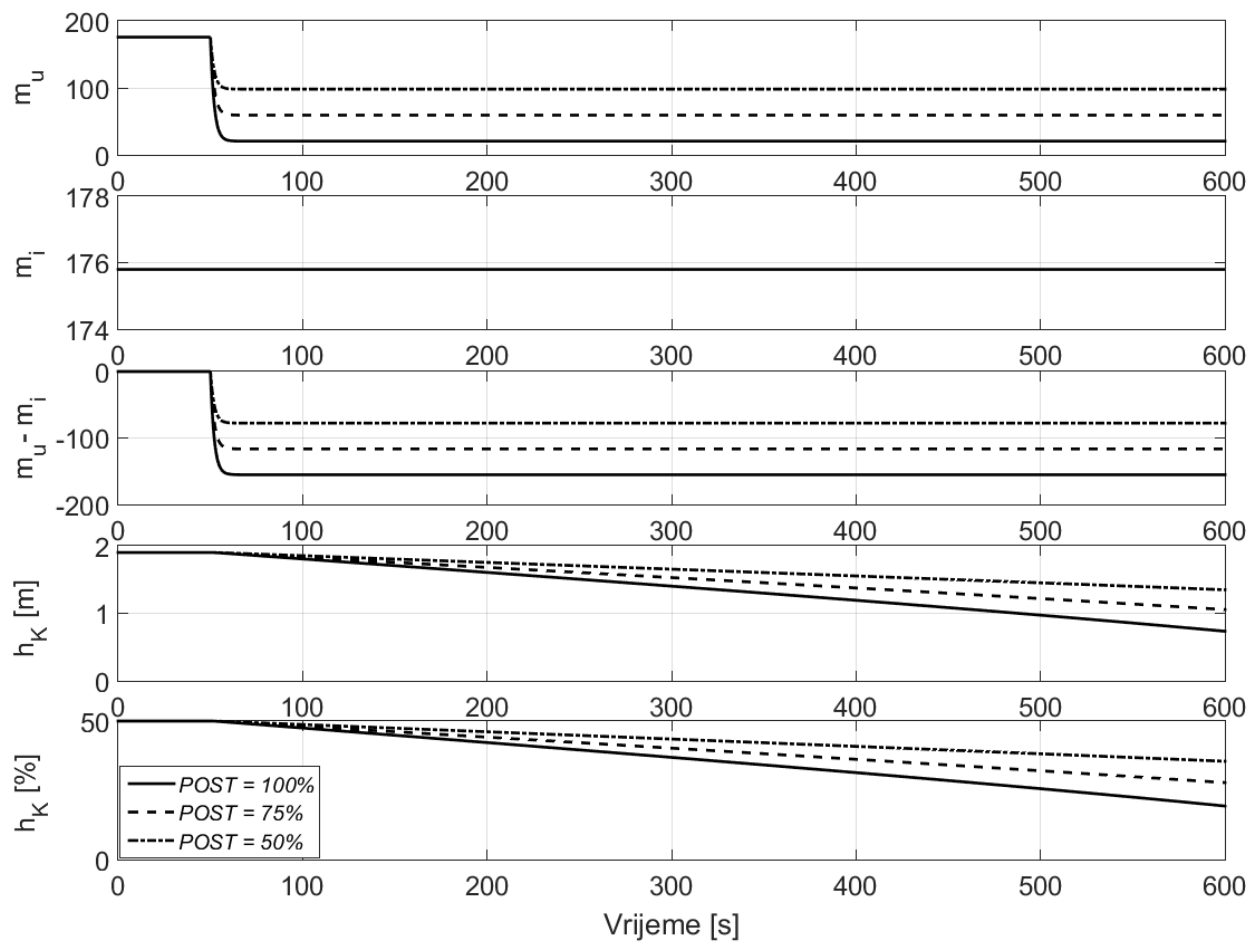
Simulacija je rađena sa svrhom otkrivanja vremena koje je potrebno da napojna voda dosegne najnižu dopuštenu razinu u napojnom spremniku (30% visine spremnika) te je to vrijeme izračunato u Simulinku i navedeno za svako opterećenje i vrijednost parametra *POST*.

Rezultati za 86% opterećenja su prikazani na Slika 23., a za 100% opterećenja na Slika 24.





Slika 23. Smanjenje razine vode u napojnom spremniku za 86% opterećenja



**Slika 24.** Smanjenje razine vode u napojnom spremniku za 100% opterećenja

Tablica 7. Vremena pražnjenja napojnog spremnika [s]

<i>POST</i> \ <i>OPT</i>	50%	75%	100%
86%	939,1	626,7	470,6
100%	746,7	498,5	374,4

Primjećujemo da se pri većem opterećenju postrojenja, uz jednaku vrijednost parametra *POST*, napojni spremnik isprazni (do zadane razine) brže nego pri manjem opterećenju. To možemo fizikalno objasniti time da su ulazni maseni protok kondenzata iz kondenzatora i pare iz turbine namijenjene procesu otplinjavanja, kao i izlazni protok prema generatoru pare, približno proporcionalni opterećenju postrojenja. U slučaju manjeg opterećenja su manji, a u slučaju većeg opterećenja su veći. Iz toga proizlazi da se preusmjeravanjem (svog ili samo dijela) protoka pare iz turbine kroz niskotlačne stupnjeve turbine, te smanjivanjem dotoka kondenzata, postiže brzina akumulacije vode u napojnom spremniku koja je ovisna o tim protocima, odnosno o trenutnom opterećenju postrojenja.

