

# Održivi scenariji pogona fleksibilne termoelektrane

---

Škrapić, Filip

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:007609>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Filip Škrapić**

Zagreb, 2018. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## **DIPLOMSKI RAD**

# **Održivi scenariji pogona fleksibilne termoelektrane**

Mentor:

prof. dr.sc. Dražen Lončar

Student:

Filip Škrapić

Zagreb, 2018. godina

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

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Draženu Lončaru i asistentu, mag. ing. mech. Anti Marušiću na vođenju i potpori.

Filip Škrapić



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<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur. broj:  |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Filip Škrapić** Mat. br.: 0035183050

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Održivi scenariji pogona fleksibilne termoelektrane**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Viable Operating Regimes of Flexible Thermal Power Plant**

Opis zadatka:

Povećanje udjela obnovljivih izvora energije kontinuirano mijenja ulogu konvencionalnih postrojenja koja se u sve većoj mjeri koriste za pokrivanje razlika između potrošnje i proizvodnje iz vjetroelektrana i fotonaponskih sustava. Energetskom tranzicijom nametnuti su složeniji zahtjevi na fleksibilnost pogona termoelektrana na ugljen i plin koji su praćeni značajnim smanjenjem broja sati godišnjeg pogona. Smanjenje proizvodnje međutim ne znači nužno i smanjenje ukupno potrebne instalirane snage konvencionalnih postrojenja koja će i dalje biti neophodna za osiguranje opskrbe u danima s malom proizvodnjom električne energije iz varijabilnih obnovljivih izvora. Uzimajući u obzir ograničenja postojećih rješenja za skladištenje energije te dostignuti stupanj razvoja novih tehnologija procjenjuje se da će i u sljedećem desetljeću konvencionalne elektrane na fosilna goriva i dalje biti jamac ravnoteže elektroenergetskog sustava.

U okviru rada potrebno je:

1. Opisati zahvate kojima se može povećati fleksibilnost pogona termoeenergetskog bloka;
2. Matematički model dinamike promjene snage bloka prilagoditi pogonskim odzivima termoelektrane na ugljen snage 210 MW;
3. Primjenom matematičkog modela simulirati koordinirano vođenje turbinskih ventila, sustava loženja i regenerativnog zagrijavanja u funkciji brze promjene snage bloka;
4. Simulirati pogon bloka u karakterističnim danima – ljetni, zimski, s većim ili manjim udjelom varijabilne proizvodnje iz obnovljivih izvora;
5. Koristeći tržišne podatke procijeniti moguće prihode od pružanja pomoćnih usluga i odrediti minimalnu godišnju razinu prihoda potrebnu za održavanje pogonske raspoloživosti;

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

Zadatak zadan:

16. studenog 2017.


Datum predaje rada:

18. siječnja 2018.

Predviđeni datum obrane:

24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Dražen Lončar

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

**Sadržaj**

|   |     |
|---|-----|
| Sadržaj.....  | I   |
| Popis slika .....   | III |
| Popis tablica .....   | IV  |
| Popis oznaka.....   | V   |
| Sažetak .....   | IX  |
| Summary .....   | X   |
| 1. Uvod.....  | 1   |
| 2. Fleksibilnost elektroenergetskog sustava i termoenergetskog postrojenja.....   | 2   |
| 2.1. Marginalni trošak.....   | 2   |
| 2.2. Upravljanje zagušenjima i ograničavanje obnovljivih izvora energije.....   | 2   |
| 2.3. Fleksibilnost pogona.....  | 2   |
| 2.4. Minimalno opterećenje .....  | 3   |
| 2.5. Vrijeme pokretanja .....   | 3   |
| 2.6. Brzina promjene opterećenja .....  | 3   |
| 2.7. Posljedice fleksibilnog rada na vijek trajanja i troškove termoenergetskog postrojenja.                            | 4   |
| 3. Zahvati za povećanje fleksibilnosti termoenergetskih postrojenja na ugljen – opcije, potencijali i ograničenja ..... | 5   |
| 3.1. Ključni dijelovi postrojenja za retrofit.....  | 5   |
| 3.2. Opcije za sniženje minimalnog opterećenja .....  | 7   |
| 3.3. Opcije za smanjenje vremena pokretanja .....   | 10  |
| 3.4. Opcije povećanja brzine promjene opterećenja.....  | 10  |
| 4. Utjecaj fleksibilnosti na isplativost i emisije termoenergetskog postrojenja .....                                   | 12  |
| 4.1. Utjecaj fleksibilnosti na radne karakteristike .....   | 12  |
| 4.2. Potrebna organizacija tržišta radi poticanja fleksibilnog rada.....  | 15  |
| 5. Opis dinamike bloka.....   | 17  |
| 5.1. Matematički model dinamike bloka .....   | 18  |
| 5.2. Matematički model mlina ugljena .....  | 20  |
| 5.3. Model vođenja bloka .....  | 22  |
| 5.4. Mjerenja u Plominu II.....   | 22  |
| 5.5. Usporedba rezultata mjerenja i simulacije.....   | 24  |
| 6. Primjena modela za prikaz različitih načina vođenja.....   | 27  |
| 6.1. Vođenje s konstantnim tlakom .....   | 27  |

|   |    |
|---|----|
| 6.1.1. Vođenje s konstantnim tlakom i forsiranjem loženja po snazi .....                                    | 27 |
| 6.2. Koordinirano vođenje .....   | 30 |
| 6.2.1. Koordinirano vođenje s različitim uzrocima forsiranja loženja.....                                   | 30 |
| 6.3. Koordinirano vođenje i prekid turbinskog oduzimanja .....  | 33 |
| 6.3.1. Koordinirano vođenje i prekid turbinskog oduzimanja s različitim uzrocima<br>forsiranja loženja..... | 36 |
| 7. Pogon bloka u karakterističnim danima .....  | 39 |
| 7.1. Rad u ljetnom razdoblju .....  | 39 |
| 7.2. Rad u zimskom razdoblju .....  | 43 |
| 8. Tehno-ekonomska analiza osjetljivosti za slučaj Plomina II .....   | 46 |
| Zaključak.....  | 50 |
| Literatura .....  | 51 |
| Prilog .....  | 52 |

## Popis slika

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Prikaz potrebnog vremena pojednostavljenog pokretanja [1].....  | 3  |
| Slika 2. 20 podsustava tipičnog TE bloka [1] .....   | 5  |
| Slika 3. Shematski prikaz generatora pare [1].....   | 6  |
| Slika 4. Utjecaj direktnog i indirektnog loženja na minimalno opterećenje [1] .....  | 7  |
| Slika 5. Isključenje mlinova ugljena iz pogona [1].....  | 8  |
| Slika 6. Usporedba zone loženja [1].....   | 8  |
| Slika 7. Utjecaj punjenja toplinskog spremnika na minimalno opterećenje [1].....   | 9  |
| Slika 8. Ugradnja plinskoturbinskog procesa [1] .....  | 11 |
| Slika 9. Usporedba dopuštenih temperaturnih gradijenata [1].....   | 11 |
| Slika 10. Rad postrojenja s obaveznim radom [1] .....  | 13 |
| Slika 11. Rad postojenja s neobaveznim radom [1] .....   | 14 |
| Slika 12. Rad fleksibilnijeg postrojenja s obaveznim radom [1] .....   | 14 |
| Slika 13. Rad fleksibilnijeg postrojenja s neobaveznim radom [1].....  | 15 |
| Slika 14. Balansiranje snage [1] .....   | 16 |
| Slika 15. Pojednostavljena shema parnoturbinskog procesa Plomina II.....   | 17 |
| Slika 16. Prikaz spajanja matematičkog modela dinamike bloka .....   | 19 |
| Slika 17. Prikaz spajanja matematičkog modela mlina ugljena .....  | 21 |
| Slika 18. Rezultati mjerenih veličina pri promjeni opterećenja Plomin II.....  | 23 |
| Slika 19. Usporedba izmjerenog toplinskog toka i poremećaja kojim se tok želi opisati.....   | 25 |
| Slika 20. Usporedba promjene opterećenja za Plomin II i simulaciju .....   | 26 |
| Slika 21. Promjena opterećenja bloka pri konstantnom tlaku .....   | 28 |
| Slika 22. Usporedba promjene opterećenja bloka pri konstantnom tlaku s i bez forsiranja<br>loženja.....  | 29 |
| Slika 23. Promjena opterećenja bloka pri koordiniranom vođenju .....   | 31 |
| Slika 24. Usporedba promjene opterećenja bloka koordiniranog vođenja s različitim<br>uzrocima forsiranja loženja.....                            | 32 |
| Slika 25. Usporedba promjene opterećenja pri samostalnom koordiniranom vođenju i<br>koordiniranom vođenju s prekidom turbinskog oduzimanja ..... | 34 |
| Slika 26. Utjecaj ponovnog otvaranje ventila turbinskog oduzimanja.....  | 35 |
| Slika 27. Utjecaj forsiranja loženja na promjenu promatranih veličina pri koordiniranom<br>vođenju i prekidom turbinskog oduzimanja .....        | 37 |
| Slika 28. Utjecaj ponovnog otvaranje ventila turbinskog oduzimanja na promjenu<br>promatranih veličina .....                                     | 38 |
| Slika 29. Promjena opterećenja prvog slučaja u ljetnom razdoblju .....   | 40 |
| Slika 30. Promjena opterećenja prvog slučaja u ljetnom razdoblju s razdobljem stabilizacije  | 41 |
| Slika 31. Promjena opterećenja drugog slučaja u ljetnom razdoblju .....  | 42 |
| Slika 32. Promjena opterećenja u trećem slučaju u ljetnom razdoblju .....  | 44 |
| Slika 33. Promjena opterećenja u zimskom razdoblju .....   | 45 |
| Slika 34. Isplativost pružanja usluge sekundarne regulacije ovisno o cijeni goriva, otkupnoj<br>cijeni električne energije i nadoknadi .....     | 48 |
| Slika 35. Isplativost pružanja usluge tercijarne regulacije ovisno o cijeni goriva, otkupnoj<br>cijeni električne energije i nadoknadi .....     | 49 |



**Popis tablica**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Usporedba dva termoenergetska postrojenja [1] .....                         | 13 |
| Tabela 2. Oznaka i vrijednost prijenosnih funkcija.....                               | 19 |
| Tabela 3. Potrošnja ugljena .....   | 46 |
| Tabela 4. Prihod od proizvedene električne energije .....                             | 46 |
| Tabela 5. Trošak proizvodnje.....   | 46 |
| Tabela 6. Dobit jednog sata pogona .....  | 47 |
| Tabela 7. Potrebna naknada za isplativost pružanja usluge sekundarne regulacije ..... | 47 |
| Tabela 8. Potrebna naknada za isplativost pružanja usluge tercijarne regulacije ..... | 48 |

