

# Utjecaj regenerativnog zagrijavanja na pogonsku fleksibilnost

---

**Budić, Roko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:721193>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-09**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Roko Budić**

Zagreb, 2018

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Roko Budić

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se svom mentoru Draženu Lončaru i asistentu Anti Marušiću na svoj ukazanoj pomoći prilikom izrade ovog rada. Zahvaljujem se svojim roditeljima, ostatku obitelji, djevojci Antoniji i svim prijateljima na podršci koju su mi pružili tokom mog studiranja.

Roko Budić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske 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:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Roko Budić**

Mat. br.: 0035187983

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj regenerativnog zagrijavanja na pogonsku fleksibilnost**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Impact of Regenerative Preheating on Operating Flexibility**

Opis zadatka:

Prekid dovodenja pare iz turbinskih oduzimanja u liniju regenerativnih zagrijača napojne vode jedna je od mjera kojom se postiže brzo povećanje snage termoenergetskog bloka i omogućava njegov fleksibilniji pogon. Uz željeno povećanje snage bloka, prekid dovodenja pare u zagrijače napojne vode izaziva i naglo sniženje temperature napojne vode na ulazu u generator pare što se nepovoljno odražava na životni vijek debelostijenih dijelova cijevnog sustava.

U okviru rada potrebno je:

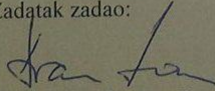
1. Izvesti matematički model dinamike termohidrauličkih procesa u liniji visokotlačnih zagrijača napojne vode termoenergetskog bloka snage 210 MW;
2. Rezultate simulacije matematičkog modela usporediti s pogonskim odzivima promjene temperature napojne vode na ulazu u ekonomajzer u uvjetima naglog prekida i ponovne uspostave dovodenja pare iz turbinskog oduzimanja;
3. Odrediti prolazno povećanje snage termoenergetskog bloka uslijed zatvaranja nereguliranog turbinskog oduzimanja;
4. Odrediti utjecaj promjene temperature napojne vode na promjenu termodinamičke iskoristivosti ciklusa;
5. Primjenom pojednostavljenog modela odrediti temperaturna naprezanja u stijenci plašta ulaznog kolektora ekonomajzera (dimenzija: vanjski promjer 406,4 mm; debljina stijenke 26 mm, duljina plašta 9000 mm). Iz kolektora izlazi 186 cijevi promjera 44,5 mm i debljine stijenke cijevi 4,5 mm.

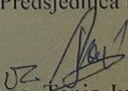
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:  
16. studenog 2017.

Datum predaje rada:  
18. siječnja 2018.

Predvideni datum obrane:  
24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:  
  
Prof.dr.sc. Dražen Lončar

Predsjednica Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. TEMPERATURNAPREZANJA .....	6
2.1. Najranjiviji dijelovi postrojenja i uzročnici pojave oštećenja.....	8
3.1. Utjecaj naprezanja na kolektor napojne vode .....	10
3. OPIS SUSTAVA .....	13
4. MATEMATIČKI MODEL VISOKOTLAČNOG ZAGRIJAČA NAPOJNE VODE .....	14
4.1. Rezultati stacionarnog stanja i dinamike visokotlačnih zagrijača .....	18
5. MATEMATIČKI MODEL NAPREZANJA KOLEKTORA NAPOJNE VODE.....	25
5.1. Odzivi temperatura i temperaturnih naprezanja segmenata stijenke kolektora .....	29
6. REZULTATI SIMULACIJE .....	32
7. ZAKLJUČAK.....	52
LITERATURA .....	53
PRILOZI.....	54

**POPIS SLIKA**

Slika 1: Udio u proizvodnji električne energije prema izvoru [2].....	1
Slika 2: Proizvodnja električne energije iz vjetra u Njemačkoj, 2016. godine [4] .....	3
Slika 3: Aktivacija rezervi nakon promjene frekvencije [8] .....	4
Slika 4: Temperaturna ekspanzija materijala [9].....	6
Slika 5: Oštećenje kolektora [7] .....	7
Slika 7: Propuštanje na spoju cijevi i kolektora uzrokovano temperaturnom ekspanzijom [7]11	
Slika 8: Shema visokotlačnog zagrijača napojne vode [15].....	14
Slika 9: Raspored temperatura parnog dijela, stijenke cijevi i napojne vode unutar visokotlačnog zagrijača 6 .....	19
Slika 10: Prikaz stanja unutar VT6 nakon prekida oduzimanja pare iz turbine .....	20
Slika 11: Prikaz stanja unutar VT6 nakon prekida oduzimanja pare iz turbine u vremenskom intervalu od $t=30-200$ s.....	21
Slika 12: Raspored temperatura parnog dijela, stijenke cijevi i napojne vode unutar visokotlačnog zagrijača 7 .....	22
Slika 13: Prikaz stanja unutar VT7 nakon zatvaranja ventila oduzimanja pare.....	23
Slika 14: Prikaz stanja unutar VT7 nakon prekida oduzimanja pare iz turbine u vremenskom intervalu od $t=30-200$ s.....	24
Slika 15: Temperature segmenata stijenke kolektora nakon zaustavljanja oduzimanja pare ..	29
Slika 16: Temperaturna naprezanja segmenata stijenke kolektora nakon prekida oduzimanja pare .....	29

---

Slika 17: Temperature segmenata stijenke kolektora nakon zatvaranja i ponovne uspostave oduzimanja pare iz turbine .....	30
Slika 18: Temperaturna naprezanja segmenata stijenke kolektora nakon zatvaranja i ponovne uspostave oduzimanja pare iz turbine .....	31
Slika 19: Odziv VT6 za simulaciju br. 1 .....	34
Slika 20: Odziv VT7 za simulaciju br. 1 .....	35
Slika 21: Odziv temperature i naprezanja kolektora za simulaciju br. 1.....	36
Slika 22: Odziv VT6 za simulaciju br. 2.....	37
Slika 23: Odziv VT7 za simulaciju br. 2.....	38
Slika 24: Odziv temperature i naprezanja kolektora za simulaciju br. 2.....	39
Slika 25: Odziv VT6 za simulaciju br. 3.....	40
Slika 26: Odziv VT7 za simulaciju br. 3.....	41
Slika 27: Odziv temperatura i naprezanja kolektora za simulaciju br. 3.....	42
Slika 28: Odziv VT6 za simulaciju br. 4.....	43
Slika 29: Odziv VT7 za simulaciju br. 4.....	44
Slika 30: Odziv temperatura i naprezanja kolektora za simulaciju br. 4.....	45
Slika 31: Odziv VT6 za simulaciju br. 5.....	46
Slika 32: Odziv VT7 za simulaciju br. 5.....	47
Slika 33: Odziv temperatura i naprezanja kolektora za simulaciju br. 5.....	48
Slika 34: Odziv VT6 za simulaciju br. 6.....	49



Slika 35: Odziv VT7 za simulaciju br. 6.....	50
Slika 36: Odziv temperatura i naprezanja kolektora za simulaciju br. 6.....	51

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Karakteristike kolektora .....	25
Tablica 2: Dopuštena naprežanja za materijal 16Mo3 [6] .....	28
Tablica 3: Tablica rezultata simulacije.....	32

**POPIS OZNAKA**

c	W/kgK	toplinski kapacitet
D	m	promjer
d	m	promjer
E	N/m <sup>2</sup>	modul elastičnosti
f	m <sup>2</sup>	površina izmjene topline
h	W/kg	entalpija
L	m	duljina
m	kg/s	maseni protok
p	Pa	tlak
T	°C	temperatura
V	m <sup>3</sup>	volumen
β	°C <sup>-1</sup>	koeficijent linearnog istezanja
n	-	broj segmenata
α	W/m <sup>2</sup> K	koeficijent izmjene topline
δ	m	debljina stjenke
λ	W/mK	toplinska vodljivost
ν	-	Poissonov koeficijent

$\rho$	$\text{kg/m}^3$	gustoća
$\sigma$	Pa	naprezanje

## **SAŽETAK**

Sve veća proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora mijenja način rada konvencionalnih termoelektrana. Njihova uloga postaje pokrivanje razlika između potražnje i proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Kako bi se pokrila razlika između potražnje i proizvodnje električne energije od povlašćenih proizvođača, potreba za povećanom fleksibilnosti termoelektrane dolazi do izražaja. Jedan od načina kratkotrajnog povećanja snage je obustava nereguliranih oduzimanja pare prema visokotlačnim zagrijačima napojne vode. Upravo taj slučaj je detaljnije opisan u ovom radu te je provjeren utjecaj obustave i ponovne uspostave oduzimanja na naprezanja u ulaznom kolektoru napojne vode. Simulacije su vršene u programskom paketu Matlab.

Ključne riječi: fleksibilnost elektrane, obustava nereguliranih oduzimanja, visokotlačni zagrijač, temperaturna naprezanja kolektora, Matlab

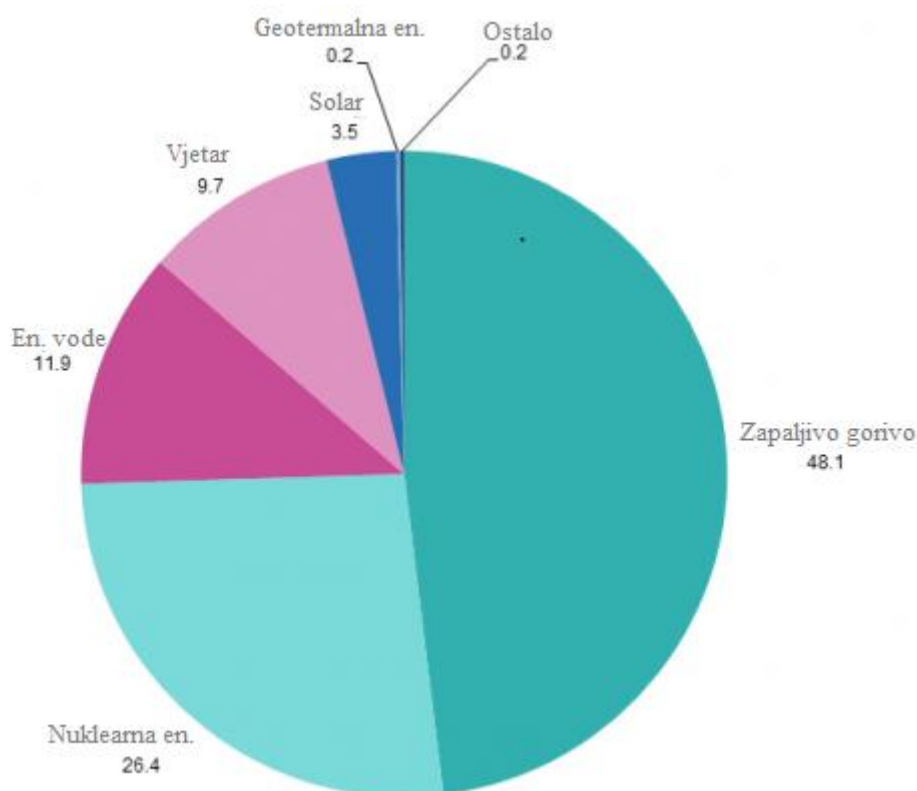
## **SUMMARY**

Rise in electricity production from renewable sources changes the operation of conventional thermal plants. Their role is to cover the difference between electricity demand and electricity generation from renewable sources. In order to cover the difference between electricity demand and electricity generation from eligible producers, the need for increased flexibility of the thermal power plant comes to the fore. One of the ways of a short-term increase in power is a short-time stoppage of the turbine steam extraction for preheating the feed water in high-pressure feed water heaters. This case is described in more detail in this paper, as well as the effects of the suspension, and re-establishment of the steam extraction on the thermal stresses of the economiser inlet header have been taken into account. The simulations were carried out in the Matlab program package.

Key words: flexibility of thermal powerplant, turbine steam extraction stoppage, high-pressure feed water heaters, thermal stress, economiser inlet header, Matlab

## 1. UVOD

Povijesno gledano, konvencionalne elektrane dizajnirane su da pokrivaju planiranu potražnju za električnom energijom. Obično su rađeni dnevni, tjedni ili sezonski profili potražnje, koje je karakterizirala niska varijabilnost. Zbog konstantog povećanja udjela proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, mijenja se uloga konvencionalnih postrojenja, koja sada moraju prilagoditi svoj rad zahtjevima mreže. Ta se prilagodba uglavnom odnosi na pokrivanje trenutnih razlika između potrošnje i planirane proizvodnje električne energije, pod koje spadaju postrojenja koja koriste obnovljive izvore, te kogeneracijska postrojenja [1]. Prema podacima "Eurostata" iz 2015. vidljiv je značajan udio vjetra i solara u ukupnoj proizvodnji električne energije u Europi.



Slika 1: Udio u proizvodnji električne energije prema izvoru [2]

S gledišta konvencionalnih proizvođača dolazi do problema jer proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora ima tendenciju rasta, a njihova se proizvodnja, sukladno tome smanjuje. Unatoč povećanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, konvencionalne termoelektrane još uvijek će biti potrebne unutar elektroenergetskog sustava, prvenstveno u slučajevima velike potražnje za električnom energijom, te male proizvodnje iz obnovljivih izvora, zbog loših vremenskih uvjeta. Kako bi se povećala konkurentnost na tržištu, pribjegava se različitim rješenjima [3].

Jedno od rješenja je i povećanje fleksibilnosti postrojenja, a ono se ocjenjuje na temelju sljedećih kriterija:

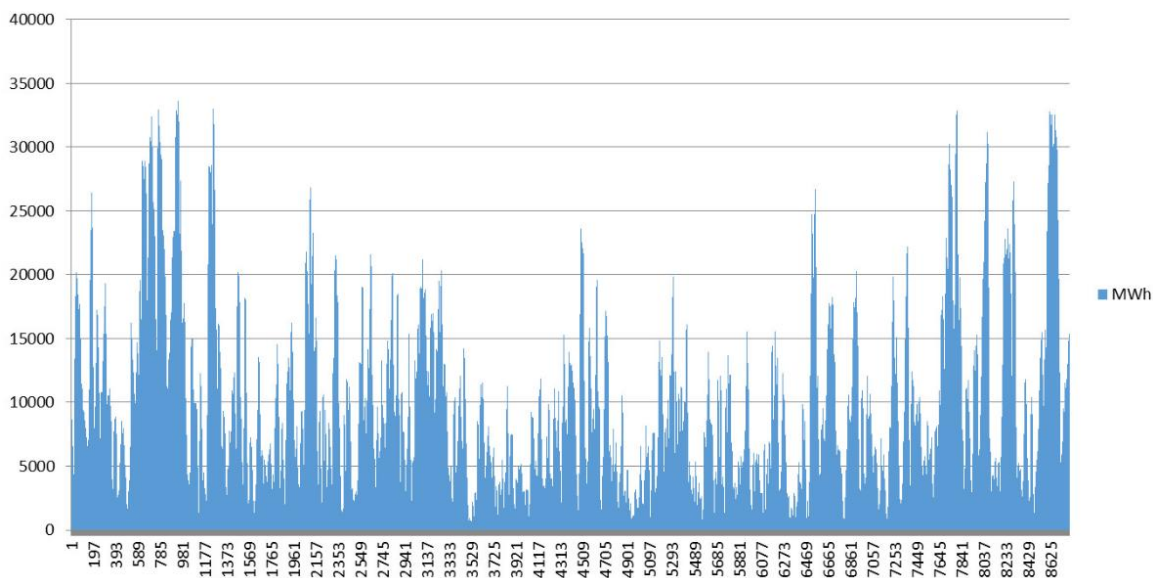
- ostvarivo povećanje snage bloka već u prvim sekundama nakon pojave potrebe, o čemu ovisi sposobnost bloka za sudjelovanje u primarnoj regulaciji frekvencije mreže.
- ostvariva brzina promjene snage u rasponu opterećenja između tehničkog minimuma i maksimalne snage, o čemu ovisi sposobnost bloka za sudjelovanje u sekundarnoj regulaciji frekvencije i raspodjele djelatne snage u mreži elektroenergetskog sustava.
- trajanje i dopuštena učestalost pokretanja bloka iz stanja mirovanja
- snižavanje tehničkog minimuma, odnosno opterećenja kod kojeg je pogon stabilan i ekološki prihvatljiv [5].

Tehnički minimum smatra se jednim od najvažnijih parametara fleksibilnosti postrojenja. Smanjenje tehničkog minimuma omogućuje širi raspon u promjeni opterećenja postrojenja. Također djeluje pozitivno i na izbjegavanje skupog i ekološki štetnog gašenja i ponovnog pokretanja postrojenja. Vođenje postrojenja na opterećenju manjem od nominalnog rezultira smanjenjem iskoristivosti postrojenja, što utječe na povećanje specifične emisije CO<sub>2</sub>. Povećanje emisije CO<sub>2</sub> ipak je manje u odnosu na ono prilikom ponovnog pokretanja postrojenja, stoga je jasno kako je sniženje tehničkog minimuma opravdano i ekološki i ekonomski [1].

Nagla promjena opterećenja elektrane najizraženija je zbog utjecaja proizvodnje električne energije iz vjetrova, budući da je teško predvidiva i ovisi o vremenskim uvjetima. Na slici ispod



vidljiva je varijabilnost proizvodnje električne energije iz vjetra kao izvora iz koje se može naslutiti potrebna brzina prilagodbe postrojenja.



**Slika 2: Proizvodnja električne energije iz vjetra u Njemačkoj, 2016. godine [4]**

Povećana fleksibilnost postrojenja pozitivno će utjecati na novčane prihode u kraćem vremenskom periodu ukoliko je riječ o elektranama koje su prvenstveno namijenjene za pokrivanje baznog opterećenja. Povećana fleksibilnost ipak će uvelike utjecati na smanjenje životnog vijeka kritičnih komponenti postrojenja, što vodi ka povećanju troškova proizvodnje, odnosno smanjenju dugoročno pretpostavljenih novčanih prihoda [1].

Brza promjena snage postrojenja u prvim trenucima nakon pojave zahtjeva izrazito je važna ukoliko je udio obnovljivih izvora u proizvodnji velik. Najveći su ograničavajući faktor temperaturno i mehaničko naprezanje debelostijenih komponenti postrojenja u koje spada i ulazni kolektor napojne vode ekonomajzera. U nastavku će se računati temperaturna naprezanja u kolektoru, nastala kao posljedica loše progrijanosti stijenke [1].

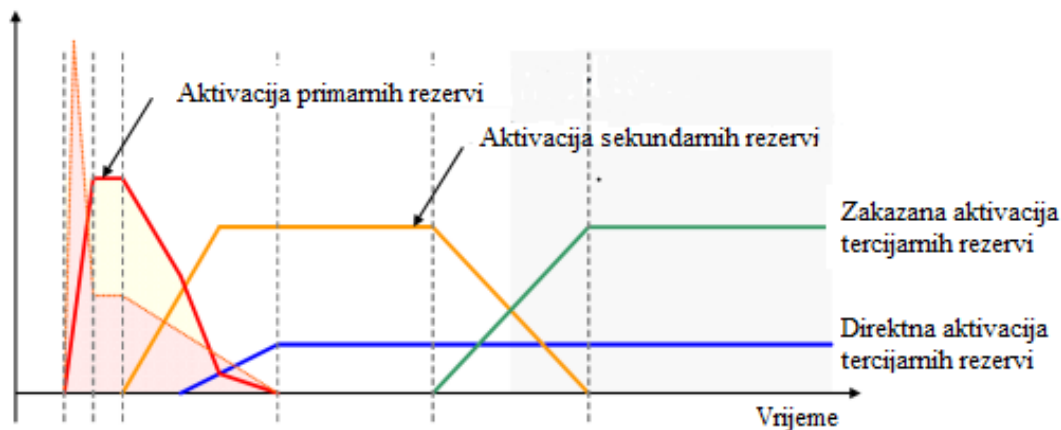
Za postizanje brze promjene snage poduzimaju se različiti zahvati, koji koriste akumuliranu masu i energiju u pojedinim komponentama postrojenja. Pod takve zahvate spadaju:

- prijelaz s pogona s kliznim tlakom na pogon s modificiranim kliznim tlakom svjež

pare

- kratkotrajno povećanje protoka pare kroz turbinu privremenim isključivanjem nereguliranih turbinskih oduzimanja
- kratkotrajno povećanje protoka pare kroz turbinu zatvaranjem reguliranih oduzimanja praćenih s privremenom obustavom toplinske energije potrošačima [8].

U ovom radu promatra se slučaj u kojem se privremeno zaustavljaju neregulirana oduzimanja, što rezultira kratkotrajnim povećanjem snage bloka. Brza promjena snage važna je za pružanje pomoćnih usluga, prvenstveno primarne i sekundarne regulacije frekvencije.