Pri većoj vrijednosti parametra *POST* (pri istom opterećenju) se također postiže brže pražnjenje napojnog spremnika nego pri manjim vrijednostima. To se može objasniti time da se pri većoj vrijednosti *POST* manje pare dovodi iz turbine u napojni spremnik, a i manje kondenzata se dovodi iz kondenzatora, što uzrokuje bržu negativnu akumulaciju, odnosno smanjenje razine vode u napojnom spremniku.

## 5.5. Zaključak

Analizom primjene metode *kondenzat stop* na postojećem postrojenju snage 210 MW smo dobili uvid u potencijalna povećanja snage koja bismo mogli postići, Tablica 5. Izračunate vrijednosti odgovaraju povećanju snage bez da uzimamo u obzir povećanje snage drugim metodama, poput otvaranja turbinskih ventila ili visokotlačnog "bypass-a" u trenutku u kojem se pojavljuje potreba za povećanjem snage.

U Tablica 6. i Tablica 7. imamo uvid u vremena punjenja spremnika kondenzata i vremena pražnjenja napojnog spremnika za različita opterećenja i različite vijednosti postotka ostvarivanja *kondenzat stopa*. Usporedimo li vrijednosti tih vremena, zaključujemo da nam je pri održavanju *kondenzat stopa* kapacitet punjenja spremnika kondenzata ograničavajući faktor. Vremena njegovog punjenja su primjetno kraća nego vremena pražnjenja napojnog spremnika u istim pogonskim uvjetima, zbog razlike u njihovim volumenima. Vremena punjenja spremnika kondenzata bi se mogla produžiti ako bi se u stacionarnom stanju održavala niža razina kondenzata. Ta razina je u ovom radu pretpostavljena na 30% od ukupne visine spremnika. Pri određivanju te razine treba uzeti u obzir da bi pri preniskoj razini postojala opasnost od preniskog tlaka u kondenzatnoj pumpi te posljedične kavitacije.

Kombinacijom neke od drugih metoda sa *kondenzat stopom*, poput visokotlačnog "bypass-a", bismo mogli dobiti intenzivnije povećanje snage postrojenja, ali sa nepovoljnom posljedicom smanjenja vremena raspoloživog za održavanje *kondenzat stopa*. Naime, i drugim metodama bismo povećali protok pare kroz turbinu, što bi uzrokovalo dodatno povećanje ulaznog masenog toka u kondenzator i dodatno skratilo vrijeme koje nam je na raspolaganju za održavanje *kondenzat stopa*.

Zaključili smo koji su najveći porasti snage koji se mogu dobiti *kondenzat stopom* na analiziranom postrojenju te smo zaključili i koja su najduža vremena koja su nam na raspolaganju za njegovo održavanje. Preostaje nam da raspravimo njihove odnose.

Naime, za najveće poraste snage pri danom opterećenju trebamo odabrati najveću vrijednost postotka ostvarivanja *kondenzat stopa* (100%). Tim odabirom se ostvaruju porasti snage do približno 7% nominalne snage postrojenja, ovisno na kojem opterećenju se odvija

*kondenzat stopa*. Tim odabirom se također ostvaruje i najveće smanjenje izlaznog protoka kondenzata iz spremnika kondenzata te najveće povećanje ulaznog protoka pare u kondenzator. Te činjenice uvjetuju to da se u režimu najvećeg postotka ostvarivanja *kondenzat stopa* najbrže akumulira kondenzat u spremniku kondenzata te nam je raspoloživo vrijeme za održavanje *kondenzat stopa* kraće. Kod postrojenja kod kojih bi vrijeme pražnjenja napojnog spremnika bio ograničavajući faktor (postrojenja sa drugačijim kapacitetima spremnika kondenzata i napojnog spremnika), postojao bi isti problem skraćivanja raspoloživog vremena za održavanje *kondenzat stopa*.

Tu se javlja nužda za kompromisom između dviju potreba: one za što većim ostvarivim porastom snage te one za što dužim održavanjem te povećane snage. Te dvije potrebe pri projektiranju sustava upravljanja termoenergetskim blokom treba uskladiti imajući na umu specifičnosti postrojenja.

## LITERATURA

- [1] Energetski institut Hrvoje Požar: Energija u Hrvatskoj 2014., 2015.
- [2] International Energy Agency, [www.iea.org](http://www.iea.org), 2016.
- [3] Bajić, A.: Karta osnovne brzine vjetra, 2012.
- [4] Henderson, C.: Increasing the flexibility of coal-fire power plants, 2014.
- [5] National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy: Impact of Load Following on Power Plant Cost and Performance: Literature Review and Industry Interviews, 2012.
- [6] Meade Vargas, P.: Potentials and Limits of Flexible Power Plant Operation, 2011.
- [7] Šerman, N., Lončar, D.: Utjecaj tehnološke opreme i strategije vođenja na dinamičke performance termoenergetskog bloka, 2009.
- [8] Zindler, H., Walter, H., Hauschke, A., Leithner, R., Dynamic Simulation of a 800 MWel Hard Coal One-Through Supercritical Power Plant to Fulfill the Great Britain Grid Code, 2008.
- [9] Wei Wang, Jizhen Liu, Deliang Zeng, Yuguang Niu, Can Cui, Modelling for condensate throttling and its application on the flexible load control of power plants, *Applied Thermal Engineering* (2015), <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.11.027>.
- [10] Bramer, B.: Developments in spray-type deaerator applications, 2015.
- [11] Ljubas, D., Dobrović S., Juretić, H.: Interna skripta iz Vode, goriva i maziva, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc