

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Novosel

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Dražen Lončar, izv.prof.

Student:

Tomislav Novosel

Zagreb, 2012.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, profesoru Draženu Lončaru na pomoći tijekom izrade rada.

Tomislav Novosel

SADRŽAJ

POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
1. UVOD.....	1
2. REGULACIJA SNAGE TERMOENERGETSKOG BLOKA	4
2.1. Opći zahtjevi na termoenergetski blok.....	4
2.2. Strategije vođenja termoenergetskog bloka	5
2.3. Primjeri iz prakse	11
3. TEMPERATURNAPREZANJA	14
4. OPIS SUSTAVA	17
5. MATEMATIČKI MODEL VISOKOTLAČNOG ZAGRIJAČA NAPOJNE VODE	19
5.1. Rezultati	24
6. MATEMATIČKI MODEL TEMPERATURNIH NAPREZANJA KOLEKTORA.....	28
6.1. Rezultati	33
7. REZULTATI SIMULACIJE	36
8. ZAKLJUČAK.....	54

POPIS SLIKA

Slika 1.	Udio obnovljivih izvora energije za EU-27 [3].....	2
Slika 2	Intermitentnost sunca i vjetra kao izvora energije [4].....	2
Slika 3	Predviđanja proizvodnje snage iz vjetra [4]	3
Slika 4	Pojednostavljeni model termoenergetskog postrojenja.....	6
Slika 5	Odziv snage na povećanje dotoka goriva	7
Slika 6	Odziv snage na otvaranje ventila.....	8
Slika 7	Odziv snage na povećanje dotoka goriva i otvaranja ventila	9
Slika 8	Primjer utjecaja regulacije na gradijent snage termoenergetskog bloka [6]	12
Slika 9	Udjeli pojedinih tehnoloških rješenja u promjeni snage i frekvencije [2]	13
Slika 10	Dozvoljena naprezanja za čelik Č7100 ovisno o temperaturi [12][13].....	15
Slika 11	Posljedica temperaturnog naprezanja [14]	16
Slika 12	Prikaz procesa u T-s dijagramu	18
Slika 13	Temperature napojne vode, stjenke i kondenzata/pare u stacionarnom stanju	25
Slika 14	Temperature napojne vode, stjenke cijevi i pare te gustoća pare kroz vrijeme.....	26

Slika 15	Temperature napojne vode, stjenke i pare nakon ponovne uspostave oduzimanja	27
Slika 16	Temperature i temperaturna naprezanja stjenke kolektora.....	34
Slika 17	Temperature i temperaturna naprezanja kolektora nakon naglog prekida i uspostave oduzimanja iz turbine	35
Slika 18	Odzivi zagrijača za simulaciju 1	37
Slika 19	Odzivi kolektora za simulaciju 1	38
Slika 20	Odzivi zagrijača za simulaciju 2	39
Slika 21	Odzivi kolektora za simulaciju 2.....	40
Slika 22	Odzivi zagrijača za simulaciju 3	41
Slika 23	Odzivi kolektora za simulaciju 3	42
Slika 24	Odzivi zagrijača za simulaciju 4	43
Slika 25	Odzivi kolektora za simulaciju 4.....	44
Slika 26	Odzivi zagrijača za simulaciju 5	45
Slika 27	Odzivi kolektora za simulaciju 5.....	46
Slika 28	Odzivi zagrijača za simulaciju 6	47
Slika 29	Odzivi kolektora za simulaciju 6.....	48

Slika 30	Odzivi zagrijača za simulaciju 7	49
Slika 31	Odzivi kolektora za simulaciju 7	50
Slika 32	Razlika temperatura napojne vode, stjenke i pare	51
Slika 33	Detaljan prikaz razlika u temperaturama	52
Slika 34	Razlika naprezanja za tri simulacije	53
Slika 35	Detaljan prikaz razlike u naprezanjima	53

POPIS TABLICA

Tablica 1	Dozvoljena naprezanja za čelik Č7100 ovisno o temperaturi [12][13].....	14
Tablica 2	Rezultati simulacija	36

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

Ulazni kolektor – Crtež broj: 001-001

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	m^2/s	koeficijent toplinskog provođenja
c	W/kgK	toplinski kapacitet
d	m	promjer
E	N/m^2	modul elastičnosti
f	m^2	površina izmjene topline
h	W/kg	entalpija
L	m	duljina
m	kg/s	maseni protok
p	Pa	tlak
T	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
V	m^3	volumen
α	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	koeficijent izmjene topline
β	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	koeficijent linearnog istežanja

δ	m	debljina stjenke
λ	W/mK	toplinska vodljivost
ν	-	Poissonov koeficijent
ρ	kg/m ³	gustoća
σ	Pa	naprezanje

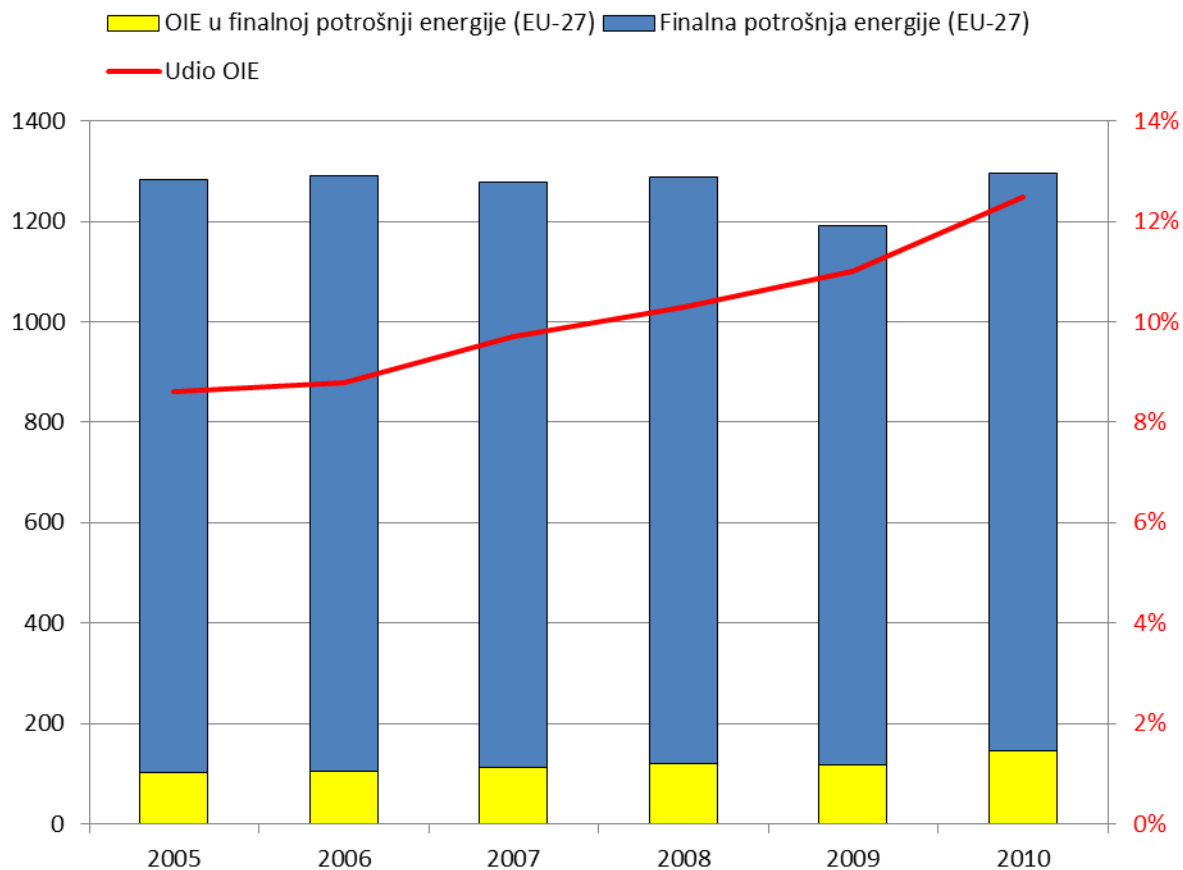
SAŽETAK

Termoelektrane moraju biti u stanju prilagoditi svoj rad zahtjevima mreže. Taj zadatak postaje sve teži povećanjem udjela intermitentnih, obnovljivih izvora energije u sustavu. Postoji nekoliko mehanizama kojima se može povećati fleksibilnost termoenergetskih postrojenja poput koordiniranog vođenja i djelovanja na turbinska oduzimanja. Treba imati u vidu da svako naglo povećanje snage za sobom povlači i nagle promjene parametara, prvenstveno temperature. Temperaturni gradijenti u debelostjenim komponentama mogu izazvati značajna temperaturna naprezanja, koja imaju negativan utjecaj na životni vijek termoenergetskog postrojenja. Ovaj rad se bavi upravo utjecajem naglog prekida i ponovne uspostave turbinskog oduzimanja pare prema visokotlačnom zagrijaču napojne vode na temperaturna naprezanja u kolektoru napojne vode. U sklopu rada je izrađen jednodimenzionalni model nestacionarnog provođenja temperature kroz stjenke kolektora na temelju kojeg su izračunata i prikazana temperaturna naprezanja.

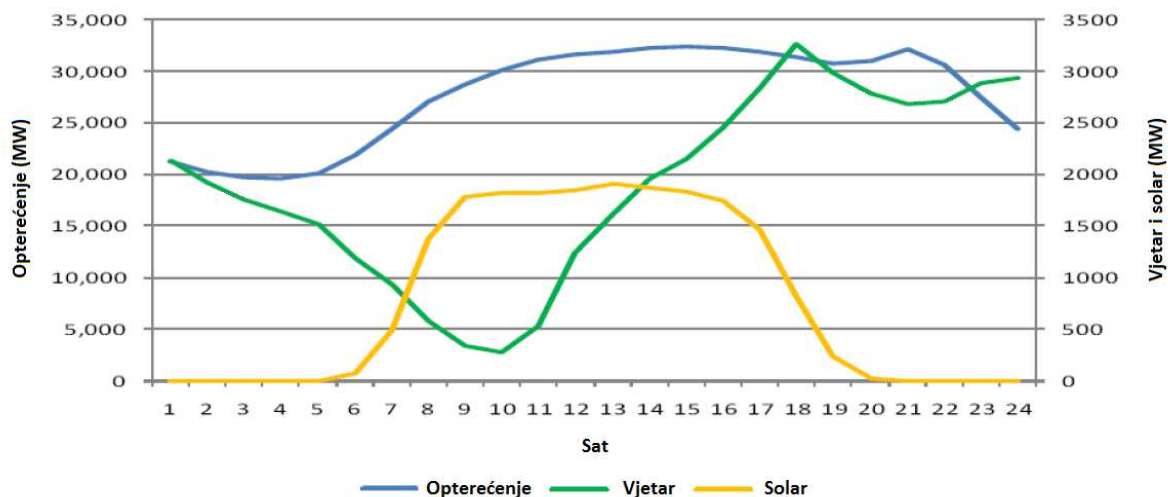
1. UVOD

Udio obnovljivih izvora je u europskom elektroenergetskom sustavu već neko vrijeme u porastu. Slika 1 prikazuje finalnu potrošnju energije i udio obnovljivih izvora u finalnoj potrošnji za EU-27 od 2005. do 2010. godine. Pošto oni predstavljaju ekološki prihvatljivu alternativu klasičnim izvorima, pogotovo termoelektranama na ugljen, u pravilu imaju povlaštenu status od strane europske politike te nacionalnih zakona i regulativa. Tako je prema zakonu o tržištu električne energije Republike Hrvatske, operator prijenosnog ili distribucijskog sustava obavezan osigurati preuzimanje ukupne proizvedene električne energije iz povlaštenih izvora [1]. Pošto je proizvodnja energije iz takvih izvora izuzetno nepredvidljiva, pojavili su se novi zahtjevi za održavanje stabilnosti elektroenergetske mreže. Slika 2 prikazuje upravo tu intermitentnost. Na slici se može vidjeti da snaga vjetra i sunca ne prate opterećenje mreže. Slika 3 prikazuje razliku između predviđene i stvarne proizvodnje energije iz vjetra. Vidljiva su znatna odstupanja čak i za predviđanja svega jedan sat unaprijed. Klasične elektrane moraju biti u stanju zadovoljiti potrebe za električnom energijom u trenucima kada obnovljivi izvori poput sunca i vjetra ne proizvode dovoljno ili, u suprotnom slučaju, moraju naglo smanjiti proizvodnju energije da ne preoptereće mrežu. Efikasnost termoelektrana polako prestaje biti glavni prioritet, tu poziciju preuzima brzina prilagođavanje postrojenja na promjene opterećenja u mreži [2].

Prvi korak prema postizanju tog cilja je unaprjeđenje ili zamjena regulacijskog sustava čime se povećavaju gradijenti, mijenjaju operativna ograničenja i povećava fleksibilnost. No taj korak sam za sebe nije dovoljan, u većini je slučajeva potreban veći zahvat. Pogon na minimalnom opterećenju može biti problematičan zbog nestabilnog izgaranja, performanse regulacije opterećenja mogu biti ograničene zbog poremećaja u gorivu te postoji mogućnost pojave toplinskih naprezanja u debelostjenim komponentama. Svi se ti problemi moraju uzeti u obzir prilikom projektiranja novog postrojenja ili nadogradnje postojećeg [2].

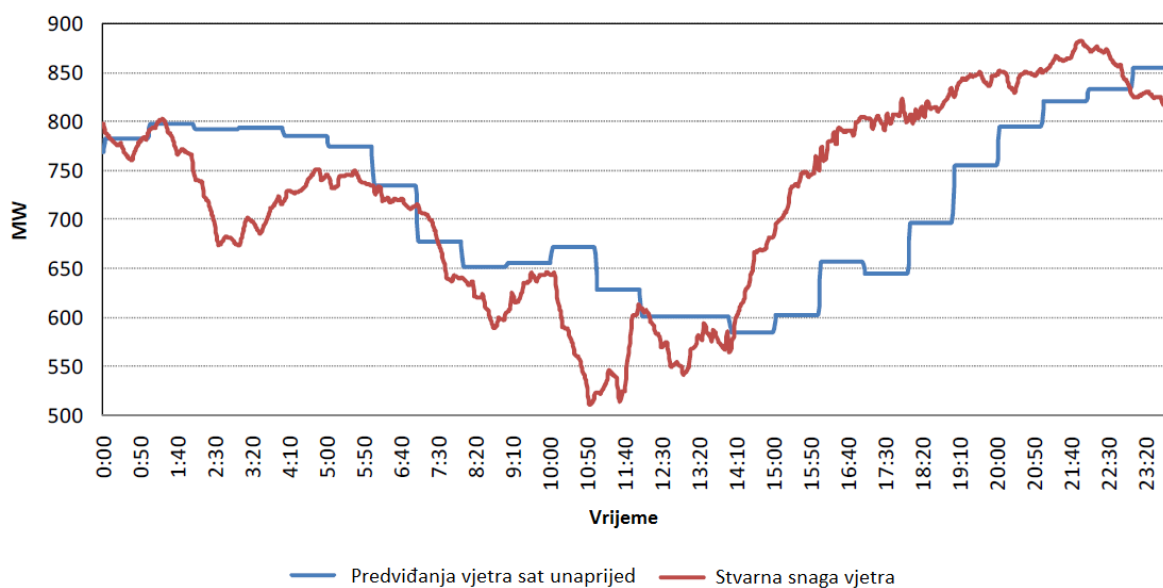


Slika 1. Udio obnovljivih izvora energije za EU-27 [3]



Slika 2 Intermitentnost sunca i vjetra kao izvora energije [4]

Najvažnija karakteristika koja određuje fleksibilnost termoelektrane je mogućnost brze promjene opterećenja a time i regulacija frekvencije električne mreže. Za to je odgovorna upravo regulacijska jedinica. Osnovna funkcija regulacijske jedinice je koordinacija glavnih kontrolnih varijabli procesa kako bi se postigle optimalne performanse za vrijeme promijene opterećenja, konstantnog opterećenja i regulacije frekvencije bez da se žrtvuje stabilnost.



Slika 3 Predviđanja proizvodnje snage iz vjetra [4]

U današnje se vrijeme zbog sve većeg udjela obnovljivih (intermitentnih) izvora energije glavni cilj regulacije pomaknuo sa održavanja optimalnog stupnja iskoristivosti na postizanje što je moguće veće fleksibilnosti pogona [5]. Povećanje fleksibilnosti može značiti brže vraćanje postrojenja na mrežu, strmiji gradijent povećanja snage, bolji odziv u primarnoj i sekundarnoj regulaciji frekvencije sustava, niža razina minimalne te viša razina maksimalne snage, pokretanje sa što manjim gubicima te što manji gubici zbog regulacije [6].

2. REGULACIJA SNAGE TERMOENERGETSKOG BLOKA

Kako bi se osigurao ekonomski isplativ i ekološki prihvatljiv rad termoenergetskog postrojenja, važno je parametre poput tlaka, temperature, omjera protoka goriva, napojne vode i zraka držati u propisanim omjerima. Regulacijski sustav upravlja odgovarajućim izvršnim organima poput ventila, zaklopki i slično te tako u svakom trenutku utječe na regulirane parametre i pokušava smanjiti razliku između zadane i mjerene vrijednosti.

Uz opremu, na dinamičke performanse bloka termoenergetskog postrojenja utječe i način vođenja procesa. Dva su osnovna koncepta vođenja procesa, pogon s prirodnim kliznim tlakom svježe pare i pogon s konstantnim tlakom svježe pare [7][8][9].

U režimu pogona s prirodnim kliznim tlakom regulacijski ventili turbine su kod svih razina opterećenja bloka potpuno otvoreni. Iz tog se razloga ispred turbine formira tlak potreban da para proizvedena u generatoru pare na tom opterećenju protječe kroz turbinu. Intenzitet proizvodnje pare uvjetovan je snagom toplinskog toka koji se stvara izgaranjem goriva i približno je proporcionalan djelatnoj električnoj snazi na stezaljkama generatora, pa je tlak pare u tom režimu pogona razmjernan opterećenju.

U režimu pogona s konstantnim tlakom pare otvorenost regulacijskih ventila turbine mijenja se proporcionalno protoku pare, tako da je tlak svježe pare ispred turbine konstantan u cijelom području opterećenja bloka.

2.1. Opći zahtjevi na termoenergetski blok

Opći zahtjevi na pogon termoenergetskog bloka mogu se svrstati u tri osnovne kategorije: ekonomski, ekološki i zahtjevi elektroenergetskog sustava [7].

Ekonomski zahtjevi znače da cijena proizvedene električne energije bude što je moguće niža, uzimajući pritom u obzir pogonske troškove poput goriva, osoblja i slično, investicijske troškove i troškove održavanja.

Ekološki zahtjevi znače da se teži tome da je utjecaj termoelektrane na okoliš što je moguće manji.

Zahtjevi elektroenergetskog sustava su zahtjevi da postrojenje odgovarajućim promjenama svoje snage sudjeluje u regulaciji frekvencije i razdiobe djelatne električne energije u mreži, sukladno ulozi koju ima u sustavu.

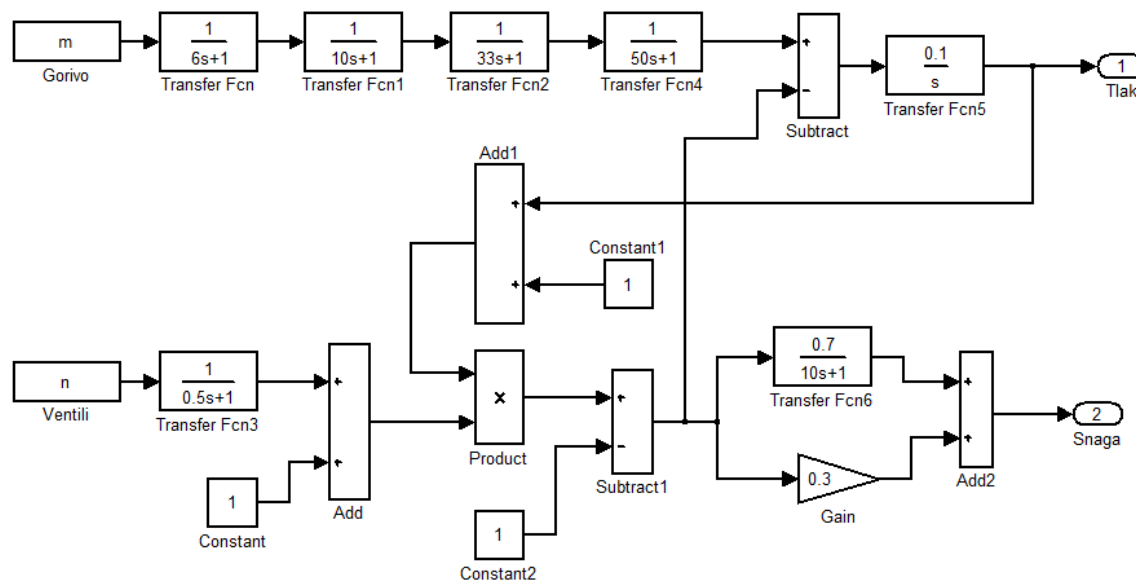
Ispunjavanje uvjeta koje na postrojenje postavljaju ekonomski i ekološki zahtjevi se uglavnom odnosi na rad postrojenja u stacionarnom stanju. Kvaliteta ispunjavanja trećeg zahtjeva, zahtjeva elektroenergetskog sustava, odnosi na dinamičke karakteristike postrojenja tj. na njegov rad u nestacionarnom stanju, točnije na brzinu promjene snage bloka.