**Popis oznaka**

| <b>Oznaka</b> | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>  |
|---------------|-----------------|--|
| $B$           | $MW$            | Toplinski tok goriva predan generatoru pare  |
| $D_{dod}$     | $MW$            | Toplina napojne vode na ulazu u generator pare   |
| $D_p$         | $kg/s$          | Proizvedeni maseni tok vodene pare   |
| $D_t$         | $kg/s$          | Maseni protok pare prema turbini   |
| $\eta$        | %               | Termalna iskoristivost   |
| $H_d$         | $MJ/kg$         | Donja ogrjevna vrijednost ugljena  |
| $p$           | $bar$           | Tlak u kolektoru generatora pare   |
| $K_S$         | —               | Konstanta pojačanja u modelu promjene tlaka svježe pare  |
| $Y_v$         | —               | Otvorenost turbinskog ventila  |
| $T_s$         | $s$             | Vremenska konstanta u modelu promjene tlaka svježe pare  |
| $P$           | $MW$            | Opterećenje bloka  |
| $m$           | —               | Dio energije koju vodena para predaje turbini  |
| $K_{hp}$      | —               | Udio visokotlačnog dijela u snazi turbine  |
| $K_{mp}$      | —               | Udio srednjtlačnog dijela u snazi turbine  |
| $K_{lp}$      | —               | Udio niskotlačnog dijela u snazi turbine   |
| $x$           | —               | Omjer masenog toka pare koja prolazi kroz prvi VTZ i masenog toka pare prije prvog turbinskog oduzimanja     |
| $y_1$         | —               | Omjer masenog toka pare koja prolazi kroz drugi VTZ i masenog toka pare prije drugog turbinskog oduzimanja   |
| $y_2$         | —               | Omjer masenog toka pare koja prolazi kroz treći VTZ i masenog toka pare prije trećeg turbinskog oduzimanja   |
| $y_3$         | —               | Omjer masenog toka pare koja prolazi kroz prvi NTZ i masenog toka pare prije četvrtog turbinskog oduzimanja  |
| $z_1$         | —               | Omjer masenog toka pare koja prolazi kroz drugi NTZ i masenog toka pare prije petog turbinskog oduzimanja    |
| $z_2$         | —               | Omjer masenog toka pare koja prolazi kroz treći NTZ i masenog toka pare prije šestog turbinskog oduzimanja   |
| $z_3$         | —               | Omjer masenog toka pare koja prolazi kroz četvrti NTZ i masenog toka pare prije sedmog turbinskog oduzimanja |

|              |         |  |
|--------------|---------|--|
| $e_1$        | —       | Udio snage srednjetačnog dijela turbine između ulaza i drugog turbinskog oduzimanja    |
| $e_2$        | —       | Udio snage srednjetačnog dijela turbine između drugog i trećeg turbinskog oduzimanja   |
| $e_3$        | —       | Udio snage srednjetačnog dijela turbine između trećeg i četvrtog turbinskog oduzimanja |
| $e_4$        | —       | Udio snage niskotlačnog dijela turbine između ulaza i petog turbinskog oduzimanja      |
| $e_5$        | —       | Udio snage srednjetačnog dijela turbine između ulaza i šestog turbinskog oduzimanja    |
| $e_6$        | —       | Udio snage srednjetačnog dijela turbine između petog i sedmog turbinskog oduzimanja    |
| $e_7$        | —       | Udio snage srednjetačnog dijela turbine između šestog i sedmog turbinskog oduzimanja   |
| $h_{ST,u}$   | $KJ/kg$ | Specifična entalpija vodene pare na ulazu u ST dio turbine                             |
| $h_{ST,i}$   | $KJ/kg$ | Specifična entalpija vodene pare na izlazu iz ST dijela turbine                        |
| $h_{ST,o,1}$ | $KJ/kg$ | Specifična entalpija vodene pare drugog oduzimanja                                     |
| $h_{ST,o,2}$ | $KJ/kg$ | Specifična entalpija vodene pare trećeg oduzimanja                                     |
| $h_{NT,u}$   | $KJ/kg$ | Specifična entalpija vodene pare na ulazu u NT dio turbine                             |
| $h_{NT,i}$   | $KJ/kg$ | Specifična entalpija vodene pare na izlazu iz NT dijela turbine                        |
| $h_{NT,o,1}$ | $KJ/kg$ | Specifična entalpija vodene pare petog oduzimanja                                      |
| $h_{NT,o,2}$ | $KJ/kg$ | Specifična entalpija vodene pare šestog oduzimanja                                     |
| $h_{NT,o,3}$ | $KJ/kg$ | Specifična entalpija vodene pare sedmog oduzimanja                                     |
| $n$          | —       | Dio energije koju vodena para predaje napojnoj vodi                                    |
| $K_{vtz1}$   | —       | Omjer dobivene i uložene topline u prvom VTZ   |
| $K_{vtz2}$   | —       | Omjer dobivene i uložene topline u drugom VTZ  |
| $K_{vtz3}$   | —       | Omjer dobivene i uložene topline u trećem VTZ  |
| $K_{ntz1}$   | —       | Omjer dobivene i uložene topline u prvom NTZ   |
| $K_{ntz2}$   | —       | Omjer dobivene i uložene topline u drugom NTZ  |

|                   |               |  |
|-------------------|---------------|--|
| $K_{ntz3}$        | –             | Omjer dobivene i uložene topline u trećem NTZ                                      |
| $K_{ntz4}$        | –             | Omjer dobivene i uložene topline u četvrtom NTZ                                    |
| $M_c$             | $kg$          | Masa neprerađenog ugljena na stolu mlina   |
| $M_{pc}$          | $kg$          | Masa usitnjenog ugljena na stolu mlina   |
| $M_{pczrak}$      | $kg$          | Masa usitnjenog ugljena u struji primarnog zraka unutar mlina                      |
| $\dot{m}_u$       | $kg/s$        | Maseni tok neprerađenog ugljena na ulazu u mlin                                    |
| $\dot{m}_{pov}$   | $kg/s$        | Maseni tok vraćenog ugljena na stol iz struje zraka                                |
| $\dot{m}_{pc}$    | $kg/s$        | Maseni tok usitnjenog ugljena  |
| $\dot{m}_i$       | $kg/s$        | Maseni tok usitnjenog ugljena na izlazu iz mlina                                   |
| $\dot{m}_{zrak}$  | $kg/s$        | Maseni tok struje primarnog zraka kroz mlin  |
| $k_1$             | $s^{-1}$      | Koeficijent brzine mljevenja ovisno o masi neprerađenog ugljena                    |
| $k_2$             | $kg^{-1}$     | Koeficijent potrebne energije usitnjavanja ovisno o masi usitnjenog ugljena        |
| $k_3$             | $kg^{-1}$     | Koeficijent potrebne energije usitnjavanja ovisno o masi neprerađenog ugljena      |
| $k_4$             | $s^{-1}$      | Koeficijent masenog toka usitnjenog ugljena na izlazu iz mlina                     |
| $k_5$             | $kg^{-1}$     | Koeficijent masenog toka usitnjenog ugljena na stolu                               |
| $k_6$             | $rad/s$       | Koeficijent brzine vrtnje odvajača čestica   |
| $k_7$             | –             | Faktor pada tlaka struje primarnog zraka   |
| $k_8$             | $kg^{-1}$     | Koeficijent pada tlaka ovisno o masi usitnjenog ugljena u zraku                    |
| $k_9$             | $s^{-1}$      | Koeficijent masenog toka vraćenog ugljena ovisno o masi usitnjenog ugljena u zraku |
| $k_{10}$          | $W$           | Koeficijent utjecaja energije usitnjavanja na izlaznu temperaturu zraka            |
| $k_{11}$          | $^{\circ}C/J$ | Koeficijent akumulacije mlina  |
| $w$               | $rad/s$       | Brzina vrtnje odvajača čestica   |
| $\Delta p_{mlin}$ | $mbar$        | Pad tlaka primarnog zraka u mlinu  |

|                     |                         |   |
|---------------------|-------------------------|---|
| $\Delta p_{pa}$     | <i>mbar</i>             | Razlika tlaka primarnog zraka u mlinu i tlaka zraka usisanog na ventilatoru |
| $E$                 | %                       | Snaga utrošena na usitnjavanje ugljena                                      |
| $E_0$               | %                       | Snaga utrošena na pogon praznog mlina                                       |
| $c$                 | —                       | Udio ugljika u ugljenu  |
| $h$                 | —                       | Udio vodika u ugljenu   |
| $s$                 | —                       | Udio sumpora u ugljenu  |
| $o$                 | —                       | Udio kisika u ugljenu   |
| $\rho_{zrak}$       | <i>kg/m<sup>3</sup></i> | Gustoća zraka na ulazu u mlin   |
| $\rho_{ugljen}$     | <i>kg/m<sup>3</sup></i> | Gustoća ugljena na ulazu u mlin   |
| $\lambda$           | —                       | Pretičak zraka na ulazu u mlin  |
| $V_{košare}$        | <i>m<sup>3</sup></i>    | Volumen košare koja prevozi ugljen  |
| $n_d$               | <i>s<sup>-1</sup></i>   | Broj okretaja vrtnje dodavača ugljena                                       |
| $\vartheta_i$       | <i>°C</i>               | Temperatura struje zraka na izlazu iz mlina                                 |
| $c_{zrak}$          | <i>kJ/kgK</i>           | Specifični toplinski kapacitet zraka  |
| $\vartheta_{zrak}$  | <i>°C</i>               | Temperatura struje zraka na izlazu iz ekonomajzera                          |
| $\varphi_m$         | %                       | Vlažnost ugljena  |
| $\vartheta_u$       | <i>°C</i>               | Temperatura struje zraka na ulazu u mlin                                    |
| $c_{voda}$          | <i>kJ/kgK</i>           | Specifični toplinski kapacitet vode   |
| $c_{ugljen}$        | <i>kJ/kgK</i>           | Specifični toplinski kapacitet ugljena                                      |
| $\dot{m}_{zrak,hl}$ | <i>kg/s</i>             | Maseni tok hladne struje zraka  |
| $\dot{m}_{zrak,to}$ | <i>kg/s</i>             | Maseni tok tople struje zraka   |
| $\vartheta_{zad}$   | <i>°C</i>               | Zadana temperatura struje zraka na izlazu iz mlina                          |
| $P_{zad}$           | <i>MW</i>               | Zadano opterećenje bloka  |
| $P_1$               | —                       | Faktor forsiranja loženja po snazi  |
| $P_2$               | —                       | Faktor forsiranja loženja po tlaku  |

## Sažetak

Kako bismo zadovoljili današnje energetske potrebe i potrebe očuvanja okoliša, čovječanstvo zadnjih nekoliko desetljeća aktivnije koristi alternative izvore energije kao što su Sunce i vjetar za proizvodnju električne energije. Ovakvi izvori energije zahtijevaju preustroj tržišta električne energije zbog svoje varijabilne proizvodnje. Preustroj tržišta nametnuo je nove zahtjeve na dinamičnije ponašanje njegovih sudionika. U ovom radu dan je pregled zahvata kojima se mogu zadovoljiti ti zahtjevi. S ciljem detaljnije analize spomenutih zahvata napravljen je i matematički model pogona bloka snage 210 MW koji uključuje i matematički model mlina ugljena te model vođenja. Ponašanje postrojenja pri različitim strategijama vođenja bloka ispitano je nizom računalnih simulacija, što je omogućilo njihovu usporedbu i izbor najboljeg rješenja. Temeljem dobivenih rezultata analizirana je mogućnost sudjelovanja na tržištu pomoćnih usluga.

Ključne riječi: fleksibilnost, vođenje, termoelektrana, model, isplativost

## Summary

To meet today's energy needs and the need for environmental conservation, for the last few decades humanity has used more alternative energy sources such as Sun and wind for electricity production. Such energy sources require a reconstruction of the electricity market due to its variable production. Market reshuffle imposed new demands on the more dynamic behavior of its participants. This paper gives an overview of the interventions that can meet these requirements. With a purpose of a more detailed analysis of the mentioned interventions, a mathematical model of powerplants load behavior based on a 210 MW powerplant was developed, including a mathematical model of coal mills and a model of control. Powerplant behavior in different blocks management strategies was tested in a series of computer simulations, which enabled mutual comparison and selection of the best solution. Based on the obtained results, the possibility of participating in the auxiliary services market was analyzed.

Key words: flexibility, control, thermal powerplant, model, cost-effectiveness

## 1. Uvod

Kako bi se ograničile i umanjile posljedice klimatskih promjena uzrokovane emisijama stakleničkih plinova, a ujedno i povećala energetska neovisnost, većina država je u svoje kratkoročne i dugoročne planove razvoja uvela mjere koje potiču razvoj i iskorištavanje obnovljivih izvora energije. Najzastupljeniji i najrazvijeniji oblici obnovljivih izvora električne energije koriste energiju vjetara i Sunca, a to su vjetroelektrane i fotonaponski sustavi. Problem kod ovakvih izvora energije je zavisnost o vremenskim uvjetima što utječe na karakteristike elektroenergetskih sustava i tržišta. Za uvođenje većeg udjela obnovljivih izvora energije u sustav, potrebno je povećati fleksibilnost sveukupnog sustava, kako na strani proizvodnje, tako i na strani potrošnje.

Ovakvom energetsom tranzicijom konvencionalnim termoenergetskim postrojenjima nametnuti su složeniji zahtjevi kako na emisije tako i na fleksibilnost pogona što je popraćeno smanjenjem broja sati godišnjeg pogona. Kako bi se osigurala sigurnost opskrbe u periodima nedovoljne proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije koriste se postojeće termoelektrane na ugljen i plin. Zbog ovakve organizacije fleksibilnost pogona postala je jedna od najbitnijih značajki termoenergetskih postrojenja. Fleksibilnost pogona pojedine elektrane definira se kroz tri značajke, a to su radni raspon (od minimalne snage do nominalne snage), brzine promjene izlazne snage i vrijeme potrebno za pokretanje postrojenja.

Povijesno gledano, konvencionalna termoenergetska postrojenja su građena da slijede relativno predvidljivi uzorak potrošnje električne energije. Ovakav način vođenja sustava davao je prednost gradnji krutih, nefleksibilnih termoenergetskih postrojenja pogonjenih ugljenom, mazutom, uljem ili plinom koje su više od 80% radnog vijeka radile na nominalnom opterećenju. U današnje vrijeme, prednosti dane ovakvim termoenergetskim postrojenjima postale su veća prepreka razvoju i primjeni obnovljivih izvora energije, osobito u zemljama s velikim udjelom električne energije dobivene iz ugljena.

Retrofitom postojećih konvencionalnih termoenergetskih postrojenja može se značajno pridonijeti fleksibilnosti sustava, ali se isplativost mora računati za svako termoenergetsko postrojenje zasebno. Osim toga, uvođenjem tržišnih poticaja dodatno se potiče pružanje usluge fleksibilne proizvodnje, odnosno, rezerve snage čime se omogućava jednostavnija integracija obnovljivih izvora energije.

Radi većeg udjela promjenjivih obnovljivih izvora energije, konvencionalna termoenergetska postrojenja moraju raditi fleksibilnije, odnosno, češće i brže mijenjati opterećenje i raditi pri djelomičnom opterećenju veći dio radnog vijeka. Uz to, povećanje udjela obnovljivih izvora energije smanjuje isplativost postrojenja zbog takozvanog marginalnog troška (eng. Merit-Order Effect)

Dugoročno gledano, za ostvarenje ciljeva ograničavanja emisija, konvencionalna termoenergetska postrojenja na ugljen morat će biti zamijenjena nekim zelenijim tehnologijama.



## **2. Fleksibilnost elektroenergetskog sustava i termoenergetskog postrojenja**

Postoji nekoliko opcija povećanja fleksibilnosti sustava, a neke od njih su, uz povećanje fleksibilnosti konvencionalnih termoenergetskih postrojenja, poticanje fleksibilne potrošnje, razvoj infrastrukture elektroenergetskog sustava (kako bi se električna energija lakše transportirala i uz manje gubitke između mjesta proizvodnje i mjesta potrošnje) te skladištenje električne energije (npr. reverzibilne hidroelektrane ili baterije).

### **2.1. Marginalni trošak**

Na slobodnom tržištu, cijena električne energije određena je proizvodnjom i potrošnjom. Općenito, veleprodajna tržišta organizirana su aukcijama kao (eng. Pay-as-clear markets). Kako bismo izračunali otkupnu cijenu električne energije, krivulja proizvodnje (eng. Supply Curve) se dobije sortiranjem po varijabilnom trošku pojedinačnih postrojenja, u rastućem nizu. Otkupna cijena se dobije točkom u kojoj krivulja potrošnje presijeca krivulju proizvodnje. Varijabilni trošak zavisi o faktorima kao što su na primjer cijena goriva, cijena emisija stakleničkih plinova i troškova prilika (eng. opportunity costs). Pošto obnovljivi izvori energije poput Sunca i vjetra nemaju varijabilan trošak oni se nalaze na početku krivulje proizvodnje. Ovakvo sortiranje ima dva učinka. Prvo, smanjeno korištenje konvencionalnih termoenergetskih postrojenja i drugo, pad prosječne otkupne cijene jer se skuplji izvori manje koriste.

### **2.2. Upravljanje zagušenjima i ograničavanje obnovljivih izvora energije**

Mjesta proizvodnje električne energije iz vjetra i Sunca nerijetko su udaljena od mjesta potrošnje, stoga se električnu energiju mora transportirati električnom mrežom. Budući da je razvoj i primjena obnovljivih izvora energije napredovao bržim tempom od razvoja mreže moguće su pojave zagušenja u mreži. Kako bi se zagušenja izbjegla, upravitelji prijenosnog sustava moraju primijeniti različite mjere. Neke od tih mjera su promjena mreže, protutrgovanje, premještanje proizvodnje električne energije iz jednog konvencionalnog postrojenja u drugo i ograničavanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije.

U zemljama gdje je zakonom prioritet dan obnovljivim izvorima energije, ograničenje proizvodnje je zadnja mjera upravljanja zagušenjima. U tim zemljama zagušenjem se upravlja fleksibilnom proizvodnjom iz konvencionalnih izvora. U nekim drugim zemljama, prioritet je dan konvencionalnim postrojenjima te se ograničenje proizvodnje uzima kao prva opcija.

### **2.3. Fleksibilnost pogona**

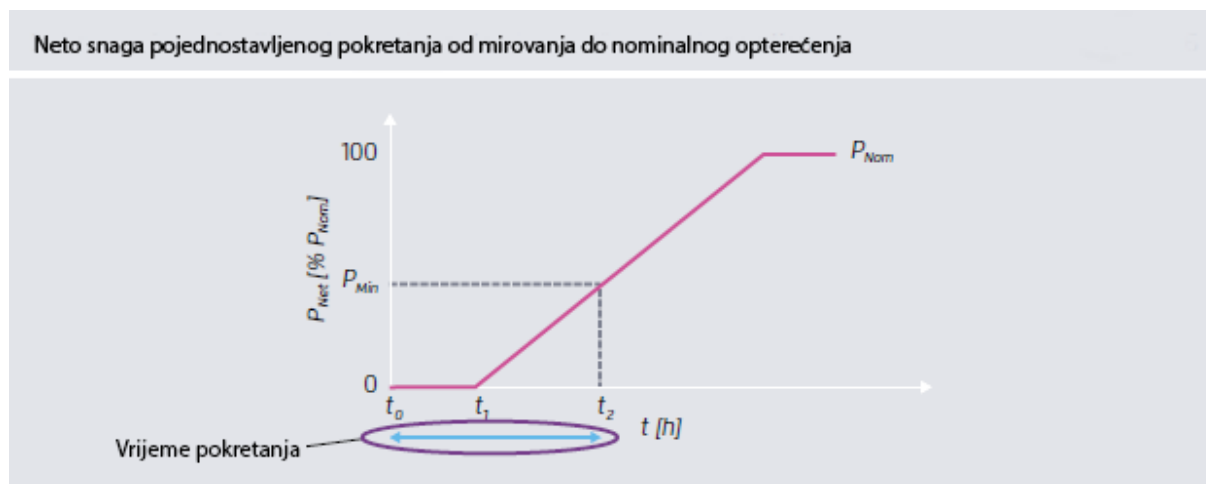
Fleksibilnost termoenergetskog postrojenja zavisi o mogućnosti prilagodbe izlazne snage predane elektroenergetskom sustavu, rasponu djelomičnog opterećenja i potrebnom vremenu pokretanja.

## 2.4. Minimalno opterećenje

Minimalno opterećenje se obično označava postotkom nominalnog opterećenja ( $\%P_{nom}$ ). Smanjenje minimalnog opterećenja povećava raspon djelomičnog opterećenja i u nekim slučajevima izbjegava gašenje i naknadno pokretanje postrojenja. Jedan od nedostataka smanjivanja minimalnog opterećenja je smanjivanje iskoristivosti zbog čega se ispuštaju veće specifične emisije stakleničkih plinova. Minimalno opterećenje je najviše ograničeno održavanjem stabilnog izgaranja goriva.

## 2.5. Vrijeme pokretanja

Vrijeme pokretanja označava potrebno vrijeme za dostizanje minimalnog opterećenja od stanja mirovanja. Osim o vrsti goriva, odnosno tehnologiji, vrijeme pokretanja zavisi i o duljini razdoblja mirovanja i brzini hlađenja. Ovaj je proces prikazan na slici 1. Ovisno o razdoblju mirovanja, vrijeme pokretanja može se podijeliti na vrući start (razdoblje mirovanja manje od 8 sati), topli start (razdoblje mirovanja između 8 i 48 sati) i hladni start (razdoblje mirovanja dulje od 48 sati). Vrijeme pokretanja je ograničeno dopuštenim toplinskim naprezanjem debelostjenih komponenti i stupnju automatizacije postrojenja.



Slika 1. Prikaz potrebnog vremena pojednostavljenog pokretanja [1]

## 2.6. Brzina promjene opterećenja

Brzina promjene opterećenja (eng. Ramp rate) označava koliko brzo je pojedino termoenergetsko postrojenje u stanju promijeniti izlaznu snagu. Obično se iskazuje kao postotak nominalnog opterećenja u minuti ( $\%P_{nom}/min$ ), a može i kao apsolutna snaga (MW/min). Najviše zavisi o vrsti termoenergetskog postrojenja. Veća brzina promjene omogućava brže i češće promjene opterećenja. Brzina promjene je isto tako ograničena dopuštenim toplinskim naprezanjem debelostjenih komponenti, ali i inercijom i akumulacijom mlinova, plamenika, generatora pare i turbine te kvalitetom goriva.

## **2.7. Posljedice fleksibilnog rada na vijek trajanja i troškove termoenergetskog postrojenja**

Fleksibilan pogon značajno utječe na vijek trajanja komponenti termoenergetskog postrojenja. Prekoračenje dopuštenih vrijednosti toplinskih naprezanja skraćuje vijek trajanja debelostjenih komponenti, a isti učinak imaju i brze promjene opterećenja od 50% nominalne snage i hladni startovi.