**Slika 3: Aktivacija rezervi nakon promjene frekvencije [8]**

Slika 3 pokazuje vrijeme u kojem djeluju primarna, sekundarna i tercijarna regulacija frekvencije. Vrijeme odziva primarne regulacije je 30 sekundi, sekundarne 5 minuta, dok tercijarna počinje djelovati nakon 7-15 minuta.

Pomoćne usluge definiraju se kao sve usluge koje pružaju operatori prijenosnog i distribucijskog sustava s ciljem održavanja integriteta i stabilnosti prijenosnog i distribucijskog sustava, te kvalitete i sigurnosti opskrbe električnom energijom [8].

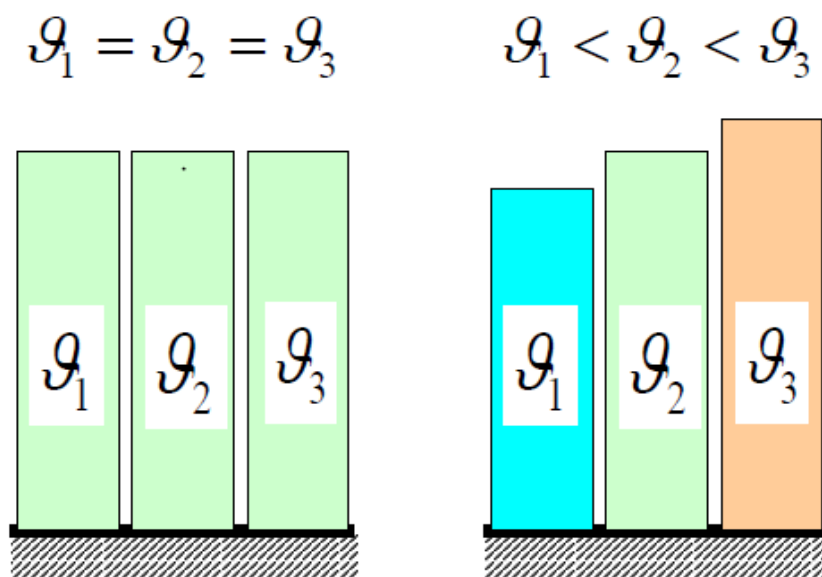
Osim regulacije frekvencije, u pomoćne usluge spadaju još:

- regulacija napona

- rotirajuća rezerva
- hladna rezerva
- beznaponski start
- daljinsko upravljanje proizvodnjom
- kompenzacija gubitaka u mreži
- postupci i upravljanje u hitnim slučajevima.

## 2. TEMPERATURNAPREZANJA

Prilikom zagrijavanja ili hlađenja bilo koje tvari, javlja se promjena u njenom volumenu. U slučaju zagrijavanja, tvar (krutina) se širi, dok se kod ohlađivanja skuplja. Ako se radi o elementu koji je izrađen od jednog materijala, a dijelovi mu se nalaze na različitim temperaturama, doći će do različitog produljenja pojedinog dijela elementa. Slika 4 daje pojednostavljen prikaz mehanizma linearnog temperaturnog rastezanja materijala.



Slika 4: Temperaturna ekspanzija materijala [9]

Linearno temperaturno rastezanje materijala računa se po jednostavnoj formuli, odnosno, ono je jednako umnošku dužine materijala u hladnom stanju, koeficijentu linearnog temperaturnog istežanja, te promjeni temperature [9].

$$dL = L_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (1)$$

Posljedice razlike u temperaturnoj ekspanziji jesu temperaturna naprezanja, koja predstavljaju veliki problem u fleksibilnom vođenju postrojenja, gdje je brza promjena temperature pojedinih djelova postrojenja neizbježna [1].

Temperaturna ekspanzija utječe na nekoliko djelova unutar postrojenja. Relativna promjena u volumenu zagrijanih dijelova generatora pare u odnosu na hladnije nosive konstrukcije, jedan je od primjera temperaturne ekspanzije. Veze između cijevi generatora pare i potporne konstrukcije projektirane su kako bi izdržale promjenu volumena cijevnog snopa, ali se njihov životni vijek drastično smanjuje prečestim izlaganjem ovakvim uvjetima [7].

Djelovanjem na neregulirana turbinska oduzimanja, odnosno u slučaju prekida dovođenja pare u visokotlačne zagrijače, dolazi do pada temperature napojne vode. Takva nagla promjena u temperaturi, značajno utječe na životni vijek i stanje debelostijenih komponenata unutar postrojenja. Utjecaj je, naravno, negativan te će životni vijek komponenata biti kraći što je češća primjena ovakvih zahvata.

Usljed nagle promjene temperature napojne vode, dolazi do pojave temperaturnih naprezanja u kolektoru, koja su to veća, što je temperaturni gradijent u stijenci kolektora veći. Kako je riječ o debelostijenim komponentama, temperaturna će naprezanja biti velika, budući da su proporcionalna kvadratu debljine stijenke [5].



**Slika 5: Oštećenje kolektora [7]**

Slika 5 pokazuje utjecaj temperaturnih napreznja na stanje debelostijenih komponenti te ukazuju na važnost njihovog ograničavanja unutar zadovoljavajućih iznosa.

### **2.1. Najranjiviji dijelovi postrojenja i uzročnici pojave oštećenja**

Jedni od najkompleksnijih i oštećenjima najpodložnijih dijelova unutar termoelektrane su komponente generatora pare. Oštećenja nastala na nekima od tih komponenata pokazala su se kroz povijest kao jedan od glavnih uzroka izlaska postrojenja iz pogona. Statistički podaci pokazuju da su oštećenja na cijevima generatora pare odgovorna za 6% ukupnih oštećenja zbog kojih su elektrane bile van pogona [10].

Kvarovi, odnosno greške u radu, uglavnom su povezane s nekim od sljedećih čimbenika:

- loša originalna izvedba komponenti
- loša proizvodna praksa
- promjena vrste goriva
- način vođenja postrojenja
- održavanje

Kako su stijenke cijevi generatora pare izložene visokim tlakovima i temperaturama, javljaju se mehanička i temperaturna napreznja različitih intenziteta. Izloženost takvim uvjetima dovodi do pojave puzanja materijala. Karakteristična oštećenja dijele se na oštećenja nastala kao posljedica izloženosti u kraćem vremenskom periodu, te na oštećenja uzrokovana izloženosti nepovoljnim uvjetima kroz duži period rada. Slika ispod pokazuju razlike u oštećenjima kod komponenata koje su bile izložene visokim temperaturama i tlakovima duži, odnosno kraći period [10].



**Slika 7: Pukotina kod vremenski kraće izloženosti nepovoljnim uvjetima [10]**



**Slika 8 Pukotina kod vremenski duže izloženosti visokim temperaturama i tlakovima [10]**

Može se vidjeti karakterističan tanki rub kod pukotine nastale u kraćem vremenu izlaganja, dok se kod oštećenja izazvanog dugotrajnim izlaganjem nepovoljnim uvjetima stvaraju određene ljuskaste formacije, te se javlja sekundarno pucanje stijenke [10].

Zavareni spojevi na dijelovima postrojenja također su podložni oštećenjima, pogotovo ako je riječ o spoju austenitnih i feritnih čelika, kod kojeg se javlja naprezanje visokog intenziteta zahvaljujući razlici u temperaturnoj ekspanziji dvaju materijala.

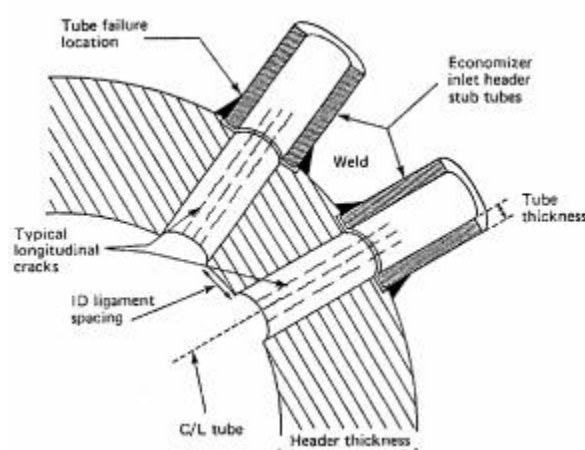


**Slika 9: Puknuće zavarenog spoja**

Puknuće je moguće izbjeći ukoliko se opterećenje i temperatura spoja regulira. Premještanje zavara u područje niže temperature je poželjno, a postoji i opcija metalne ispune na bazi nikla [11].

### **3.1. Utjecaj naprezanja na kolektor napojne vode**

Razvoj pukotina uvelike ovisi o načinu rada postrojenja. Iskustvo, te provedene inspekcije, upućuju na to da je kolektor napojne vode jedna od komponenti najpodložnijih oštećenjima. Pukotine mogu nastati na bilo kojem mjestu ulaznog kolektora, ukoliko je izložen prevelikim koncentracijama naprezanja. Oštećenja su ipak najčešća na korijenima zavara i udubljenjima na mjestima ulaza cijevi u kolektor. Što je razmak između ulaznih cijevi u kolektor manji, to je kolektor podložniji oštećenjima [11].



**Slika 10: Presjek ulaznog kolektora ekonomajzera [11]**



Mehanizam je oštećenja takav, da se sastoji od višestrukog pucanja okomitog na glavni smjer naprezanja, pri čemu jedna pukotina obično postaje dominantna te uzrokuje prodor kroz stijenkku. Postoji mogućnost pojave mjestimičnih oštećenja na ulazima cijevi u kolektor, koja ukazuju na visoke lokalne stope grijanja ili hlađenja [11].

Uzdužno ili kružno oštećenje duž redova ulaznih cijevi javlja se zbog temperaturne ekspanzije, budući da ta mjesta u prosjeku reagiraju brže na promjene temperature u odnosu na ostatak tijela kolektora. Pukotine su povezane s cikličkim opterećenjem, te su kolektori njima podložniji, ukoliko temperaturni gradijent kroz stijenkku kolektora nije održavan u granicama određenim pri projektiranju postrojenja [7].



**Slika 6: Propuštanje na spoju cijevi i kolektora uzrokovano temperaturnom ekspanzijom [7]**

Cikličko opterećenje obično je uzrokovano temperaturnom ekspanzijom elementa, dok ponekad može biti uzrokovano i savojnim napreznjima priključaka. Proizvodni postupci također utječu na povećanje osjetljivosti prema stvaranju pukotina. To se prvenstveno odnosi na zavarene spojeve te na spojeve dobijene valjanjem.

Postoje određeni pokazatelji koji mogu biti iskorišteni kako bi se odredio potencijal kolektora za razvijanjem budućih pukotina. Uglavnom se sastoje od izvedbe kolektora te načina vođenja postrojenja. Pokazatelji su sljedeći:

- kolektor je akumulirao veliki broj ciklusa rada
- razmak među cijevima kolektora je premal
- debljina stijenke kolektora dosta je veća od minimalne potrebne debljine
- izvedba kolektora ima povijest problema u drugim elektranama
- veliki temperaturni gradijenti kroz stijenku
- intermitentno dovođenje napojne vode u velikom protoku pri pokretanju postrojenja.

Postavljanjem kolektora izvan toka dimnih plinova smanjuje razliku u temperaturi između napojne vode i stijenke kolektora za vrijeme hladnog starta. Ponekad se kolektori smješteni unutar puta prolaska dimnih plinova izoliraju s ciljem postizanja istog učinka, ali izolacija također sprječava ohlađivanje kolektora u razdoblju izvan opterećenja, što nije najpoželjnije.

Za kolektore koji zahtjevaju zamjenu, postoje brojne modifikacije modela, koje će smanjiti faktore koncentracije naprezanja. Smanjenjem debljine stijenke kolektora smanjuje se gradijent temperature kroz stijenku, a time i temperaturna naprezanja.

Međutim, preporuke koje proizlaze iz ranijih istraga o debljini stijenke pokazuju, da se debljina može smanjivati do neke mjere, ali se u obzir moraju uzeti geometrijske i radne karakteristike kolektora. Ako bi se debljina stijenke smanjivala, potrebno je razmotriti upotrebu korištenja materijala s većom otpornošću. Korištenjem, primjerice, 1CrMo čelika, smanjila bi se debljina stijenke u odnosu na kolektor od ugljičnog čelika, ali bi bilo potrebno provesti ekonomsku analizu, kako bi se ustvrdilo da je takva zamjena isplativa [11].

Metode i postupci korišteni za ulazne kolektore ekonomajzera, također se mogu koristiti i na ostalim debelostijenim komponentama koje djeluju na temperaturama ispod granice puzanja njihovih konstrukcijskih materijala.

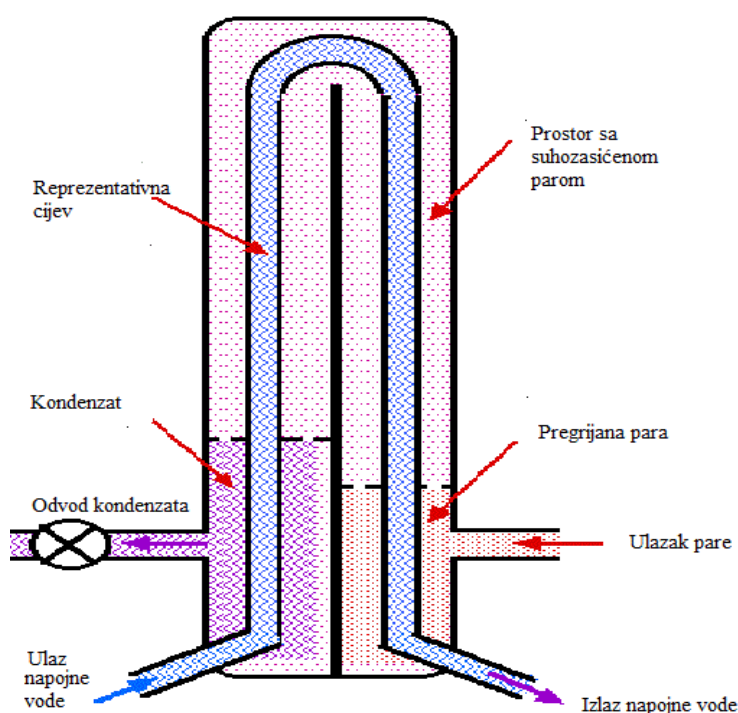
### 3. OPIS SUSTAVA

Sustav koji se obrađuje u ovom radu nalazi se na objektu Plomin 2, te obuhvaća 2 visokotlačna zagrijača napojne vode i ulazni kolektor napojne vode ekonomajzera. Predgrijavanje napojne vode vrši se zbog pozitivnog utjecaja na iskoristivost postrojenja. U stacionarnom se stanju iz visokotlačnog dijela turbine oduzima vodena para, koja se potom vodi u zagrijače napojne vode, gdje predaje toplinu napojnoj vodi. Kod visokotlačnog zagrijača 6 (VT6) napojna voda na ulazu konstantne je temperature od 190 °C, dok je na ulazu u VT7 temperature 217 °C. Kako bi se dobilo kratkotrajno povećanje snage, zatvaraju se ventili turbinskih oduzimanja, te se para u tom periodu ne odvodi u visokotlačne zagrijače, čime se povećava njen protok kroz turbinu. Prilikom prekida turbinskih oduzimanja, temperatura pare unutar zagrijača postepeno pada do temperature napojne vode na ulazu u pojedini zagrijač te se uspostavlja novo stacionarno stanje. Ponovnom uspostavom oduzimanja, novodovedena para u visokotlačnim zagrijačima predaje toplinu napojnoj vodi, te njena temperatura raste do stanja prije prekida turbinskih oduzimanja.

Nakon izlaska iz VT7, napojna voda ulazi u kolektor generatora pare. Za vrijeme stacionarnog stanja, temperatura stijenke kolektora jednaka je temperaturi napojne vode na izlazu iz VT7, odnosno 249.2°C. Prekidom oduzimanja, temperatura napojne vode pada, te hladi stijenku kolektora. Budući da je stijenka kolektora velike debljine, njeno će hlađenje biti neravnomjerno, te će pojedini segmenti stijenke kolektora biti na različitim temperaturama. Razlika u temperaturama unutar segmenata stijenke vodi ka različitoj temperaturnoj ekspanziji pojedinog segmenta, što izaziva pojavu temperaturnih naprezanja. Naprezanja će biti to veća, što je temperaturni gradijent veći. Ukoliko se kolektoru napojne vode dopusti ohlađivanje do 190 °C uslijedit će porast temperaturnog gradijenta nakon ponovne uspostave turbinskih oduzimanja i samim time će temperaturna naprezanja biti veća.

#### 4. MATEMATIČKI MODEL VISOKOTLAČNOG ZAGRIJAČA NAPOJNE VODE

Za potpuno razumijevanje fizikalnih procesa unutar sutava potrebno je razviti sustav jednačbi koji opisuje te procese, što za sobom vuče određena pojednostavljenja i pretpostavke. Prikaz pojednostavljene sheme visokotlačnog zagrijača vidi se na slici 7.



Slika 7: Shema visokotlačnog zagrijača napojne vode [15]

Jedna od pretpostavki je da se cijevni snop visokotlačnog zagrijača promatra kao snop paralelno spojenih cijevi istih geometrijskih karakteristika kroz koje struji napojna voda. Oko tih cijevi međucijevni je prostor, koji se dijeli na dio s pregrijanom parom, dio sa suhozasićenom parom te dio u kojem se nalazi kondenzat[12].

Pretpostavke u matematičkom modelu su sljedeće:

- zanemaruje se utjecaj akumulacije energije u dijelu međucijevnog prostora koji sadrži suhozasićenu paru
- zanemarena je izmjena topline plašta i okoline

- hidrostatski tlak u kondenzatu se ne uzima u obzir
- zanemaren je temperaturni gradijent u radijalnom smjeru stijenke cijevi
- provođenje topline u uzdužnom smjeru stijenke cijevi je zanemareno
- visina kondenzata je konstantna, sav novonastali kondenzat se odvodi

U nastavku su prikazane jednadžbe očuvanja energije i mase za segmente izmjenjivača u kojima se nalazi para, segmente u kojima je kondenzat, segmente stijenke cijevi, te segmente ispunjene napojnom vodom [12].

Akumulacija energije u segmentu pothlađenog kondenzata računa se za prva 4 segmenta međucijevnog prostora, pošto je pretpostavljeno kako se u njima nalazi kondenzat, dok je u posljednjem 5. segmentu temperatura kondenzata jednaka temperaturi pare, kako bi se zanemarila izmjena topline na slobodnoj površini. Akumulacija je prikazana jednadžbom (2).

$$\frac{dT_{Pk}}{dt} = \frac{f_v \cdot \alpha_K \cdot (T_{Pk+1} - T_{sk}) + m_K \cdot c_{Kk} \cdot (T_{Pk+1} - T_{Pk})}{\rho_K \cdot V_K \cdot c_{Kk}} \quad (2)$$

- $f_v$  – površina izmjene topline s vanjske strane cijevi [ $m^2$ ]
- $T_{Pk}$  – temperatura medija (para, kondenzat) s vanjske strane cijevi [ $^{\circ}C$ ]
- $c_{Kk}$  – specifični toplinski kapacitet kondenzata [ $J/kgK$ ]
- $\rho_K$  – gustoća kondenzata [ $kg/m^3$ ]
- $\alpha_K$  – koeficijent prijelaza topline [ $W/m^2K$ ]
- $V_K$  – volumen segmenta kondenzata [ $m^3$ ]
- $m_K$  – maseni protok kondenzata [ $kg/s$ ]

U posljednja 4 segmenta, u kojima se nalazi pregrijana para, gornji izraz poprima sljedeći oblik.

$$\frac{dT_{pk}}{dt} = \frac{m_{pt} \cdot c_{pt} \cdot (T_{pk+1} - T_{pk}) - f_v \cdot \alpha_v \cdot (T_{pk} - T_{sk})}{\rho_{pt} \cdot c_{pt} \cdot V_v} \quad (3)$$

- $T_{pk}$  – temperatura pare u k-tom segmentu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $c_{pt}$  – specifični toplinski kapacitet pare [ $\text{J/kgK}$ ]
- $\alpha_v$  – koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani stijenke cijevi [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]

Akumulacija energije u napojnoj vodi opisana je jednadžbom (4), s tim da je u ulaznom segmentu  $T_{nvk-1}$  jednaka  $190^{\circ}\text{C}$  za visokotlačni zagrijač 6.

$$\frac{dT_{nvk}}{dt} = \frac{f_u \cdot \alpha_{nv} \cdot (T_{sk} - T_{nvk}) + m_{nv} \cdot c_{nvk} \cdot (T_{nvk-1} - T_{nvk})}{\rho_{nv} \cdot V_u \cdot c_{nvk}} \quad (4)$$

- $f_u$  – površina izmjene topline s unutarnje strane cijevi [ $\text{m}^2$ ]
- $\alpha_{nv}$  – koeficijent prijelaza topline na strani napojne vode [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
- $\rho_{nv}$  – gustoća napojne vode [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $c_{nvk}$  – specifični toplinski kapacitet vode [ $\text{J/kgK}$ ]
- $V_u$  – volumen segmenta napojne vode [ $\text{m}^3$ ]
- $T_{nvk}$  – temperatura napojne vode u k-tom segmentu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $m_{nv}$  – maseni protok napojne vode [ $\text{kg/s}$ ]

Akumulacija energije u stijenci cijevi izmjenjivača računa se jednadžbom (5).

$$\frac{dT_{sk}}{dt} = \frac{f_v \cdot \alpha_v \cdot (T_{pk} - T_{sk}) - f_u \cdot \alpha_{nv} \cdot (T_{sk} - T_{nvk})}{\rho_s \cdot V_s \cdot c_s} \quad (5)$$

- $\alpha_v$  – koeficijent prijelaza topline s vanjske strane cijevi ovisno o mediju koji se tamo nalazi [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
- $T_{sk}$  – temperatura stijenke cijevi u k-tom segmentu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $\rho_s$  – gustoća materijala stijenke cijevi [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $V_s$  – volumen segmenta stijenke cijevi [ $\text{m}^3$ ]
- $c_s$  – specifični toplinski kapacitet stijenke cijevi [ $\text{J/kgK}$ ]

Gustoća pare izračunata je pomoću zakona o očuvanju mase, odnosno njena promjena u vremenu ovisi o razlici mase novodovedene pare i novonastalog kondenzata.

$$\frac{d\rho_{pt}}{dt} = \frac{m_{pt} - \sum_{k=6}^{k=nseg-4} m_{Kk}}{Vmc - \frac{Vmc}{nseg} \cdot 9} \quad (6)$$

- $m_{pt}$  – maseni protok pare [kg/s]
- $Vmc$  – volumen međucijevnog prostora [ $m^3$ ]
- $nseg$  – broj segmenata
- $m_{Kk}$  – maseni protok novonastalog kondenzata po segmentu [kg/s]
- $\rho_{pt}$  – gustoća pare [ $kg/m^3$ ]

Maseni protok pare izračunava se iz razlike tlaka ispred odvodnog ventila i unutar izmjenjivača prema sljedećoj formuli (7).

$$m_{pt} = C \cdot y \cdot \sqrt{2 \cdot (p_u - p_t) \cdot 10^5 \cdot \rho_{pt}} \quad (7)$$

- $C$  – faktor gubitaka na ulazu u izmjenjivač
- $y$  – otvorenost ventila
- $p_u$  – tlak pare ispred ulaza u izmjenjivač [bar]
- $p_t$  – tlak pare unutar izmjenjivača [bar]

Maseni protok kondenzata jednak je zbroju novonastalog kondenzata na pojedinom segmentu, s tim da se ne računa u segmentima pothlađenog kondenzata, odnosno u segmentima pregrijane pare. Računa se po sljedećoj formuli.

$$m_K = \sum_{k=6}^{k=nseg-4} \frac{\alpha_{Dk} \cdot f_v \cdot (T_{zas} - T_{sk})}{(h_{sp} - h_{sv}) \cdot 10^3} \quad (8)$$

- $\alpha_{Dk}$  – koeficijent prijelaza topline na strani pare [ $W/m^2K$ ]
- $h_{sp}$  – specifična entalpija suhozasićene pare [kJ/kg]
- $h_{sv}$  – specifična entalpija vrele vode [kJ/kg]
- $T_{zas}$  – temperatura zasićenja [ $^{\circ}C$ ]

Tlak pare unutar izmjenjivača računa se interpolacijom tlaka (XP) i gustoća (YRO) za izračunatu gustoću pare ( $\rho_{pt}$ ) u tom vremenskom trenutku. Za potrebe interpolacije koristi se funkcija unutar Matlaba, `interp1` [13].

$$p_t = \text{interp1}(XP, YRO, \rho_{pt})$$

- XP – raspon tlakova za potrebe interpolacije [bar]
- YRO – veličina koja sadržava gustoće suhozasićene za raspon tlakova XP, pomoću toplinskih tablica, XSteam.

Iz proračunatog tlaka  $p_t$  korištenjem funkcije XSteam, dobiva se temperatura zasićenja [14].

$$T_{zas} = XSteam('Tsat\_p', p_t)$$

Sustav diferencijalnih jednadžbi rješava se Matlab funkcijom „ode15s“ koja integrira jednažbe za zadani vremenski interval, te zadane početne uvjete.

$$[t, y] = \text{ode15s}(@VT6\_din, t_{sim}, ic)$$

- VT6\_din – sustav jednadžbi koji funkcija ode15s rješava
- t<sub>sim</sub> – vektor koji sadržava trajanje simulacije i vremenski korak za koji će riješenja biti ispisana
- ic – stupčasta matrica početnih vrijednost sustava jednadžbi

Uz pomoć funkcije „fsolve“ računaju se početne vrijednosti jednadžbe. Funkcija „fsolve“ traži rješenje sustava jednadžbi za stacionarno stanje.

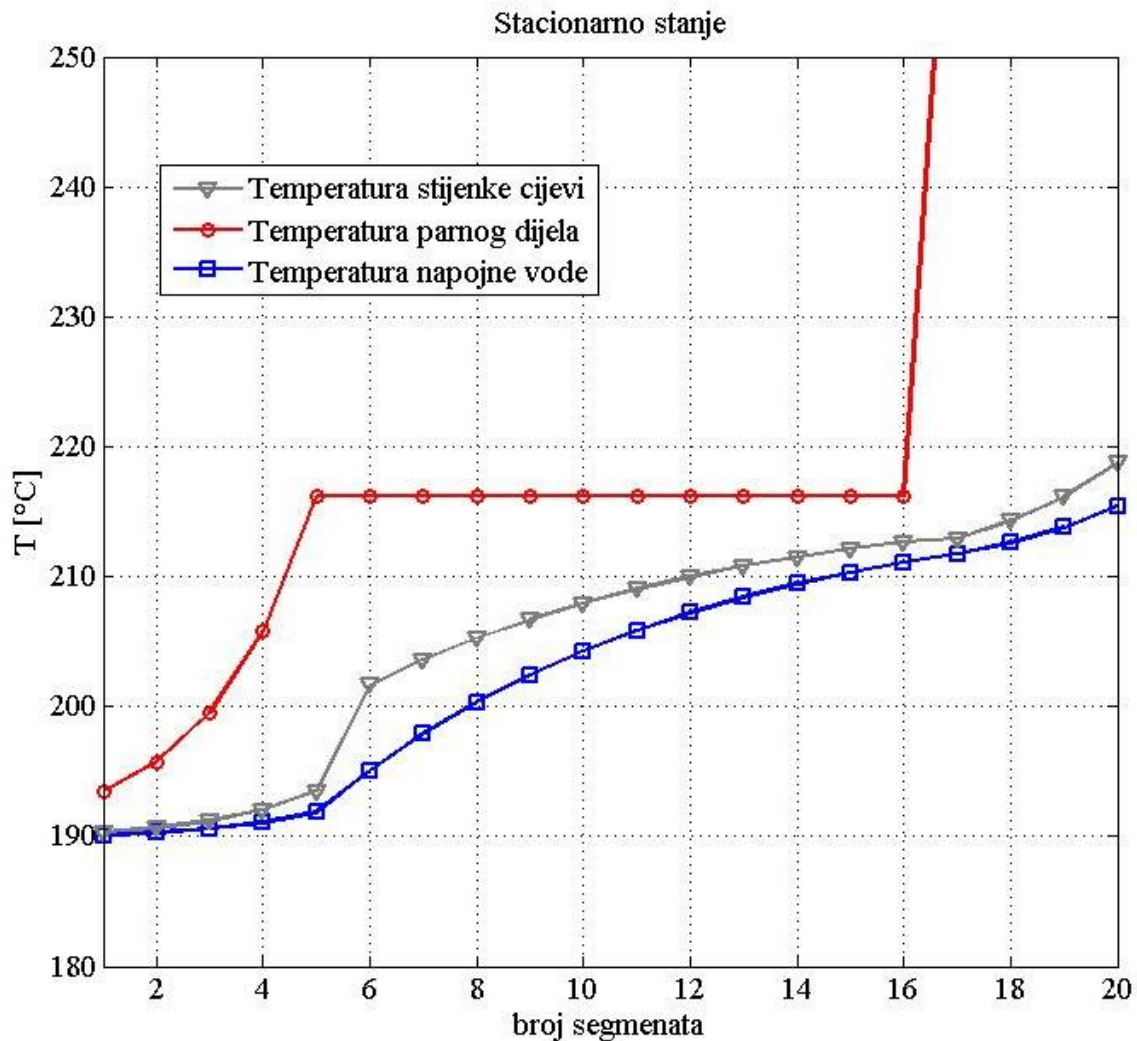
$$T = \text{fsolve}(@VT6, T0)$$

- VT6 – sustav koji funkcija „fsolve“ rješava
- T0 – pretpostavljene početne vrijednosti

#### 4.1. Rezultati stacionarnog stanja i dinamike visokotlačnih zagrijača

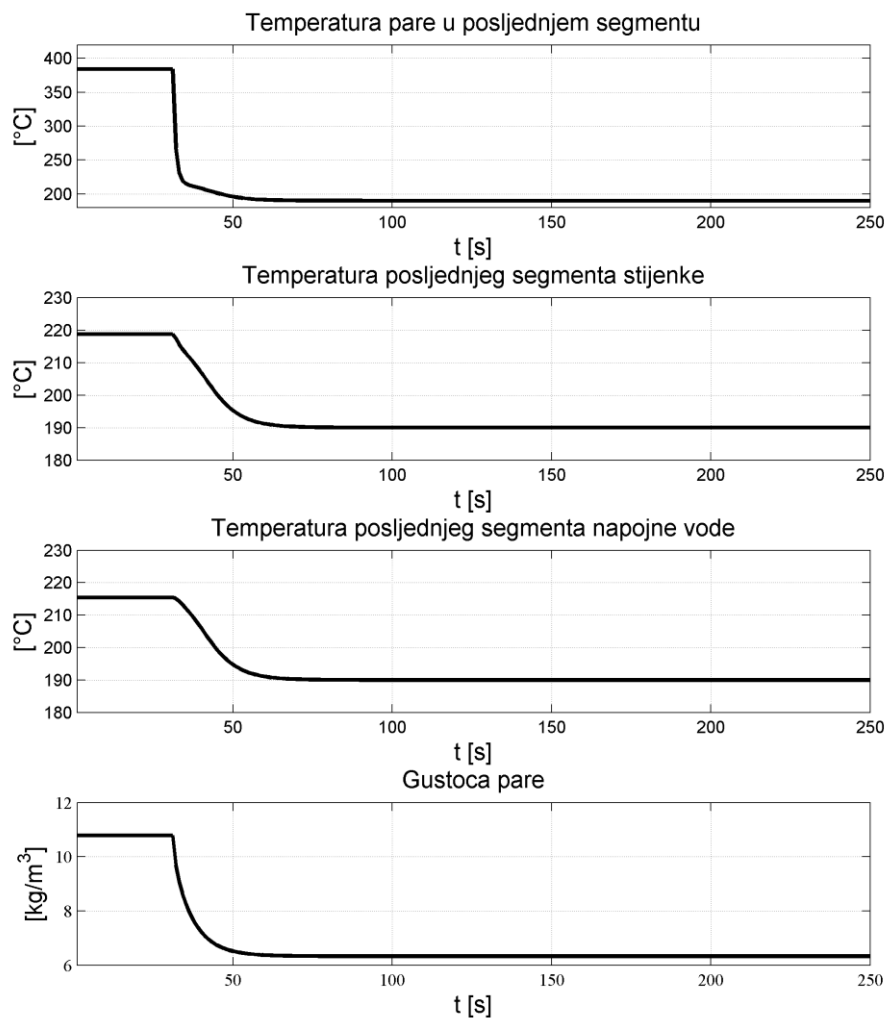
U nastavku su prikazani rezultati stacionarnog stanja za VT6 i VT7 te ponašanje temperatura i gustoće prilikom prekida odvođenja pare iz turbine.





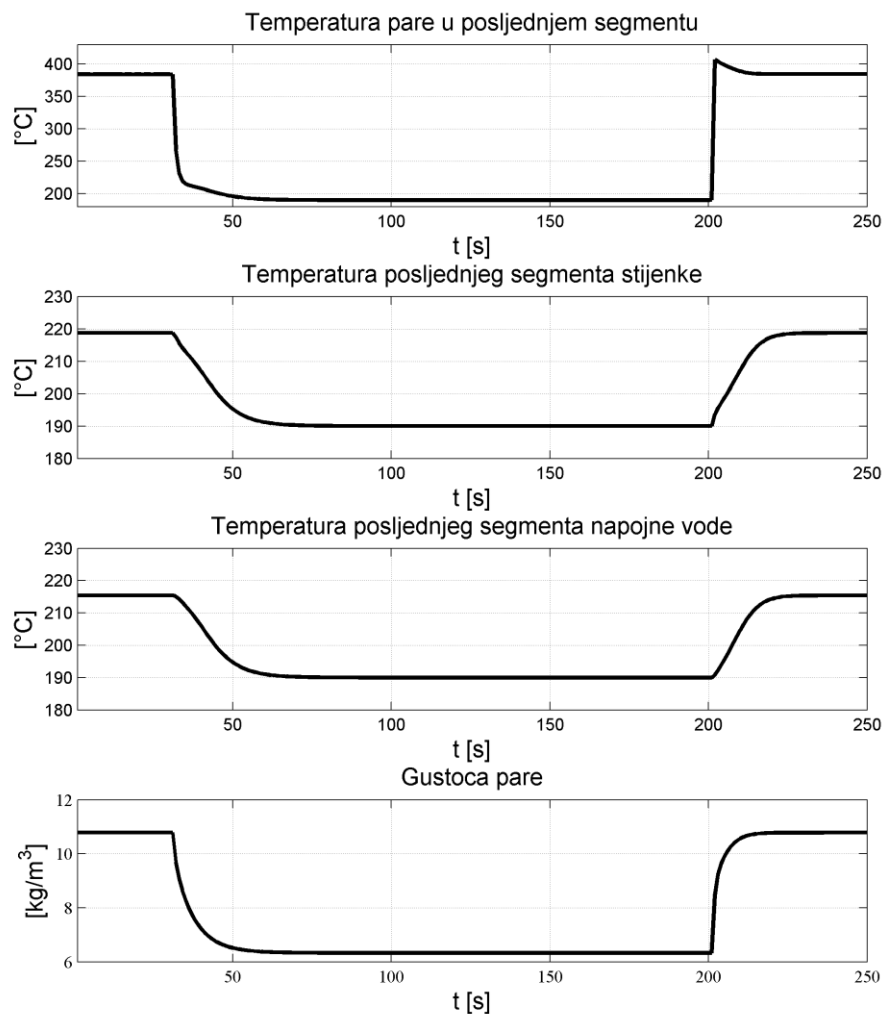
**Slika 8: Raspored temperatura parnog dijela, stijenke cijevi i napojne vode unutar visokotlačnog zagrijača 6**

Na slici Slika 8 vidi se razlika u temperaturnom gradijentu, ovisno o tome koji se medij nalazi u određenim segmentima međucijevnog prostora, te je uočljiv utjecaj zanemarenja izmjene topline među susjednim segmentima. U prvih 5 segmenata u kojima se nalazi kondenzat vidljivo je kako je temperatura stijenke cijevi bliža temperaturi vode. To je posljedica znatno većeg masenog protoka vode i značajno većeg koeficijenta prijelaza topline na strani vode u odnosu na koeficijent prijelaza topline na strani kondenzata. U segmentima suhozasićene pare dolazi do porasta koeficijenta prijelaza topline, što se može vidjeti po ponašanju temperature stijenke cijevi, koja ima određeni odmak od temperature napojne vode.



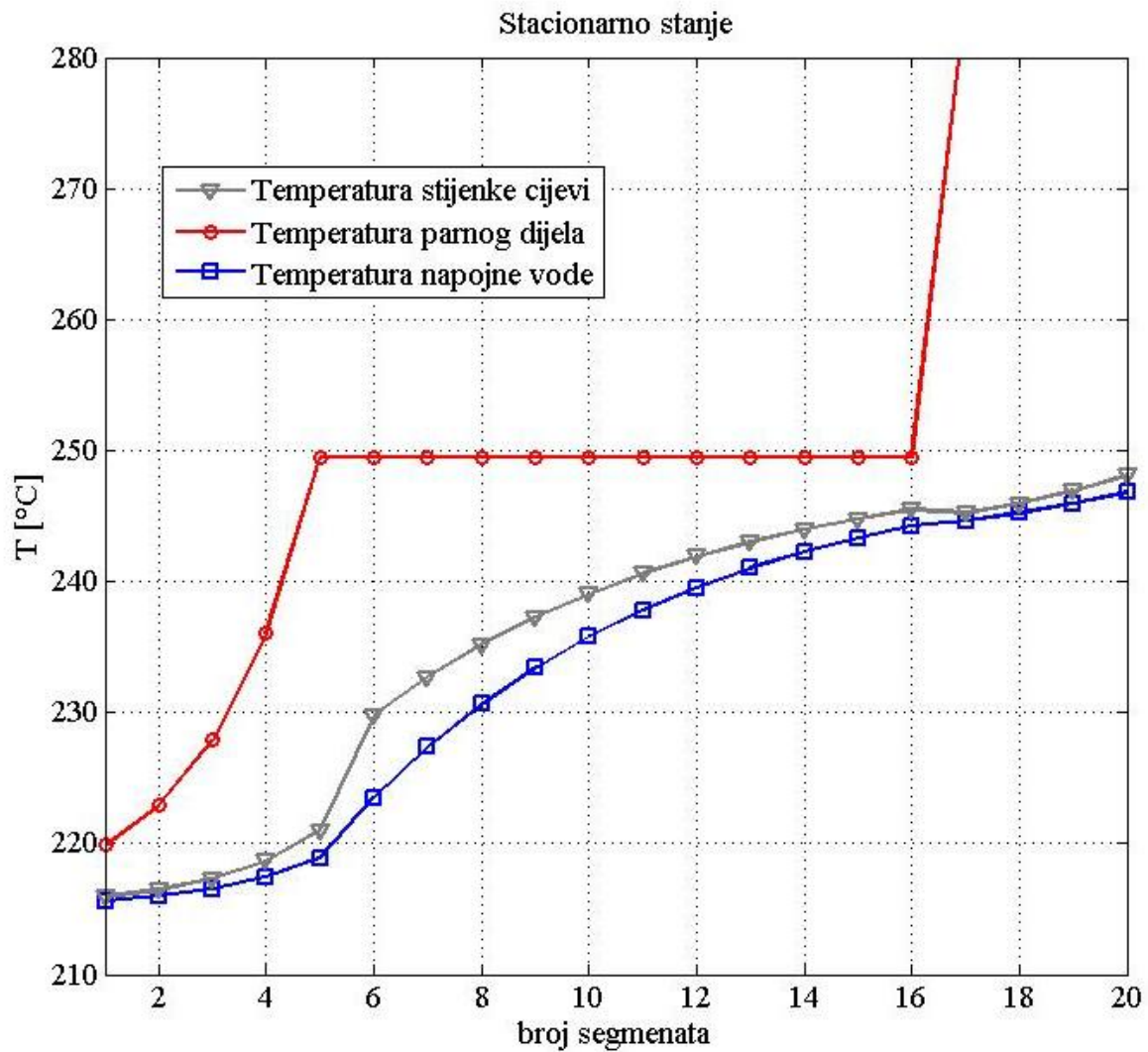
**Slika 9: Prikaz stanja unutar VT6 nakon prekida oduzimanja pare iz turbine**

Nakon što se prekine oduzimanje pare iz turbine u 30. sekundi, dolazi do postepenog pada temperatura medija unutar izmjenjivača, sve do uspostave novog stacionarnog stanja oko 30 sekundi poslije. Promjena temperature pare znatno je brža u odnosu na promjenu temperature napojne vode, budući da napojna voda ima značajno veći maseni protok i toplinski kapacitet.



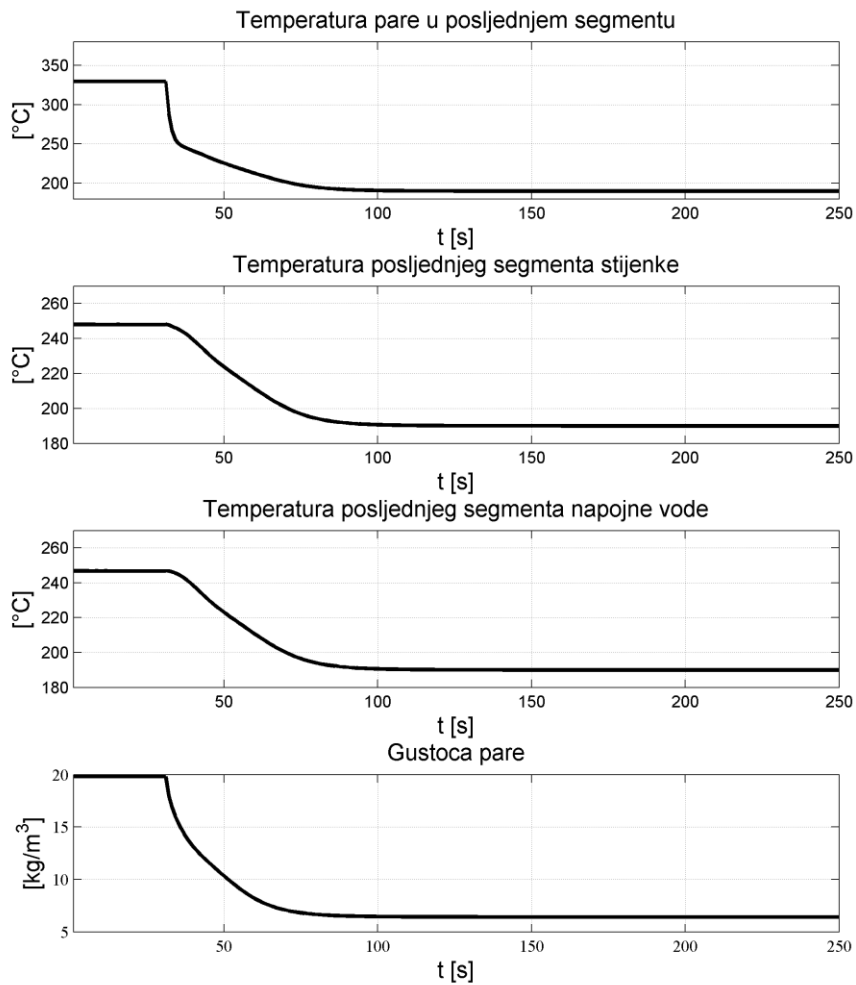
**Slika 10: Prikaz stanja unutar VT6 nakon prekida oduzimanja pare iz turbine u vremenskom intervalu od  $t=30-200$  s**

Prekidom oduzimanja pare u 30. sekundi, te ponovnom uspostavom nakon 200. sekunde, dobivaju se rezultati prikazani na slici Slika 10. Otvaranjem ventila nakon 200. sekunde dolazi do porasta gustoće i temperature pare, te porasta temperature napojne vode i stijenke cijevi. Kao i u prethodnom slučaju, promjena temperature pare intenzivnija je u odnosu na promjenu temperature napojne vode.



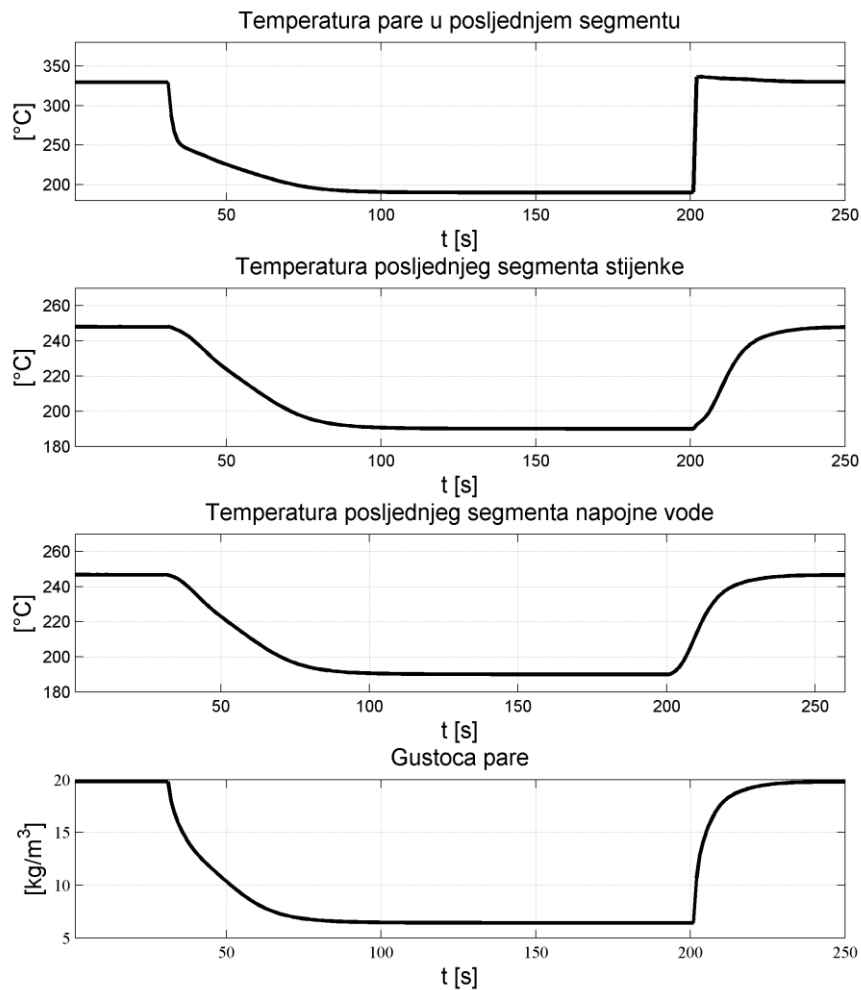
**Slika 11: Raspored temperatura parnog dijela, stijenke cijevi i napojne vode unutar visokotlačnog zagrijača 7**

Zbog bolje predodžbe rezultata nije prikazana krajnja temperatura pregrijane pare unutar izmjenjivača. Vidljivo je kako se glavina izmjene topline odvija u segmentima koji sadržavaju suhozasićenu paru, jer je u njima najveći porast temperature napojne vode.



**Slika 12: Prikaz stanja unutar VT7 nakon zatvaranja ventila oduzimanja pare**

Slika 12: Prikaz stanja unutar VT7 nakon zatvaranja prikazuje stanje temperatura i gustoće medija, nakon zatvaranja ventila u 30. sekundi. Sustavu je potrebno oko 50 sekundi da postigne novo stacionarno stanje.



**Slika 13: Prikaz stanja unutar VT7 nakon prekida oduzimanja pare iz turbine u vremenskom intervalu od  $t=30-200$  s**

Za razliku od VT6 kojem je potrebno 30 sekundi za uspostavu novog stacionarnog stanja, VT7 reagira sporije na zatvaranje ventila oduzimanja. Uzrok ovakvog ponašanja serijski je spoj dvaju visokotlačnih izmjenjivača, u kojem je stanje napojne vode na ulazu u VT7 jednako stanju napojne vode na izlazu iz VT6. To znači da se u VT7 napojna voda nakon zatvaranja ventila hladi za nešto više od  $50$  °C, dok je u VT6 promjena temperature malo iznad  $25$  °C.

## 5. MATEMATIČKI MODEL NAPREZANJA KOLEKTORA NAPOJNE VODE

U ovom poglavlju dan je matematički zapis ponašanja temperatura i naprezanja stijenke kolektora. Slično kao i u prethodnom poglavlju, primjenom zakona o očuvanju energije, izvedene su jednadžbe za temperaturni profil stijenke, te su zatim riješene korištenjem programskog paketa Matlab [13]. Karakteristike kolektora prikazane su u tablici ispod.

Duljina	Vanjski promjer	Debljina stijenke	Broj cijevi	Vanjski promjer cijevi	Debljina stijenke cijevi
9 m	0.4064	0.026 m	186	0.0445	0.0045

**Tablica 1: Karakteristike kolektora**

Stijenka kolektora napojne vode cilindričnog je oblika, ali se za potrebe proračuna promatra kao beskonačna ravna ploča. Na taj se način izbjegao utjecaj zakrivljenosti stijenke na temperaturni profil, te je zanemareno provođenje topline u tangencijalnom i uzdužnom smjeru stijenke kolektora. Temperaturno polje stijenke računato je na način da je debljina stijenke podjeljena na 6 kontrolnih volumena jednake debljine, te je za svaki od njih postavljena jednadžba očuvanja energije [15]. Jednadžba ispod koristi se za računanje temperature prvog segmenta stijenke.

$$\frac{dT_{s1}}{dt} = A_1 \cdot (B_1 \cdot (T_{nv} - T_{s1}) - C_1 \cdot (T_{s1} - T_{s2})) \quad (9)$$

- $T_{s1}$  – temperatura stijenke kolektora u prvom segmentu [°C]
- $T_{s2}$  – temperatura stijenke kolektora u drugom segmentu [°C]
- $T_{nv}$  – temperatura napojne vode unutar kolektora [°C]
- $A_1$  – faktor
- $B_1$  – faktor

- $C_1$  – faktor

$$A_1 = \frac{1}{\rho \cdot \delta \cdot c} \quad (10)$$

- $\rho$  – gustoća materijala stijenke [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\delta$  – debljina segmenta stijenke [m]
- $c$  – toplinski kapacitet materijala stijenke kolektora [ $\text{J/kgK}$ ]

$$B_1 = \frac{1}{\left( \frac{1}{\alpha_{nv}} + \frac{\delta}{2\lambda} \right)} \quad (11)$$

- $\alpha_{nv}$  – koeficijent prijelaza topline na unutrašnjoj strani kolektora [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
- $\lambda$  – koeficijent toplinske vodljivosti materijala stijenke [ $\text{W/mK}$ ]

$$C_1 = \frac{\lambda}{\delta} \quad (12)$$

Temperature segmenata u rasponu od 2 do n-1 se računaju pomoću sljedećeg izraza.

$$\frac{dT_{si}}{dt} = \frac{\lambda}{\rho \cdot \delta^2 \cdot c} \cdot (T_{si-1} + T_{si+1} - 2 \cdot T_{si}) \quad (13)$$

Prilikom izračunavanja temperature posljednjeg segmenta stijenke kolektora, uzima se u obzir pretpostavka da kolektor ne izmjenjuje toplinu s okolinom, odnosno pretpostavlja se idealna izoliranost kolektora.

$$\frac{dT_{sn}}{dt} = A_2 \cdot (B_2 \cdot (T_{sn-1} - T_{sn})) \quad (14)$$

- $T_{sn}$  – temperatura zadnjeg segmenta kolektora [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $T_{sn-1}$  – temperatura predzadnjeg segmenta kolektora [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $A_2$  – faktor
- $B_2$  – faktor



$$A_2 = \frac{\lambda}{\rho \cdot \delta \cdot c} \quad (15)$$

$$B_2 = \frac{\lambda}{\delta} \quad (16)$$

Integracija gornjeg sustava jednadžbi učinjena je pomoću funkcije „ode15s“.

$[t,y]=ode15s(@dinstijenka, tsim, ic)$

- ode15s – funkcija unutar Matlab-a za numeričko rješavanje diferencijalnih jednadžbi
- dinstijenka – sustav jednadžbi koji funkcija rješava
- tsim – vremenski interval
- ic – stupčasta vektor početnih uvjeta

Kako bi se sustav jednadžbi riješio, potrebno je odrediti početne uvjete. Početni su uvjeti dobiveni korištenjem funkcije „fsolve“ koja nastoji svesti rješenja sustava jednažbi u nultu vrijednost, odnosno njome se dobiju rješenja sustava jednažbi za stacionarno stanje.

$Ts=fsolve(@stijenkastac, Ts0)$

- stijenkastac – sustav jednadžbi koje funkcija fsolve rješava
- Ts0 – pretpostavljene početne vrijednosti

Za potrebe računanja toplinskih naprezanja koristi se izraz (17) [9].

$$\sigma_i = \frac{\beta \cdot E}{1-\nu} (T_{sr} - T_i) \quad (17)$$

- $\beta$  – koeficijent linearnog temperaturnog rastezanja [ $K^{-1}$ ]
- E – modul elastičnosti [ $N/m^2$ ]
- $T_{sr}$  – srednja temperatura stijenke kolektora [ $^{\circ}C$ ]
- $T_i$  – temperatura segmenta stijenke kolektora [ $^{\circ}C$ ]

- $\nu$  – Poissonov koeficijent
- $\sigma_i$  – temperaturna naprezanja segmenta stijenske [N/m<sup>2</sup>]

$$T_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (18)$$

Uz temperaturna naprezanja, valja uzeti u obzir i naprezanja uzrokovana konstantnim tlakom u kolektoru. Računaju se pomoću sljedećeg izraza [9].

$$\sigma_p = \frac{D}{2 \cdot s} \cdot p \quad (19)$$

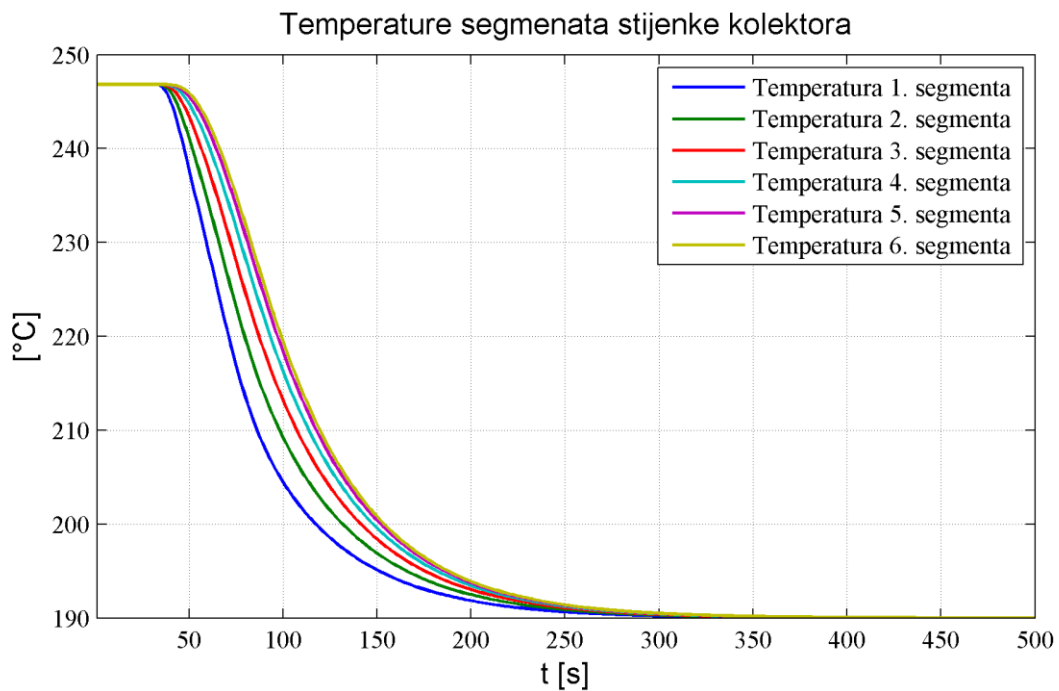
- $D$  – promjer kolektora [m]
- $s$  – debljina stijenske kolektora [m]
- $p$  – tlak unutar kolektora [Pa]

Ukupna naprezanja potrebno je održati u određenim granicama, kako ne bi došlo do oštećenja kolektora. Dopuštena naprezanja za najvišu temperaturu kolektora, dana su u tablici ispod.

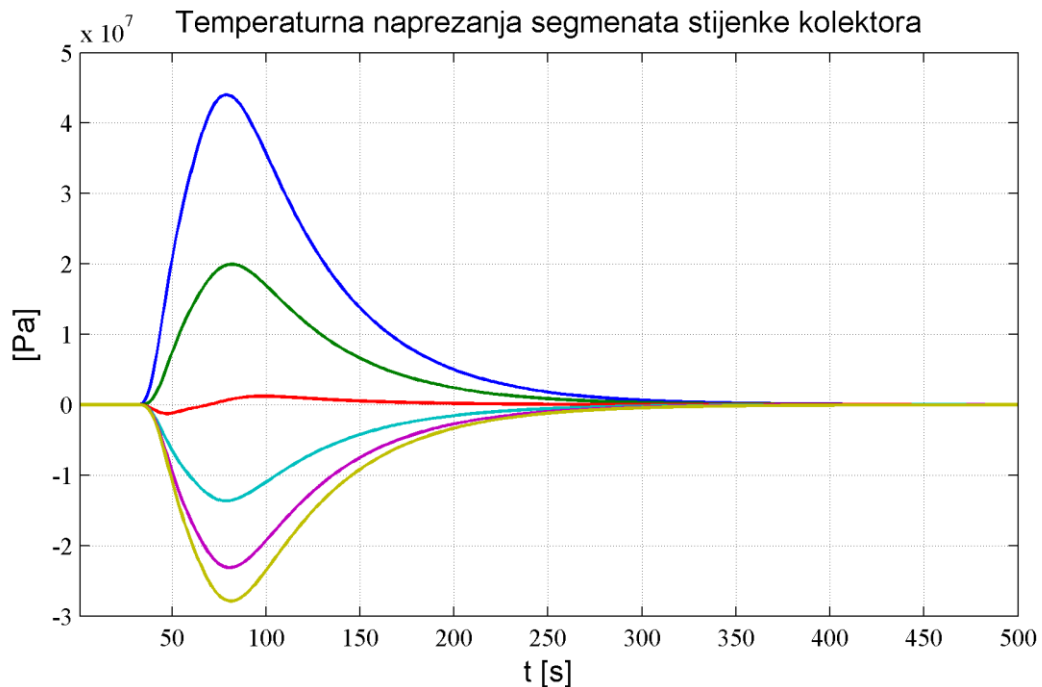
Temperatura [°C]	150	200	250	300	350	400	450	500
$\sigma_{dop}$ [MPa]	250	233	213	194	175	159	147	141

**Tablica 2: Dopuštena naprezanja za materijal 16Mo3 [6]**

### 5.1. Odzivi temperatura i temperaturnih naprezanja segmenata stijenke kolektora



Slika 14: Temperature segmenata stijenke kolektora nakon zaustavljanja oduzimanja pare

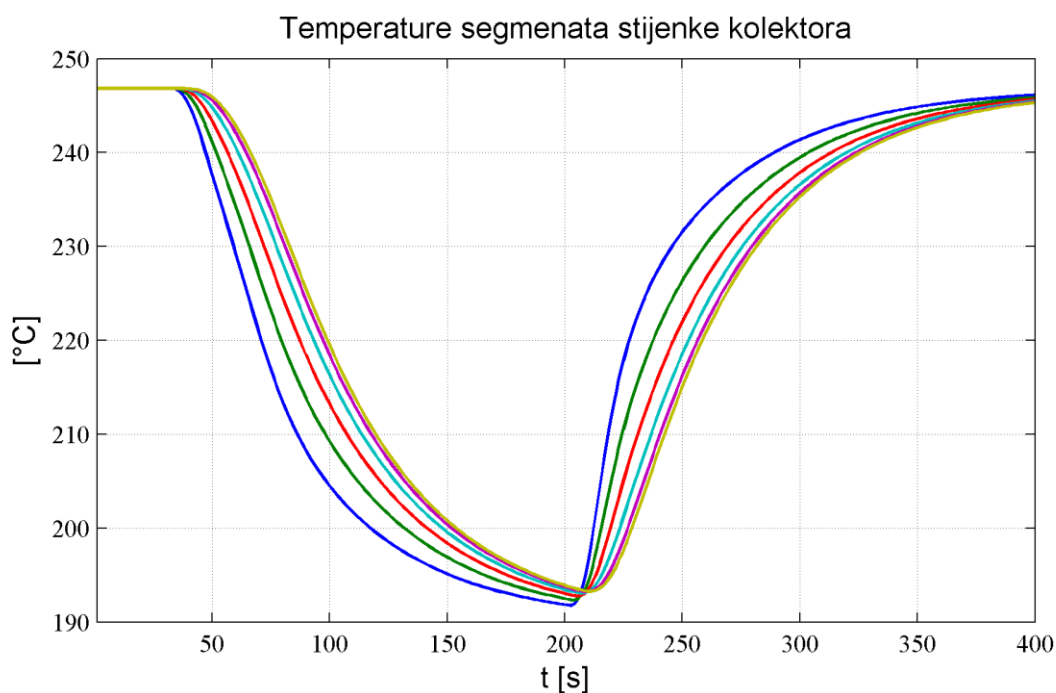


Slika 15: Temperaturna naprezanja segmenata stijenke kolektora nakon prekida oduzimanja pare

Slika 14 pokazuje promjene temperature stijenke kolektora za slučaj prekida odvođenja pare iz turbine u 30. sekundi. Pretpostavka o idealnoj izolaciji kolektora vidljiva je u prvih 30 sekundi, gdje su segmenti na istoj temperaturi. Nakon unešenog poremećaja, temperatura prvog segmenta stijenke mijenja se brže od temperature sljedećih segmenata iz razloga što je u dodiru s napojnom vodom, te prva prima informaciju o njenoj promjeni temperature.

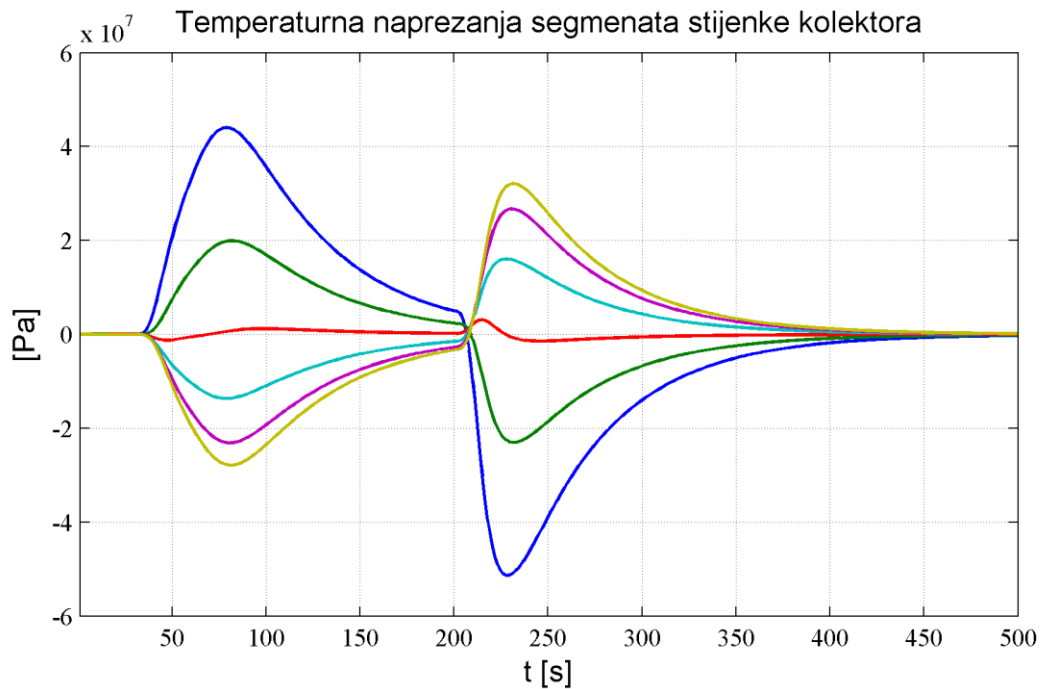
Na slici Slika 15 temperaturna su naprezanja u segmentima stijenke kolektora. Prvi segment stijenke kolektora izložen je najvećim temperaturnim naprezanjima, što se u startu i očekivalo, budući da je njegov odziv na promjenu temperature napojne vode, najbrži.

U slučaju zatvaranja oduzimanja u intervalu od 30 do 200s, dobiveni su sljedeći rezultati.



**Slika 16: Temperature segmenata stijenke kolektora nakon zatvaranja i ponovne uspostave oduzimanja pare iz turbine**

Kašnjenje temperaturnog odziva stijenke kolektora jasno je vidljivo nakon ponovnog otvaranja ventila oduzimanja pare. Razlog leži u inerciji napojne vode koja izlazi iz visokotlačnog zagrijača, te ulazi u kolektor. Za ponovnu uspostavu stacionarnog stanja, kolektoru je potrebno nešto više od 200 sekundi.



**Slika 17: Temperaturna naprezanja segmenata stijenke kolektora nakon zatvaranja i ponovne uspostave oduzimanja pare iz turbine**

Naprezanja prvog segmenta stijenke opet su dominantna iznosom, u odnosu na druge segmente. Prvi skok vidljiv je nakon zatvaranja ventila oduzimanja pare, a drugi nakon ponovne uspostave oduzimanja. Temperaturna naprezanja prvog segmenta nešto su veća prilikom uspostave oduzimanja, nego li naprezanja kod obustave oduzimanja. Razlog leži u tome što se kolektor hladio dovoljno dugo. U slučaju da je oduzimanje pare bilo obustavljeno na duži period, temperaturna naprezanja prilikom uspostave oduzimanja bila bi još veća.

## 6. REZULTATI SIMULACIJE

U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije za različito vrijeme obustave oduzimanja pare. Simulacije su provedene na način da uzimaju u obzir različite brzine otvaranja ventila kod ponovne uspostave oduzimanja. Simulacije su rađene tako da je vrijeme obustave oduzimanja pare jednako 20, 70 i 340 sekundi, za jednu brzinu otvaranja ventila, te je sve to ponovljeno, ali ovog puta za trenutno otvaranje ventila. Rezultati su prikazani u tablici ispod.

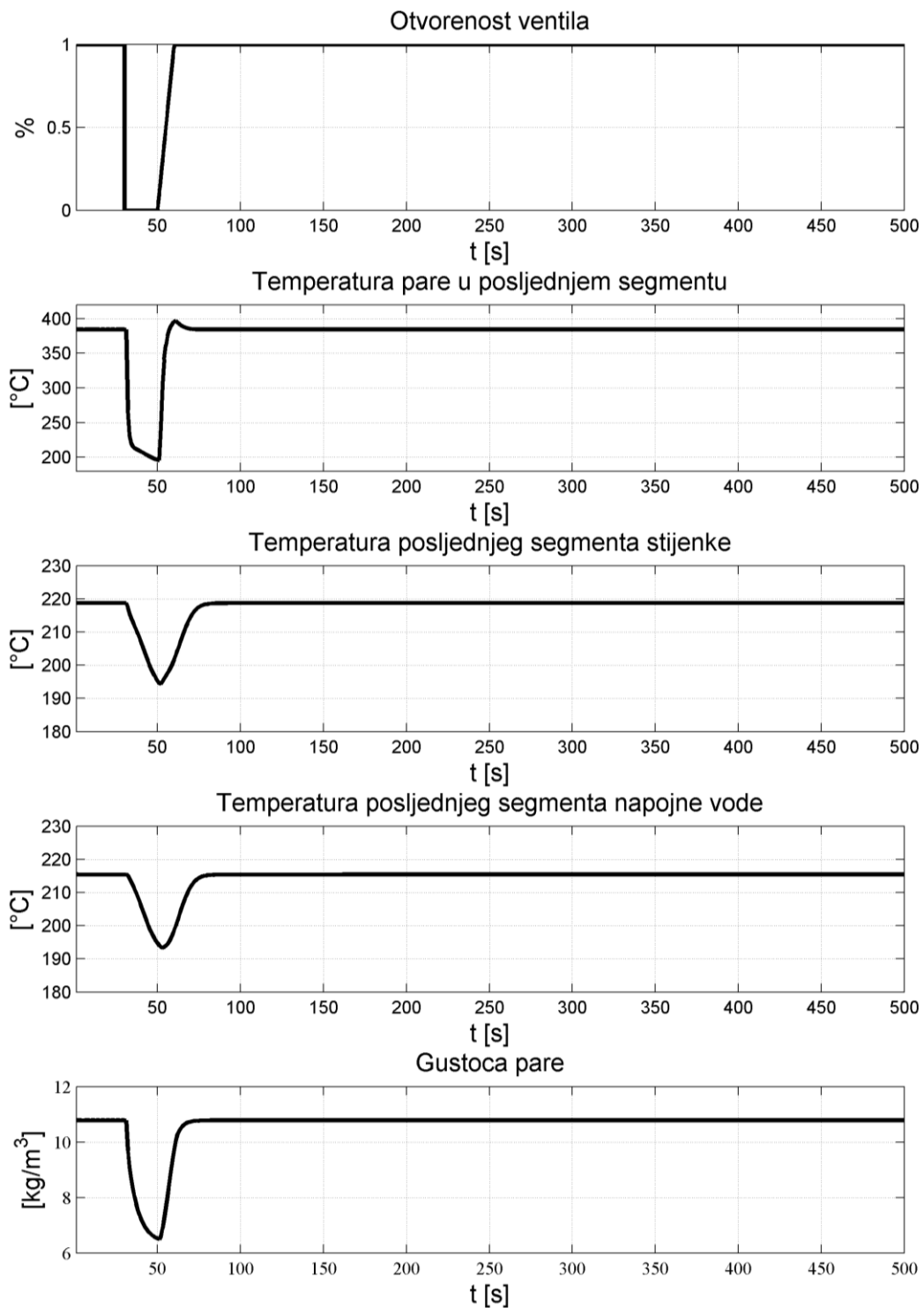
Simulacija broj	Trajanje obustave oduzimanja	Vrijeme otvaranja ventila kod ponovne uspostave	Naprezanje
1.	20 s	10 s	184.17 MPa
2.	70 s		199.09 MPa
3.	340 s		199.09 MPa
4.	20 s	0 s	181.31 MPa
5.	70 s		199.09 MPa
6.	340 s		199.09 MPa
$\sigma_{dop}=213$ MPa			

**Tablica 3: Tablica rezultata simulacije**

Ukupna naprezanja prilikom ponovne uspostave nisu prekoračila dopuštena naprezanja za temperaturu od 250 °C. Dopušteno naprezanje je 213 MPa, dok najveće iznosi 199.09 MPa. Najveće naprezanje u svim simulacijama javilo se u prvom segmentu, čiji je temperaturni gradijent bio najviši. Rezultati pokazuju kako se najveća naprezanja javljaju prilikom obustave oduzimanja. Iako su temperaturna naprezanja veća prilikom ponovne uspostave oduzimanja, kako je vidljivo na Slika 17: Temperaturna naprezanja segmenata stijenke kolektora nakon zatvaranja i ponovne uspostave oduzimanja pare iz turbine, budući da su

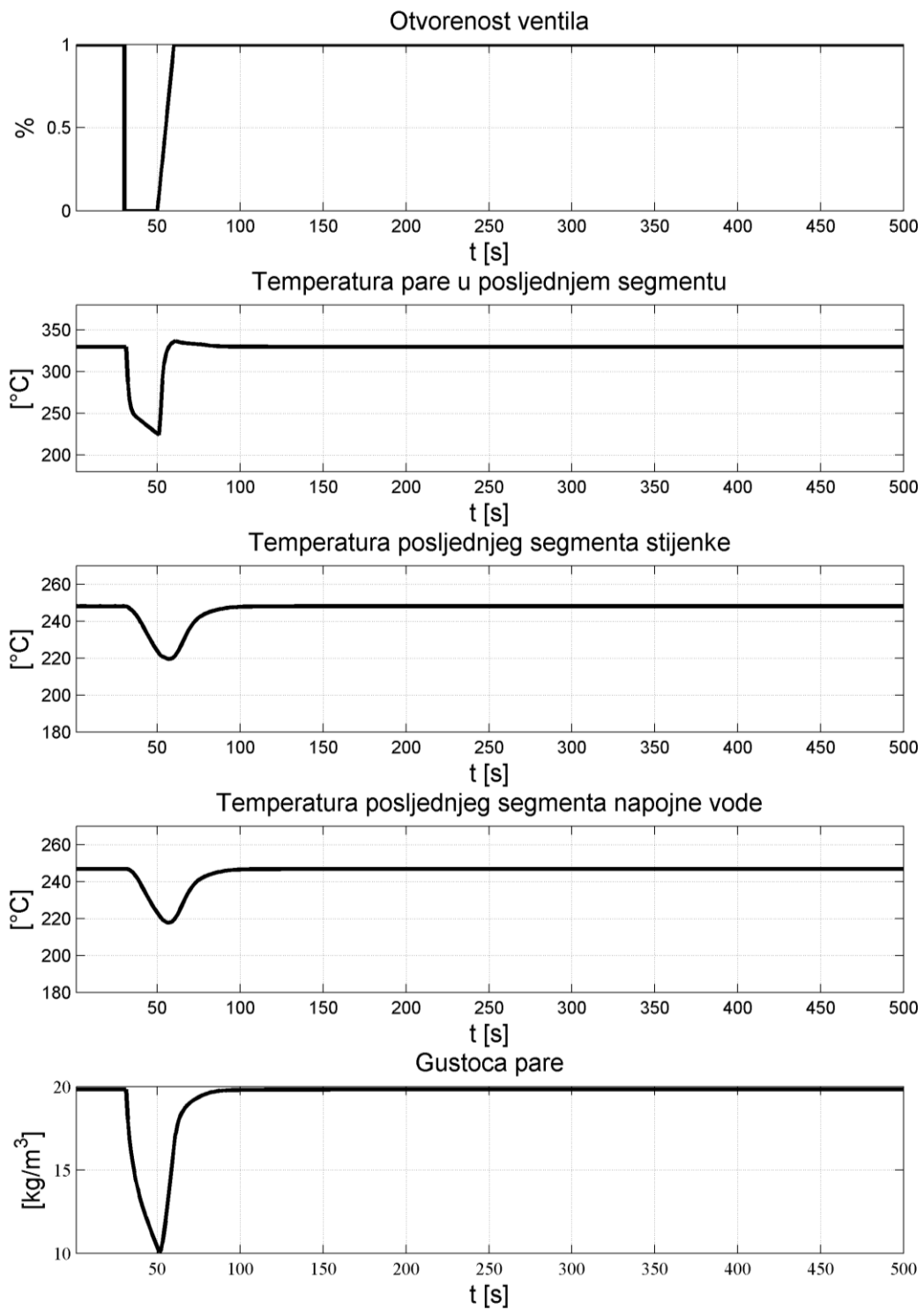
negativnog predznaka biti će umanjena za naprezanja od strane tlaka unutar kolektora. Ukoliko se uspoređuju naprezanja nastala prilikom obustave oduzimanja s naprezanjima kod ponovne uspostave oduzimanja, vidljivo je kako vrijeme za koje je oduzimanje pare zaustavljeno, ima velik utjecaj na njihovu razliku. Skok u naprezanju, koji je posljedica zatvaranja ventila oduzimanja, ne ovisi previše o tome koliko će obustava oduzimanja trajati, dok isto ne vrijedi i za naprezanje nastalo prilikom otvaranja ventila oduzimanja. Ovo drugo povećanje naprezanja uvelike ovisi o trajanju obustave oduzimanja. Ukoliko je trajanje obustave oduzimanja duže, veća će biti i ukupna naprezanja nastala prilikom ponovne uspostave oduzimanja. Rast tih naprezanja doseže svoj maksimum nakon što je stijenka kolektora u potpunosti ohlađena na temperaturu od 190 °C, a to se javlja kod vremena obustave oduzimanja od 340 sekundi.

Za simulaciju br. 6 izračunat je maksimalan porast snage postrojenja nakon obustave oduzimanja pare, koji iznosi  $\Delta P=23.19$  MW. Kako je već prije rečeno, prekid oduzimanja utječe na ukupnu iskoristivost postrojenja, te će ona pasti s  $\eta=36.91\%$  na  $\eta=33.47$ , što je pad od 3.43%. Ovaj pad iskoristivosti je opravdan, s obzirom da je nakon zaustavljanja oduzimanja, temperaturni pad napojne vode gotovo 60 °C.

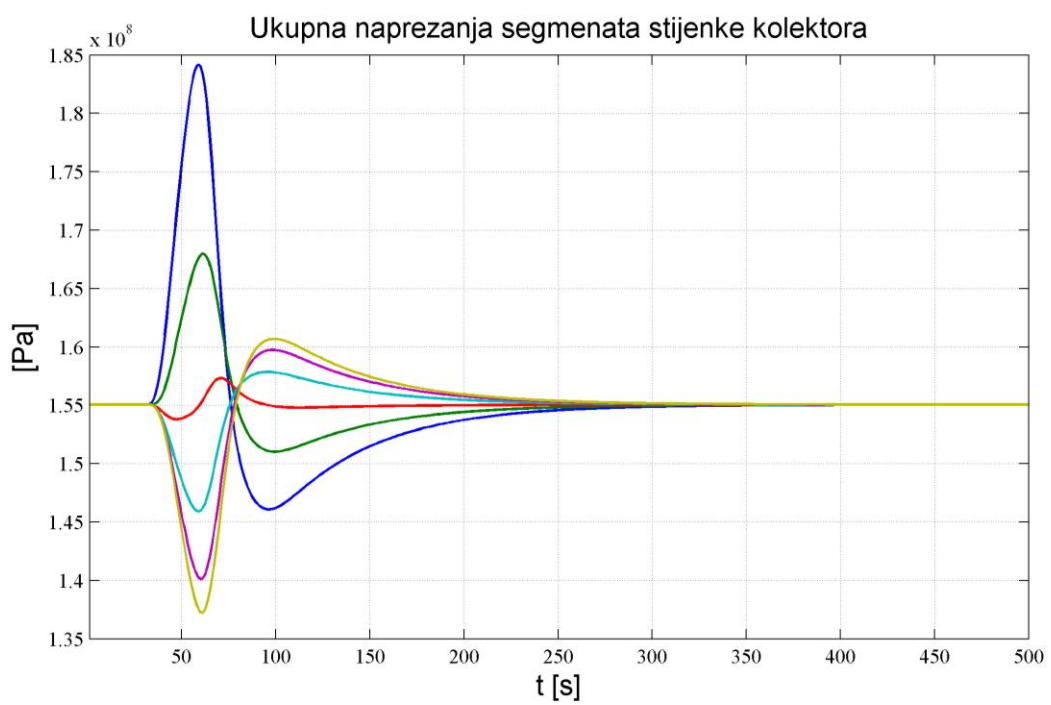
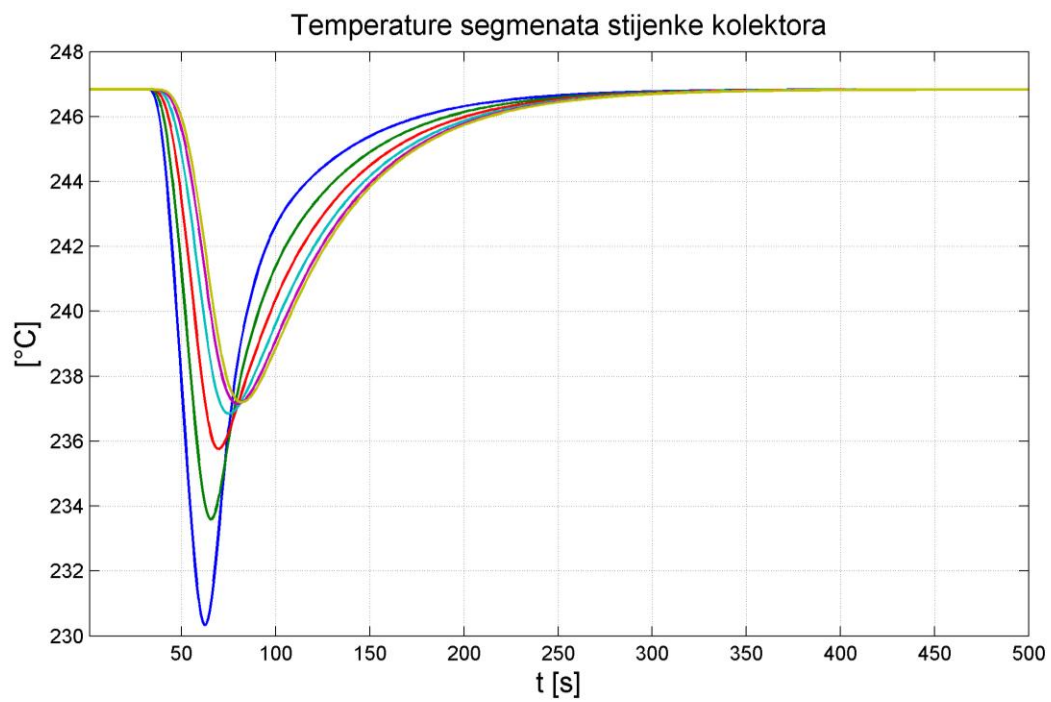


Slika 18: Odziv VT6 za simulaciju br. 1

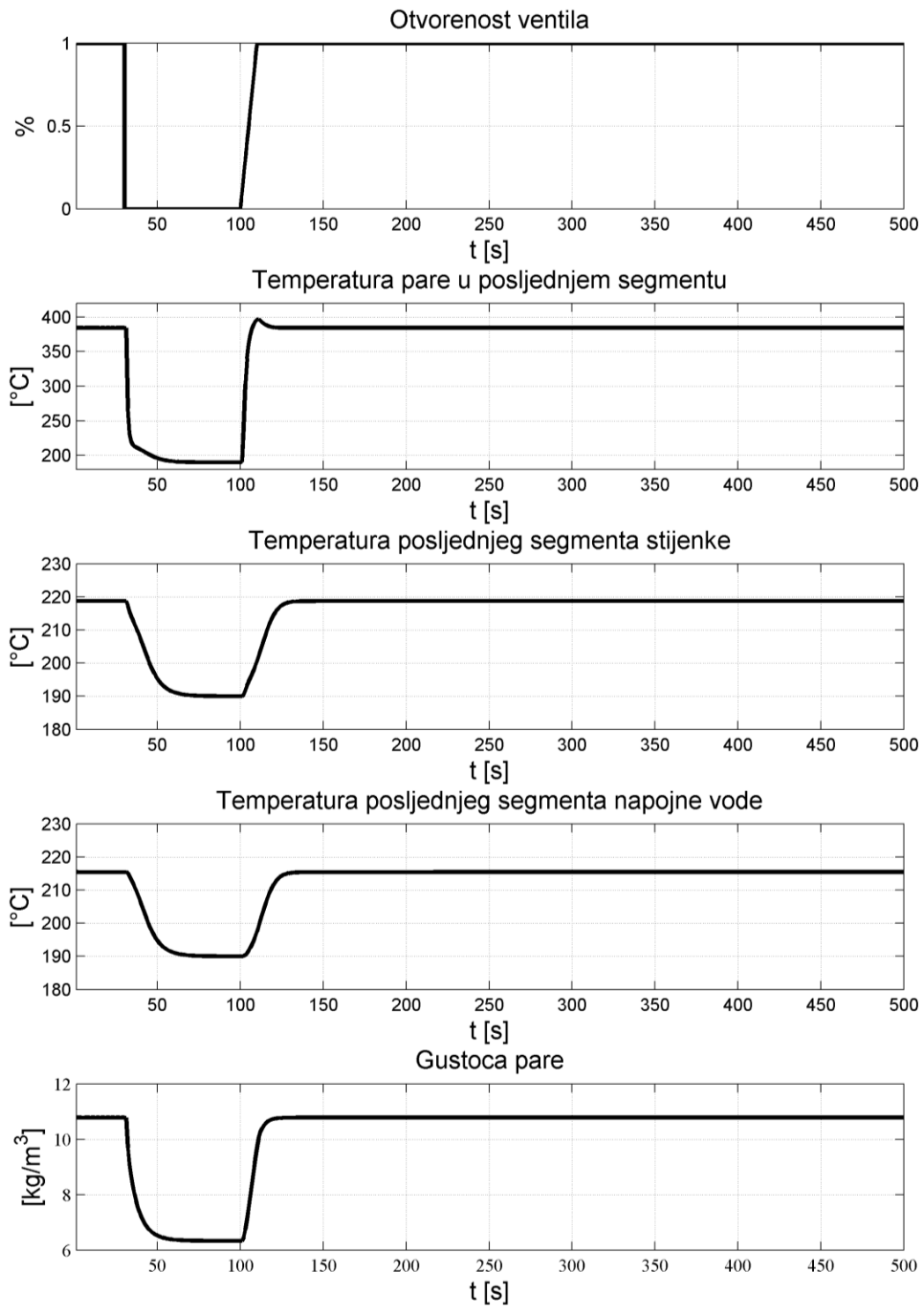




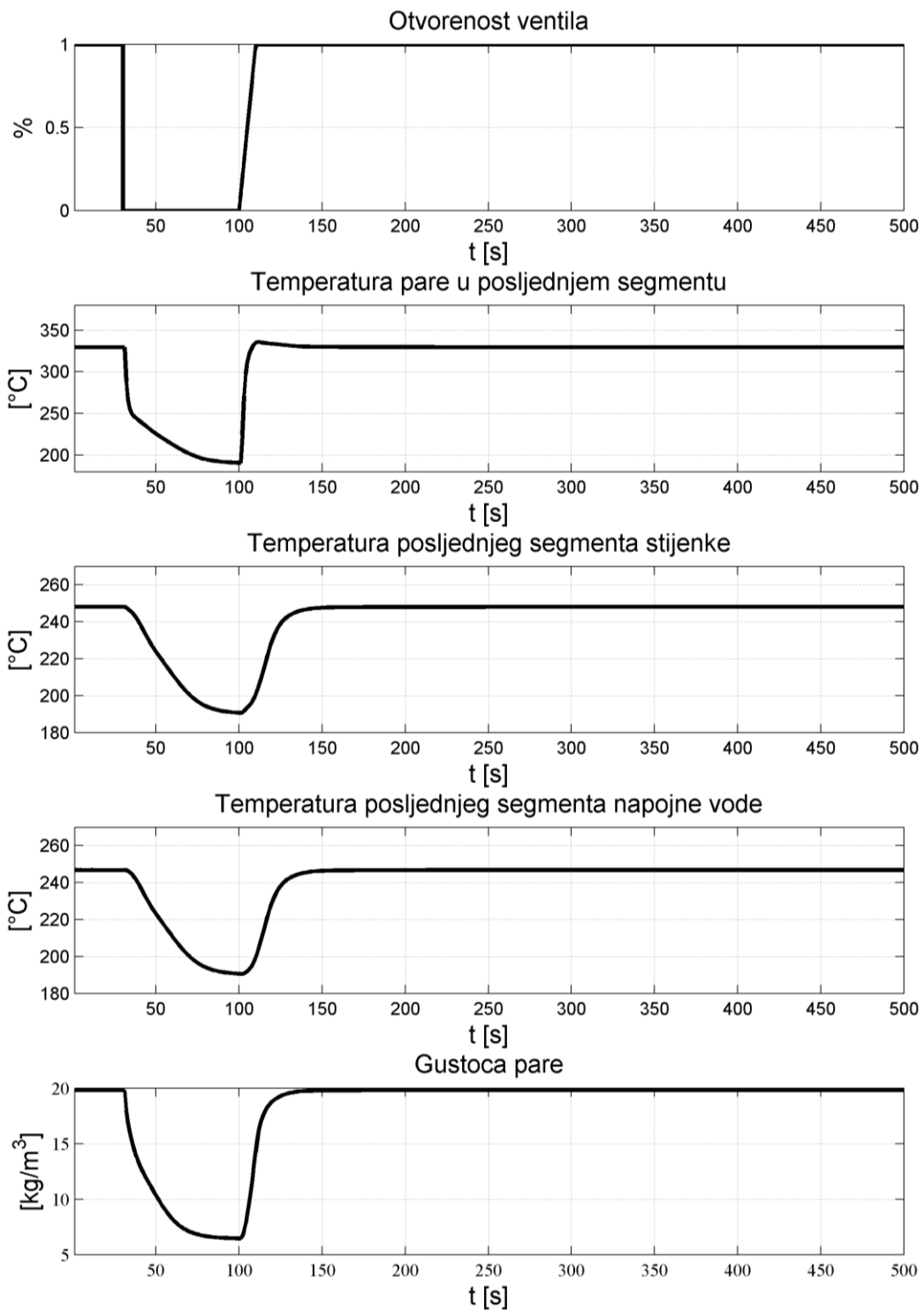
Slika 19: Odziv VT7 za simulaciju br. 1



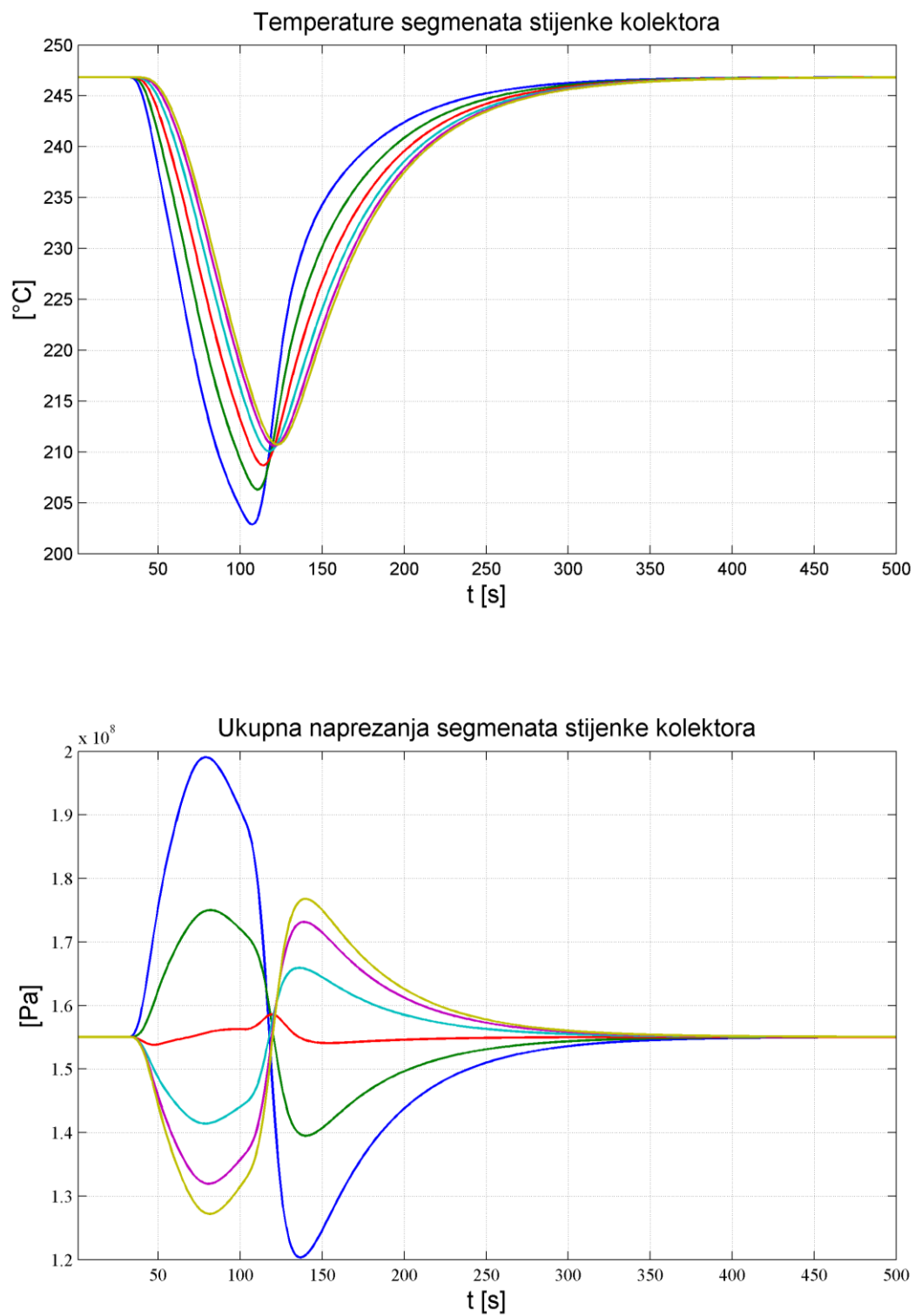
Slika 20: Odziv temperature i naprezanja kolektora za simulaciju br. 1



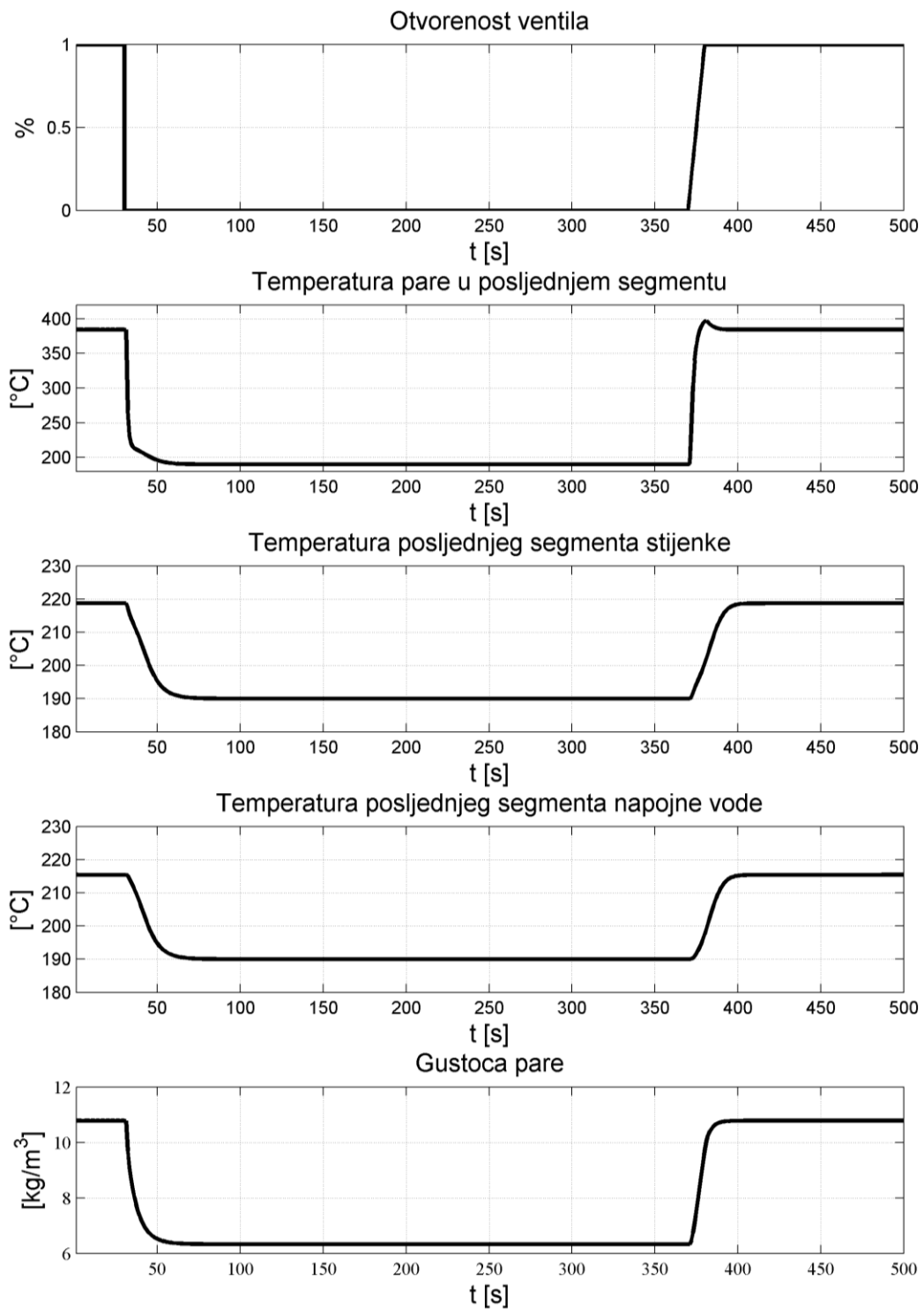
Slika 21: Odziv VT6 za simulaciju br. 2



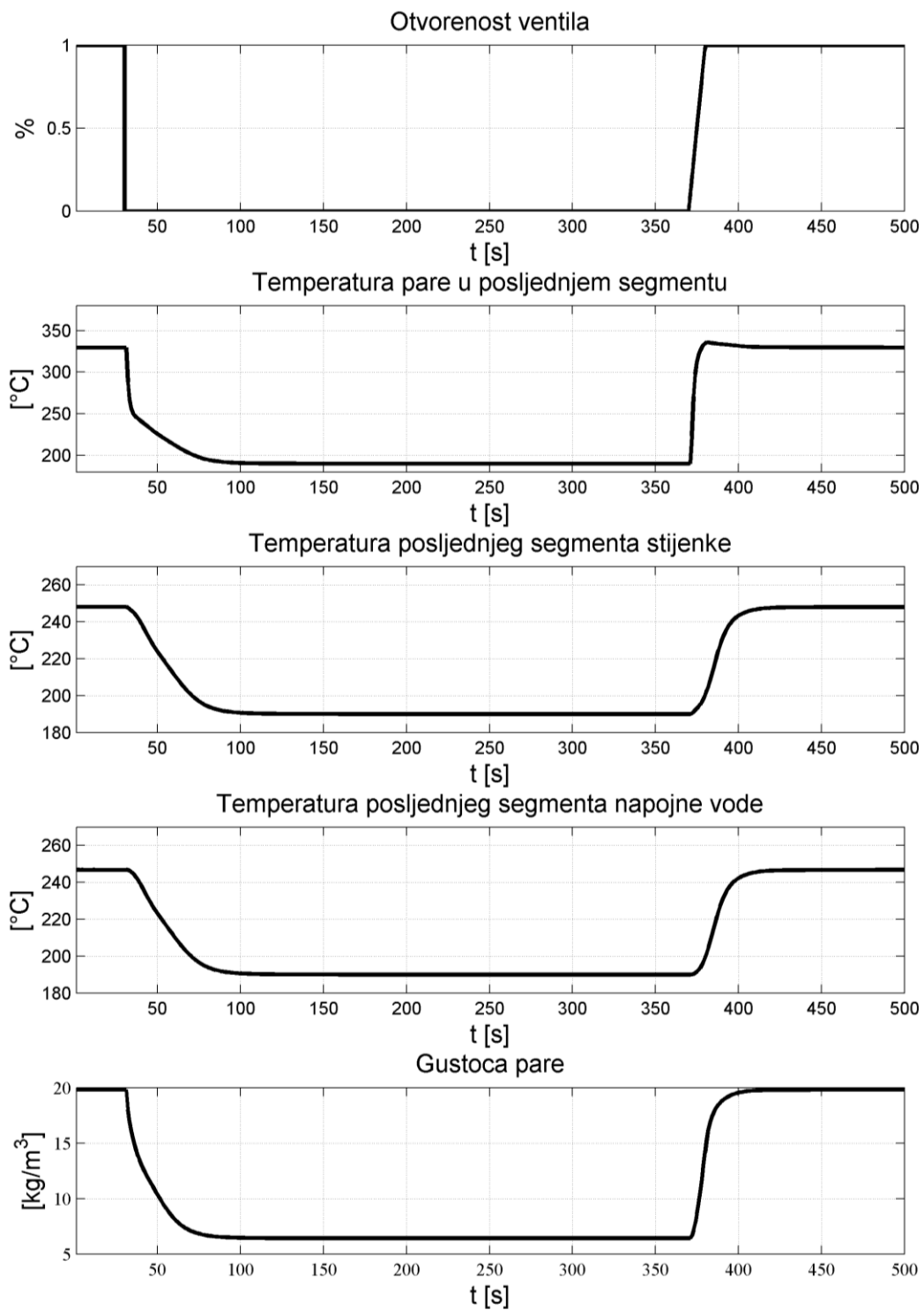
Slika 22: Odziv VT7 za simulaciju br. 2



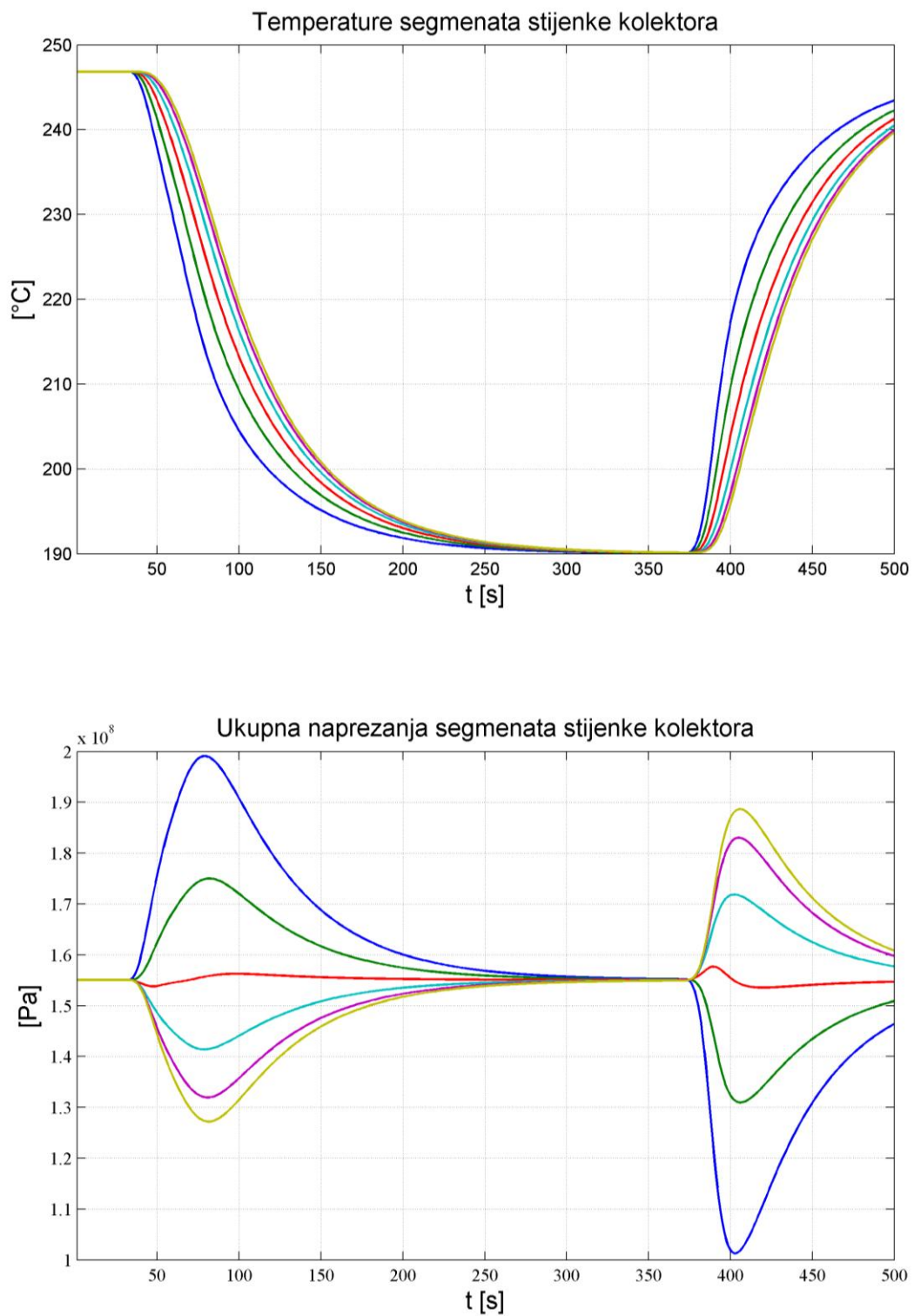
**Slika 23: Odziv temperature i naprezanja kolektora za simulaciju br. 2**



Slika 24: Odziv VT6 za simulaciju br. 3

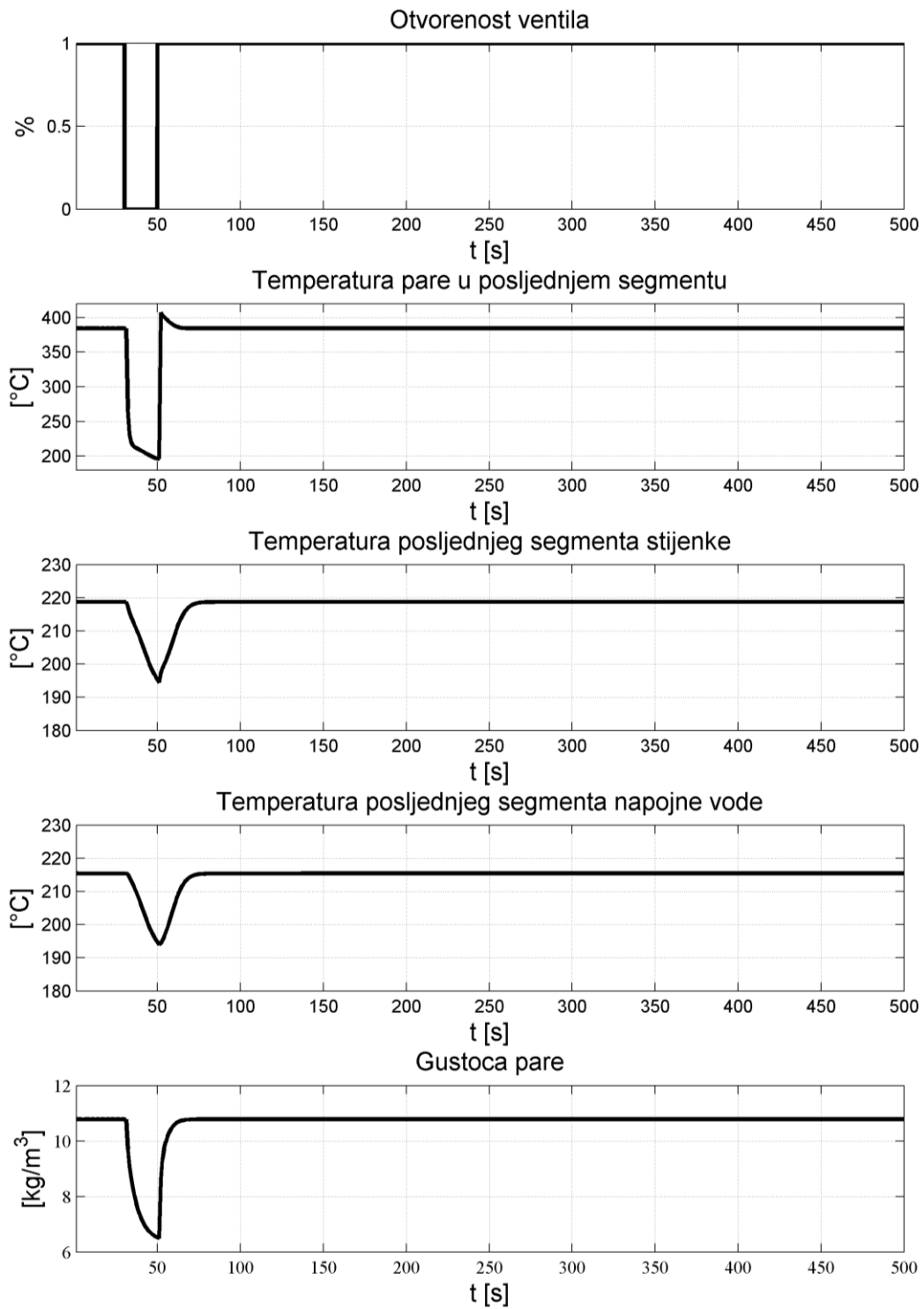


Slika 25: Odziv VT7 za simulaciju br. 3

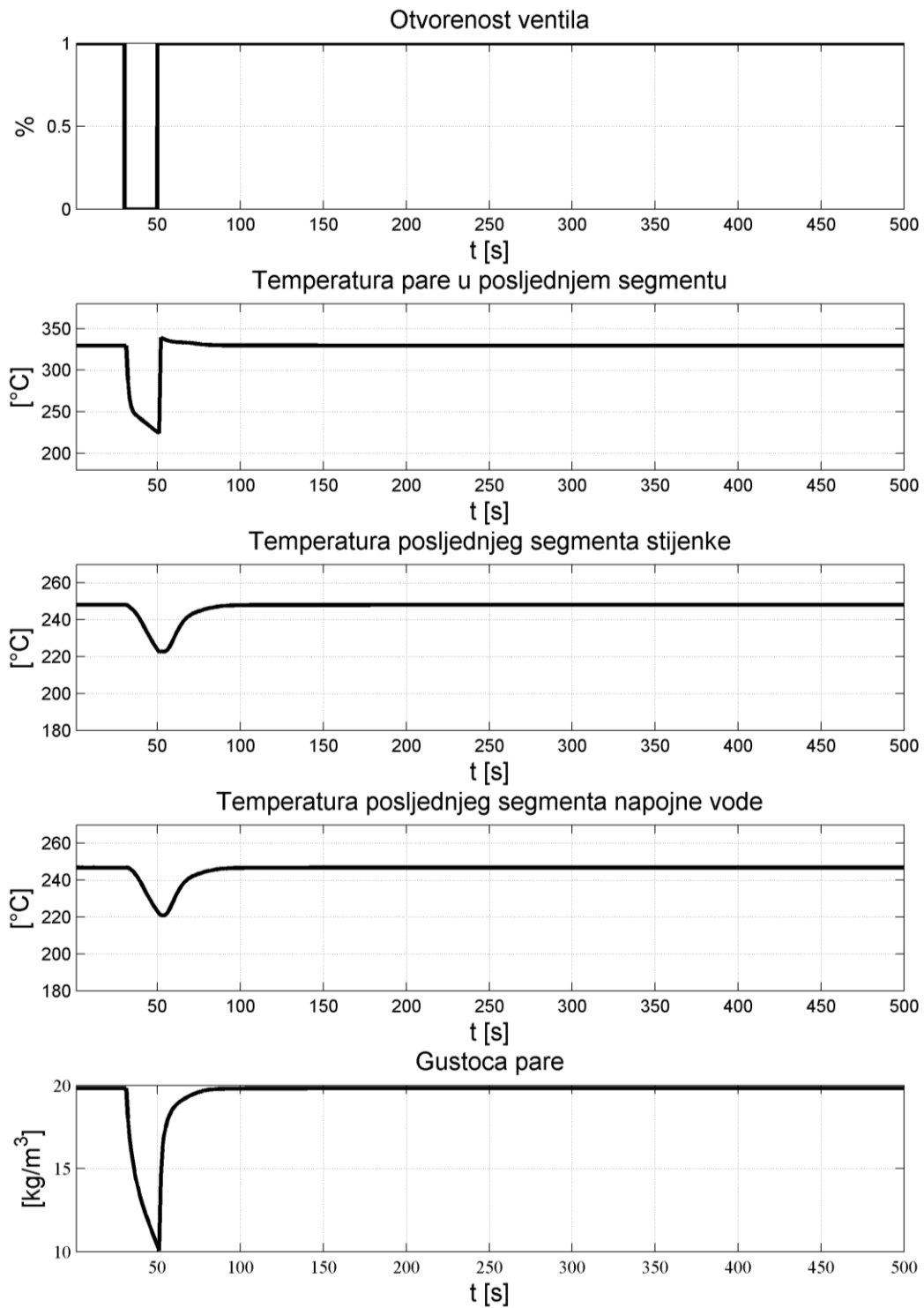


**Slika 26: Odziv temperatura i napreznja kolektora za simulaciju br. 3**

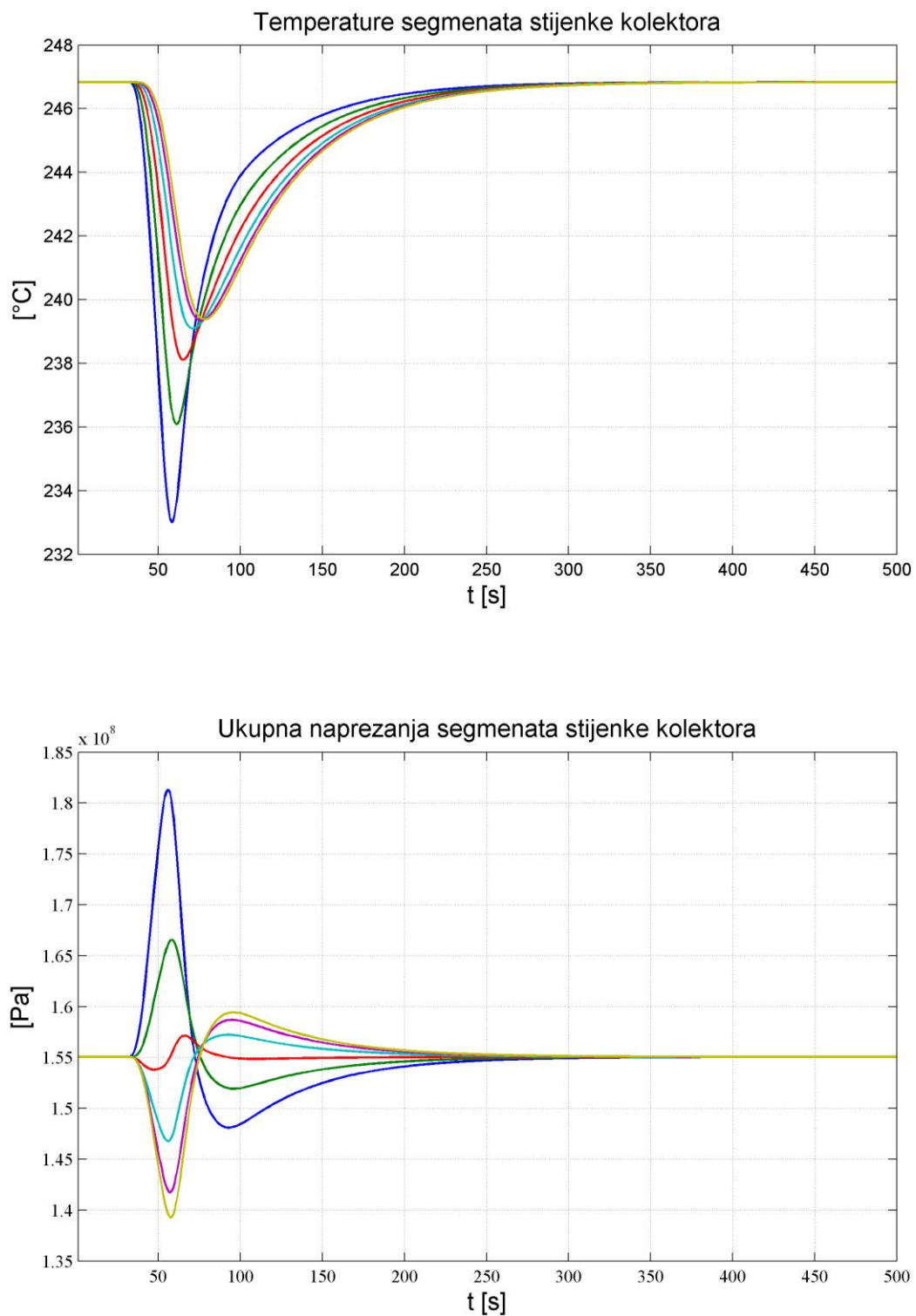




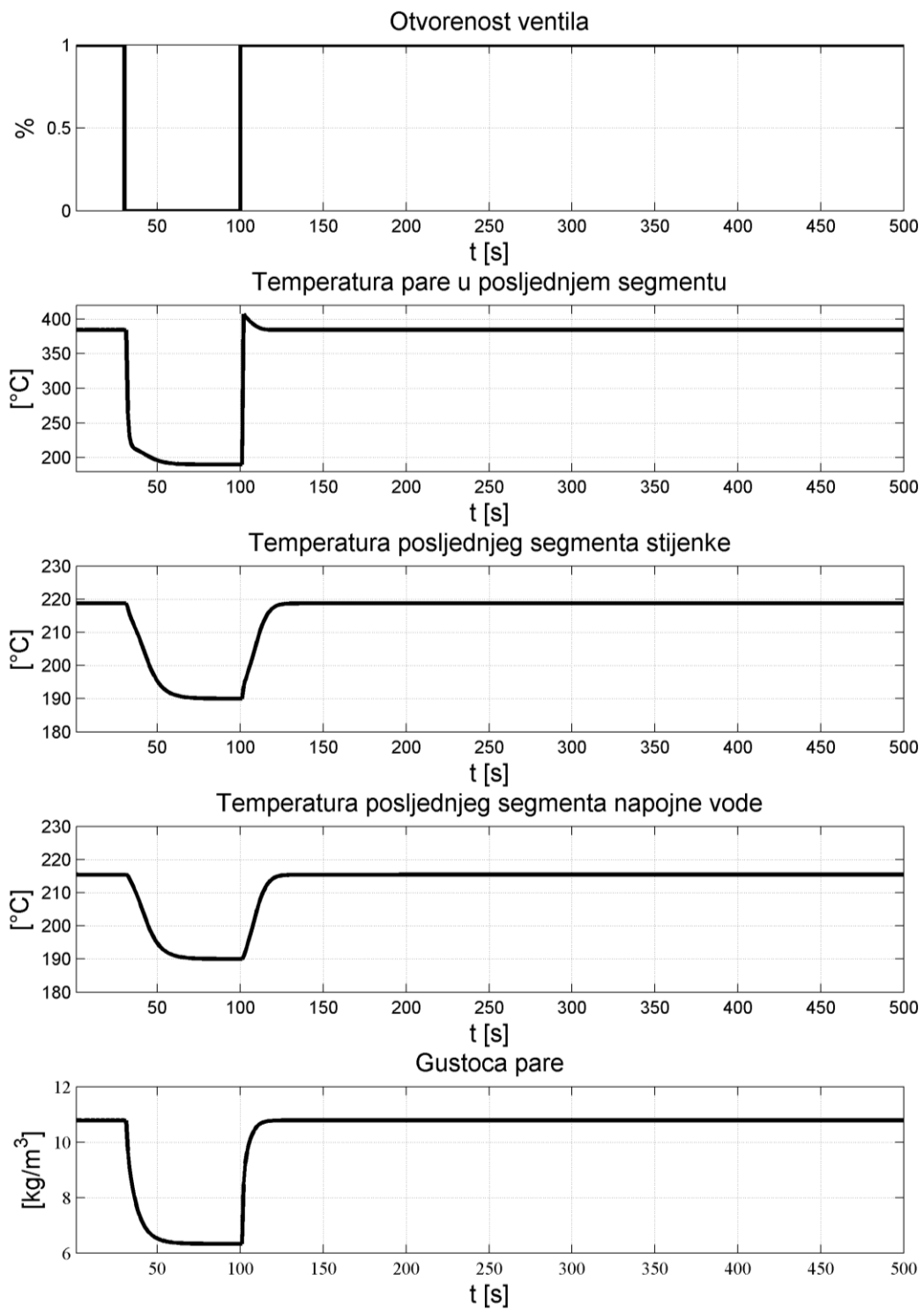
Slika 27: Odziv VT6 za simulaciju br. 4



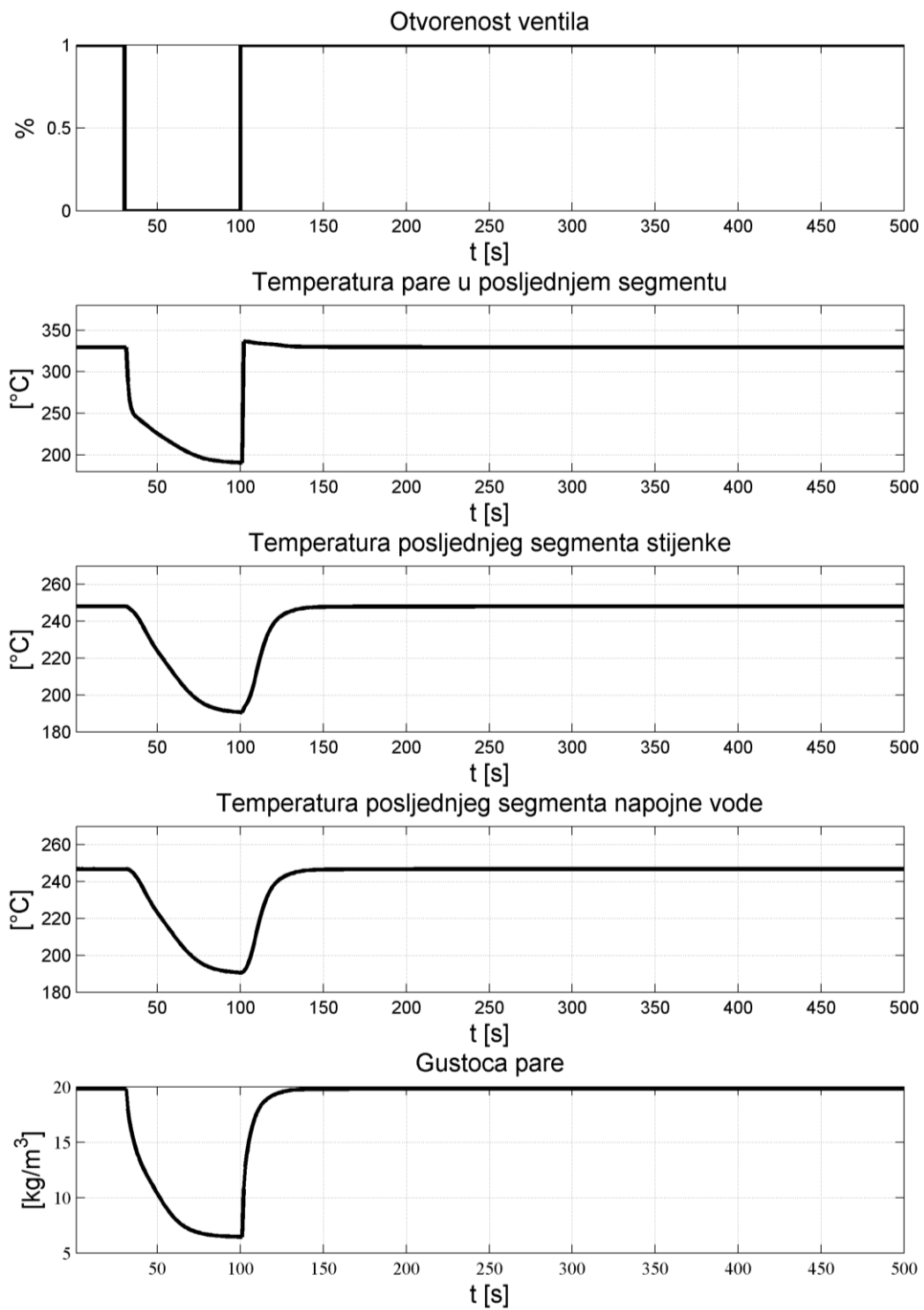
Slika 28: Odziv VT7 za simulaciju br. 4



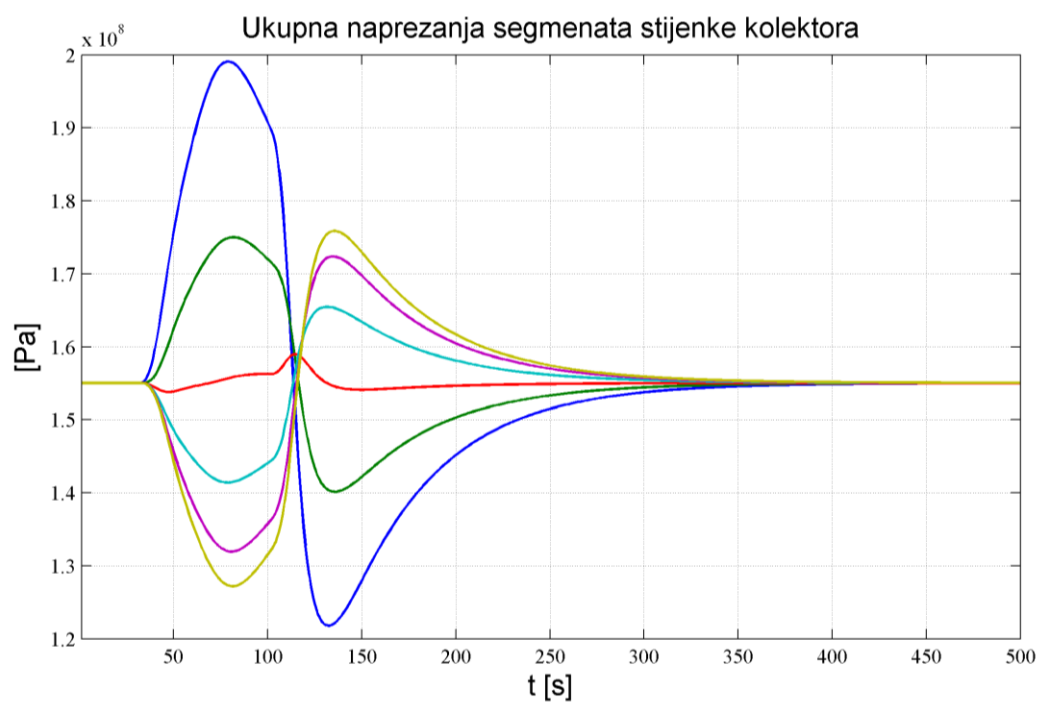
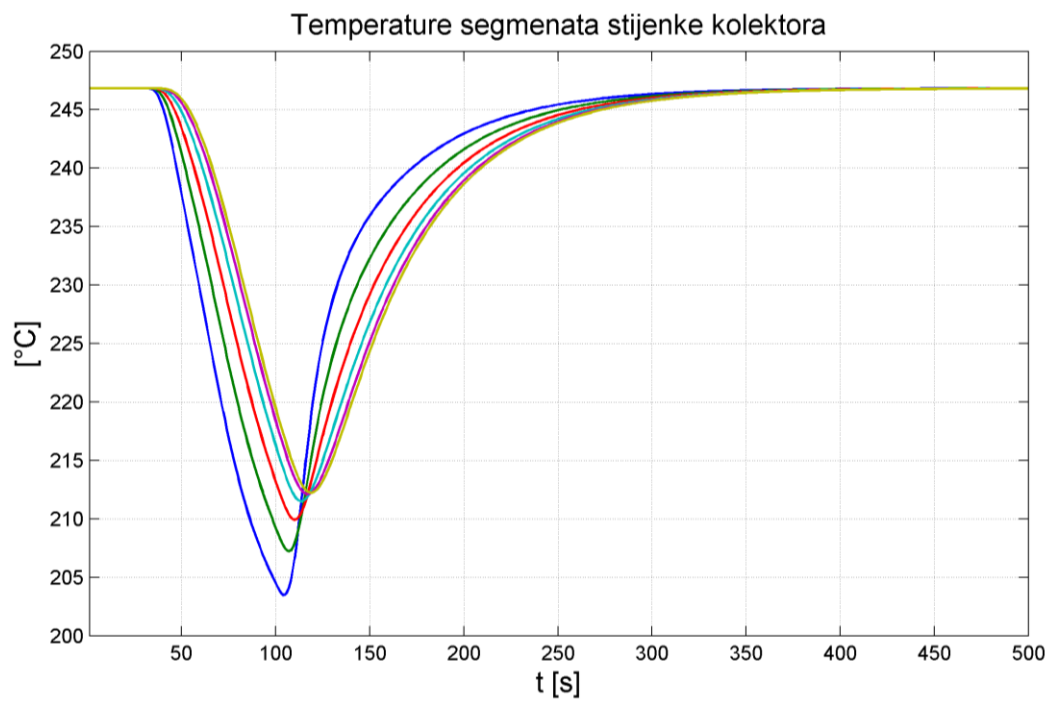
**Slika 29: Odziv temperatura i napreznja kolektora za simulaciju br. 4**



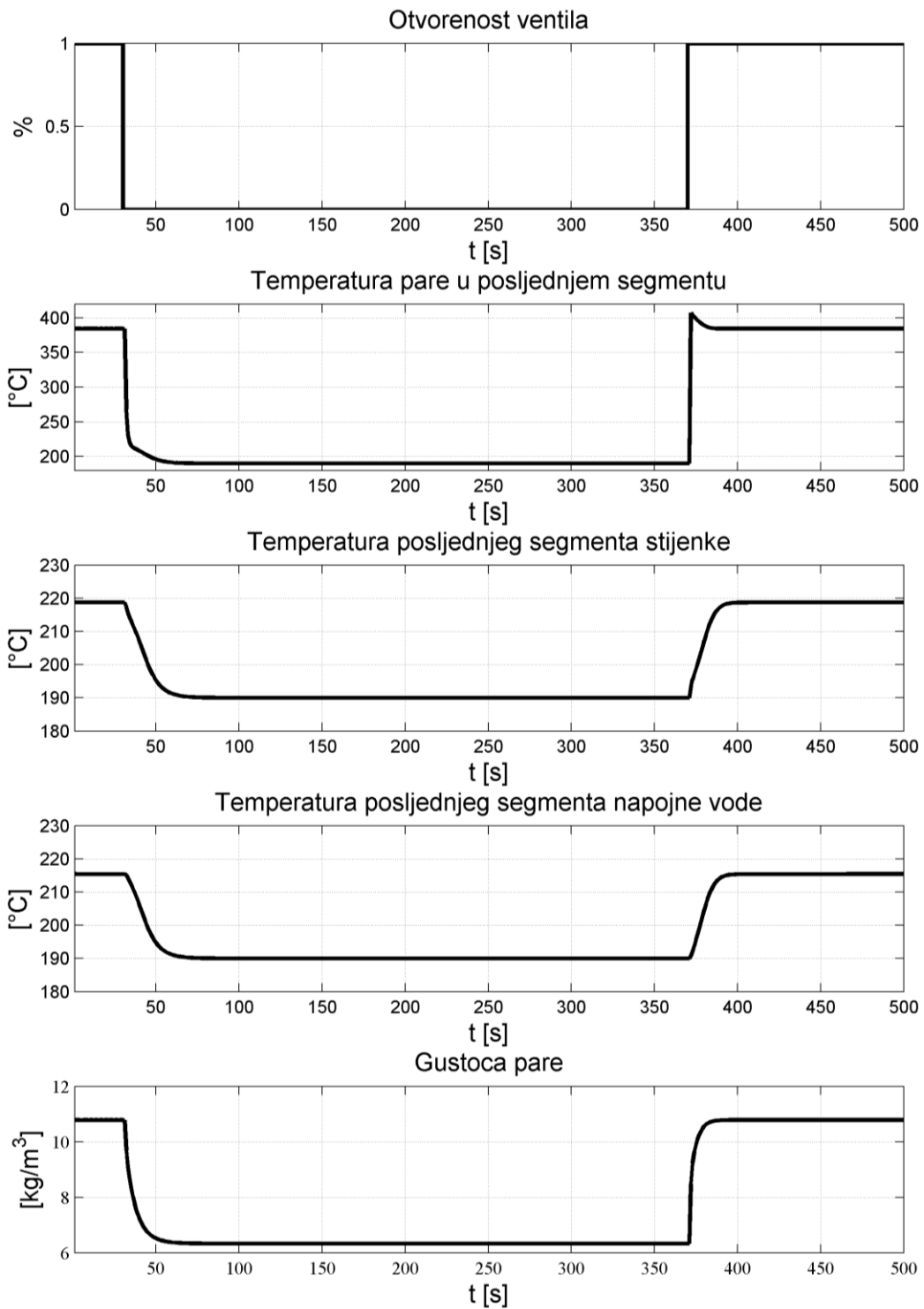
Slika 30: Odziv VT6 za simulaciju br. 5



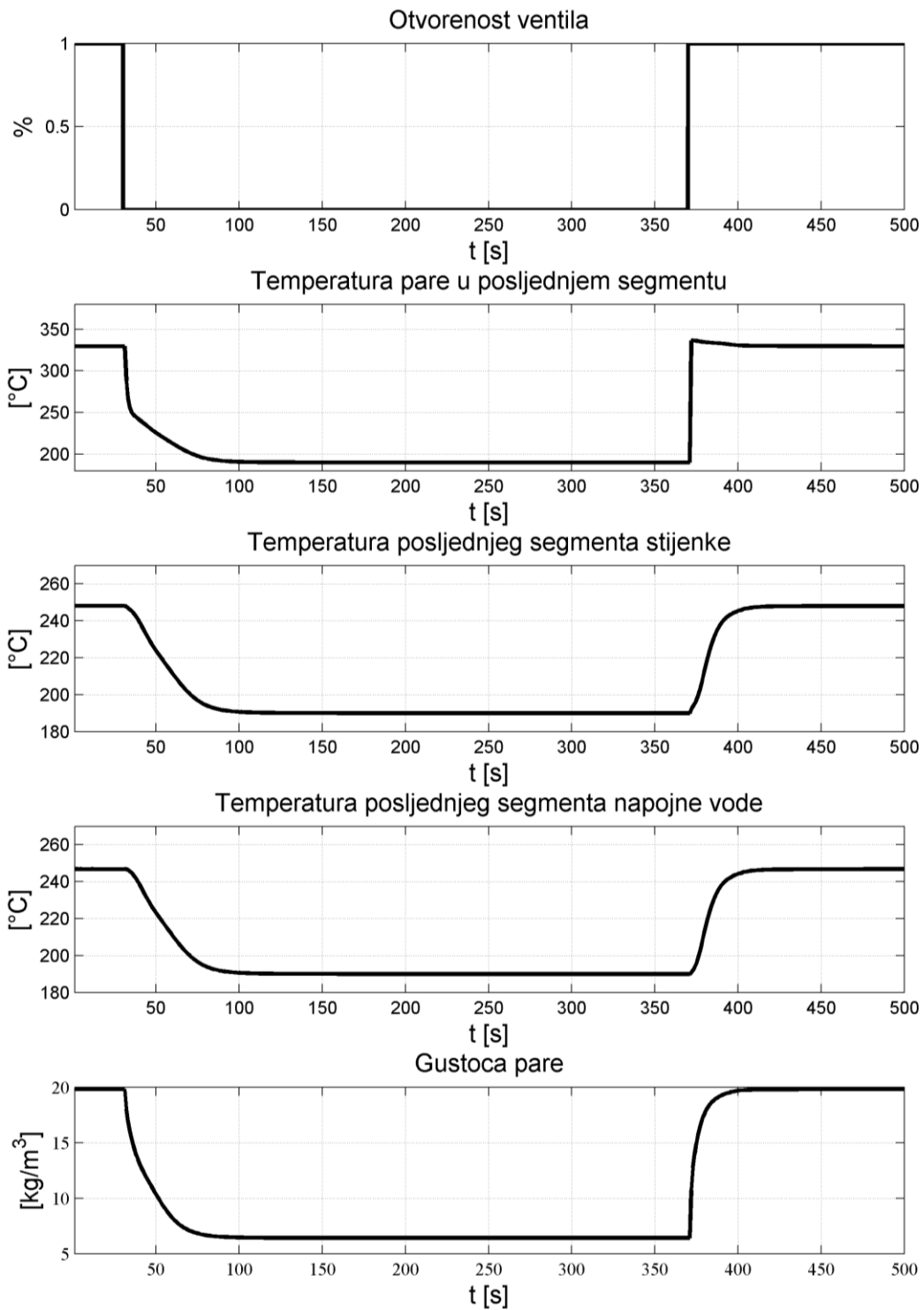
Slika 31: Odziv VT7 za simulaciju br. 5



Slika 32: Odziv temperatura i naprezanja kolektora za simulaciju br. 5

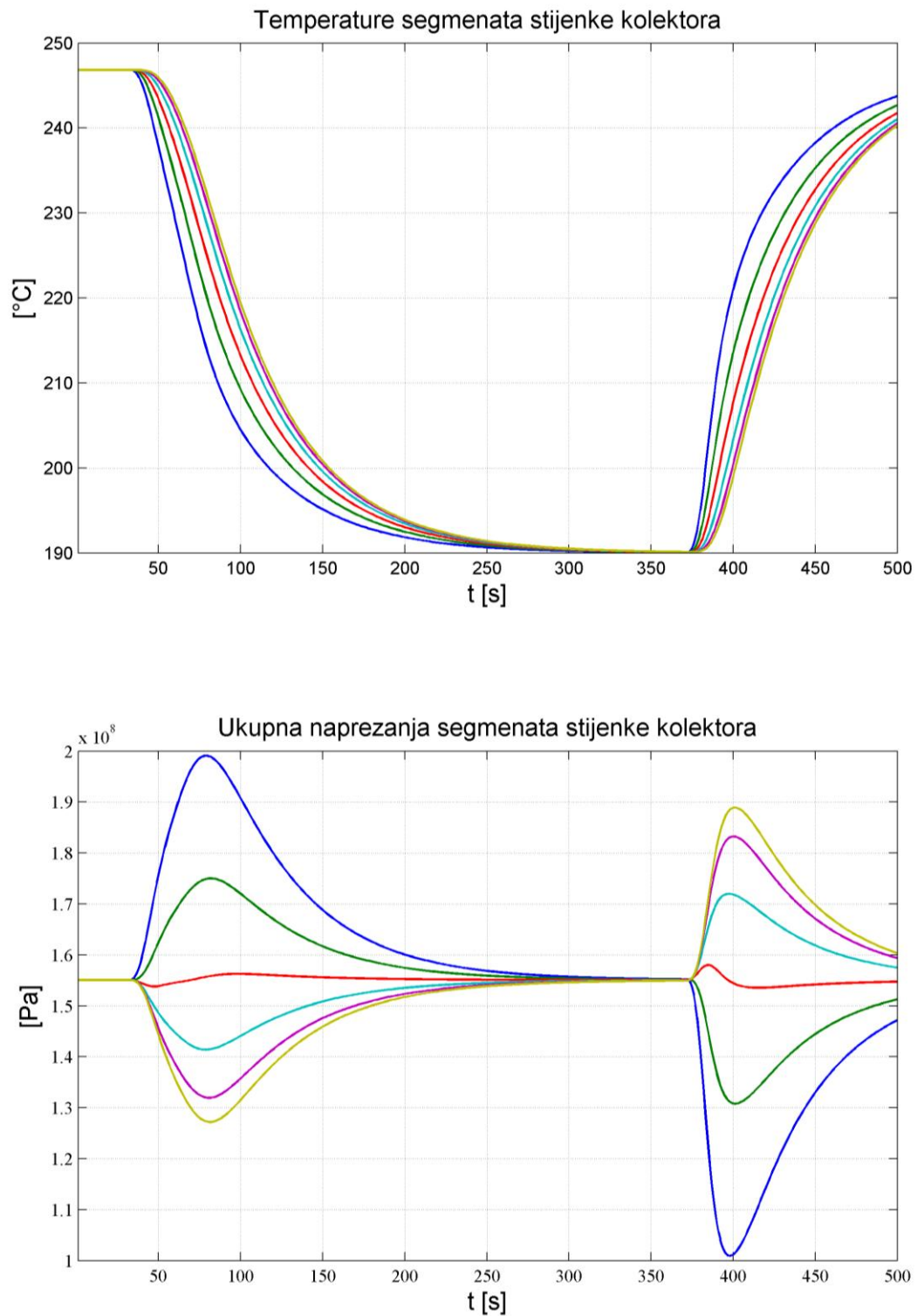


Slika 33: Odziv VT6 za simulaciju br. 6



Slika 34: Odziv VT7 za simulaciju br. 6





Slika 35: Odziv temperatura i naprezanja kolektora za simulaciju br. 6

## 7. ZAKLJUČAK

Povećanjem udjela obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije, dolazi do značajnih promjena unutar elektroenergetskog sustava. Jedna od glavnih karakteristika te relativno nove tehnologije je njihova varijabilnost u proizvodnji. Posljedično dolazi do potrebe za promjenom režima rada postojećih postrojenja, među koje spadaju i termoelektrane na ugljen. Njihova prilagodba je važna ukoliko postoji želja za opstankom na tržištu, ali isto tako i potrebna kako bi se pokrile razlike u potrošnji i proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora. Kako je već rečeno, varijabilna proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora zahtjeva i varijabilnu proizvodnju električne energije od strane konvencionalnih postrojenja. Takva proizvodnja je moguća ukoliko se elektranama inicijalno projektiranim za pokrivanje baznog opterećenja, poveća fleksibilnost. Najpopularnija rješenja za povećanje fleksibilnosti ukratko su opisana u ovom radu, dok je naglasak stavljen na isključivanje visokotlačnih zagrijača vode. Predgrijavanje napojne vode u visokotlačnim zagrijačima napojne vode parom iz turbinskih oduzimanja izvodi se s ciljem povećanja iskoristivosti postrojenja. U slučaju potrebe za kratkotrajnim povećanjem snage, oduzimanja pare prema zagrijačima se obustavljaju te se povećava protok pare koji ekspandira u turbini. Brza promjena temperature napojne vode ima velik utjecaj na određene deblostijene komponente unutar postrojenja. Jedna od takvih je i ulazni kolektor napojne