2.2. Strategije vođenja termoenergetskog bloka

Ovisno o veličini na koju regulacijski sustav izravno utječe razlikujemo nekoliko različitih strategija vođenja termoenergetskih blokova. Te strategije su [7][9]:

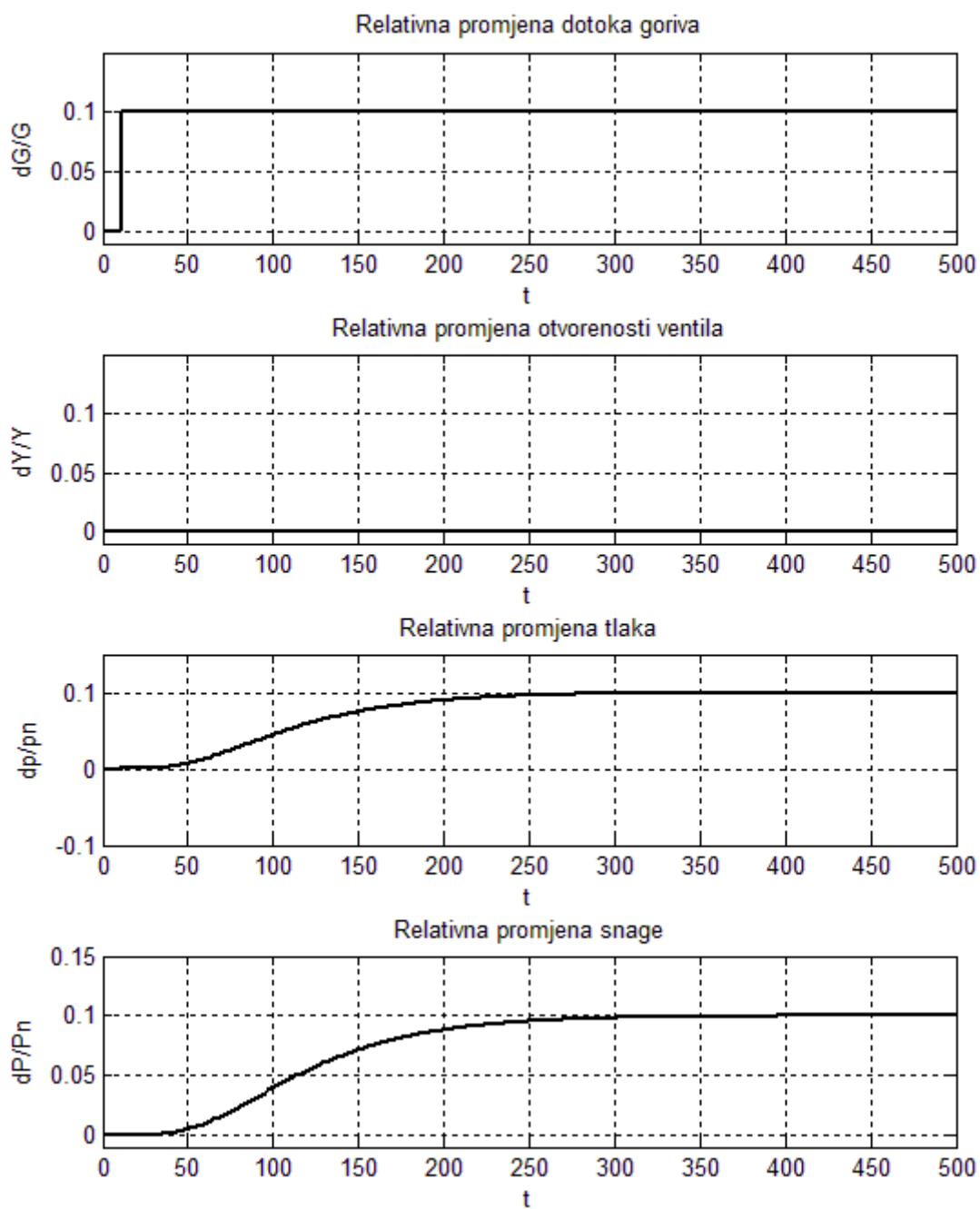
- Generator pare vodi
- Turbina vodi
- Koordinirano vođenje
- Koordinirano vođenje i djelovanje na turbinska oduzimanja pare
- Koordinirano vođenje i kondenzat stop

Slika 4 prikazuje pojednostavljen model termoenergetskog bloka izrađenog u programskom paketu simulink [10]. Pomoću ovog je modela moguće prikazati odzive snage i tlaka za različite strategije vođenja.

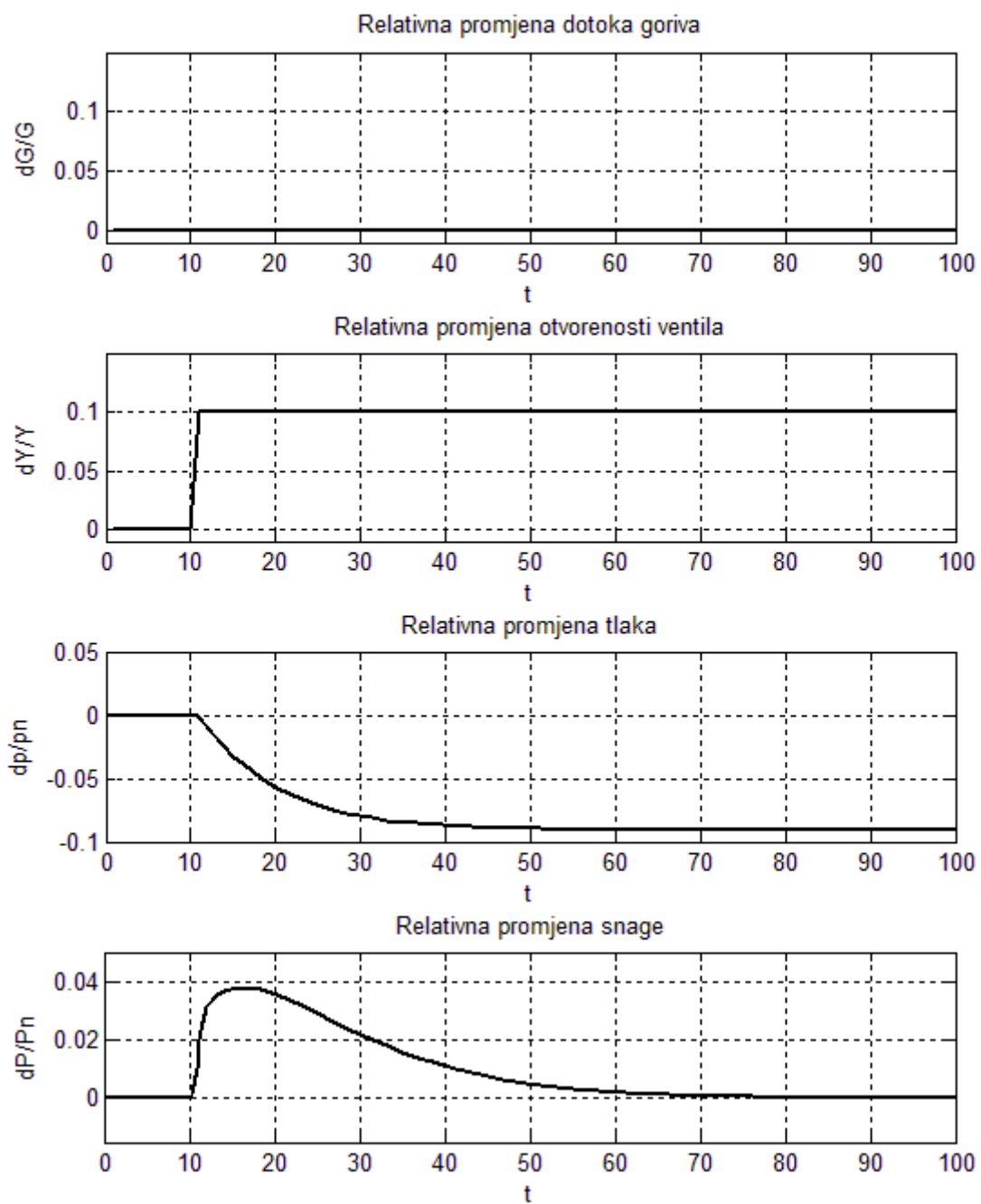


Slika 4 Pojednostavljeni model termoenergetskog postrojenja

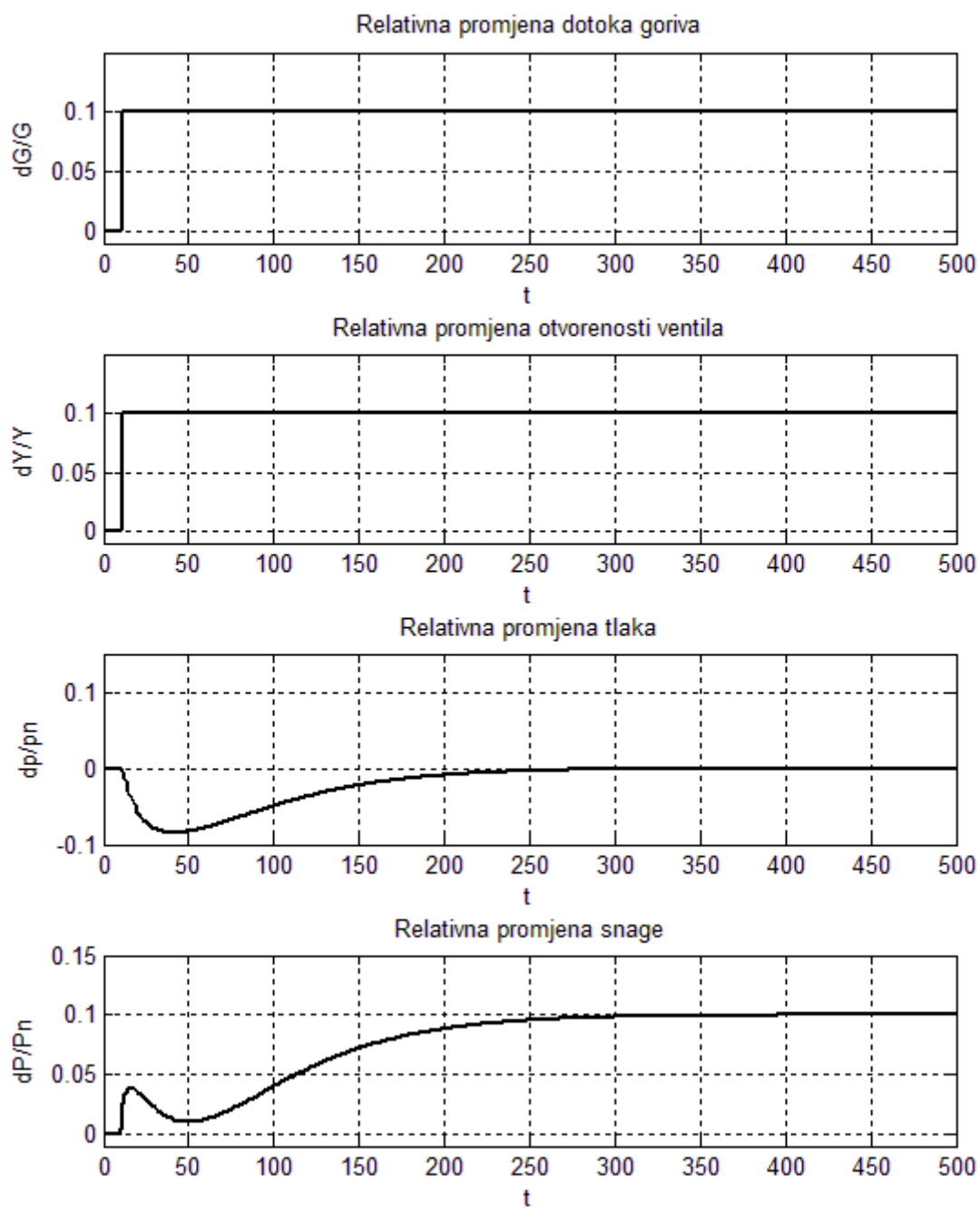
Povećanje snage se kod strategije vođenja generator pare vodi odvijajući na način da se naglo poveća dotok goriva u kotao. Povećanjem dotoka goriva se postupno povećava protok svježeg para kroz turbinu, a samim time i snaga termoenergetskog bloka. Kod režima rada sa prirodnim kliznim tlakom, tlak pare se povećava jer su regulacijski ventili turbine cijelo vrijeme potpuno otvoreni, dok je kod režima s konstantnim tlakom nepromijenjen uslijed djelovanja turbinskih ventila. Slika 5 prikazuje relativnu promjenu snage, tlaka, dotoka goriva i otvorenosti ventila za slučaj strategije vođenja generator pare vodi u režimu rada sa prirodnim kliznim tlakom. Na slici se može vidjeti da ventili ostaju u istom položaju dok se dotok goriva povećao za 10% u odnosu na nazivni. Uslijed tog povećanja, postupno rastu i tlak pare u turbini te snaga termoenergetskog bloka. Povećanje snage je kod ove strategije polagano no trajno. Ova strategija ne omogućava brze prilagodbe postrojenja opterećenju u mreži.



Slika 5 Odziv snage na povećanje dotoka goriva



Slika 6 Odziv snage na otvaranje ventila



Slika 7 Odziv snage na povećanje dotoka goriva i otvaranja ventila

Strategija vođenja turbina vodi je primjenjiva samo u režimu rada sa konstantnim tlakom, pošto se ona bazira na otvaranju turbinskih ventila koji su kod režima sa prirodnim kliznim tlakom cijelo vrijeme potpuno otvoreni. Na zahtjev za naglim povećanjem snage se kod ove strategije reagira otvaranjem turbinskih ventila koji su u normalnom pogonu djelomično zatvoreni, odnosno malo prigušuju protok pare u turbinu. Dodatnim otvaranjem ventila se naglo povećava dotok pare u turbinu te joj se kratkotrajno povećava izlazna snaga. Povećanjem protoka se također smanjuje tlak pare u turbini. Slika 6 prikazuje relativne promjene dotoka goriva, otvorenosti ventila, tlaka pare i snage termoenergetskog bloka. Na slici se može vidjeti da je povećanje snage znatno brže nego za slučaj strategije vođenja generator pare vodi no ono je ovdje samo kratkotrajno. Tlak se nakon nekog vremena ustabilizirao na nekoj novoj, nižoj vrijednosti.

Istovremenim djelovanjem na turbinske ventile i dotok goriva u generator pare možemo postići brži odziv i trajno povećanje snage termoenergetskog bloka. Ta strategija se zove koordinirano vođenje i, jednako kao i strategija turbina vodi, ostvariva je jedino u režimu konstantnog tlaka. Slika 7 prikazuje relativnu promjenu dotoka goriva, otvorenosti ventila, tlaka pare i snage termoenergetskog bloka za slučaj koordiniranog vođenja. Na slici možemo vidjeti da se otvaranjem turbinskih ventila ostvaruje naglo i kratkotrajno povećanje snage poput onog za slučaj strategije turbina vodi. Otvaranje ventila je popraćeno povećanjem dotoka goriva u generator pare, time se postupno povećava protok pare kroz turbinu a time i snaga bloka. To povećanje snage je slično onom za slučaj generator pare vodi. Tlak se također nakon prvobitnog pada vrati u početno stanje i ustabilizirao. Nedostatak ove strategije je „grba“ koja se javlja nakon djelovanja turbinskih ventila. Taj se problem može ublažiti djelovanjem na turbinska oduzimanja.

Prekidom dotoka svježe pare iz turbinskih oduzimanja prema visokotlačnim zagrijačima napojne vode se može ublažiti pad snage nakon djelovanja turbinskih ventila. Prekidom oduzimanja se povećava količina pare koja prolazi kroz niskotlačne dijelove turbine te se na taj način naglo povećava snaga termoenergetskog bloka na štetu ukupne efikasnosti postrojenja. Dodatan problem ove metode su temperaturna naprezanja koja se mogu javiti u

kolektoru napojne vode zbog njenog naglog hlađenja. Problem naprezanja se može izbjeći prolaznim prekidom dotoka kondenzata u napojni spremnik. Taj se postupak naziva „kondenzat stop“.

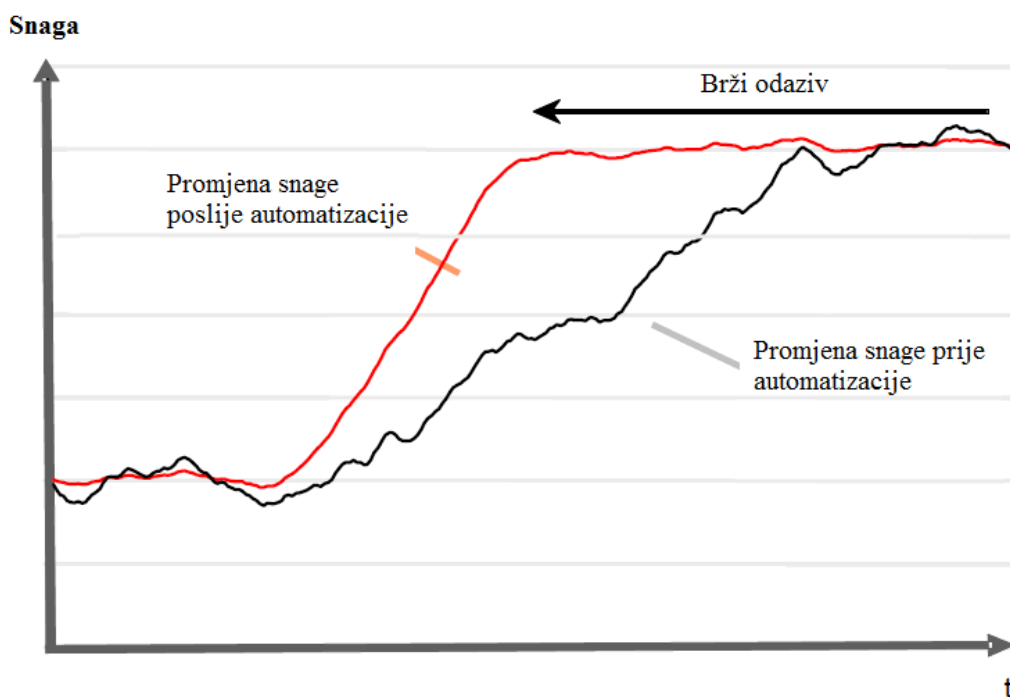
Kombinacija koordiniranog vođenja, djelovanja na turbinska oduzimanja i kondenzat stop se pokazala kao najpovoljnija kombinacija sa strane vođenja postrojenja. Koordiniranim vođenjem se može postići naglo i trajno povećanje snage bloka dok djelovanje na turbinska oduzimanja može smanjiti ili čak u potpunosti ukloniti „grbu“ u snazi koja se javlja takvim vođenjem. Istovremenim prekidom dotoka kondenzata u napojni spremnik i djelovanja na turbinska oduzimanja, temperatura napojne vode se tijekom naglog povećanja snage gotovo i ne mijenja. Za vrijeme ovakvog rada, kondenzat se prikuplja u sabirniku dok se generator pare napaja iz napojnog spremnika. Trajanje rada u ovom režimu je ograničeno kapacitetima napojnog spremnika i sabirnika kondenzata.

2.3. Primjeri iz prakse

Modeliranjem tlaka, temperature i izgaranja, automatskim pokretanjem generatora pare i turbine te razlikovanjem hladnog, toplog i vrućeg starta sa glatkim prijelazom u koordinirano vođenje se može značajno ubrzati start termoenergetskog bloka. Na primjer, pokretanje termoelektrane na ugljen (lignit) snage 300 MW se može skratiti sa 4 na 2 sata. Uz 10 takvih pokretanja godišnje mogu se ostvariti uštede od približno 150.000 € godišnje [6].

Automatiziranom koordinacijom generatora pare i turbine te optimizacijom regulacijskih krugova važnih za dinamiku jedinice se može ubrzati povećanje snage bloka, odnosno povećati gradijent promijene snage. Implementacijom ovakvog rješenja, gradijent snage termoelektrane na ugljen (antracit) instalirane snage 300 MW može povećati sa 2 na 2.5% u minuti. Ta promjena bi predstavljala povećanje snage od 37.5 MW umjesto 30 MW nakon 5 minuta. Ovakva bi promjena ostvarila dodatnu zaradu od približno 940.000 € godišnje [6]. Slika 8 prikazuje primjer povećanja gradijenta snage bloka. Kao što se može vidjeti, postrojenje je nakon automatizacije u stanju brže reagirati na promjenu opterećenja. Time je u

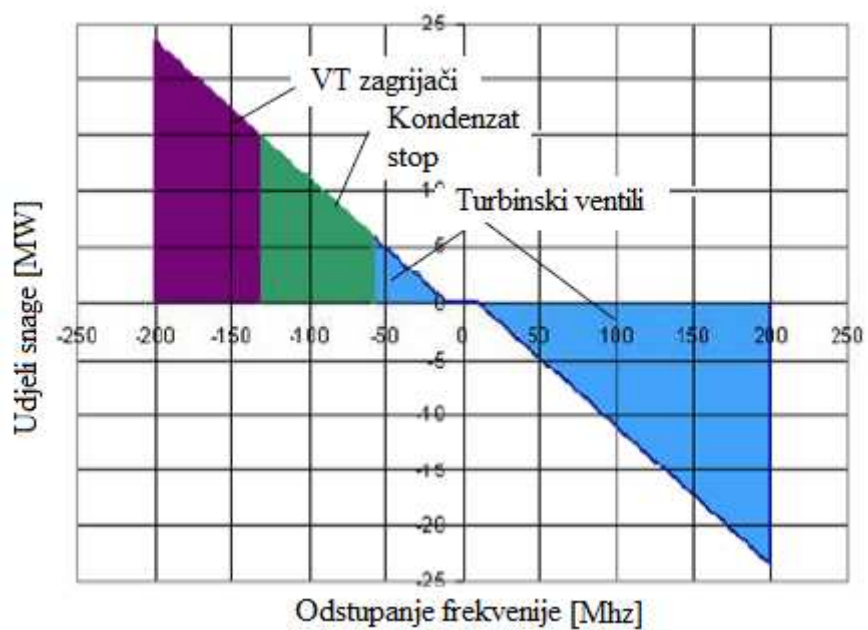
stanju ostvariti dodatnu zaradu na tržištu električne energije te kvalitetnije sudjelovati u regulaciji frekvencije elektroenergetskog sustava.



Slika 8 Primjer utjecaja regulacije na gradijent snage termoenergetskog bloka [6]

Suvremeni regulacijski sustavi se opremaju mjerama koje omogućuju brzo dodavanje i oduzimanje energije procesu. Regulacija na strani turbine i kondenzata sama za sebe u pravilu nije dovoljna da bi omogućila istovremenu primarnu i sekundarnu regulaciju elektroenergetskog sustava. Neke od mjera koje se koriste za ostvarivanje tog cilja su regulacija oduzimanja pare prema visokotlačnim zagrijačima, smanjenje ili obustava opskrbe procesnom parom te smanjenje ili obustava opskrbe sustava centralnog grijanja sa toplinskom energijom [2].

Slika 9 prikazuje udjele pojedinih tehnoloških rješenja na snagu postrojenja i regulaciju sustava.



Slika 9 Udjeli pojedinih tehnoloških rješenja u promjeni snage i frekvencije [2]

3. TEMPERATURNAPREZANJA

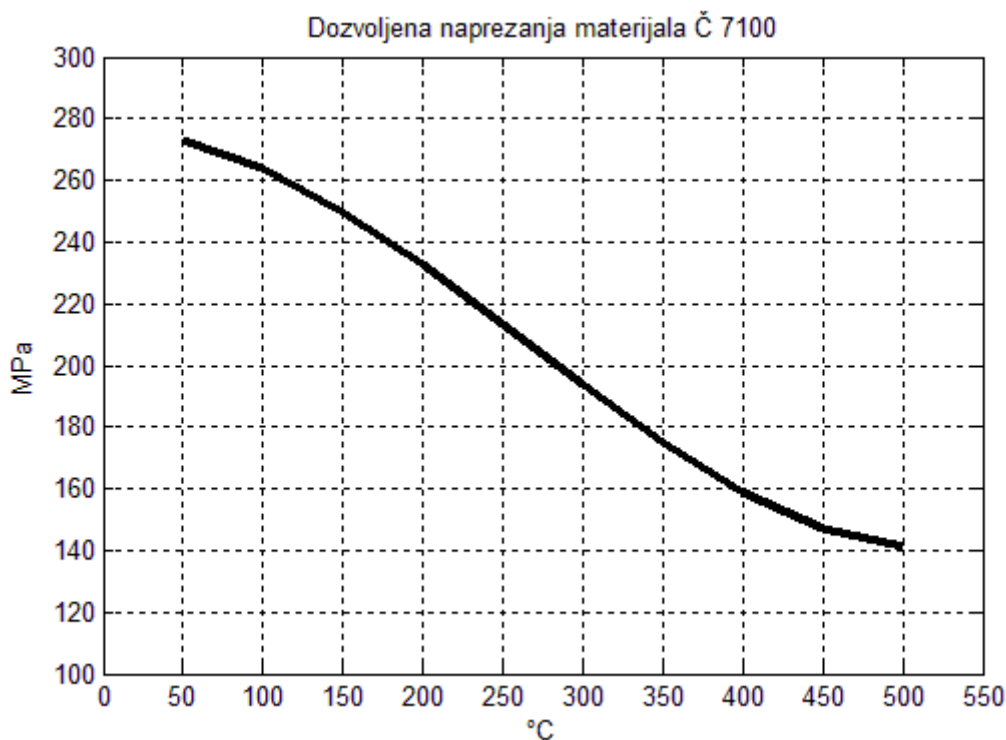
Zagrijavanje bilo koje tvari, bilo krutine, tekućine ili plina izaziva njezino širenje. Ta pojava može imati iznimno negativan utjecaj na strojarske konstrukcije. Ako se neki element zagrije na temperaturu veću od one u početnom stanju, odnosno prilikom montaže, u njemu može zbog temperaturne ekspanzije doći do naprezanja. Sličan se problem može pojaviti i kod elemenata koji se zagrijavaju neravnomjerno, odnosno kod elemenata u kojima je prisutan temperaturni gradijent po jednoj ili više dimenzija. U tom će slučaju doći do unutrašnjih temperaturnih naprezanja zbog neravnomjernog zagrijavanja a time i neravnomjernog širenja elementa. Linearna temperaturna ekspanzija se računa prema izrazu (1). Jednaka je umnošku dužine elementa u hladnom stanju, koeficijentu linearnog istežanja i promjeni temperature. Koeficijent linearnog istežanja β je ovisan o materijalu i temperaturi.

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

Tablica 1 **Dozvoljena naprezanja za čelik Č7100 ovisno o temperaturi [12][13]**

Temperatura [°C]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Dozvoljeno naprezanje [MPa]	273	264	250	233	213	194	175	159	147	141

Tablica 1 i Slika 12 prikazuju maksimalna naprezanja u ovisnosti o temperaturi za materijal kolektora napojne vode, čelika Č 7100, debljine do 16 mm za životni vijek od 200.000 sati. Iz dijagrama i tablice se može vidjeti sa su za više temperature dozvoljena sve niža naprezanja. Ako naprezanje premaši maksimalna dozvoljena, životni vijek opreme će se smanjiti.



Slika 10 Dozvoljena napreznja za čelik Č7100 ovisno o temperaturi [12][13]

Prilagođavanje pogona termoelektrane potrebama sustava zahtjeva nagle promjene snage, a samim time i temperatura u procesu, što izaziva značajna temperaturna napreznja u debelostjenim komponentama. Upravo su ta napreznja odnosno oštećenja koja ona izazivaju osnovni financijski problem fleksibilnog vođenja termoelektrane. Neke od tih poteškoća se mogu ublažiti pravilnim vođenjem pogona i regulacijom procesa, no nije moguće u potpunosti ukloniti njihov utjecaj na životni vijek vitalnih komponenti. Slika 11 prikazuje primjer štete izazvane temperaturnim napreznjem na kolektoru napojne vode jedne termoelektrane na ugljen.

Temperaturna napreznja mogu izazvati pukotine debelostjenih komponenti, posebice lijevanih dijelova poput kućišta i ventila turbina. Često su pogođeni i pregrijači i međupregrijači. Šteta poput one prikazane na prošloj slici su upravo posljedica naglih promjena temperature koja je povezana sa fleksibilnim vođenjem elektrane ili u nekim slučajevima naglim hlađenjem kondenzatom koji se nakupio tokom hladnog pogona [14].



Slika 11 Posljedica temperaturnog naprezanja [14]

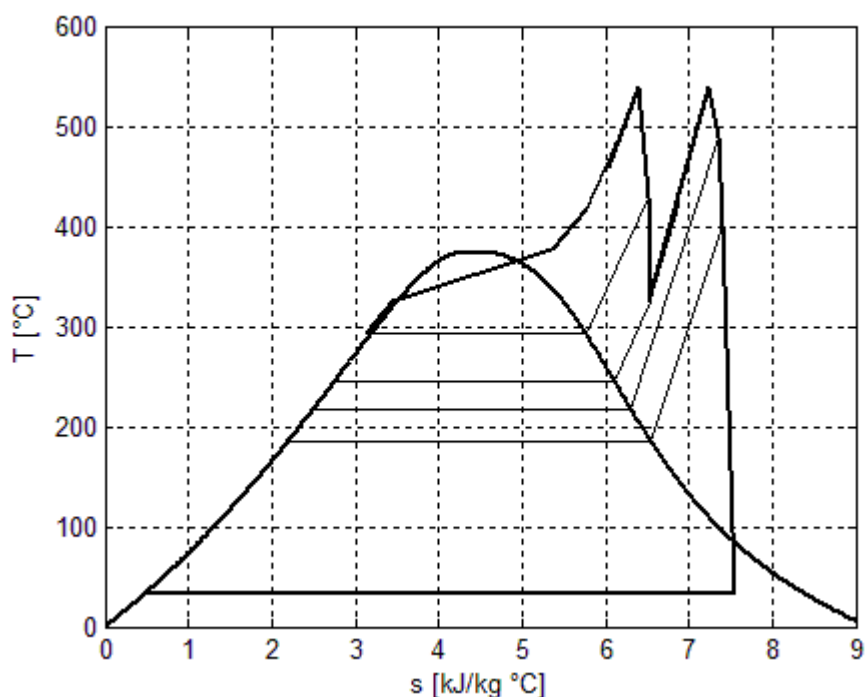
4. OPIS SUSTAVA

U svrhu povećanja energetske efikasnost termoenergetskog bloka dio pare se iz turbine odvodi i pomoću nje se zagrijava napojna voda prije ulaska u generator pare. Turbina može, ovisno o izvedbi imati više oduzimanja, što u visokotlačnom što u niskotlačnom dijelu. Kako je već ranije napomenuto, ako se od bloka zahtjeva naglo povećanje snage, jedna od opcija je obustava oduzimanja pare prema visokotlačnom zagrijaču napojne vode čime se povećava njen protok kroz niskotlačni dio te time i snaga samog bloka. Ovaj rad razmatra upravo takav slučaj.

U normalnom pogonu, odnosno u stacionarnom stanju, dio pare koji se oduzima iz visokotlačnog dijela turbine predaje energiju cijevnim stjenkama visokotlačnog zagrijača napojne vode. Kroz cijevi zagrijača se dovodi napojna voda približno konstantne ulazne temperature od 243 °C. Cijevna stjenka predaje energiju napojnoj vodi te ona izlazi iz zagrijača i ulazi u kolektor napojne vode sa povišenom temperaturom od 291 °C. Višak kondenzata pare se iz izmjenjivača odvodi da bi se održala njegova konstantna razina. U slučaju obustave oduzimanja u zagrijač više ne ulazi svjež para. Para koja je u zagrijaču preostala postupno kondenzira te joj se smanjuje tlak. Temperaturna razlika napojne vode na ulazu i izlazu zagrijača se s vremenom smanjuje do trenutka kada para, cijevne stjenke izmjenjivača i napojna voda ne poprime jednaku temperaturu od 243 °C, odnosno ulaznu temperaturu napojne vode. Ponovnom uspostavom oduzimanja, tlak i temperatura pare te temperatura napojne vode i cijevne stjenke se povećavaju dok se ponovno ne uspostavi stacionarno stanje.

Napojna voda se iz visokotlačnog zagrijača vodi u kolektor generatora pare. U normalnom radu postrojenja, temperatura stjenke kolektora će biti jednaka temperaturi napojne vode na izlazu iz visokotlačnog zagrijača odnosno 291 °C, umanjena za potencijalne gubitke koji su u ovom modelu zanemareni. Obustavom oduzimanja, temperatura napojne vode se smanjuje, kako je gore već opisano. Takva, sada hladnija, napojna voda ulazi u kolektor te ga hladi.

Debelostjene komponente kolektora će se neravnomjerno hladiti te će to rezultirati temperaturnim naprezanjima. Ponovnom uspostavom oduzimanja temperatura napojne vode na ulasku u kolektor će rasti te će ga neravnomjerno zagrijavati i ponovno izazivati temperaturna naprezanja. Što se kolektoru da više vremena da se ohladi to će temperaturna naprezanja uslijed ovog postupka biti izraženija.



Slika 12 Prikaz procesa u T-s dijagramu

Slika 12 prikazuje T-s dijagram procesa od izlaska iz četvrtog visokotlačnog zagrijača napojne vode do izlaska iz kondenzatora. Na dijagramu su prikazana i četiri visokotlačna oduzimanja.

5. MATEMATIČKI MODEL VISOKOTLAČNOG ZAGRIJAČA NAPOJNE VODE

Matematički model izmjenjivača topline odnosno visokotlačnog zagrijača napojne vode je opisan u ovom poglavlju. Model je riješen pomoću računalnog modela MATLAB [15].

Prilikom izrade modela uzete su slijedeće pretpostavke:

- Regulacija održava stupac kondenzata od 2 metra
- U ostatku cijevi je para u suhozasićenom stanju
- Zanemaren je prijelaz topline sa filma kondenzata na paru
- Specifični toplinski kapacitet vode nije ovisan o tlaku, ova je pretpostavka ne utječe znatno na rezultat
- Zanemaren je prijelaz topline između segmenata cijevi
- Toplinski kapacitet materijala stjenke cijevi nije ovisan o temperaturi
- Konstantan koeficijent prijelaza topline na pojedinim segmentima, nije ovisan o tlaku ni temperaturi
- Konstantna gustoća napojne vode i kondenzata.

Model je izrađen pomoću jednadžbi očuvanja mase i energije [17].

Akumulacija energije u napojnoj vodi je opisana pomoću jednadžbe (2). U prvom segmentu je ulazna temperatura napojne vode (T_{nvi-1}) konstantna i iznosi 247°C.

$$\frac{dT_{nvi}}{dt} = \frac{f_u \cdot \alpha_u \cdot (T_{si} - T_{nvi}) + m_{nv} \cdot c_{nvi} \cdot (T_{nvi-1} - T_{nvi})}{\rho_{nv} \cdot V_u \cdot c_{nvi}} \quad (2)$$

- f_u – površina izmjene topline sa unutrašnje strane cijevi [m^2]
- α_u – koeficijent izmjene topline sa unutrašnje strane cijevi [W/m^2K]
- T_{si} – temperatura stjenke u i-tom segmentu [$^{\circ}C$]
- T_{nvi} – temperatura napojne vode u i-tom segmentu [$^{\circ}C$]
- m_{nv} – maseni protok napojne vode [kg/s]
- c_{nvi} – toplinski kapacitet napojne vode u i-tom segmentu [W/kgK]
- ρ_{nv} – gustoća napojne vode [kg/m^3]
- V_u – volumen unutrašnjosti segmenta cijevi [m^3]

Akumulacija energije u stjenci cijevi je izračunata pomoću jednadžbe (3).

$$\frac{dT_{si}}{dt} = \frac{f_v \cdot \alpha_v \cdot (T_{vi} - T_{si}) - f_u \cdot \alpha_u \cdot (T_{si} - T_{nvi})}{\rho_s \cdot V_s \cdot c_s} \quad (3)$$

- f_v – površina izmjene topline sa vanjske strane cijevi [m^2]
- α_v – koeficijent izmjene topline sa vanjske strane cijevi [W/m^2K]
- T_{vi} – temperatura medija s vanjske strane cijevi u i-tom segmentu [$^{\circ}C$]
- ρ_{sv} – gustoća materijala stjenke cijevi [kg/m^3]
- V_s – volumen segmenta stjenke cijevi [m^3]
- c_s – toplinski kapacitet materijala stjenke cijevi [W/kgK]

Akumulacija energije u mediju izvan stjenke cijevi (para/kondenzat) je izračunata pomoću jednadžbe (4). Temperature se računaju samo na prva 4 segmenta, odnosno prva 2 metra na kojima je pretpostavljen kondenzat. Na ostalim je segmentima pretpostavljena temperatura zasićenja za izračunati tlak.

$$\frac{dT_{vi}}{dt} = \frac{f_v \cdot \alpha_v \cdot (T_{vi} - T_{si}) + m_v \cdot c_{vi} \cdot (T_{vi+1} - T_{vi-1})}{\rho_k \cdot V_v \cdot c_{vi}} \quad (4)$$

- m_v – maseni protok kondenzata s vanjske strane cijevi [kg/s]
- c_{vi} – toplinski kapacitet kondenzata u i-tom segmentu [W/kgK]
- ρ_k – gustoća kondenzata [kg/m³]
- V_s – volumen segmenta oko cijevi [m³]

Temperatura zasićenja se računa interpolacijom tlaka i temperatura dobivenih pomoću funkcije „XSteam“ [16] za izračunati tlak u tom vremenskom trenutku.

$$T_{zas} = \text{interp}(XP, YTSAT, p_t)$$

- T_{zas} – temperatura zasićenja za izračunati tlak [°C]
- `interp1` – funkcija za linearnu interpolaciju računalnog programa Matlab
- XP – tlak [bar]
- $YTSAT$ – temperatura [°C]
- p_t – izračunati tlak za vremenski trenutak t [bar]

Tlak zasićenja se računa interpolacijom tlaka i gustoće dobivenih pomoću funkcije „XSteam“ za izračunatu gustoću u tom vremenskom trenutku.

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

- YRO – gustoća [kg/m³]
- ρ_{pt} – gustoća suhozasićene pare za vremenski trenutak t [kg/m³]

Gustoća suhozasićene pare se računa pomoću zakona o očuvanju mase, odnosno pomoću jednadžbe (5). Ona je izražena kao razlika mase novo dovedene pare iz oduzimanja i novonastalog kondenzata.

$$\frac{d\rho_{pt}}{dt} = \frac{m_{pt} - \sum_{i=5}^{i=nseg} m_{ki}}{\frac{Vmc}{n} - \frac{Vmc}{n \cdot nseg}} \cdot 4 \quad (5)$$

- m_{pt} – maseni protok pare u vremenskom trenutku t [kg/s]
- m_{ki} – masa novonastalog kondenzata na segmentu cijevi [kg/s]
- $\sum m_{ki}$ – ukupna masa novonastalog kondenzata po svim segmentima, ne računa se za prva četiri segmenta pošto na njima nema kondenzacije [kg/s]
- Vmc – volumen međucijevnog prostora [m^3]
- n – broj cijevi
- $nseg$ – broj segmenata cijevi (kontrolnih volumena)

Maseni protok pare je izračunat pomoću bernulijeve jednadžbe (6).

$$m_{pt} = A \cdot \rho_k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_i - p_t| \cdot 10^5}{\rho_k}} \cdot y \quad (6)$$

- A – površina [m^2]
- p_i – tlak na ispred ulaza u izmjenjivač [bar]
- y – otvorenost ventila

Na ulazu u izmjenjivač, odnosno na izlazu iz oduzimanja je pretpostavljen protupovratni ventil simuliran sljedećim izrazom.

if $p_t > p_i$; $m_{pt}=0$; *end*

Tim je izrazom određeno da za slučaj da tlak u izmjenjivaču naraste na iznos veći od tlaka u turbini ne dođe do strujanja pare u suprotnom smjeru.

Maseni protok kondenzata u prva 4 segmenta cijevi je jednak sumi masenih protoka novonastalog kondenzata na svim segmentima (7). Ovakav način računanja je prihvatljiv zbog pretpostavke konstantne visine kondenzata na izlazu iz izmjenjivača, pa se stoga sav novonastali kondenzat (kondenzirana para) iz sustava mora odvesti.

$$m_v = \sum m_{ki} \quad (7)$$

Masa novonastalog kondenzata se računa pomoću izraza (8) i to za sve osim prva četiri segmenta, na njima ne dolazi do kondenzacije.

$$m_{ki} = \frac{\alpha_v \cdot f_v \cdot (T_{vi} - T_{si})}{(h_{sp} - h_{sv}) \cdot 10^3} \quad (8)$$

- h_{sp} – entalpija suhozasićene pare za tlak p_i [kW/kg]
- h_{sv} – entalpija vrele vode pare za tlak p_i [kW/kg]

Entalpiju suhozasićene pare i vrele vode se računa interpolacijom pomoću tlaka p_i i entalpija izračunatih pomoću funkcije „XSteam“.

$$hsp=interp1(XP,YHV, p_t)$$
$$hsv=interp1(XP,YHL, p_t)$$

- YHV - entalpija suhozasićene pare [kW/kg]
- YHL - entalpija vrele vode pare [kW/kg]

Sustav diferencijalnih jednadžbi je riješen pomoću funkcije „ode23“. Funkcija ode23 integrira sustav diferencijalnih jednadžbi u zadanom vremenskom području i sa zadanim početnim uvjetima. Koristi eksplicitne Runge-Kutta jednadžbe drugog i trećeg reda.

$$[t,y]=ode23(@modelver, tsim, ic)$$

- ode23 – poziv funkcije
- modelver – sustav koji se rješava funkcijom ode23
- tsim – vektor kojim je određen vremenski korak i trajanje simulacije
- ic – stupčasta matrica u kojoj su sadržane početne vrijednosti sustava

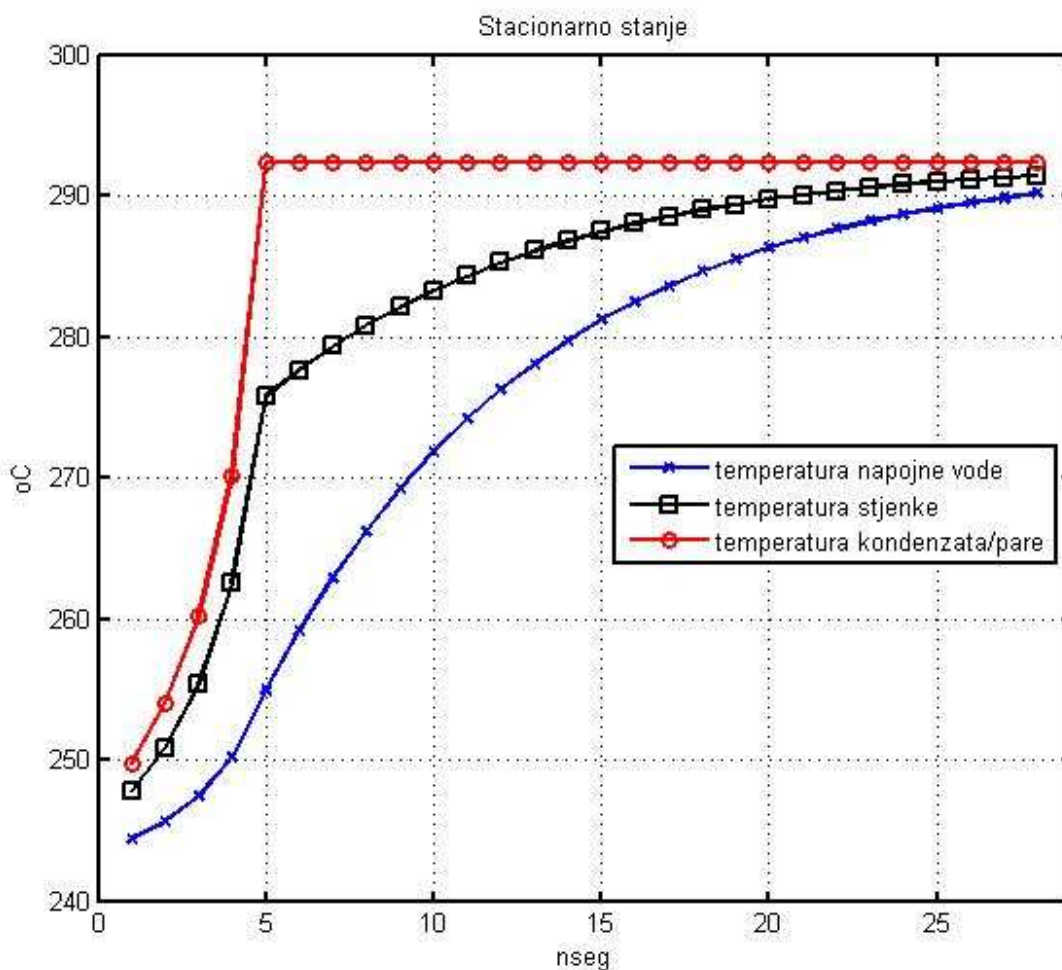
Početne vrijednosti simulacije su izračunati pomoću funkcije „fsolve“ koja traži nulte vrijednosti sustava jednadžbi.

$$S1=fsolve(@model,S0)$$

- fsolve – poziv funkcije
- model – sustav koji se rješava funkcijom fsolve
- S0 – pretpostavljene početne vrijednosti

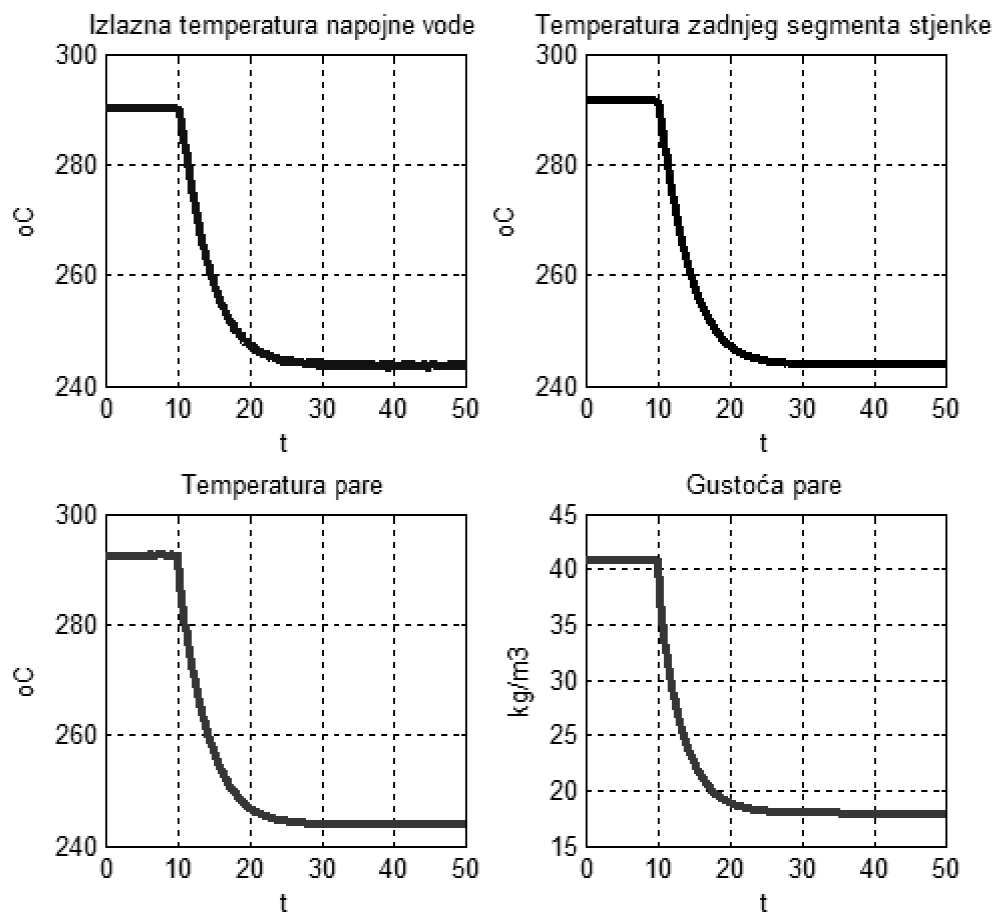
5.1. Rezultati

U ovom su poglavlju prezentirani temperaturni profili napojne vode, cijevne stjenke i kondenzata/pare.



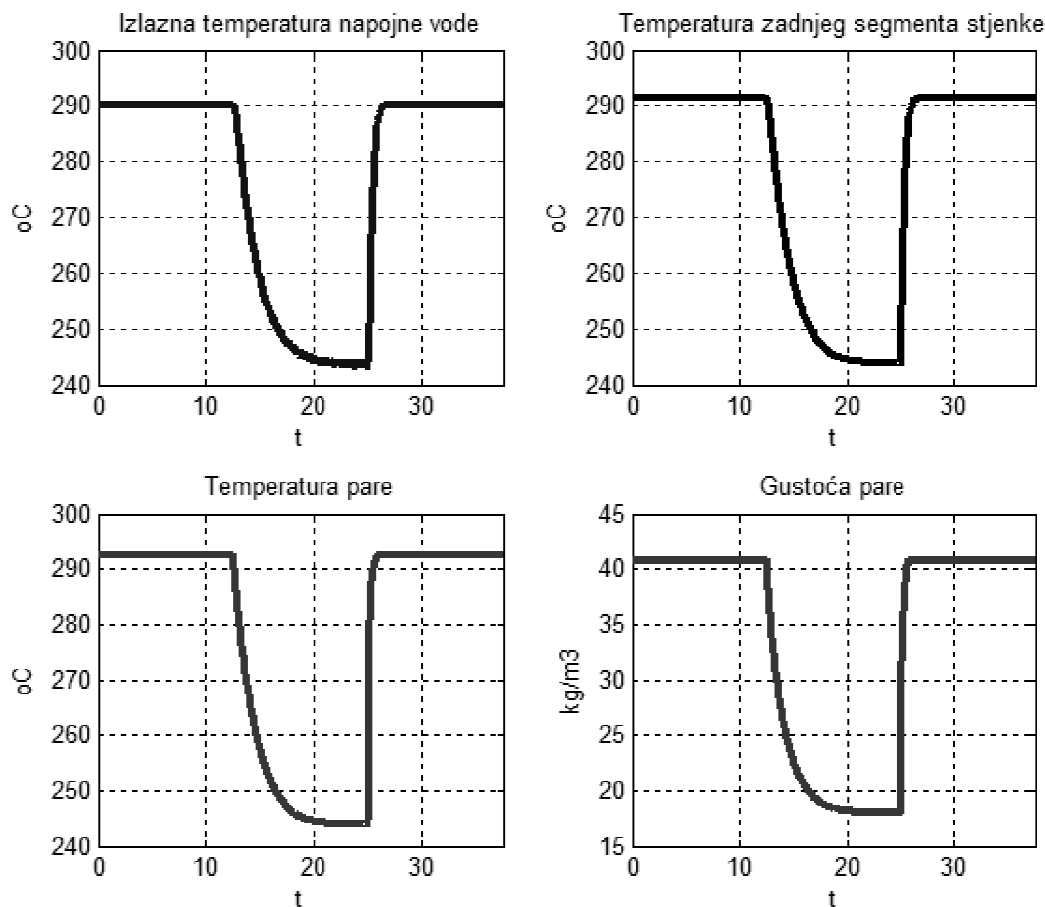
Slika 13 Temperature napojne vode, stjenke i kondenzata/pare u stacionarnom stanju

Slika 13 prikazuje T-A dijagram za napojnu vodu, stjenku cijevi i kondenzat/paru u stacionarnom stanju. Mogu se vidjeti posljedice pretpostavke suhozasičene pare nakon prvih 4 segmenta odnosno prvih 4 kontrolnih volumena te zanemarenja provođenja topline među segmentima cijevne stjenke. Prva se pretpostavka očituje konstantnom temperaturom medija s vanjske strane cijevi dok se druga očituje naglom promjenom temperaturnog gradijenta stjenke.



Slika 14 Temperature napojne vode, stjenke cijevi i pare te gustoća pare kroz vrijeme

Slika 14 prikazuje dijagrame temperature napojne vode na izlazu iz zagrijača, zadnjeg segmenta stjenke cijevi i pare te gustoće pare kroz vrijeme trajanja simulacije od 50 sekundi. Nakon 10 sekundi simulacije je prekinut dovod svježje pare iz oduzimanja. Iz dijagramima se može vidjeti da se nakon otprilike 20 sekundi nakon prekida oduzimanja uspostavi novo stacionarno stanje u sustavu kada se napojna voda, stjenka i para ohlade na ulaznu temperaturu napojne vode. Sustav ne pokazuje znatne oscilacije ni prije ni nakon prestanka dobave svježje pare.



Slika 15 Temperature napojne vode, stjenke i pare nakon ponovne uspostave oduzimanja

Slika 15 prikazuje dijagrame temperature napojne vode na izlazu iz zagrijača, zadnjeg segmenta stjenke cijevi i pare te gustoće pare kroz vrijeme trajanja simulacije od 75 sekundi sa ponovnom uspostavom dotoka svježe pare. Nakon 25 sekundi, dotok svježe pare iz oduzimanja je naglo obustavljen, te ponovno uspostavljen nakon 50 sekundi. Na dijagramu se može primijetiti izrazito naglo povećanje temperature i gustoće nakon ponovne uspostave dotoka svježe pare iz oduzimanja, te uspostave novog stacionarnog stanja nakon svega nekoliko sekundi.

6. MATEMATIČKI MODEL TEMPERATURNIH NAPREZANJA KOLEKTORA

U ovom je poglavlju opisan matematički model temperaturnog profila i temperaturnih i tlačnih napreznja u kolektoru [18].

Temperaturni profil kolektora je modeliran pomoću tri diferencijalne jednačbe koje su riješene funkcijom „ode45“ programskog paketa „MATLAB“. Funkcija ode45 je slična funkciji ode23 uz razliku da koristi eksplicitne Runge-Kutta jednačbe četvrtog i petog reda.

```
[t,z]=ode45(@tempstj, tsim, ul);
```

- ode45 – poziv funkcije
- tempstj – sustav koji se rješava funkcijom ode23
- tsim= – vektor kojim je određen vremenski korak i trajanje simulacije
- ul – stupčasta matrica u kojoj su sadržane početne vrijednosti sustava

Početne vrijednosti koje predstavljaju ulazne podatke za simulaciju su dobiveni pomoću funkcije „fsolve“.

```
U1=fsolve(@Kolektor,Tsk0,options);
```

- fsolve – poziv funkcije
- Kolektor – sustav koji se rješava funkcijom fsolve
- Tsk0 – pretpostavljene početne vrijednosti

Promjena temperature napojne vode koja je u dodiru sa kolektorom izaziva promjene u temperaturnom polju debelostjenih dijelova kolektora. Uslijed prostornog gradijenta tog temperaturnog polja u materijalu stjenke se javljaju temperaturna napreznja kao funkcija oblika tog polja. Oblik temperaturnog polja ne ovisi samo o izmjeni topline između stjenke i

medija već i o geometriji stjenke. Zbog toga se maksimalna naprezanja u stjenci ne mogu jednostavno izračunati ali im je karakter približno proporcionalan promjeni temperature i računa se prema izrazu (9).

$$\sigma_T \approx K \cdot \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{dT}{dt} \cdot s^2 \quad (9)$$

- σ_T - temperaturno naprezanje [Pa]
- s - debljina stjenke [m]
- $\frac{\partial T}{\partial t}$ - brzina promjene temperature površine stjenke [$^{\circ}\text{C/s}$]
- c - specifična toplina materijala stjenke [$\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$]
- ρ - gustoća materijala stjenke [Kg/m^3]
- λ - koeficijent toplinske vodljivosti materijala stjenke [W/mK]
- K - koeficijent proporcionalnosti (ovisi o obliku debelostjenog dijela, o svojstvima materijala stjenke i o uvjetima prijelaza topline između medija i stjenke)

Jednodimenzijski matematički model nestacionarnog provođenja topline kroz stjenku cilindričnog plašta temelji se na pretpostavci da je plašt beskonačna ravna ploča. Tom je pretpostavkom zanemaren utjecaj zakrivljenja stjenke, kao i utjecaj prostornih gradijenata temperature u tangencijalnom i uzdužnom smjeru na oblik temperaturnog polja, tj. pretpostavlja se da je nestacionarno provođenje topline unutar stjenke uvjetovano isključivo temperaturnim gradijentom u radijalnom smjeru. Izraz (10) prikazuje model nestacionarnog temperaturnog polja u beskonačnoj ravnoj ploči [18].

$$\frac{dT(x,t)}{dt} = a \cdot \frac{d^2 \cdot T(x,t)}{dx^2} \quad (10)$$

Nestacionarno temperaturno polje se računa prema izrazu (10). Stjenka kolektora je podijeljena u n slojeva odnosno kontrolnih volumena jednake debljine δ . Postavljanjem

jednadžbe bilance energije za svaki od slojeva i uz pretpostavku da se profili temperature između simetrala susjednih slojeva može smatrati linearnim, tj. da je gustoća toplinskog toka između dva susjedna sloja proporcionalna razlici temperatura u simetralama tih slojeva, matematički model nestacionarnog provođenja topline kroz stjenku opisan je pomoću tri diferencijalne jednadžbe.

Pomoću jednadžbe (11) se računa temperatura prvog segmenta odnosno kontrolnog volumena stjenke kolektora.

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{a}{\delta^2} \cdot [2 \cdot A \cdot T_k - (3 - 2B) \cdot T_1 + T_2] \quad (11)$$

- T_1 – temperatura prvog segmenta stjenke kolektora [°C]
- a – koeficijent toplinskog provođenja materijala stjenke kolektora [m^2/s]
- δ – debljina segmenta stjenke [m]
- A – faktor
- T_k – temperatura napojne vode koja ulazi u kolektor [°C]
- B – faktor
- T_2 – temperatura drugog segmenta stjenke [°C]

Koeficijent toplinskog provođenja se računa pomoću izraza (12). Pošto toplinska vodljivost ovisna o temperaturi koja se mijenja iz segmenta u segment te u vremenu ovaj koeficijent čini izraz nelinearnim. Pretpostavljena je linearna ovisnost toplinske vodljivosti o temperaturi.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (12)$$

- λ – toplinska vodljivost materijala stjenke kolektora [W/mK] [19]
- ρ – gustoća materijala stjenke kolektora [kg/m³]
- c – toplinski kapacitet materijala stjenke [J/kgK]

Koeficijenti A i B se računaju pomoću izraza (13) i (14).

$$A = \frac{\alpha \cdot \delta}{\alpha \cdot \delta + 2\lambda} \quad (13)$$

$$B = \frac{2\lambda}{\alpha \cdot \delta + 2\lambda} \quad (14)$$

- α – koeficijent izmjene topline napojne vode i kolektora [W/m²K]

Temperatura segmenata 2 do n-1 se računaju pomoću izraza (15).

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{a}{\delta^2} \cdot (T_{i-1} + T_{i+1} - 2T_i) \quad (15)$$

- T_{i-1} – Temperatura prošlog segmenta stjenke kolektora [°C]
- T_{i+1} – Temperatura idućeg segmenta stjenke kolektora [°C]

Temperatura posljednjeg segmenta stjenke kolektora se računa pomoću izraza (16). Na zadnjem segmentu kolektora je pretpostavljena idealna izolacija koja sprječava izmjenu topline kolektora i okoline u tom smjeru.

$$\frac{dT_n}{dt} = \frac{a}{\delta^2} \cdot (T_{n-1} - T_n) \quad (16)$$

Toplinska naprezanja kolektora se računaju prema izrazu (17). Pretpostavljena je linearna ovisnost modula elastičnosti o temperaturi.

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

- σ_j – temperaturna naprezanja segmenta stjenke kolektora [N/m^2]
- β – koeficijent linearnog temperaturnog rastezanja materijala stjenke kolektora [K^{-1}]
- E – modul elastičnosti [N/m^2]
- ν – Poissonov koeficijent
- T_{sr} – srednja temperatura stjenke kolektora za jedan vremenski trenutak [$^{\circ}\text{C}$]
- T_j – temperatura segmenta stjenke kolektora [$^{\circ}\text{C}$]

Srednja temperatura kolektora se računa pomoću izraza (18).

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

- n – broj segmenata

Tlačna naprezanja u kolektoru se računaju pomoću izraza (19).

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

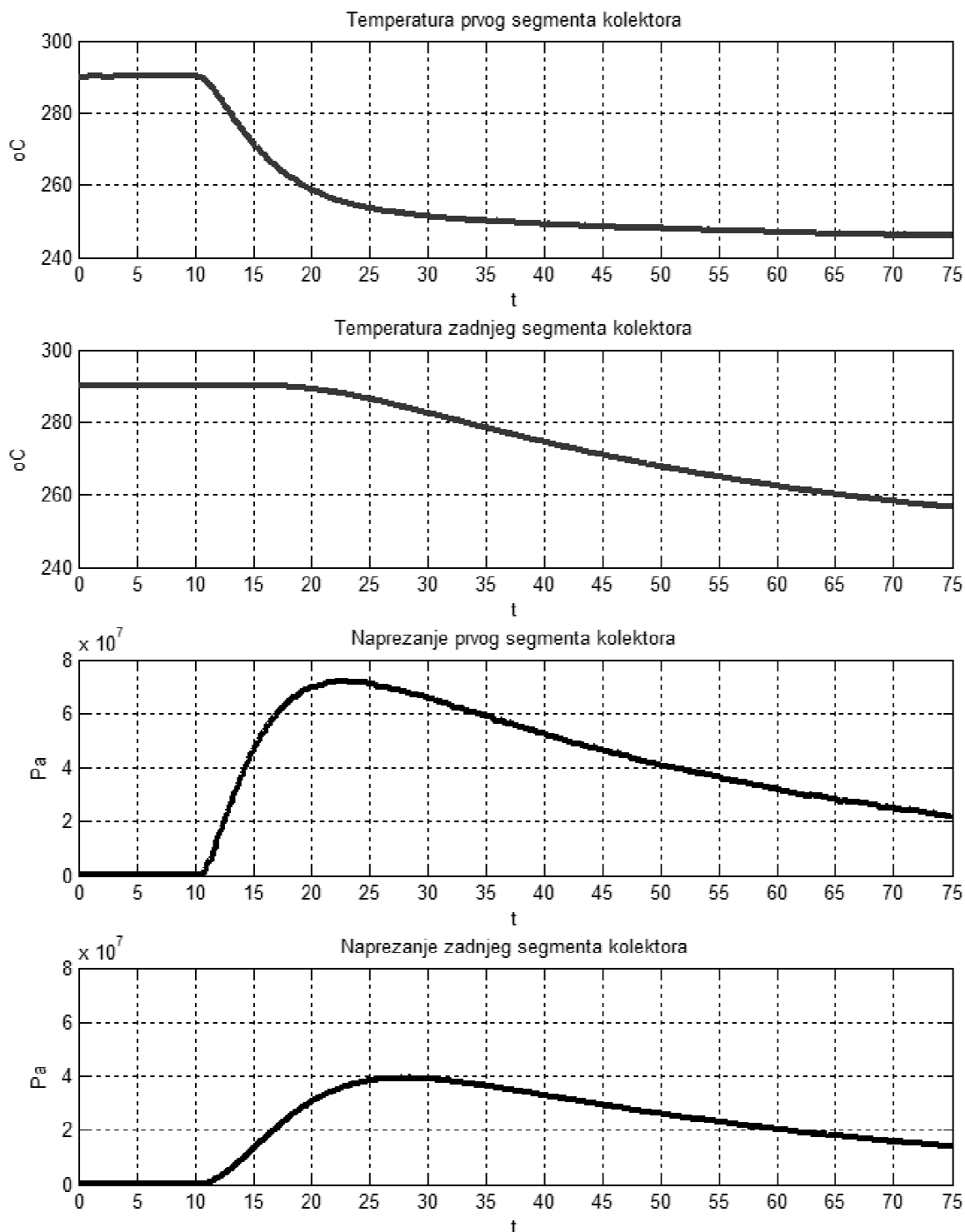
- σ_p – tlačna naprezanja segmenta stjenke kolektora [N/m^2]
- D – unutrašnji promjer kolektora [m]
- s – debljina stjenke kolektora [m]
- p – tlak u kolektoru [Pa]

Ukupna naprezanja na stjenku kolektora su jednaka zbroju temperaturnih i tlačnih naprezanja. Tlačna naprezanja su konstantna tokom vremena pošto je i tlak u kolektoru konstantan tokom cijele simulacije

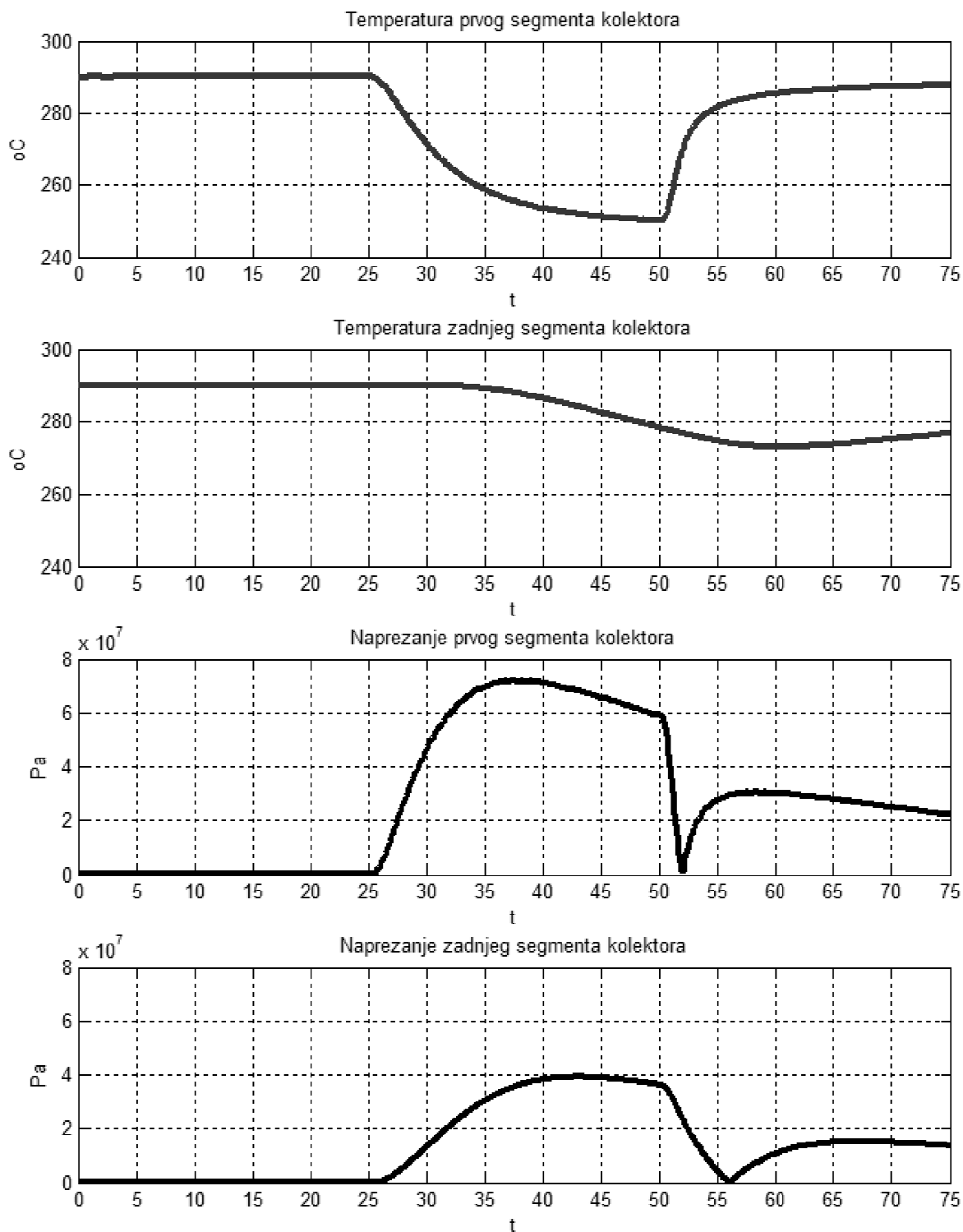
6.1. Rezultati

Slika 16 prikazuje temperaturne profile i temperaturna naprezanja prvog i zadnjeg segmenta stjenke kolektora kroz vrijeme trajanja simulacije, za slučaj nagle obustave oduzimanja pare iz turbine nakon 10 sekundi. Naglim prekidom oduzimanja se para u visokotlačnom zagrijaču napojne vode naglo hladi te se time hladi i napojna voda. Zbog toga se hlade stjenke kolektora koje su sa tom vodom u dodiru. Relativno brza promjena temperature stjenke kolektora u njemu izaziva temperaturna naprezanja.

Slika 17 prikazuje temperaturne profile i temperaturna naprezanja prvog i zadnjeg segmenta stjenke kolektora kroz vrijeme trajanja simulacije, za slučaj nagle obustave oduzimanja pare iz turbine nakon 25 sekundi te njene ponovne uspostave nakon 50 sekundi. Iz dijagrama se može vidjeti da se temperature za razliku od napojne vode i pare nisu stigle za to vrijeme ustabiliti te nije postignuto novo stacionarno stanje. Takvo ponašanje je bilo očekivano.



Slika 16 Temperature i temperaturna naprezanja stjenke kolektora



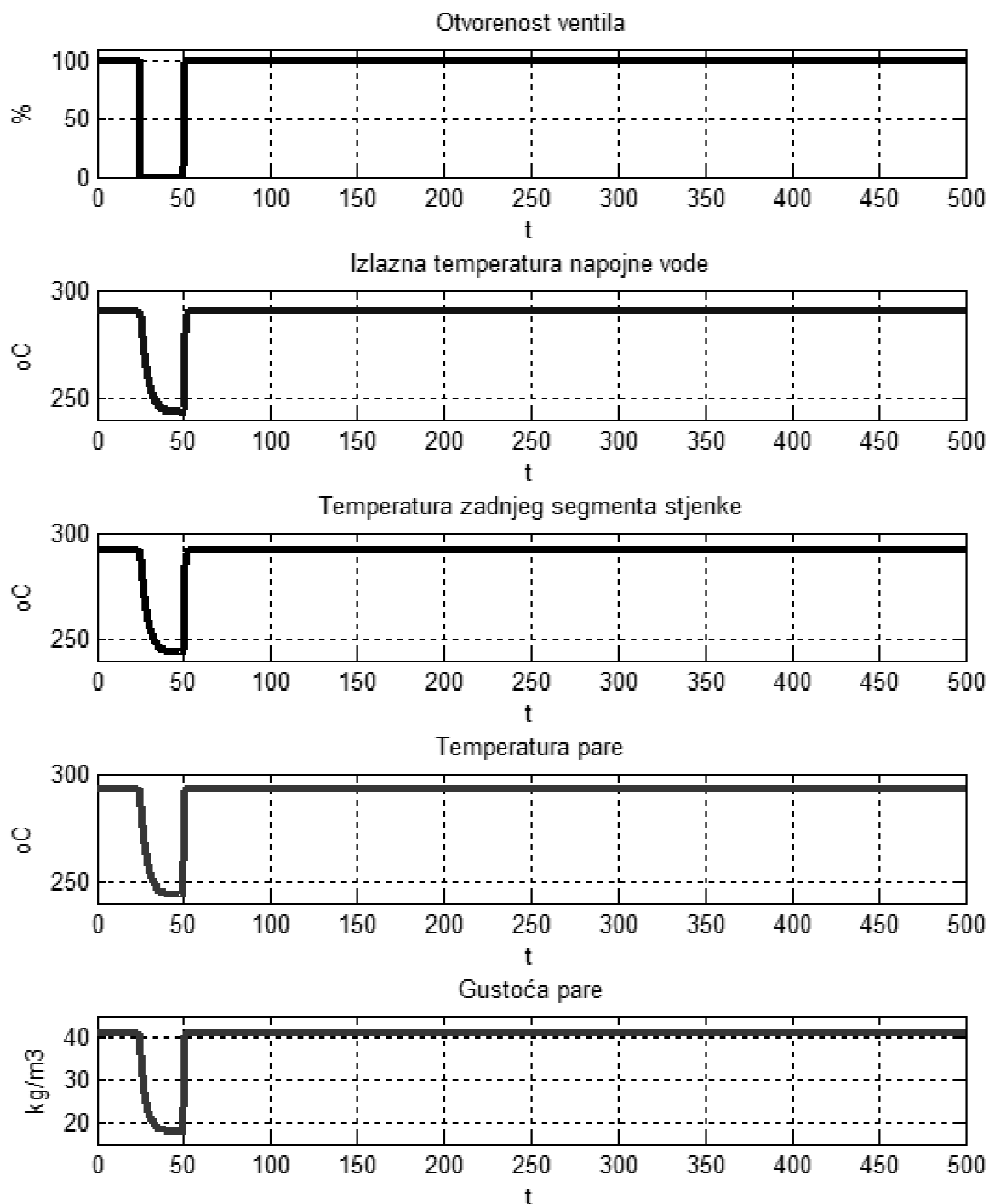
Slika 17 Temperature i temperaturna naprezanja kolektora nakon naglog prekida i uspostave oduzimanja iz turbine

7. REZULTATI SIMULACIJE

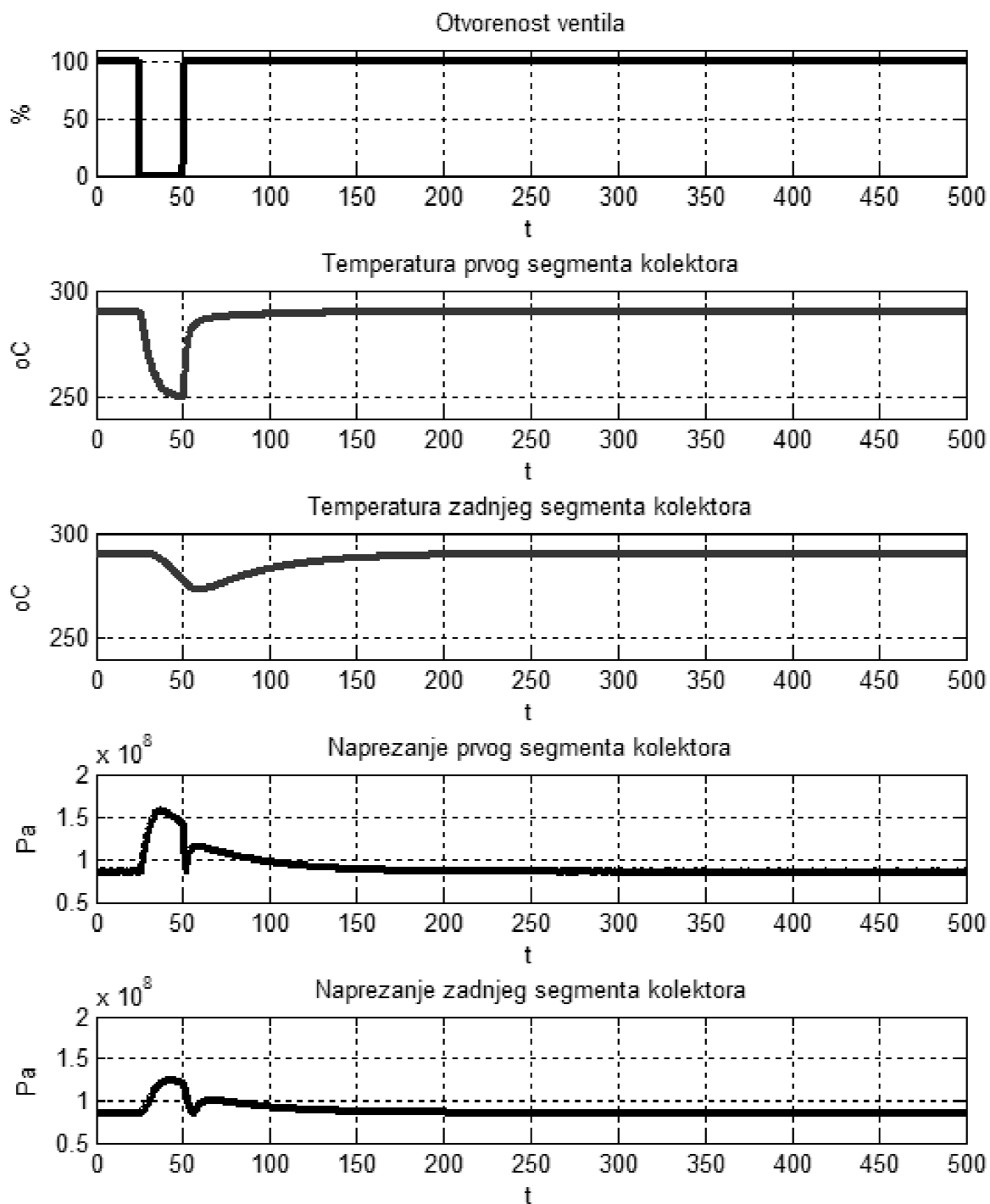
U ovom su poglavlju prezentirani rezultati provedenih simulacija. Simulacije traju 500 sekundi. U svakoj se nakon 25 sekundi prekine dovod pare iz oduzimanja u visokotlačni zagrijač napojne vode te se nakon 25, 75, 125, 175, 225, 275 i li 325 sekundi ponovno uspostavi. Tablica 2 prikazuje rezultate provedenih simulacija, prvo redni broj, vrijeme nakon kojeg je oduzimanje ponovno uspostavljeno te maksimalno naprezanje, toplinsko i tlačno, koje je izračunato za taj slučaj. Maksimalno dozvoljeno naprezanje za 300 °C (maksimalna temperatura koja se tokom simulacije postigne) je za ovaj slučaj 192 MPa. Slika 18 do Slika 31 prikazuju rezultate pojedinih simulacija.

Tablica 2 Rezultati simulacija

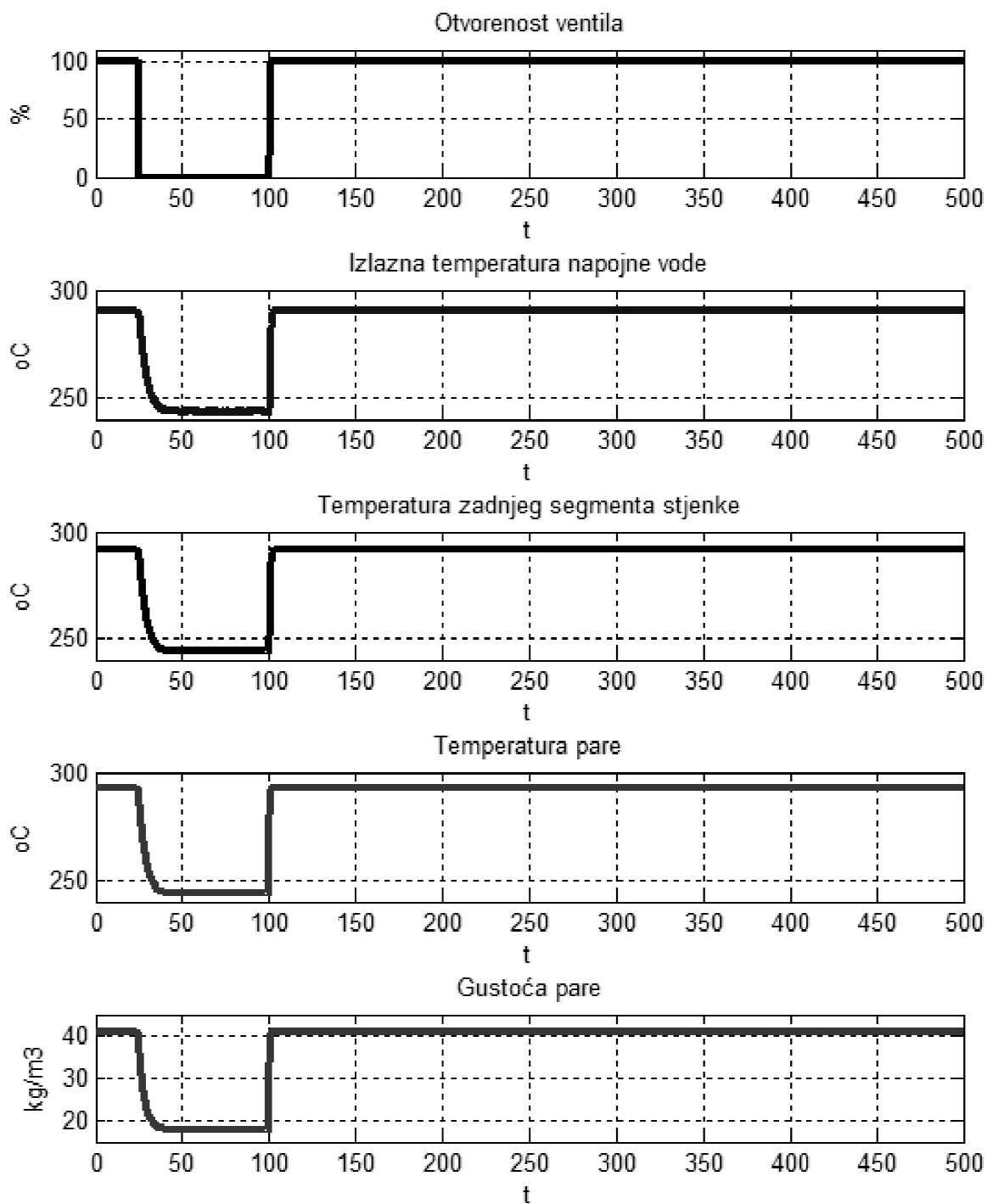
Simulacija broj:	Vrijeme	Maksimalno naprezanje
1.	25 s	157.11 MPa
2.	75 s	157.11 MPa
3.	125 s	162.79 MPa
4.	175 s	165.92 MPa
5.	225 s	166.79 MPa
6.	275 s	167.11 MPa
7.	325 s	167.13 MPa
σ_{\max} za 300°C:		192 MPa



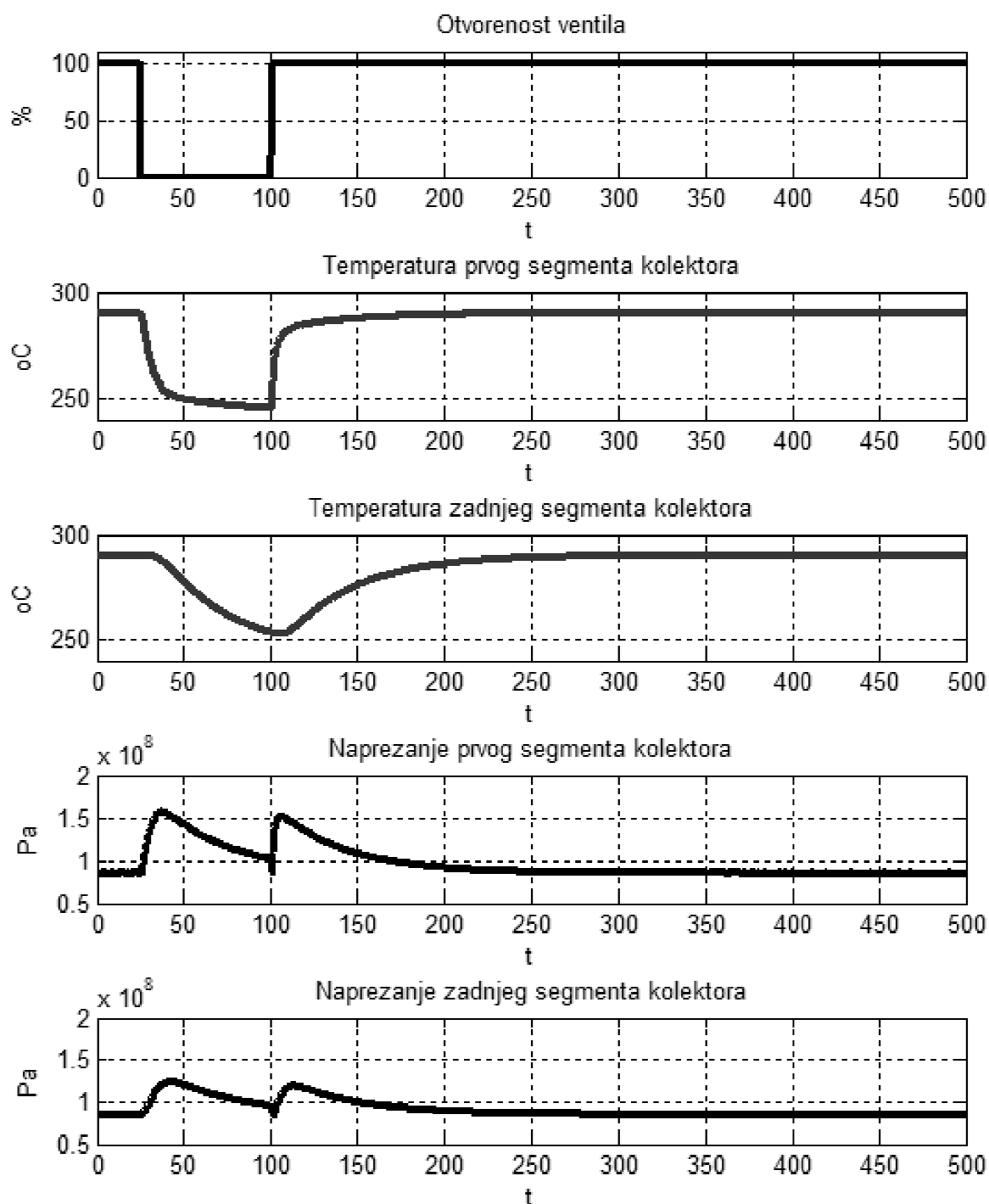
Slika 18 Odzivi zagrijača za simulaciju 1



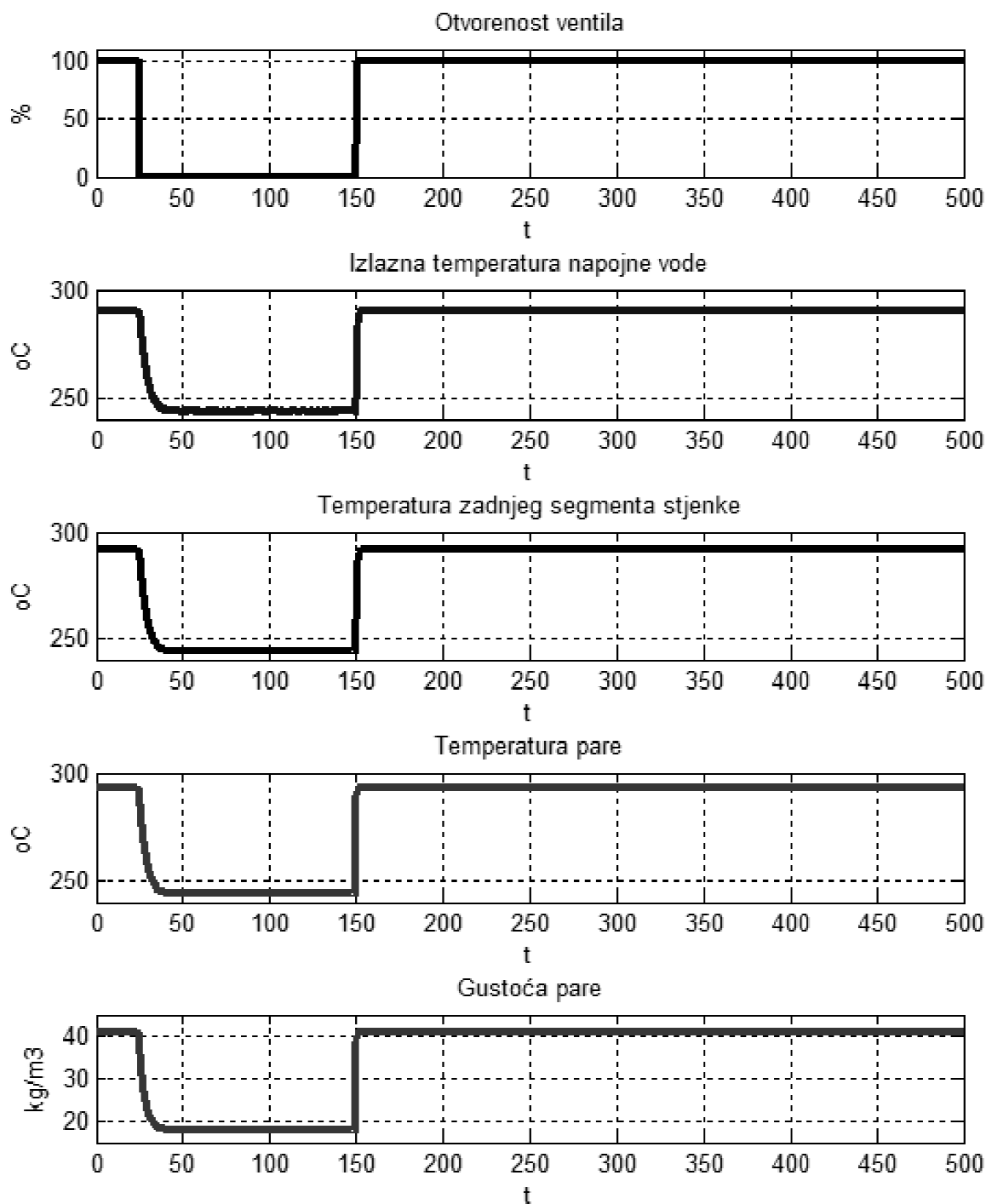
Slika 19 Odzivi kolektora za simulaciju 1



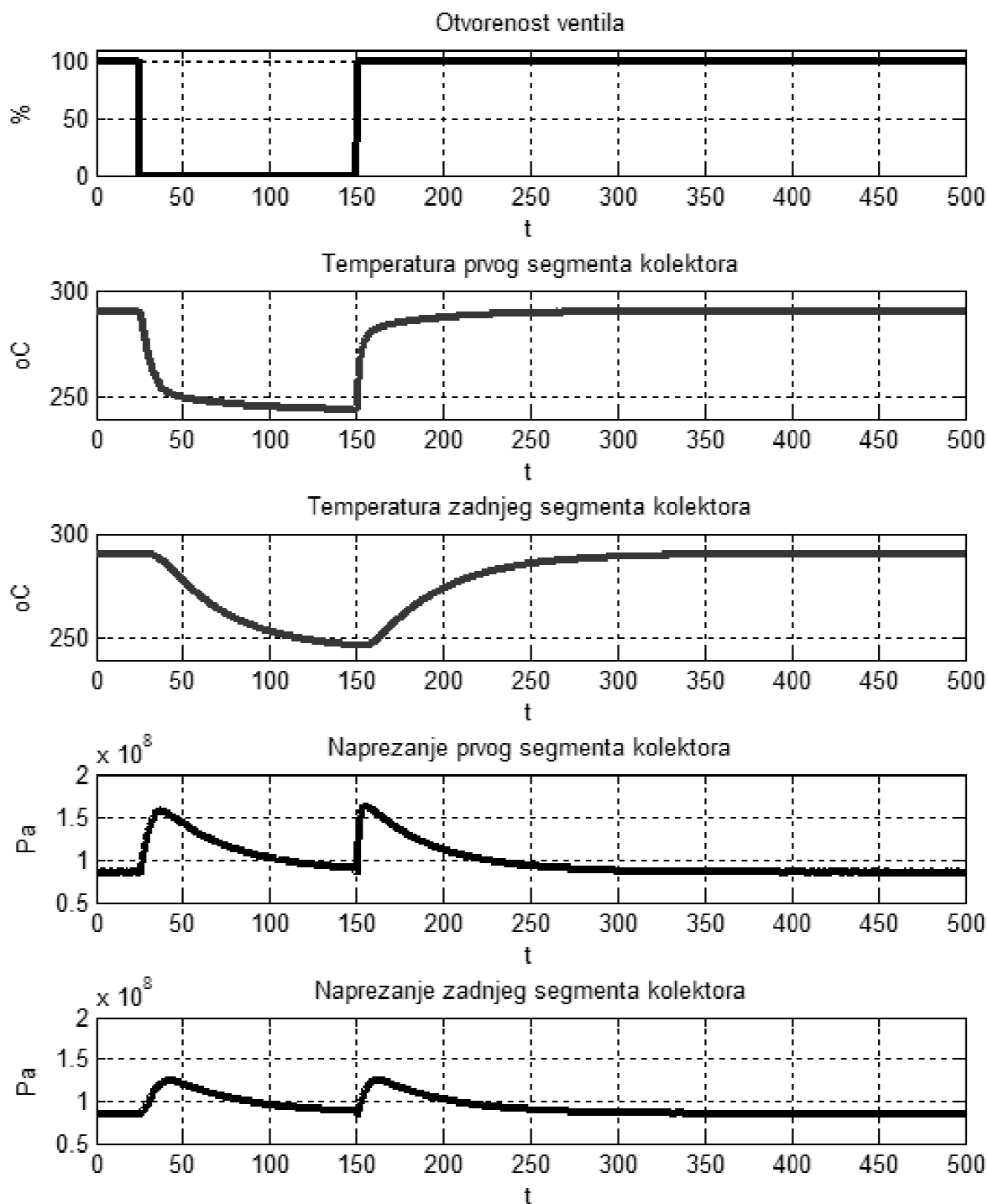
Slika 20 Odzivi zagrijača za simulaciju 2



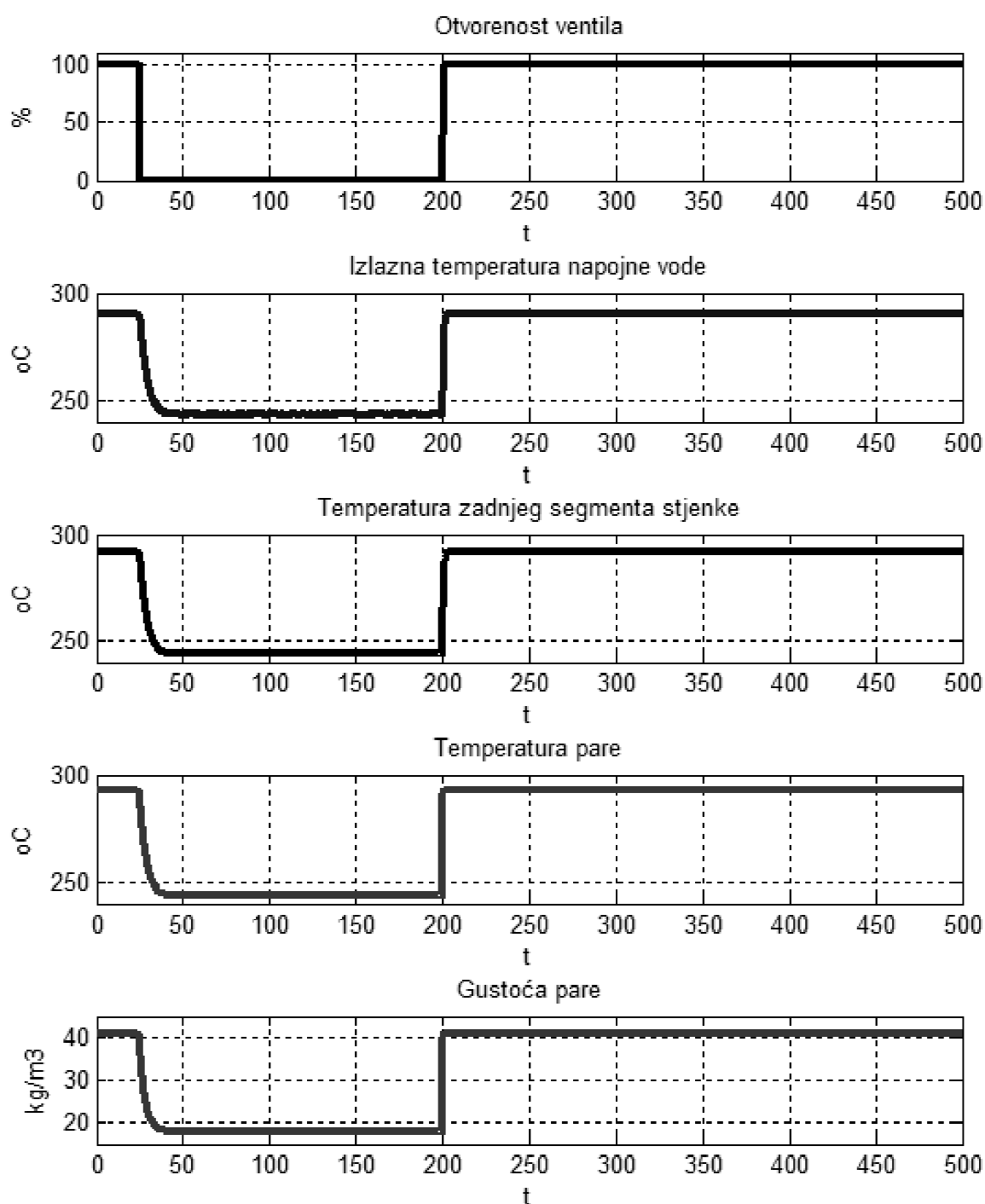
Slika 21 Odzivi kolektora za simulaciju 2



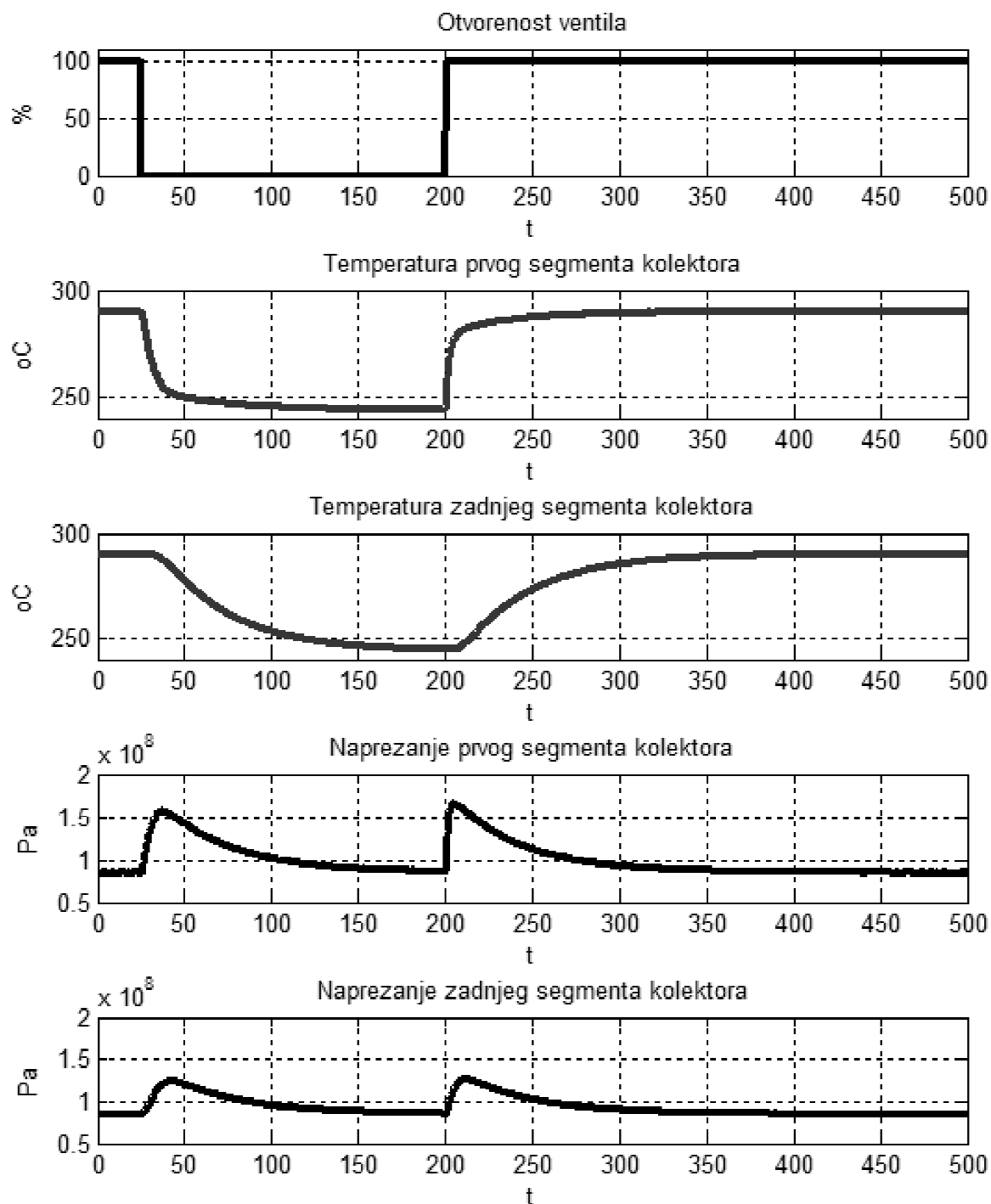
Slika 22 Odzivi zagrijača za simulaciju 3



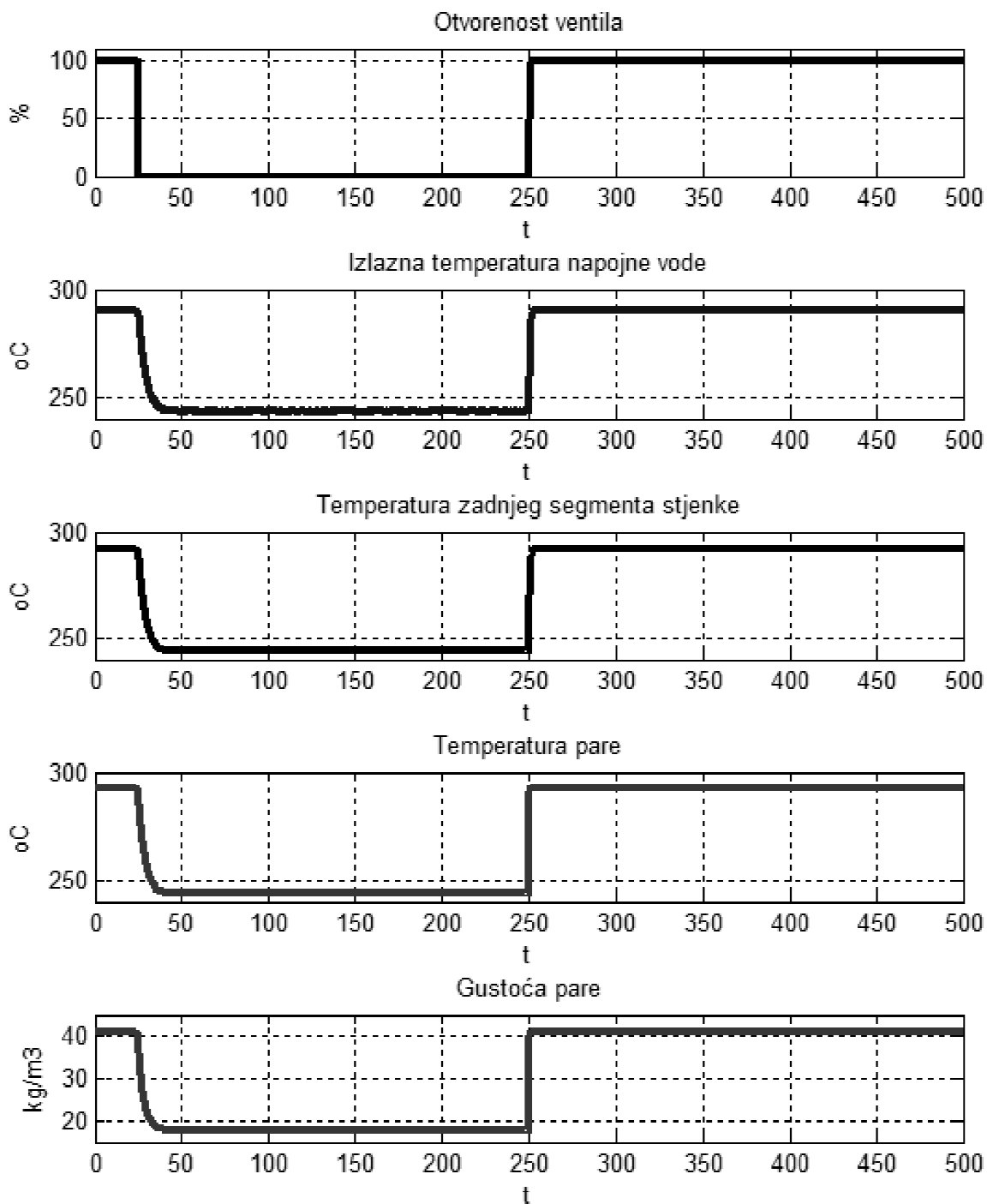
Slika 23 Odzivi kolektora za simulaciju 3



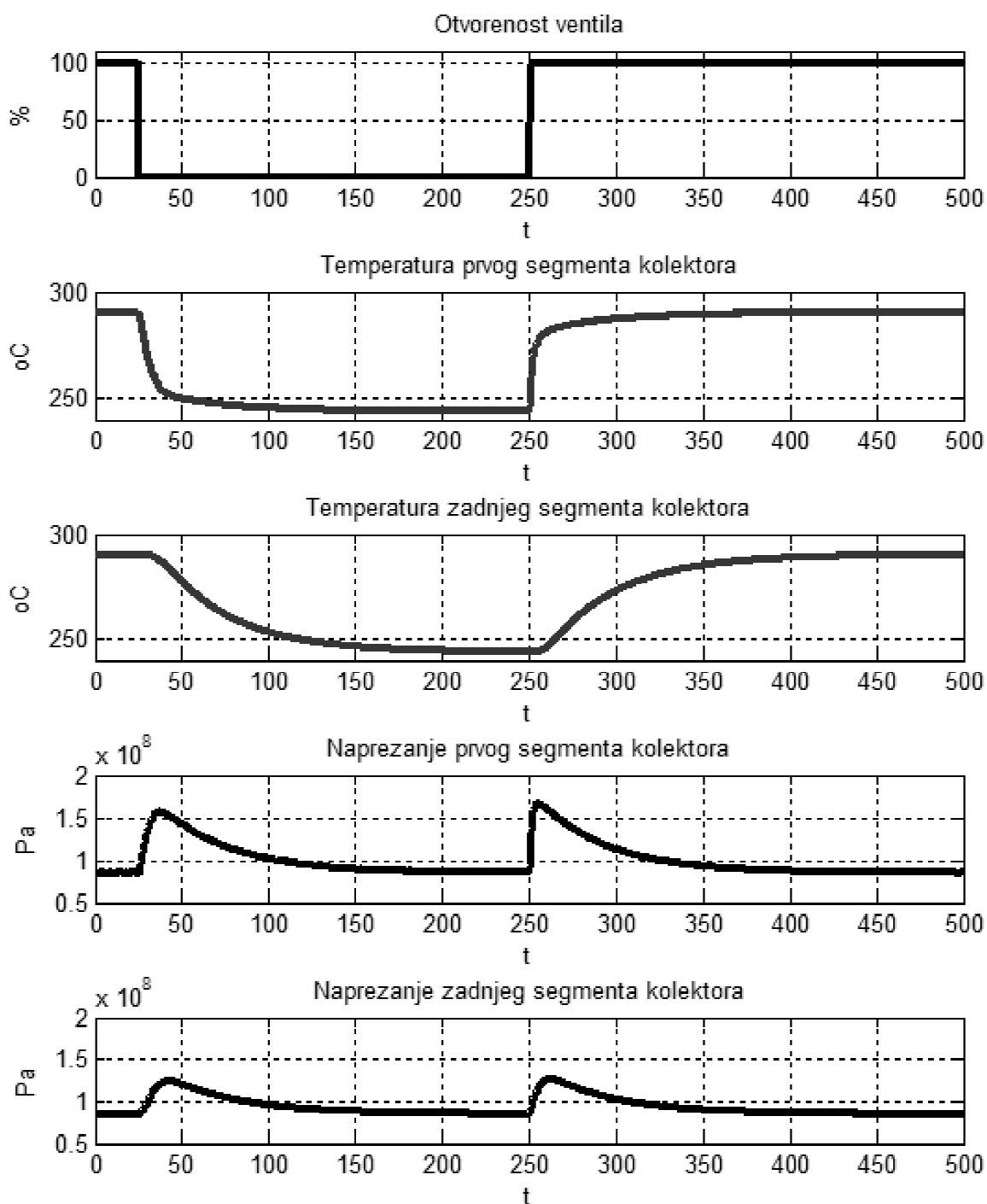
Slika 24 Odzivi zagrijača za simulaciju 4