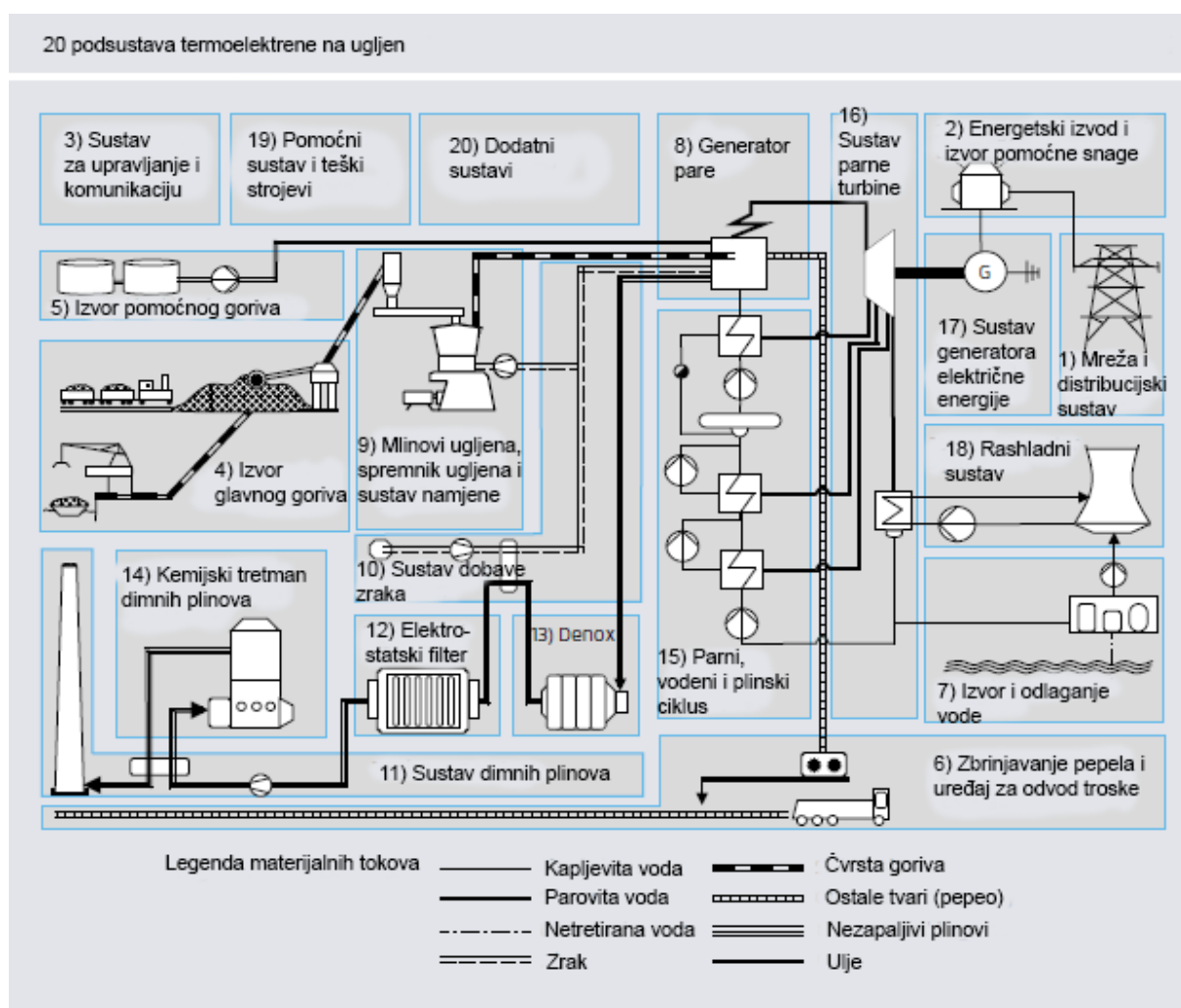
Fleksibilan pogon ne utječe značajno na varijabilne troškove rada i održavanja te otprilike iznosi manje od 5% ukupnog troška rada i održavanja. U usporedbi s ušteđenim gorivom ovi su troškovi relativno niski. Problemi nastaju ako je potrebno zamijeniti neki veći dio što može koštati i preko milijun eura.

### 3. Zahvati za povećanje fleksibilnosti termoenergetskih postrojenja na ugljen – opcije, potencijali i ograničenja

Na području tehnologija termoenergetskih postrojenja, retrofitom se smatra modernizacija ili poboljšanje dijelova ili podsustava termoenergetskog postrojenja. Općenito, retrofit se izvodi planski kao dio većeg remonta koji zahtjeva obustavu rada postrojenja. Retrofiti se izvode u svrhu poboljšanja iskoristivosti, fleksibilnosti ili produljenja vijeka trajanja dijelova postrojenja.

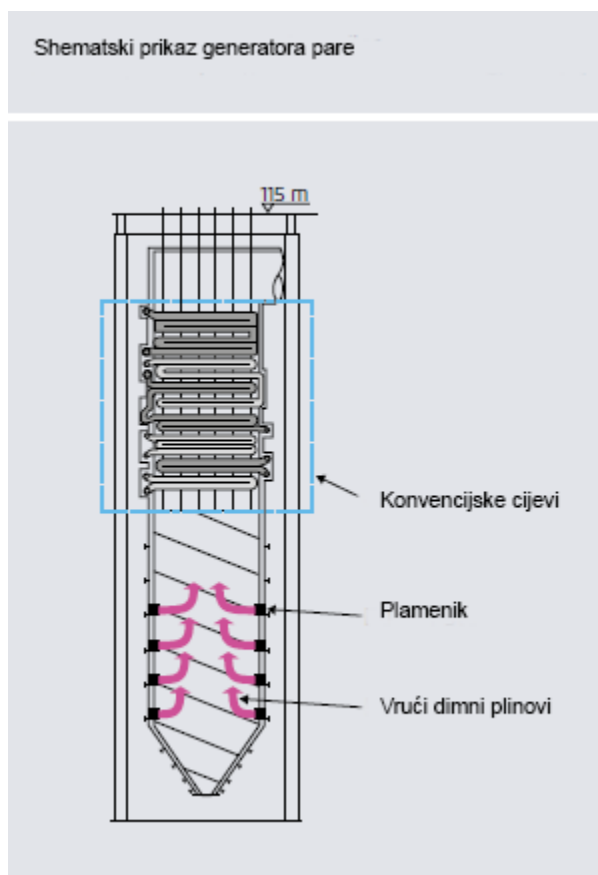
#### 3.1. Ključni dijelovi postrojenja za retrofit

Kako bi se što bolje razumjeli ključni dijelovi postrojenja i njihove funkcije dan je shematski prikaz 20 podsustava jednog tipičnog termoenergetskog postrojenja pogonjenog ugljenom na slici 2. Analize su pokazale da retrofiti na određenim podsustavima značajnije utječu na fleksibilnost. Sustavi koji se mogu izdvojiti kao posebno pogodni za retrofit su:



Slika 2. 20 podsustava tipičnog TE bloka [1]

- a) Upravljački sustav je zadužen za pravilan rad postrojenja i komunikaciju između raznih podsustava postrojenja.
- b) Sustav dovoda goriva za pokretanje loženja ima ključnu ulogu u potrebnom vremenu pokretanja. Pri pokretanju se obično koriste pomoćna goriva poput loživog ulja ili prirodnog plina, a svrha mu je progrijavanje komponenti generatora pare.
- c) Generator pare je zadužen za pretvaranje napojne vode u vodenu paru. U današnje vrijeme se obično koriste protočni generatori pare s jednim prolazom u obliku tornja kakav je prikazan na slici 3.



Slika 3. Shematski prikaz generatora pare [1]

- d) Sustav za pripremu, pohranu i dodjelu goriva se sastoji od mlinova, spremišta ugljena i sustava za transport ugljena. U ovom sustavu ugljen se melje u prah u mlinovima i upuhuje u ložište.
- e) Sustav rekuperacije topline koristi vruću paru iz turbine kako bi zagrijao napojnu vodu prije ulaska u generator pare. Ovo se obično izvodi u izmjenjivačima topline, a svrha je podizanje temperature napojne vode kako bi se povećala termička iskoristivost.

### 3.2. Opcije za sniženje minimalnog opterećenja

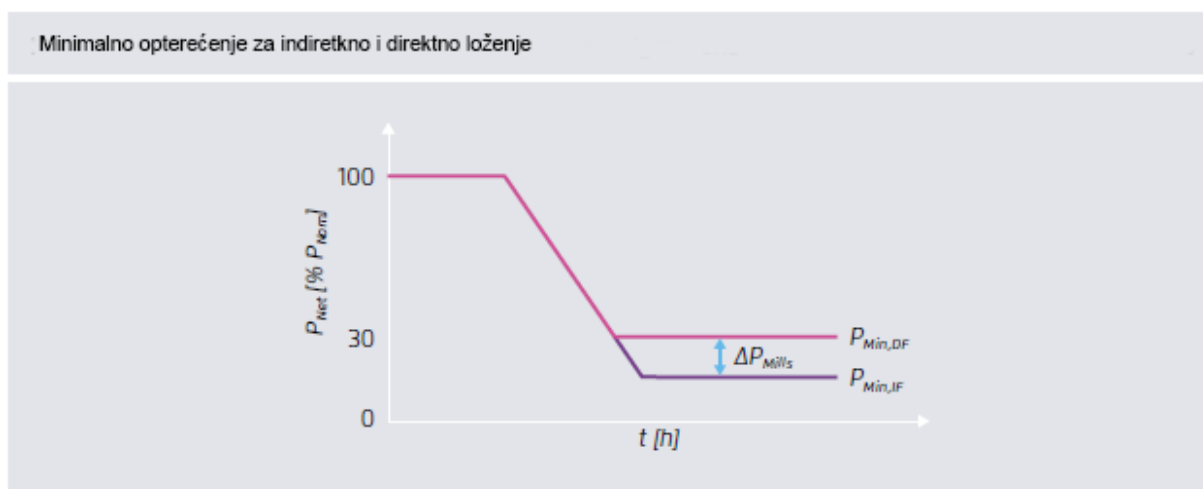
Minimalno opterećenje je određeno s nekoliko tehnoloških ograničenja kao što su stabilnost i kontrola plamena i izgaranja, zapaljenjem neizgorenog ugljena i emisijama stakleničkih plinova.

Nestabilnost plamena se može pojaviti uslijed naglih promjena u dovođenju goriva, promjeni kvalitete goriva, nepravilnom omjeru goriva i zraka te neujednačenim strujanjem ugljene prašine, ali i uslijed nepotpunog izgaranja goriva pri niskim opterećenjima.