vode kod kojeg se kao posljedica nagle promjene temperature napojne vode, javljaju temperaturna naprezanja. Simulacije koje su prikazane u ovom radu, opisuju slučajeve obustave dotoka pare u dva visokotlačna zagrijača napojne vode. Na temelju simulacija promjene temperaturnog profila u stijenci dobiva se uvid u iznos naprezanja u samom kolektoru. Rezultati su pokazali kako ukupna naprezanja unutar stijenke kolektora nikad ne prelaze dopuštena naprezanja za materijal kolektora. Treba naglasiti kako usprkos tome što su naprezanja ostala u dopuštenim granicama, prečesto zatvaranje i otvaranje ventila oduzimanja pare, svakako ima nepovoljan utjecaj na životni vijek kolektora.

Povećana fleksibilnost konvencionalnih termoelektrana na ugljen ne čini ugljen "čistim" izvorom energije, ali u službi integracije obnovljivih izvora u elektroenergetski sustav, svakako je poželjna.

## LITERATURA

- [1] Agora Energiewende, <https://www.agoraenergiewende.de>
- [2] Eurostat, <http://ec.europa.eu>
- [3] Henderson, C. Increasing the flexibility of coal-fired power plants. London 2014.
- [4] Vmisenenergy, <https://vmisenenergy.com/>
- [5] Šerman, N. Lončar, D.: Utjecaj tehnološke opreme i strategije vođenja na dinamičke performanse termoenergetskog bloka, Zagreb 2009.
- [6] Azom, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5244>
- [7] Hesler S., Mitigating the Effects of Flexible Operation on Coal-Fired Power Plants, Electric Power Research Institute, 2011.
- [8] Lončar, D. Vođenje energetskih sustava, interne prezentacije, FSB
- [9] Novosel, T. Povećanje snage termoelektrane isključivanjem visokotlačnog zagrijača napojne vode, diplomski rad, FSB 2012.
- [10] [http://www.eecpowerindia.com/codelibrary/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/1\\_Boiler%20Tube%20failures.pdf](http://www.eecpowerindia.com/codelibrary/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/1_Boiler%20Tube%20failures.pdf)
- [11] Electric power research institute, Cycling operation of fossil-fueled plants, 1993.
- [12] Šerman, N. Lončar, D.: Provjera projektnog rješenja regulacije razine kondenzata u zagrijačima napojne vode simulacijom na računalu
- [13] Matlab, <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [14] XSteam, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam-thermodynamic-properties-of-water-and-steam>
- [15] Engineering 360, <http://insights.globalspec.com/article/2681/feedwater-heaters-not-to-be-ignored>
- [16] Powerlab, <http://powerlab.fsb.hr/DinamikaProcesa/Viseslojnastijenka.pdf>

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**