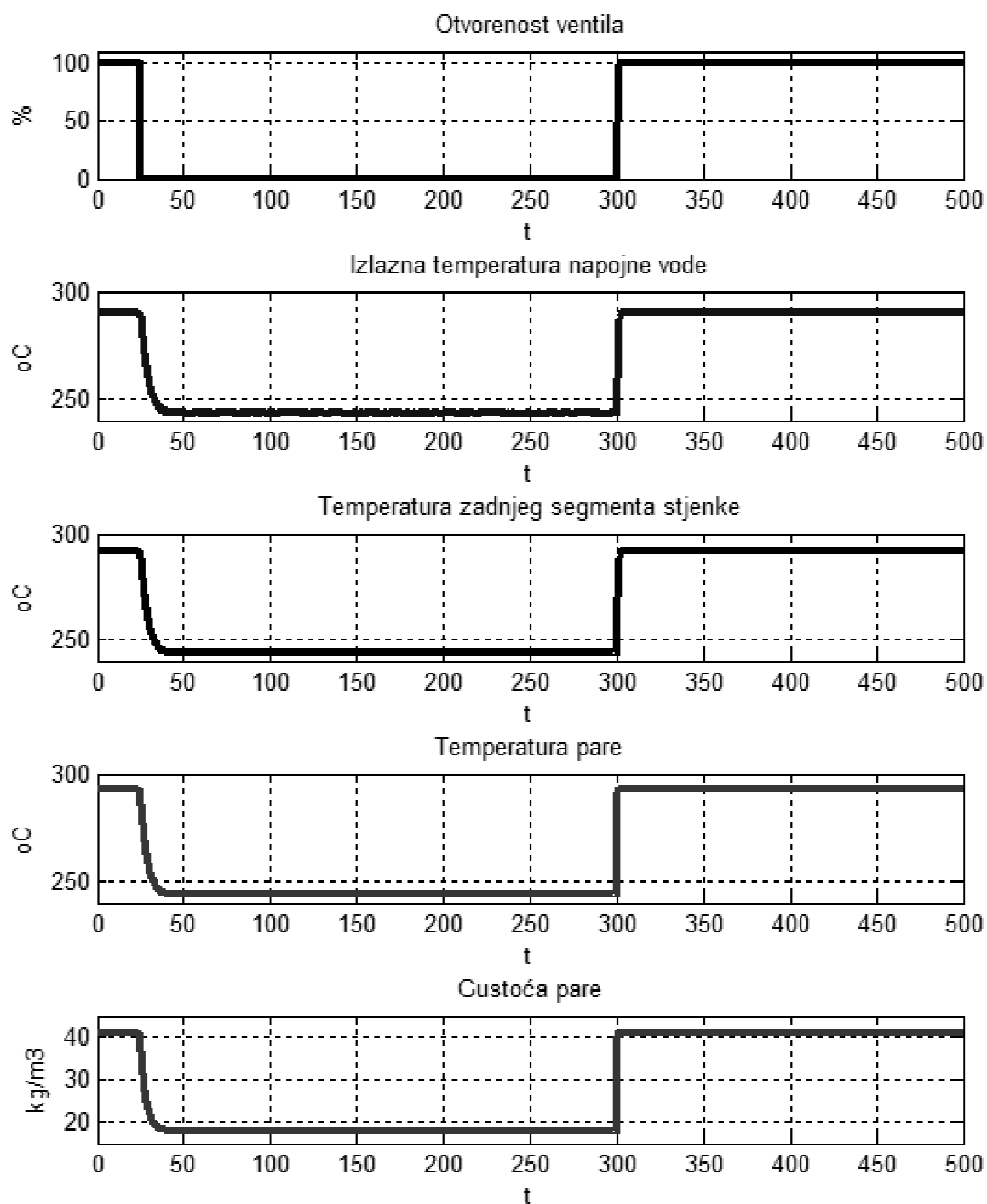
Slika 25 Odzivi kolektora za simulaciju 4



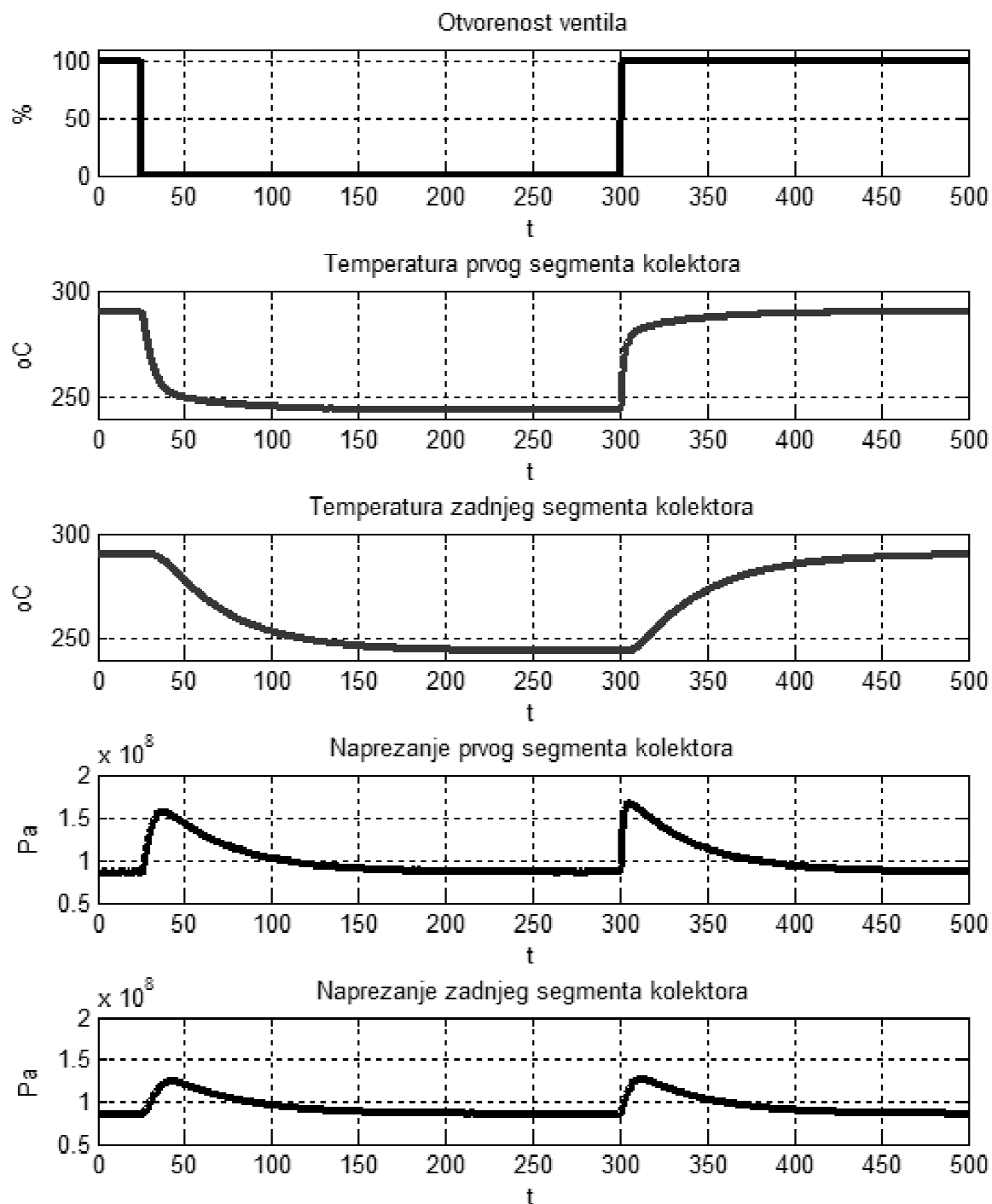
Slika 26 Odzivi zagrijača za simulaciju 5



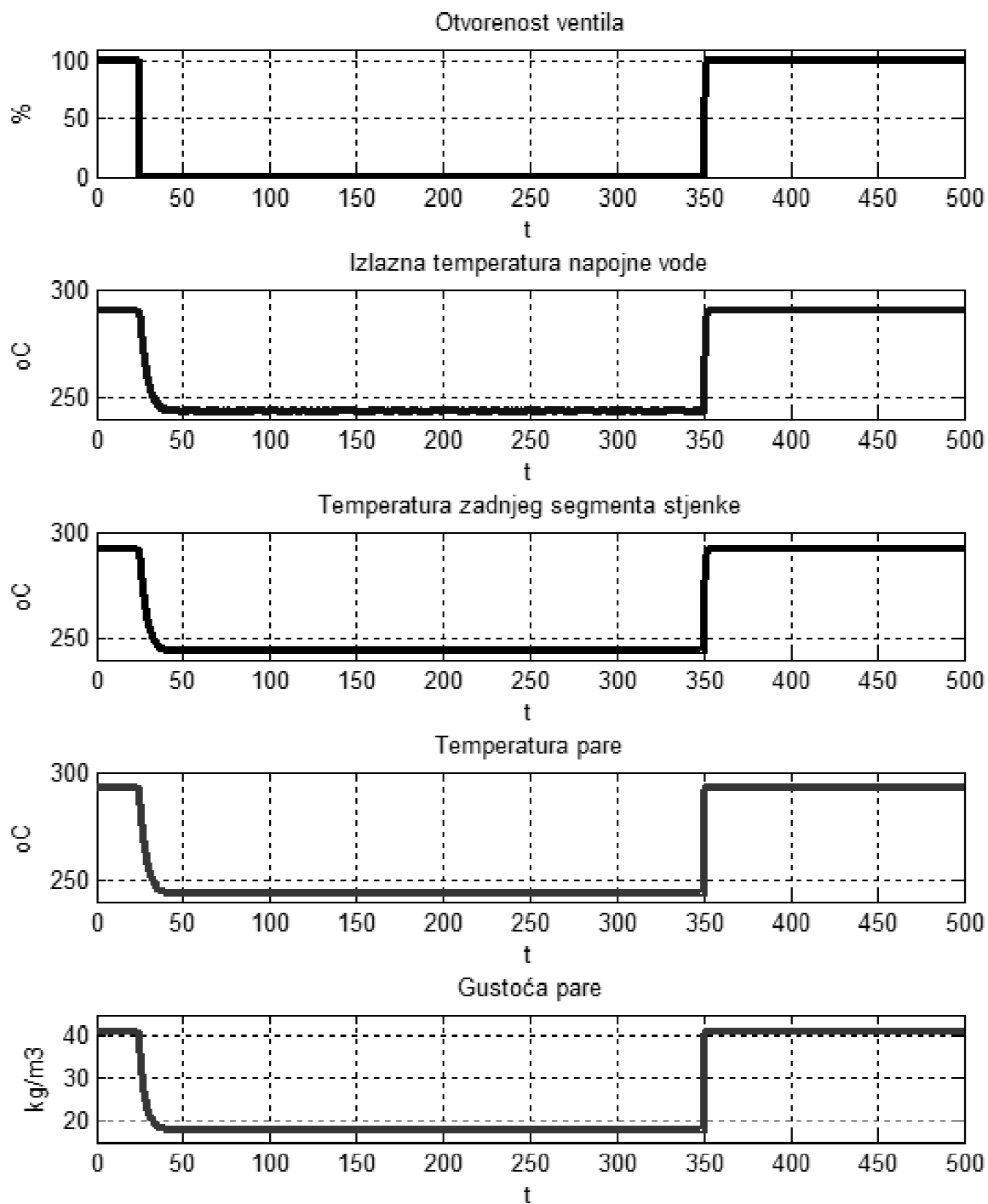
Slika 27 Odzivi kolektora za simulaciju 5



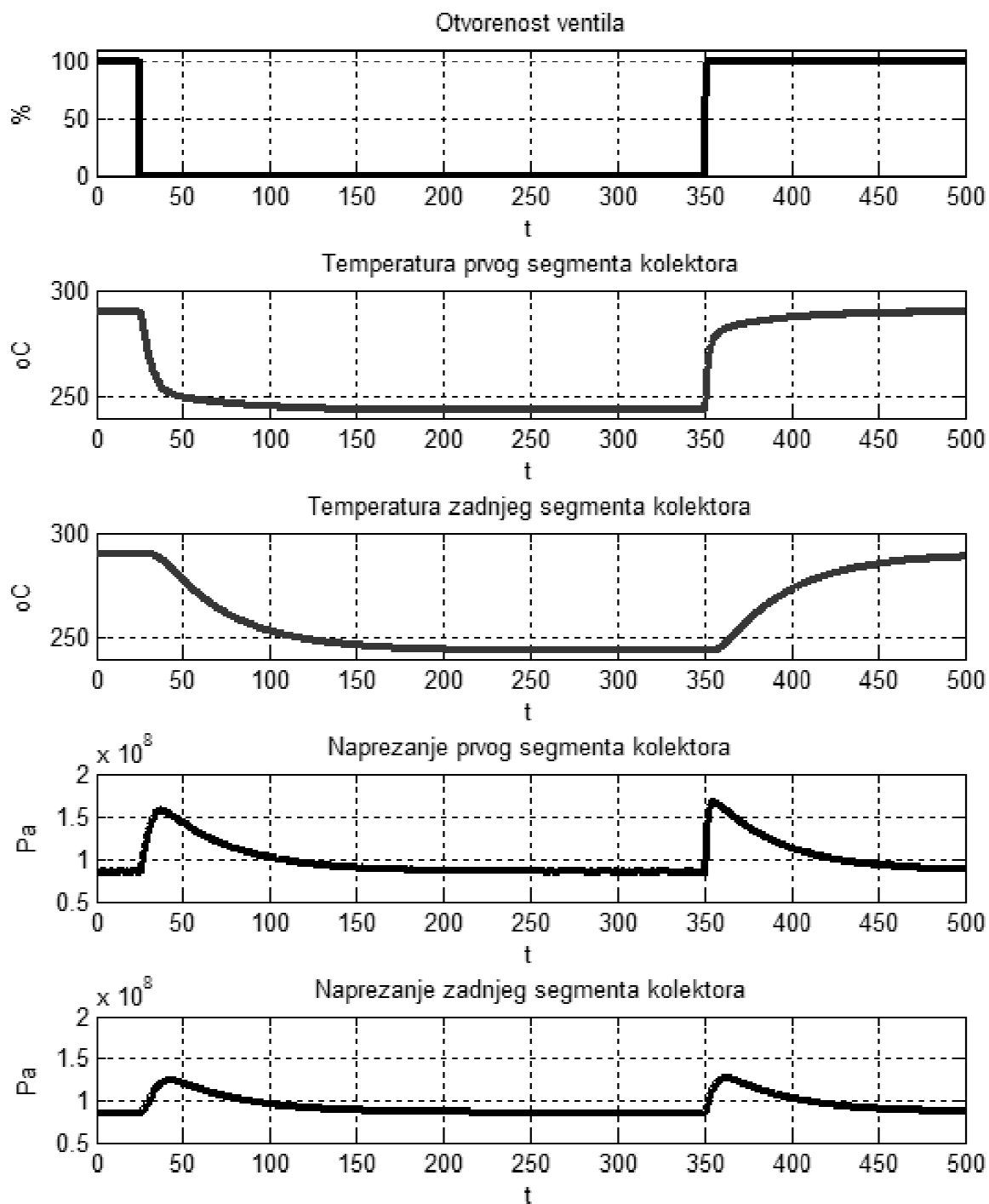
Slika 28 Odzivi zagrijača za simulaciju 6



Slika 29 Odzivi kolektora za simulaciju 6



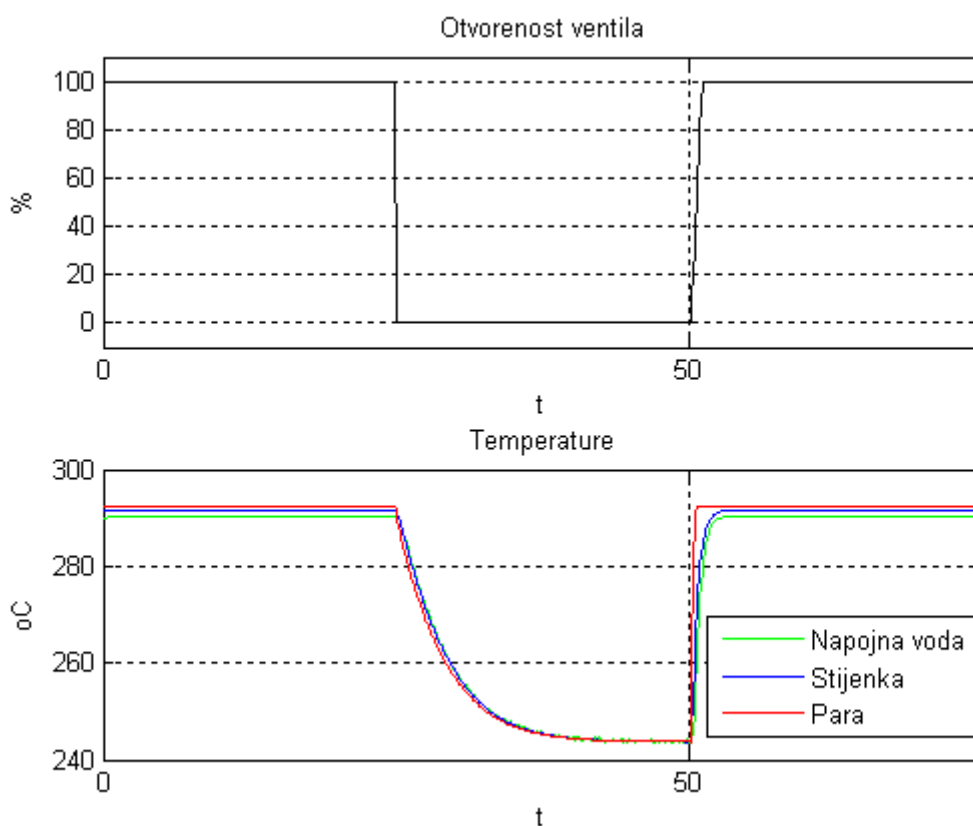
Slika 30 Odzivi zagrijača za simulaciju 7



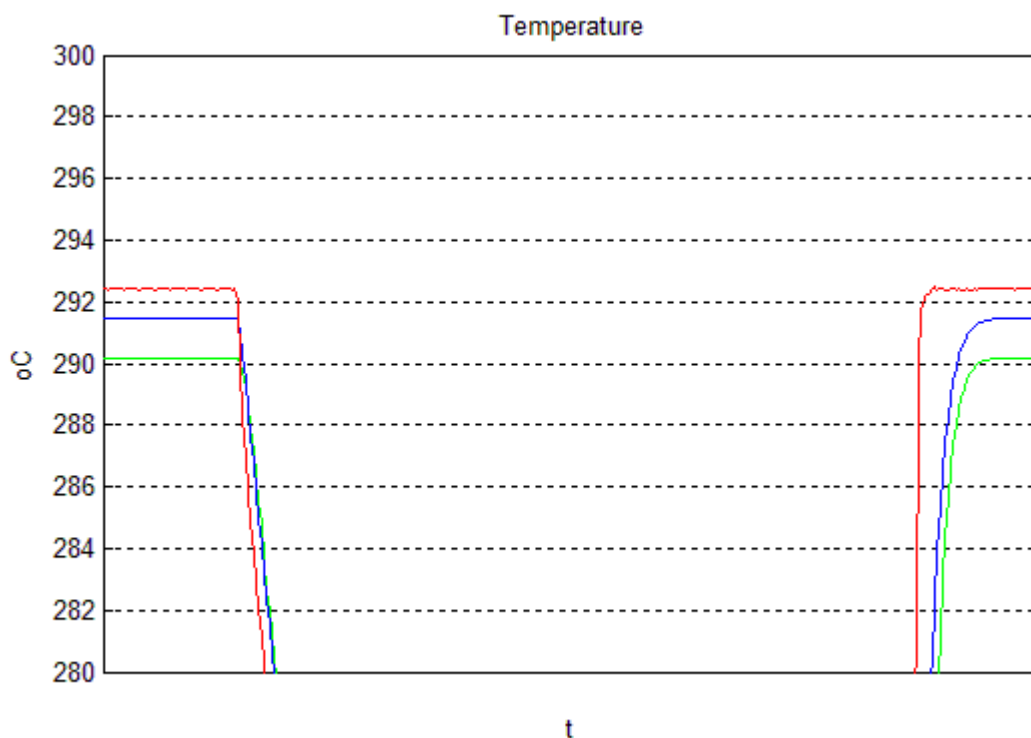
Slika 31 Odzivi kolektora za simulaciju 7

Iz prikazanih se rezultata može vidjeti da ovakav način vođenja termoenergetskog bloka neće u kolektoru izazvati naprezanja veća od dozvoljenih, čak ni za slučaj kada se kolektor u potpunosti ohladi. Na dijagramima se vide dva skoka u naprezanjima i to su trenutci naglog prekida i ponovne uspostave oduzimanja.

Kolektor se nakon otprilike 325 sekundi u potpunosti ohladi te je za slučaj prekida oduzimanja u trajanju od 325 sekundi ili više najveće naprezanje u kolektoru jednako 167.13 MPa, to se naprezanje javlja uslijed ponovne uspostave oduzimanja. Ako prekid oduzimanja traje kraće od 75 sekundi maksimalno naprezanje je jednako 157.11 MPa i to je naprezanje koje se javlja uslijed prekida oduzimanja, to je također najmanje naprezanje koje se javlja kod ovakvog vođenja.