Postoji nekoliko opcija prevladavanja spomenutih ograničenja, a to su:

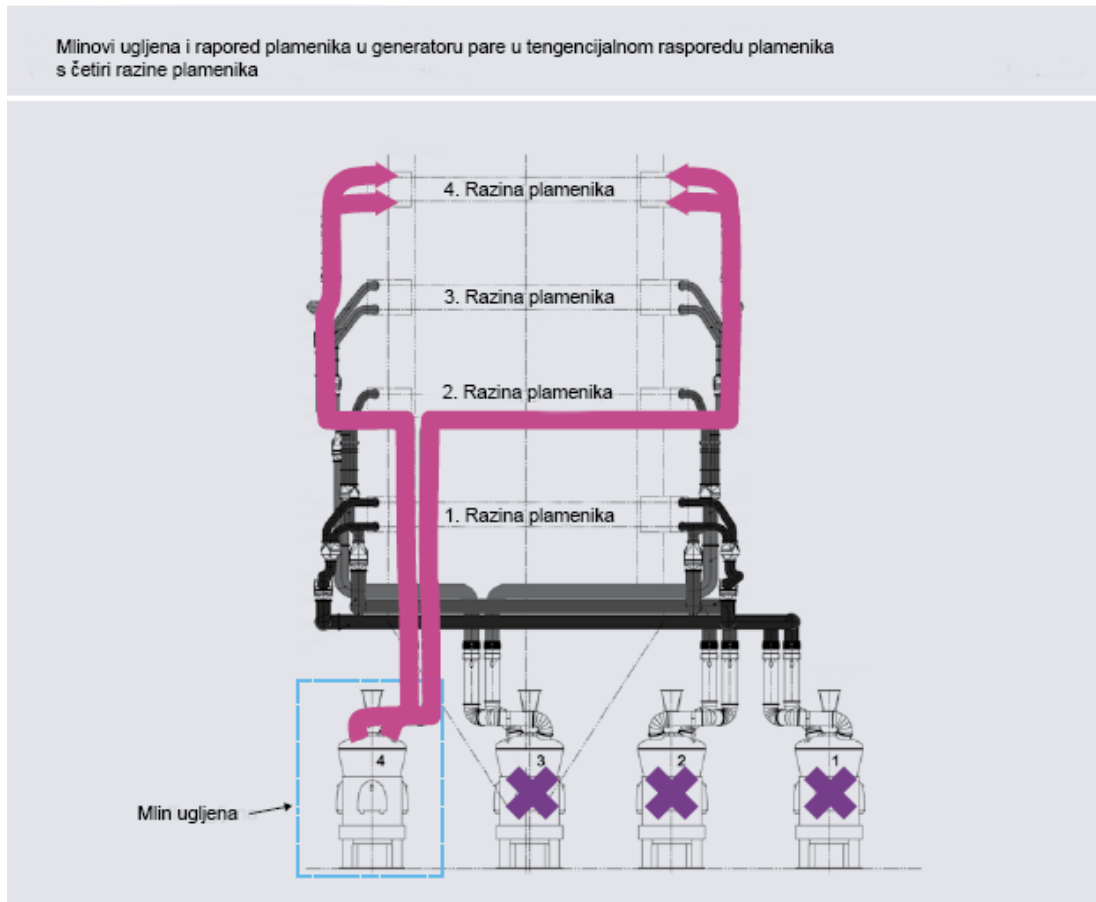
1. Neizravno loženje
2. Isključivanje nepotrebnih mlinova
3. Poboljšanje upravljačkog sustava
4. Pomoćno loženje sušenim lignitom
5. Spremnik topline za grijanje napojne vode

Za neizravno loženje je potrebno ugraditi spremnik ugljene prašine između mlinova i plamenika. Ovime se prekida direktna ovisnost plamenika o mlinovima, tj. dotoku goriva iz mlinova. Ovime se postiže brži odaziv na pojavu nestabilnosti u plamenu i na promjenu opterećenja te smanjenje minimalnog opterećenja jer mlinovi rade na nominalnom opterećenju pri djelomičnim opterećenjima što je prikazano na slici 4.

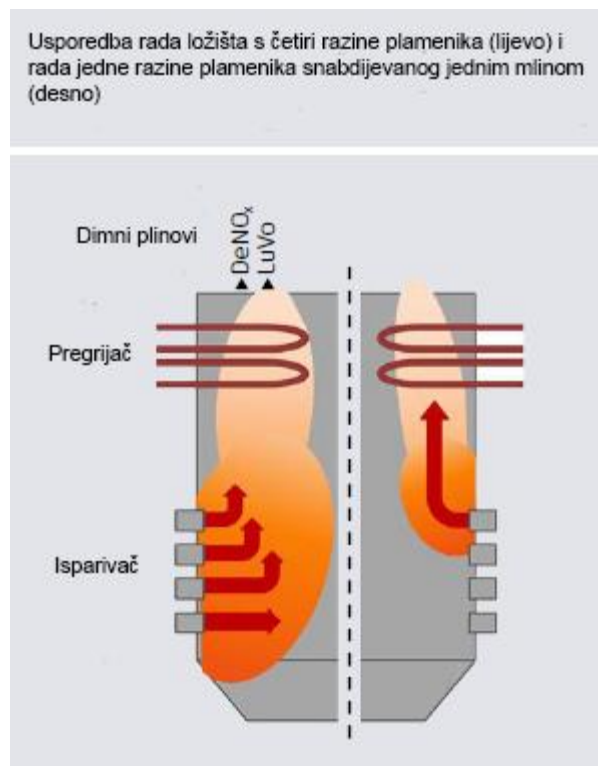


Slika 4. Utjecaj direktnog i indirektnog loženja na minimalno opterećenje [1]

Pri dovoljno niskim opterećenjima nije potreban rad svih mlinova, stoga ih se može izvaditi iz pogona i ostaviti samo jedan da radi na nominalnom opterećenju. Ovime bi se smanjila količina opskrbljivanih plamenika, a time i zona loženja. Ovaj je proces prikazan na slici 5 i slici 6.



Slika 5. Isključenje mlinova ugljena iz pogona [1]

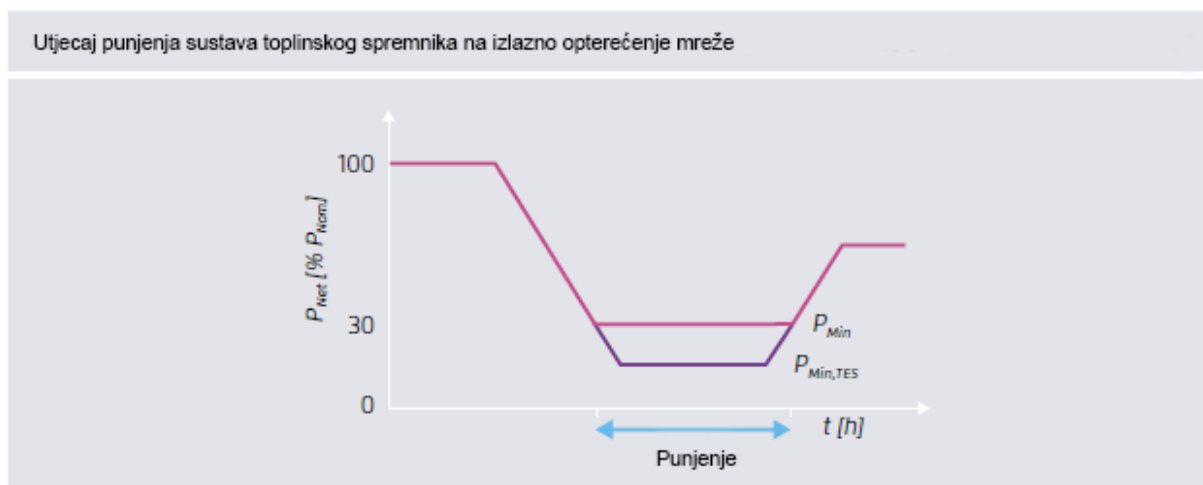


Slika 6. Usporedba zone loženja [1]

Nadogradnja upravljačkog sustava modulima usmjerenim na točnost, pouzdanost i brzinu kontrole omogućava pogon postrojenja bliže dopuštenim vrijednostima naprezanja važnijih dijelova. Poboljšanje upravljačkog sustava se obično izvodi u kombinaciji s drugim (hardverskim) tehnološkim poboljšanjima.

Pomoćnim loženjem se obično poboljšava stabilnost plamena dodavanjem ulja ili plina. Zamjenom skupljih goriva s fino smljevenim i sušenim lignitom postiže se isti učinak uz manju cijenu goriva.

Spremnik topline za grijanje napojne vode smanjuje minimalno opterećenje povećanjem količine pare oduzete iz turbine zbog čega termoenergetsko postrojenje proizvodi manje električne energije. Oduzeta para se koristi za punjenje toplinskog spremnika koje se obično odvija u periodima niskog opterećenja. Ovime se ne utječe na opterećenje generatora pare. Smanjenje minimalnog opterećenja je prikazano na slici 7.



Slika 7. Utjecaj punjenja toplinskog spremnika na minimalno opterećenje [1]

Snižanje minimalnog opterećenja omogućava veći raspon djelomičnog opterećenja i u nekim slučajevima izbjegava gašenje postrojenja. Pogon pri djelomičnom opterećenju uzrokuje veće specifične emisije stakleničkih plinova zbog manje termalne iskoristivosti.

S druge strane, paljenje postrojenja je također popraćeno većim specifičnim emisijama ugljičnog dioksida zbog čega se u nekim slučajevima ispusti manje emisija radom pri minimalnom opterećenju nego gašenjem i ponovnim pokretanjem postrojenja.



### 3.3. Opcije za smanjenje vremena pokretanja

U želji da se poveća iskoristivost, prilikom projektiranja tradicionalnih baznih postrojenja primjenjivale su se komponente s debljim stijenkaama kako bi se povećao radni tlak i temperatura što negativno utječe na fleksibilnost.

Postoji nekoliko opcija prevladavanja spomenutih ograničenja, a to su:

1. Ugradnja plinskoturbinskog procesa
2. Optimiranje upravljačkog sustava
3. Primjena tanjih stijenki
4. Novi start turbine

Ugradnja plinskoturbinskog procesa zahtjeva postavljanje plinske turbine i iskorištavanje topline vrućih dimnih plinova za grijanje napojne vode vodenoparnog ciklusa. Ovime se postiže znatno brži početak proizvodnje električne energije, ali i smanjenje količine oduzete pare iz turbine zbog čega se povećava nominalno opterećenje. Shema ovakvog postrojenja prikazana je na slici 8.

Optimiranje upravljačkog sustava uključuje optimiranje parametara kao što su uštede goriva i toplinsko naprezanje u cilju bržeg pokretanja.

Primjena tanjih stijenki za dijelove postrojenja omogućava brže progrijavanje tj. manja toplinska naprezanja, ali smanjuje iskoristivost jer postrojenje radi pri nižem radnom tlaku i temperaturi.

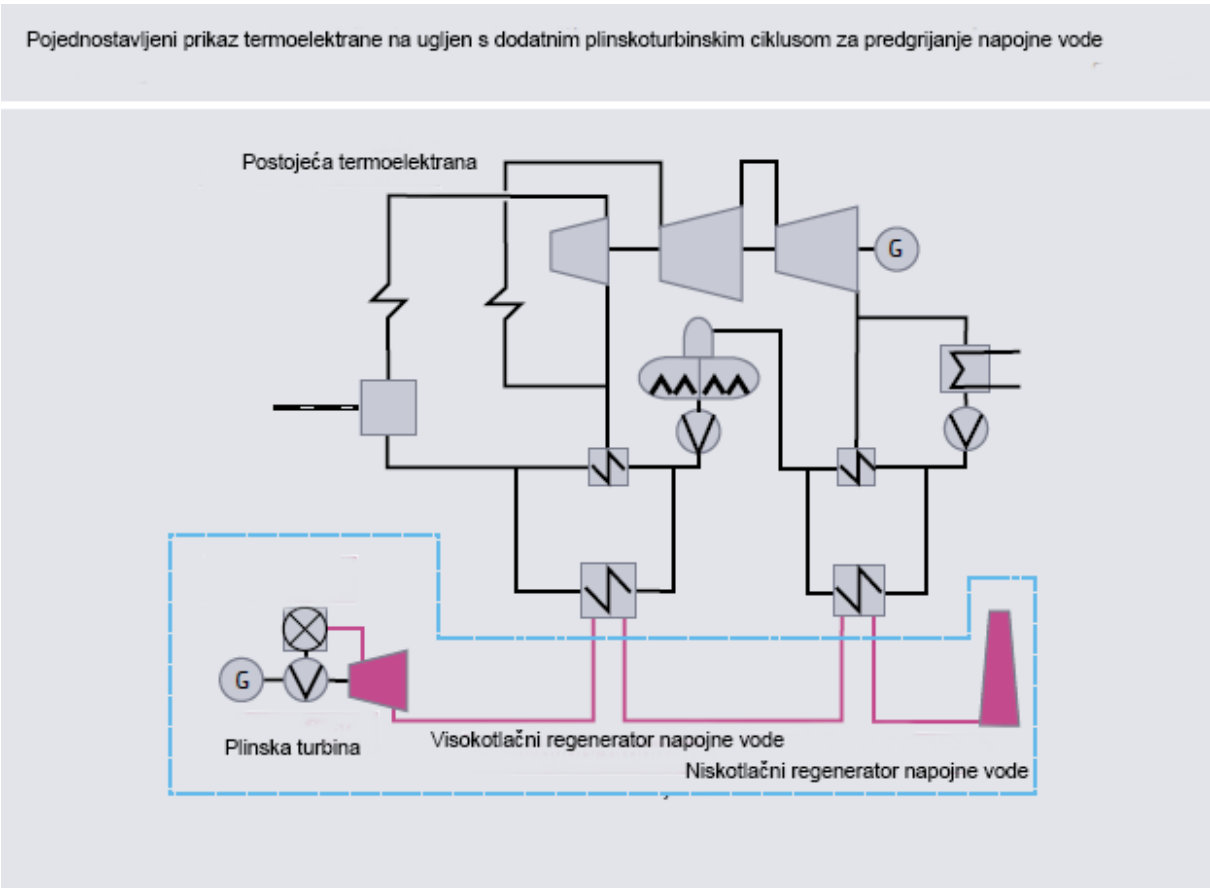
Novi start turbine uključuje hlađenje turbine puštanjem vodene pare niže temperature kroz nju kako bi se brže ohladila i kako bi nakon toga bila spremna za ponovno pokretanje.

### 3.4. Opcije povećanja brzine promjene opterećenja

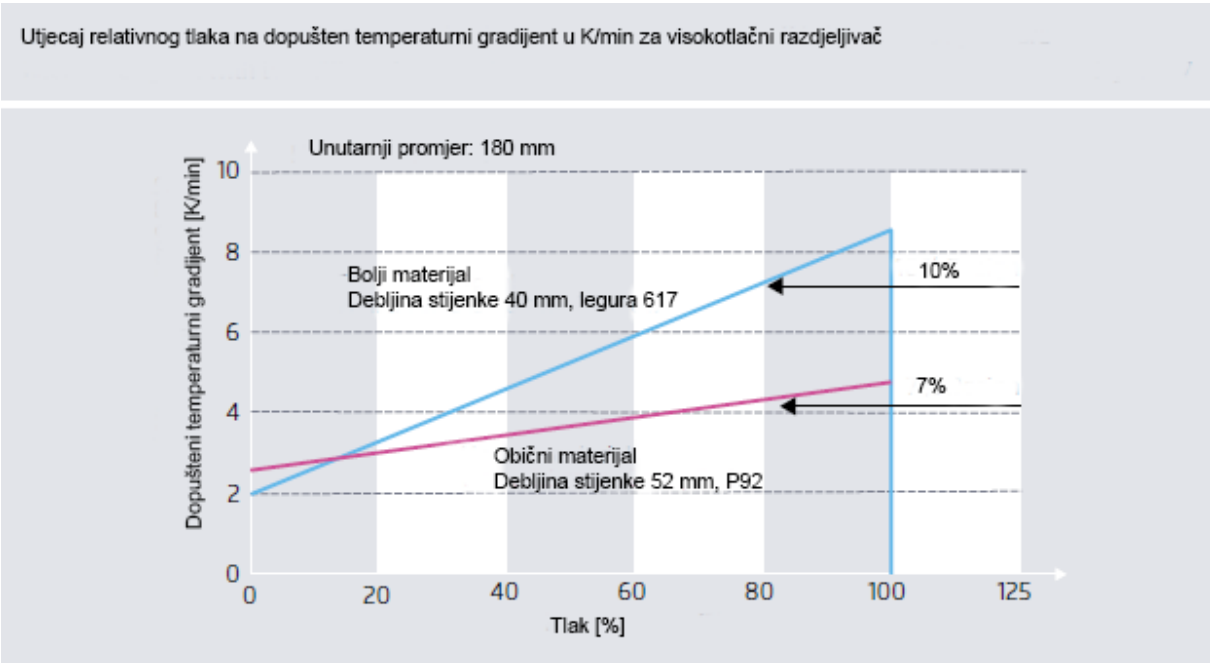
Postoji nekoliko opcija povećavanja brzine promjene opterećenja, neke od njih su već prije opisane tako da će ih se samo navesti.

1. Ugradnja plinskoturbinskog procesa
2. Poboljšanje upravljačkog sustava
3. Primjena kvalitetnijih materijala
4. Pomoćno loženje sa sušenim lignitom

Primjena kvalitetnijih materijala omogućava korištenje tanjih stijenki uz zadržavanje istog radnog tlaka i temperature. Primjenom tanjih stijenki povećava se dopuštena vrijednost brzine promjene temperature stijenke. Na dijagramu na slici 9 prikazana je usporedba između feritnog čelika (P92) i legure na bazi nikla (Alloy 617).



Slika 8. Ugradnja plinskoturbinskog procesa [1]



Slika 9. Usporedba dopuštenih temperaturnih gradijenata [1]

## **4. Utjecaj fleksibilnosti na isplativost i emisije termoenergetskog postrojenja**

### **4.1. Utjecaj fleksibilnosti na radne karakteristike**

Tržište električne energije se općenito sastoji od dugoročnog tržišta (eng. long-term market), dan unaprijed tržišta (eng. day-ahead market) i dnevnog tržišta (eng. intraday market). Ovi dijelovi tržišta električne energije dopunjeni su tržištem i dogovorima pomoćnih usluga. Sudionici na takvim tržištima u mogućnosti su zaraditi dodatne prihode na tim tržištima. Tržišta dan unaprijed trenutno posjeduju najveći udio na tržištu električne energije i najviše utječu na pogon i prihode termoenergetskih postrojenja.

Većina tržišta dan unaprijed zasnovana je na marginalnom trošku, a pošto obnovljivi izvori energije imaju mali marginalni trošak ili ga uopće nemaju, povećanje udjela obnovljivih izvora energije sve će češće dovesti do perioda niskih ili negativnih cijena na veleprodajnom tržištu. Zbog toga se konvencionalna termoenergetska postrojenja potiču na izbjegavanje rada u tim periodima kako bi se ograničili gubici.

U slučaju da postrojenje mora raditi, veća fleksibilnost ima ekonomsku vrijednost operateru. Kako je već prije navedeno, gašenje i paljenje postrojenja bi u nekim slučajevima bila skuplja opcija nego pogon pri minimalnom opterećenju.

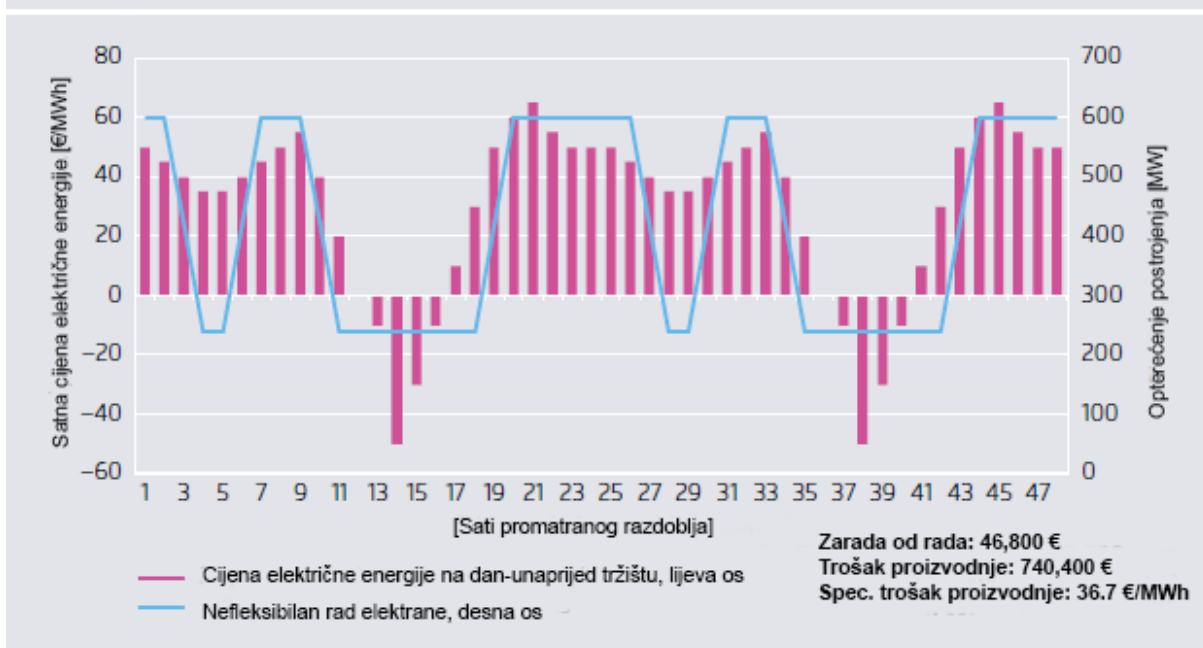
Kako bi se pokazao utjecaj fleksibilnosti na prihode, na tablici 1 dan je primjer dva ista termoenergetska postrojenja različitih fleksibilnosti. Rad nefleksibilnog postrojenja u slučaju obaveznog rada prikazan je na slici 10 iz čega je vidljivo da zbog ograničene fleksibilnosti, postrojenje mora raditi i kada je cijena premala za isplativ rad. Rad nefleksibilnog postrojenja u slučaju neobaveznog rada prikazan je na slici 11 iz čega je vidljivo gašenje i naknadno paljenje postrojenja kako bi se izbjegao period negativnih cijena, ali se time stvaraju dodatni novčani gubici. Rad fleksibilnijeg postrojenja u slučaju obaveznog rada prikazan je na slici 12 iz čega je vidljivo da snižavanje minimalnog opterećenja i povećanje brzine promjene opterećenja ograničava gubitke jer je izbjegnuta potreba za gašenjem i paljenjem postrojenja. Rad fleksibilnijeg postrojenja u slučaju neobaveznog rada prikazan je na slici 13 iz čega je vidljivo da postrojenje s ovakvim načinom rada ostvaruje najveće dobitke jer najbolje prati različite dnevne cijene električne energije. Iz ovog primjera se mogu izvući sljedeći zaključci. Prvo, sniženje minimalnog opterećenja najviše utječe na isplativost i drugo, isplativost specifičnih retrofita mora se računati za svako postrojenje zasebno jer se u obzir moraju uzeti i starost postrojenja, udio obnovljivih izvora energije, tržište električnom energijom i opcije naknade.

Ovim primjerom je pokazano da odluka o fleksibilnom načinu rada najviše ovisi o ostvarenim prihodima, a kako bi se omogućilo iskorištavanje ovakvog načina rada, tržište je potrebno organizirati na odgovarajući način.