Slika 32 Razlika temperatura napojne vode, stjenke i pare

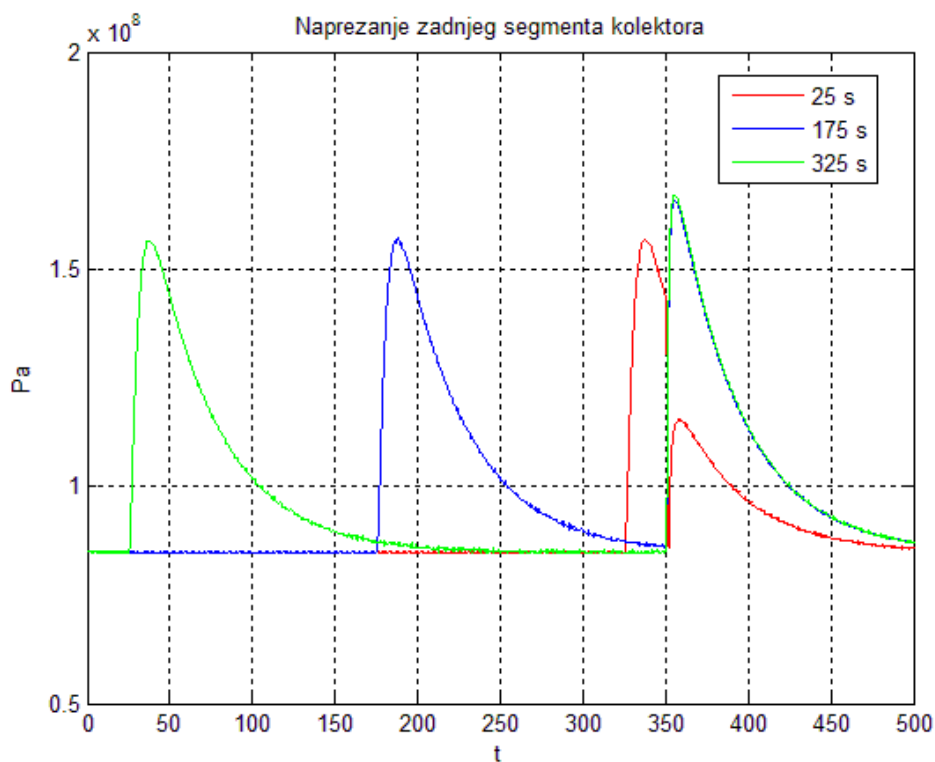


Slika 33 Detaljan prikaz razlika u temperaturama

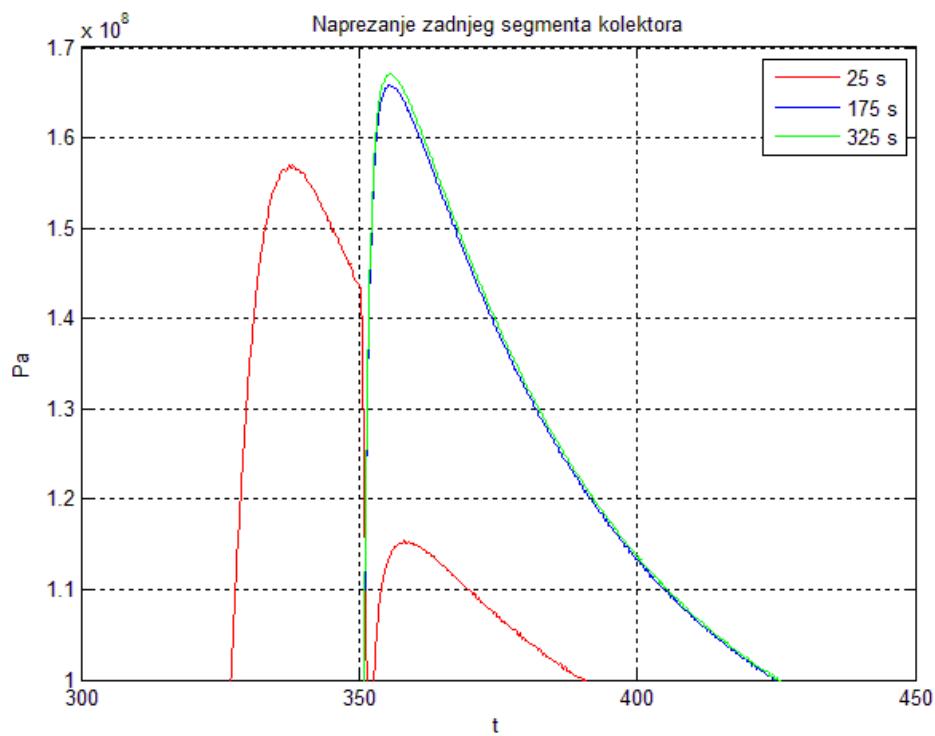
Slika 32 demonstrira razlike temperatura napojne vode, stjenke i pare u stacionarnom i nestacionarnom stanju. Slika 33 daje detaljniji prikaz temperatura u trenutku prekida oduzimanja pare i postizanja novog stacionarnog stanja.

U ovom se slučaju naglim prekidom oduzimanja snaga termoenergetskog bloka može povećati za maksimalno 12.9 MW odnosno 6.14 %.

Slika 34 demonstrira razlike između naprezanja za slučajeve trajanja obustave oduzimanja od 25, 175 i 325 sekundi. Naprezanja su prilikom obustave oduzimanja za sva tri slučaja jednaka i iznose 157.11 MPa. Naprezanja koja se javljaju prilikom ponovne uspostave oduzimanja su za slučaj simulacije obustave od 175 i 325 sekundi veća od naprezanja koja se javljaju prilikom njezinog prekida, dok su ona kod obustave od 25 sekundi manja. Razlog tome je što se kolektor za 25 sekundi nije stigao dovoljno ohladiti. Slika 35 detaljnije prikazuje maksimalna naprezanja za sva tri slučaja.



Slika 34 Razlika naprezanja za tri simulacije



Slika 35 Detaljan prikaz razlike u naprezanjima

8. ZAKLJUČAK

Termoelektrane se moraju prilagoditi modernim zahtjevima elektroenergetskog sustava. Efikasnost njihovog pogona više nije glavni kriterij po kojem se ocjenjuju. Zbog sve većeg udjela obnovljivih, intermitentnih izvora energije, termoelektrane moraju biti u stanju prilagoditi svoj rad zahtjevima mreže. Takav pogon od njih zahtjeva brze promijene opterećenja za koje one, pošto su u pravilu projektirane kao bazne elektrane, najčešće nisu namijenjene.

Nagle promjene snage izazivaju značajne poremećaje u pogonu postrojenja. Brza povećanja ili smanjenja temperatura izazivaju temperaturna naprezanja debelostjenih komponenti te tako smanjuju kako njihov životni vijek tako i životni vijek cijelog termoenergetskog bloka. Simulacije provedene u sklopu ovog rada pokazuju da temperaturna naprezanja uslijed naglih promjena opterećenja znatno povećavaju radna naprezanja postrojenja. Tlačna naprezanja u kolektoru za vrijeme normalnog pogona iznose približno 95 MPa, dok tlačna i temperaturna naprezanja za vrijeme poremećaja iznose i preko 167 MPa. Iako ta naprezanja ne premašuju maksimalna dozvoljena za materijal kolektora ona ipak mogu značajno skratiti životni vijek postrojenja ako su takvi poremećaji učestali.

Kombinacija koordiniranog vođenja i djelovanja na turbinska oduzimanja mogu značajno povećati fleksibilnost termoenergetskog postrojenja te ga tako učiniti konkurentnim u modernim elektroenergetskim sustavima. Ako se uz navedene mjere primjeni i kondenzat stop, mogu se izbjeći negativni utjecaji na životni vijek. Povećanje njegove fleksibilnosti ima i izrazito pozitivan utjecaj na ekonomsku isplativost pošto ono postaje dostupnije te se može prilagođavati cijenama električne energije na tržištu.

LITERATURA

- [1] Zakon o tržištu električne energije, 10. prosinca 2004.
- [2] Vargas, P.A.M.: Potentials and Limitations of Flexible Power Plant Operations, Paper PowerGen 2011
- [3] Renewable Energy Council, <http://www.erec.org/statistics/res-share.html>, 11.11.2012.
- [4] CaliforniaISO, Integration of Renewable sources, 2010.
- [5] Euroelectric, Flexible generation: Backing up renewables, 2011
- [6] SPPA-P3000 Process Optimization, Solutions for steam power plants, Siemens AG, 2008.
- [7] Šerman, N. Lončar, D.: Utjecaj tehnološke opreme i strategije vođenja na dinamičke performanse termoenergetskog bloka, Zagreb studeni 2009.
- [8] Vitalis, B. P.: Constant and sliding-pressure options for new supercritical plants, Steam generator design, 2006.
- [9] Flynn, D. Thermal Power Plant Simulation and Control, Power and Energy Series 43, London 2003.
- [10] Simulink, <http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- [11] Šerman, N. Lončar, D.: Thermal Power Plan Operation to the Public Grid, interne prezentacije, FSB

-
- [12] Masteel, <http://www.masteel.co.uk/16mo3.htm?referrer=AZOMDOTCOM>, pristupio 21.11.2012.
- [13] Azom, <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5244>, pristupio 21.11.2012.
- [14] Hesler S., Mitigating the Effects of Flexible Operation on Coal-Fired Power Plants, Electric Power Research Institute, 2011.
- [15] Matlab, <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [16] XSteam, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam-thermodynamic-properties-of-water-and-steam>, pristupio 18.09.2012.
- [17] Šerman, N. Lončar, D.: Provjera projektnog rješenja regulacije razine kondenzata u zagrijačima napojne vode simulacijom na računalu
- [18] Lončar, D. Šerman, N.: Temperaturno naprezanje kao kriterij za ocjenu kvalitete djelovanja regulacijskog sustava, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [19] Kraut B.: Strojarski priručnik, str 375,

PRILOZI

Funkcija kreni.m

Funkcija inicijalizacija.m

Funkcija model.m

Funkcija modelver.m

Funkcija krenikol.m

Funkcija kolektor.m

Funkcija tempstj.m

Funkcija kreni.m

```

clear, clear global
load Tablica;
load TablicaT;
load TablicaHV;
load TablicaHL;
load TablicaCVU;
load TablicaCVV;
global XP YRO YHL YHV YTSAT CU TU CV TV nk dv du L n nseg dL Vmc Tnvs fv fu
Vv Vs Vu mu alfau alfav alfavk rok cs ros pi nstj delta alfakol rokol ckol
tmax Tnkuk Tnvuk yi

inicijalizacija

Tnv0(1:nseg)=[244.1841  245.0633  246.3929  248.5454  252.6319  256.3484
259.7262  262.7944  265.5801  268.1082  270.4016  272.4814  274.3668
276.0757  277.6241  279.0267  280.2978  281.4471  282.4913  283.4308
284.2894  285.0582  285.7565  286.4060  286.9291  287.5585  287.8195
288.5787];
Ts0(1:nseg)=[247.2016  250.5399  254.6643  261.9110  277.9130  279.2666
280.4970  281.6146  282.6292  283.5500  284.3854  285.1429  285.8297
286.4521  287.0161  287.5270  287.9898  288.4089  288.7883  289.1320
289.4428  289.7245  289.9795  290.2090  290.4204  290.6034  290.7846
290.9234];
Tvu0(1:nseg)=[248.9304  253.6775  259.4031  269.5683  269.5683  269.5683
269.5683  269.5683  269.5683  269.5683  269.5683  269.5683  269.5683
269.5683  269.5683  269.5683  269.5683  269.5683  269.5683  269.5683
269.5683  269.5683  269.5683  269.5683  269.5683  269.5683];
Tv0(1:nk)=Tvu0(1:nk);
rop0=40.7086;

tsim=[0:0.1:tmax];

options=optimset('MaxFunEvals',61000, 'MaxIter',1600);
S0=[Tnv0 Ts0 Tv0 rop0];
S1=fsolve(@model,S0,options);

Tnv0(1:nseg)=S1(1:nseg);
Ts0(1:nseg)=S1(nseg+1:2*nseg);
Tv0(1:nk)=S1(2*nseg+1:2*nseg+nk);
rop0=S1(2*nseg+nk+1);

ic=[Tnv0 Ts0 Tv0 rop0]';

[t,y]=ode23(@modelver, tsim, ic);

Tnkuk=y(tmax*10,nseg);

Tnvuk(:,1)=y(:,nseg);

```

Funkcija inicijalizacija.m

```
global XP YRO YHL YHV YTSAT CU TU CV TV nk dv du L n nseg dL Vmc Tnvs fv fu
Vv Vs Vu mu alfau alfav alfavk rok cs ros pi nstj delta alfaKol rokol ckol
tmax Tnkuk Tnvuk yi
```

```
nk=4;
nseg=28;
tmax=500;
dv=0.016;
du=0.011;
L=14;
n=1055;
dL=L/nseg;
Vmc=6.315;
Tnvs=243.7;
fv=dv*3.14*dL;
fu=du*3.14*dL;
Vv=Vmc/L/n*dL;
Vs=(dv^2*3.14/4-du^2*3.14/4)*dL;
Vu=du^2*3.14/4*dL;
mu=500*3.6/2/n;
alfau=35000;
alfav=40000;
alfavk=30000;
rok=860;
cs=532;
ros=7800;
pi=77.05;
nstj=10;
s=0.0323;
delta=s/nstj;
alfaKol=20000;
rokol=7860;
ckol=466;
beta=12.5*10^-6;
pois=0.28;
Dkol=0.25;
pnv=219;
yi(1:3250)=1;
yi(3250:3501)=0;
yi(3501:3511)=0:0.1:1;
yi(3511:5001)=1;
```


Funkcija model.m

```

function out=model(in)

global XP YRO YHL YHV YTSAT CU TU CV TV nk dv du L n nseg dL Vmc Tnvs fv fu
Vv Vs Vu mu alfau alfav alfavk rok cs ros pi nstj delta alfa kol rok ol ckol
tmax Tnkuk Tnvuk yi

Tnv(1:nseg)=in(1:nseg); Ts(1:nseg)=in(nseg+1:2*nseg);
Tv(1:nk)=in(2*nseg+1:2*nseg+nk); rop=in(2*nseg+nk+1);

Tv0=Tv(1)*0.99;
pvp=interp1(YRO,XP,rop);
cvu(1:nseg)=interp1(TU,CU,Tnv(1:nseg));
cvv(1:nk)=interp1(TV,CV,Tv(1:nk));

hsp=interp1(XP,YHV,pvp);
hsv=interp1(XP,YHL,pvp);
Tzas=interp1(XP,YTSAT,pvp);
Tv(nk+1:nseg)=Tzas;

Gnk(1:nk)=0;
Gnk(nk+1:nseg)=alfav.*fv.*(Tv(nk+1:nseg)-Ts(nk+1:nseg))./(hsp-hsv)./1000;
Gnkp=sum(Gnk(1:nseg));
Gk(1:nseg)=Gnkp;

mv=A*rok*sqrt(2*abs((pi-pvp))*10^5/rok);

if pvp>pi; mv=0; end

out(2*nseg+nk+1)=(mv-Gnkp)/(Vmc/n-Vmc/n/nseg^4);
out(1)=(fu.*alfau.*(Ts(1)-Tnv(1))+mu.*cvu(1).*(Tnvs-
Tnv(1)))./(rok*Vu*cvu(1));
out(2:nseg)=(fu.*alfau.*(Ts(2:nseg)-
Tnv(2:nseg))+mu.*cvu(2:nseg).*(Tnv(1:nseg)-
Tnv(2:nseg)))./(rok*Vu*cvu(2:nseg));

out(nseg+1:nseg+nk)=(fv.*alfav.*(Tv(1:nk)-Ts(1:nk))-fu.*alfau.*(Ts(1:nk)-
Tnv(1:nk)))./(ros*Vs*cs);
out(nseg+nk+1:2*nseg)=(fv.*alfavk.*(Tv(nk+1:nseg)-Ts(nk+1:nseg))-
fu.*alfau.*(Ts(nk+1:nseg)-Tnv(nk+1:nseg)))./(ros*Vs*cs);
out(2*nseg+1)=(Gk(1).*cvv(1).*(Tv(2)-Tv0)-fv.*alfav.*(Tv(1)-
Ts(1)))./(rok.*Vv.*cvv(1));
out(2*nseg+2:2*nseg+nk)=(Gk(2:nk).*cvv(2:nk).*(Tv(3:nk+1)-Tv(1:nk-1))-
fv.*alfav.*(Tv(2:nk)-Ts(2:nk)))./(rok*Vv*cvv(2:nk));

out=out(1:2*nseg+nk+1);

```

Funkcija modelver.m

```
function out=modelver(t,in)

global XP YRO YHL YHV YTSAT CU TU CV TV nk dv du L n nseg dL Vmc Tnvs fv fu
Vv Vs Vu mu alfau alfav alfavk rok cs ros pi nstj delta alfa kol rok ol ckol
tmax Tnkuk Tnvuk yi
Tnv(1:nseg)=in(1:nseg); Ts(1:nseg)=in(nseg+1:2*nseg);
Tv(1:nk)=in(2*nseg+1:2*nseg+nk); rop=in(2*nseg+nk+1);
Tv0=Tv(1)*0.99;
pvp=interp1(YRO,XP,rop);
cvu(1:nseg)=interp1(TU,CU,Tnv(1:nseg));
cvv(1:nk)=interp1(TV,CV,Tv(1:nk));
hsp=interp1(XP,YHV,pvp);
hsv=interp1(XP,YHL,pvp);
Tzas=interp1(XP,YTSAT,pvp);
Tv(nk+1:nseg)=Tzas;
Gnk(1:nk)=0;
Gnk(nk+1:nseg)=alfav.*fv.*(Tv(nk+1:nseg)-Ts(nk+1:nseg))./(hsp-hsv)./1000;
Gnkp=sum(Gnk(1:nseg));
Gk(1:nseg)=Gnkp;

y=interp1(0:tmax*10,yi,t*10);

mv=A*rok*sqrt(2*abs((pi-pvp))*10^5/rok)*y;

if pvp>pi
    mv=0;
end

drop=(mv-Gnkp)/(Vmc/n-Vmc/n/nseg*4);

dTnv(1)=(fu.*alfau.*(Ts(1)-Tnv(1))+mu.*cvu(1).*(Tnvs-
Tnv(1)))./(rok*Vu*cvu(1));
dTnv(2:nseg)=(fu.*alfau.*(Ts(2:nseg)-
Tnv(2:nseg))+mu.*cvu(2:nseg).*(Tnv(1:nseg)-
Tnv(2:nseg)))./(rok*Vu*cvu(2:nseg));
dTns(1:nk)=(fv.*alfav.*(Tv(1:nk)-Ts(1:nk))-fu.*alfau.*(Ts(1:nk)-
Tnv(1:nk)))./(ros*Vs*cs);
dTns(nk+1:nseg)=(fv.*alfavk.*(Tv(nk+1:nseg)-Ts(nk+1:nseg))-
fu.*alfau.*(Ts(nk+1:nseg)-Tnv(nk+1:nseg)))./(ros*Vs*cs);
dTv(1)=(Gk(1).*cvv(1).*(Tv(2)-Tv0)-fv.*alfav.*(Tv(1)-
Ts(1)))./(rok.*Vv.*cvv(1));
dTv(2:nk)=(Gk(2:nk).*cvv(2:nk).*(Tv(3:nk+1)-Tv(1:nk-1))-
fv.*alfav.*(Tv(2:nk)-Ts(2:nk)))./(rok*Vv*cvv(2:nk));
out=[dTnv(1:nseg) dTns(1:nseg) dTv(1:nk) drop]';
```

Funkcija krenikol.m

```
global XP YRO YHL YHV YTSAT CU TU CV TV nk dv du L n nseg dL Vmc Tnvs fv fu
Vv Vs Vu mu alfau alfav alfavk rok cs ros pi nstj delta alfakol rokol ckol
tmax Tnkuk Tnvuk yi
```

```
Tsk0=[291 291 291 291 291 291 291 291 291 291];
```

```
Tnkuk=y(1,nseg);
U1=fsolve(@Kolektor,Tsk0,options);
```

```
Tsks0(1:nstj)=U1(1:nstj);
ul=Tsks0';
Tnvuk(:,1)=y(:,nseg);
[t,z]=ode45(@tempstj, tsim, ul);
```

```
SigP=Dkol/2/s*pnv*10^5;
```

```
for ii=1:1:tmax*10; Tsr(ii)=sum(z(ii,1:nstj))/nstj;
E(ii)=210000*10^6+(185000*10^6-210000*10^6)/100*(Tsr(ii)-200); end
for ii=1:1:tmax*10
for jj=1:nstj
Sig(ii,jj)=beta.*E(ii)./(1-pois).*abs((Tsr(ii)-z(ii,jj)));
SigU(ii,jj)=Sig(ii,jj)+SigP;
end
end
```

Funkcija kolektor.m

```
function out=Kolektor(in)

global XP YRO YHL YHV YTSAT CU TU CV TV nk dv du L n nseg dL Vmc Tnvs fv fu
Vv Vs Vu mu alfau alfav alfavk rok cs ros pi nstj delta alfaKol rokol ckol
tmax Tnkuk Tnvuk yi

Tsk(1:nstj)=in(1:nstj);

lamkol=45.9+((43.6-45.9)/100)*(Tsk(1)-200);

A=alfakol*delta/(alfakol*delta+2*lamkol);
B=2*lamkol/(alfakol*delta+2*lamkol);

a=lamkol/rokol/ckol;

out(1)=a./delta^2.*(2.*A.*Tnkuk-(3-2*B).*Tsk(1)+Tsk(2));
out(2:nstj-1)=a./delta^2.*(Tsk(1:nstj-2)+Tsk(3:nstj)-2.*Tsk(2:nstj-1));
out(nstj)=a./delta^2.*(Tsk(nstj-1)-Tsk(nstj));

out=out(1:nstj);
```

Funkcija tempstj.m

```
function out=Tempstj(t,in)

global XP YRO YHL YHV YTSAT CU TU CV TV nk dv du L n nseg dL Vmc Tnvs fv fu
Vv Vs Vu mu alfau alfav alfavk rok cs ros pi nstj delta alfakol rokok ckol
tmax Tnkuk Tnvuk yi
Tsk(1:nstj)=in(1:nstj);

lamkol=45.9+((43.6-45.9)/100)*(Tsk(1)-200);

A=alfakol*delta/(alfakol*delta+2*lamkol);
B=2*lamkol/(alfakol*delta+2*lamkol);

a=lamkol/rokol/ckol;

dTsk(1)=a./delta^2.*(2.*A.*interp1(0:tmax*10,Tnvuk,t*10)-(3-
2.*B).*Tsk(1)+Tsk(2));
dTsk(2:nstj-1)=a./delta^2.*(Tsk(1:nstj-2)+Tsk(3:nstj)-2.*Tsk(2:nstj-1));
dTsk(nstj)=a./delta^2.*(Tsk(nstj-1)-Tsk(nstj));

out=dTsk';
```