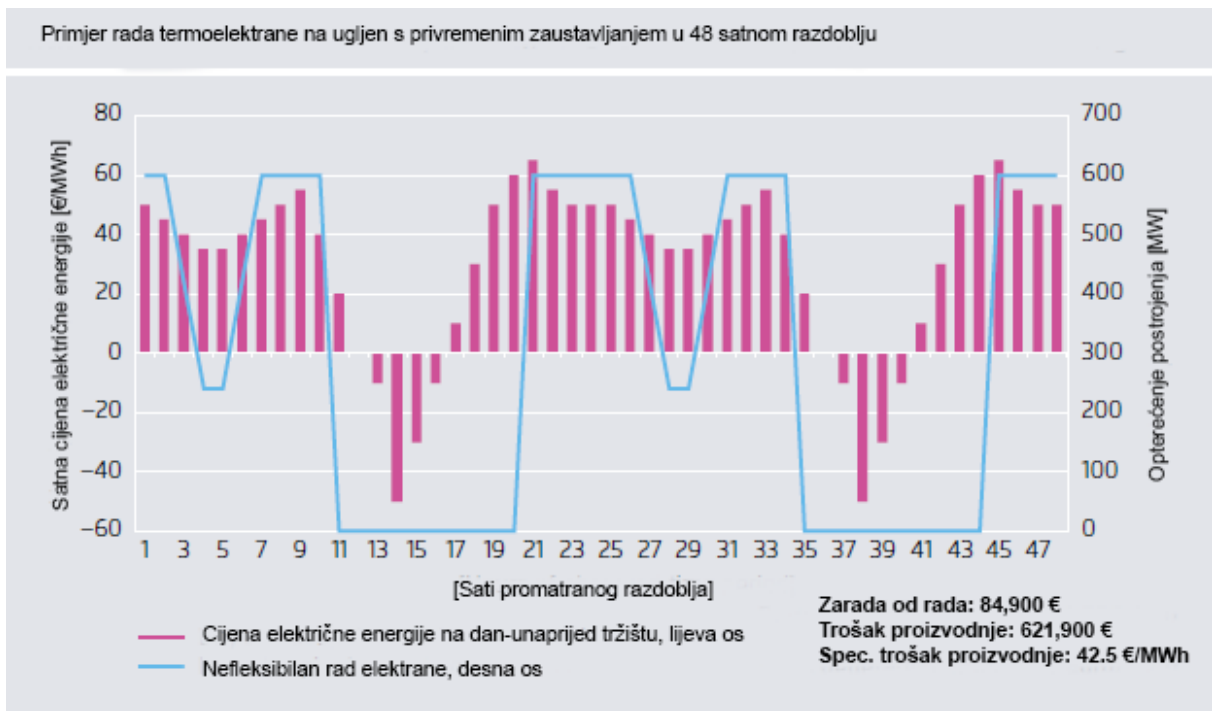
Tabela 1. Usporedba dva termoenergetska postrojenja [1]

| Karakteristike postrojenja i tržišta za dane primjere |   |   |                    |
|---|---|---|--------------------|
| Karakteristike postrojenja                            | Termoelektrana na ugljen s ograničenom fleksibilnosti | Termoelektrana na ugljen s poboljšanom fleksibilnosti | Kombinirani ciklus |
| Nominalno opterećenje                                 | 600 MW  | 600 MW  | 600 MW             |
| Minimalno opterećenje [%]                             | 40 %  | 25 %  | 40 %               |
| Minimalno opterećenje [MW]                            | 240 MW  | 150 MW  | 240 MW             |
| Termička iskoristivost pri nominalnom opterećenju     | 40 %  | 40 %  | 52 %               |
| Termička iskoristivost pri minimalnom opterećenju     | 34.5 %  | 31 %  | 40 %               |
| Trošak pokretanja [€/MW]                              | 80  | 80  | 40                 |
| Specifične CO <sub>2</sub> emisije goriva [g/kWh]     | 330   | 330   | 202                |
| Varijabilni trošak rada [€/MWh]                       | 2.0   | 2.0   | 1.0                |
| Vrijeme pokretanja [h]                                | 2   | 2   | 1                  |
| Karakteristike tržišta                                |   |   |                    |
| Cijena goriva [€/MWh]                                 | 10  | 10  | 15.8               |
| CO <sub>2</sub> cijena [€/t]                          | 10  | 10  | 10                 |
| Marginalni trošak proizvodnje u €/MWh                 | 35.3  | 35.3  | 35.3               |

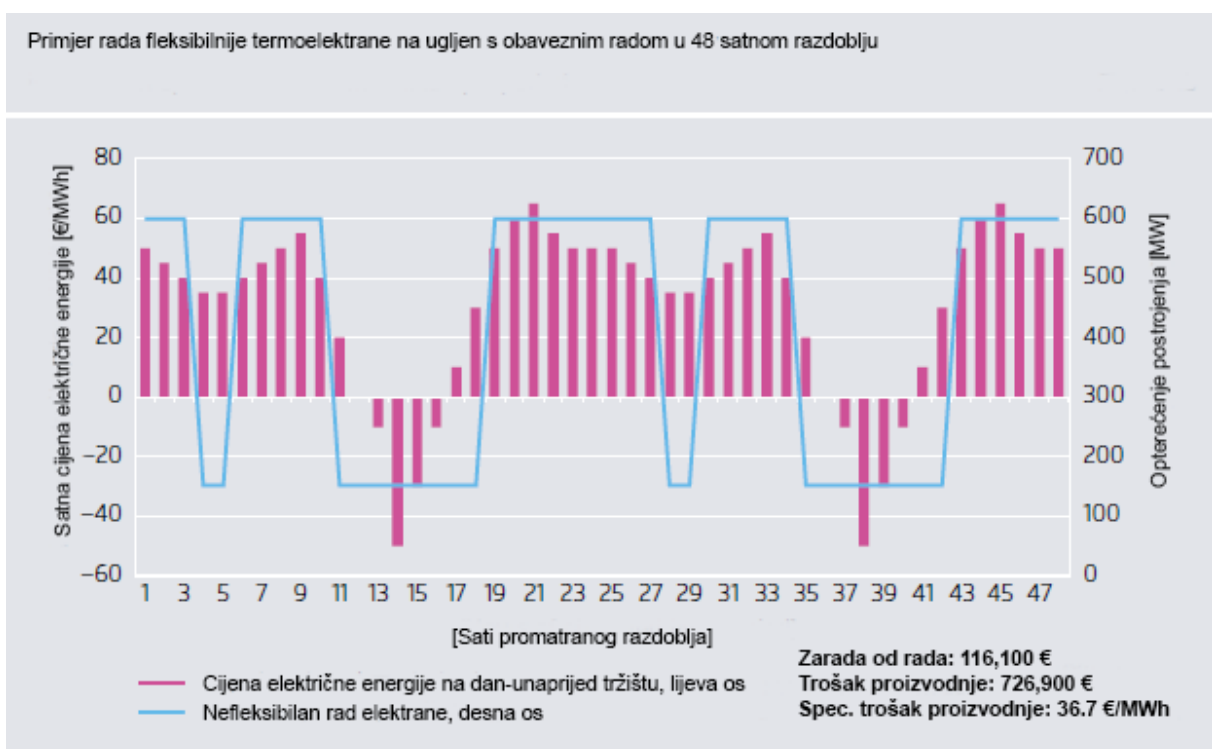
Primjer rada termoelektrane na ugljen s obaveznim radom u 48 satnom razdoblju



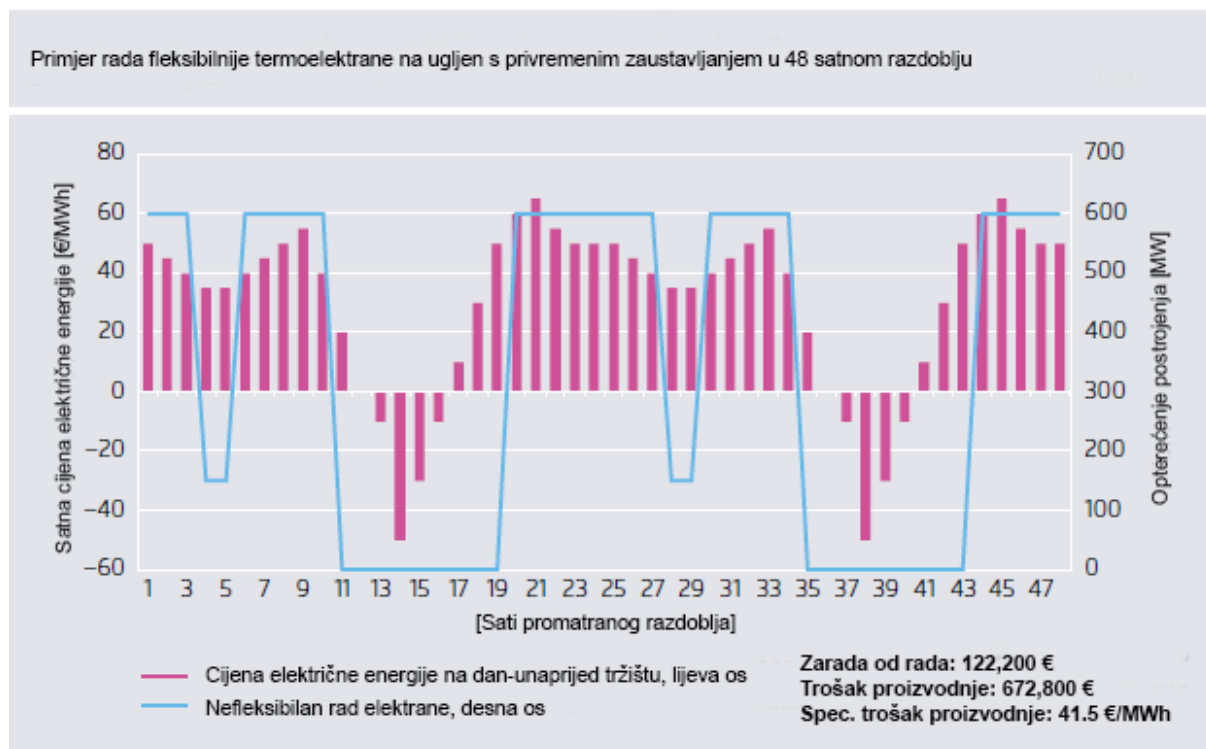
Slika 10. Rad postrojenja s obaveznim radom [1]



Slika 11. Rad postrojenja s neobaveznim radom [1]



Slika 12. Rad fleksibilnijeg postrojenja s obaveznim radom [1]



Slika 13. Rad fleksibilnijeg postrojenja s neobaveznim radom [1]

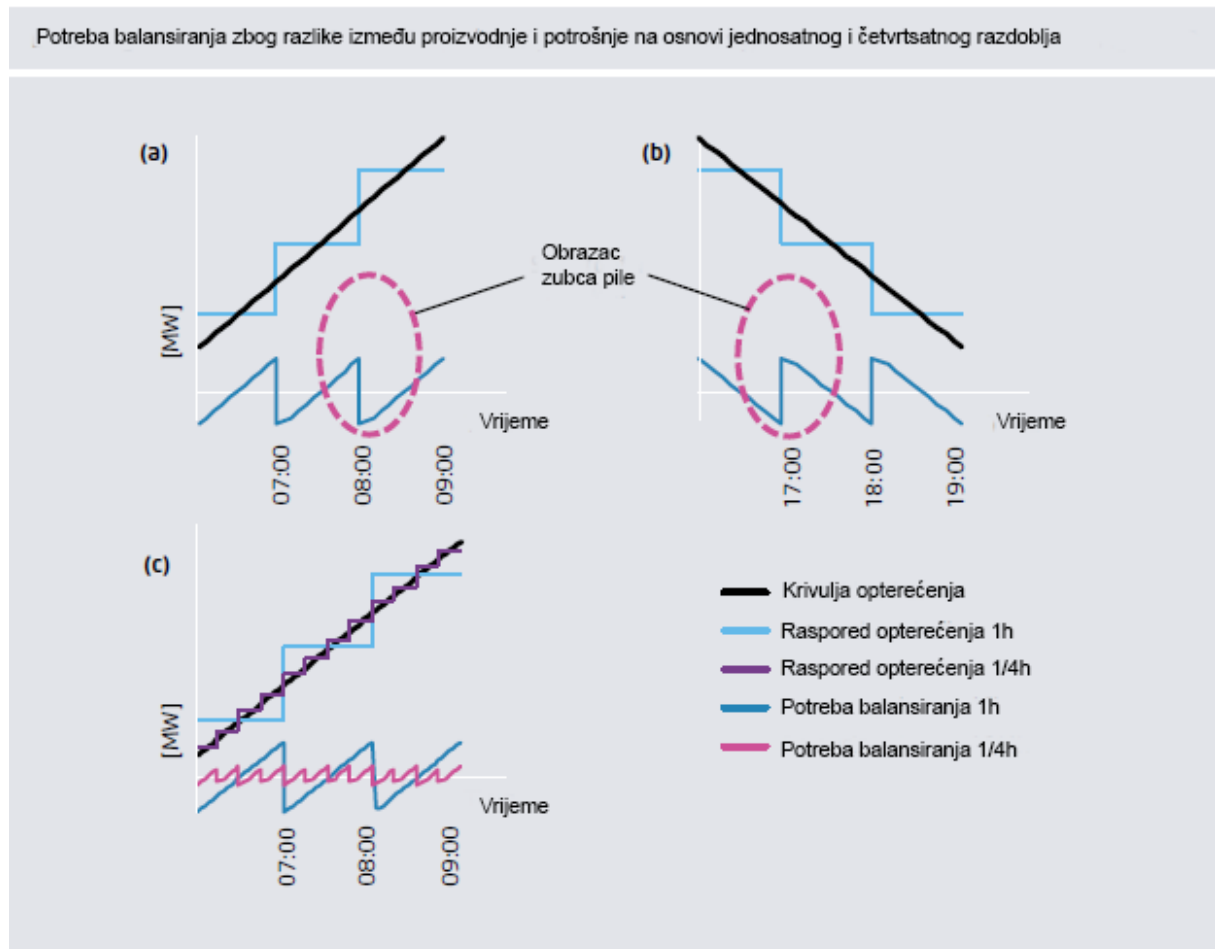
#### 4.2. Potrebna organizacija tržišta radi poticanja fleksibilnog rada

Regulatorni i tržišni sporazumi koji daju jasne signale cijena za daljnji razvoj obnovljivih izvora energije, sve su važniji državama koje planiraju povećanje udjela obnovljivih izvora energije. Međunarodna energetska agencija (eng. IEA) posvetila se istraživanju veze između organizacije tržišta i fleksibilnosti te su na kraju identificirali tri izazova organizacije tržišta za naknadu fleksibilnosti. Ti izazovi su povezani s velikim investicijskim zahtjevima obnovljivih izvora energije, ograničenom predvidljivosti i promjenjivom proizvodnjom te decentraliziranom proizvodnjom.

Organizacija balansnog tržišta može imati značajan utjecaj na tržište dan unaprijed i time na fleksibilan rad. Kako bi se ublažio taj utjecaj, većina država je uvela dnevno tržište koje omogućuje kupnju i prodaju i do 45 minuta prije isporuke, a neke su uvele i tržišta na kojima je moguće kupiti i prodati električnu energiju i do 15 minuta prije isporuke. Smanjenjem tog perioda omogućena su bolja predviđanja proizvodnje iz obnovljivih izvora, a time su smanjene potrebe balansiranja.

Potrebe balansiranja javljaju se zbog razlike između dogovorene proizvodnje i stvarnog opterećenja. Na slici 14 dan je primjer jedne takve potrebe balansiranja. Na primjeru se određena električna energija kupuje od jedinog proizvođača u razmacima od jednog sata kako bi se zadovoljile potrebe opterećenja električne mreže. Na osnovi jednog sata, kupljena količina električne energije odgovara prosječnom opterećenju, ali stvarno opterećenje odstupa od proizvedene količine što uzrokuje potrebe balansiranja. U slučaju rasta opterećenja, u prvoj polovini sata potrebna je negativna balansna snaga, a u drugoj pozitivna kako bi se razlika između proizvedene količine i opterećenja smanjila. U slučaju pada opterećenja, situacija je

obrnuta. Uvođenjem 15 minutnog tržišta omogućena je češća kupnja manjih količina električne energije čime se pojavljuju manje razlike, a time i manja potreba balansiranja.

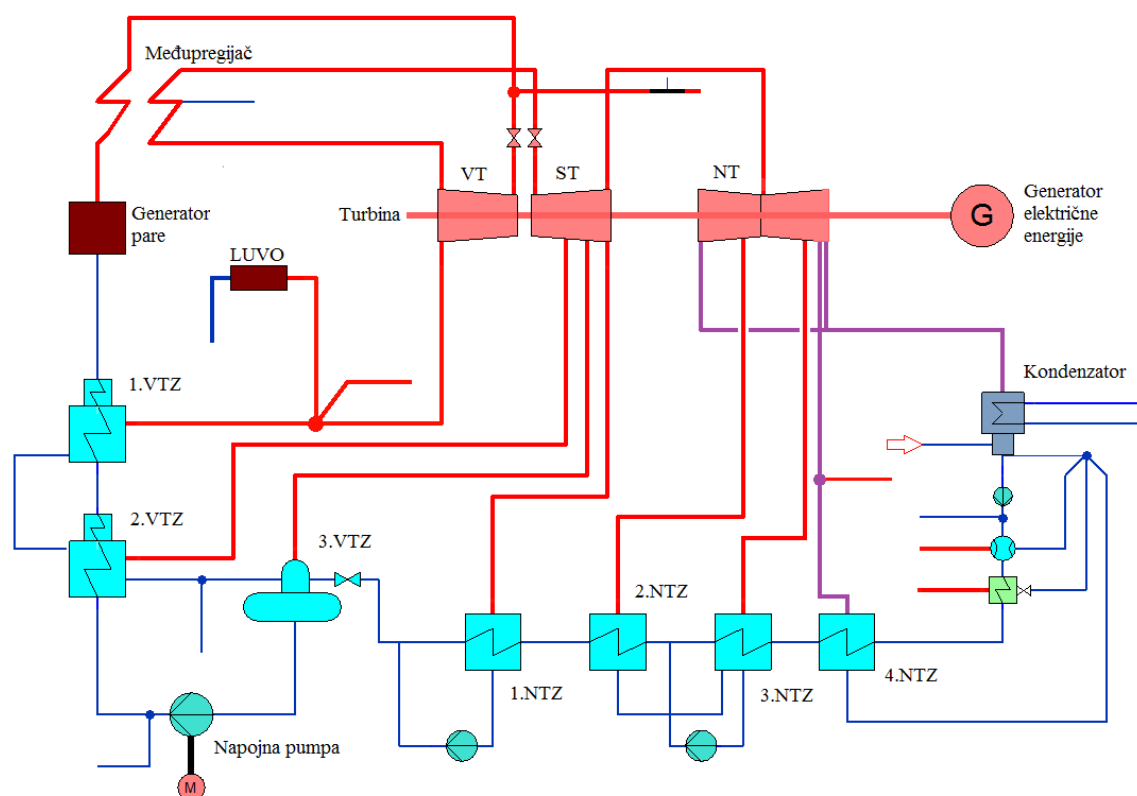


Slika 14. Balansiranje snage [1]

## 5. Opis dinamike bloka

Modelom dinamike promjene snage bloka želi se prikazati promjena opterećenja termoelektrane Plomin 2. Model je napravljen u računalnom programu MATLAB/ Simulink.

Plomin 2 je termoelektrana na ugljen, nominalnog opterećenja 210 MW. U pogon je puštena 1999. godine. Generator pare Plomina 2 je jednocijevni protočni, a napravljen je za kapacitet proizvodnje svježe pare do 670 t/h pri 147,4 bar i 535°C. Za potrebe proizvodnje pare generator pare potroši i do 80 t/h ugljena donje ogrjevne vrijednosti 24 MJ/kg. Ugljen se dovodi u zonu loženja kroz 24 plamenika raspoređenih u 6 razina. Turbina je kondenzacijska, s međupregrijanjem između visokotlačnog i srednjetlačnog dijela turbine. Turbina se sastoji od dva kućišta, u prvom kućištu se nalazi visokotlačni i srednjetlačni dio, a u drugom se nalazi niskotlačni dio u protustrujnoj dvoizlaznoj izvedbi. Na turbinu spojeno je sedam nereguliranih oduzimanja pare, jedno u visokotlačnom te tri u srednje i niskotlačnom dijelu turbine. Shema parnoturbinskog procesa prikazana je na slici 15. Nominalna brzina vrtnje turbine je 3000 o/min. Podaci uzeti iz [3] i [4].



Slika 15. Pojednostavljena shema parnoturbinskog procesa Plomina II



### 5.1. Matematički model dinamike bloka

Matematički model dinamike bloka opisan je jednačbama od (1) do (15). Osnovni model dinamike promjene opterećenja bloka je linearan i temelji se na prijenosnim funkcijama čime se želi prikazati utjecaj akumulacije i provođenja. Uzet je iz [5] te proširen modelom turbinskih oduzimanja kojim se želi opisati utjecaj turbinskih oduzimanja na snagu turbine i zagrijavanje napojne vode.

$$D_p = B + D_{dod} \quad (1)$$

$$B = 5 * m_i * H_d * \eta \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{D_p - D_t}{T_s} \quad (3)$$

$$D_t = (p * K_s + 1) * Y_v \quad (4)$$

$$P = D_t * m \quad (5)$$

$$\begin{aligned} m = & K_{hp} + K_{mp} * e_1 * (1 - x) + K_{mp} * e_2 * (1 - x) * (1 - y_1) \\ & + K_{mp} * e_3 * (1 - x) * (1 - y_1) * (1 - y_2) \\ & + 0,5 * \{K_{lp} * e_4 * (1 - x) * (1 - y_1) * (1 - y_2) * (1 - y_3) \\ & + K_{lp} * e_5 * (1 - x) * (1 - y_1) * (1 - y_2) * (1 - y_3) \\ & + K_{lp} * e_6 * (1 - x) * (1 - y_1) * (1 - y_2) * (1 - y_3) * (1 - z_1) \\ & + K_{lp} * e_7 * (1 - x) * (1 - y_1) * (1 - y_2) * (1 - y_3) * (1 - z_2) \\ & + K_{lp} * (1 - x) * (1 - y_1) * (1 - y_2) * (1 - y_3) * (1 - z_3) \\ & * [(1 - z_1) * (1 - e_4 - e_6) + (1 - z_2) * (1 - e_5 - e_7)] \} \end{aligned} \quad (6)$$

$$e_1 = \frac{h_{ST,u} - h_{ST,o,1}}{h_{ST,u} - h_{ST,i}} \quad (7)$$

$$e_2 = e_1 - \frac{h_{ST,u} - h_{ST,o,2}}{h_{ST,u} - h_{ST,i}} \quad (8)$$

$$e_3 = 1 - e_1 - e_2 \quad (9)$$

$$e_4 = \frac{h_{NT,u} - h_{NT,o,1}}{h_{NT,u} - h_{NT,i}} \quad (10)$$

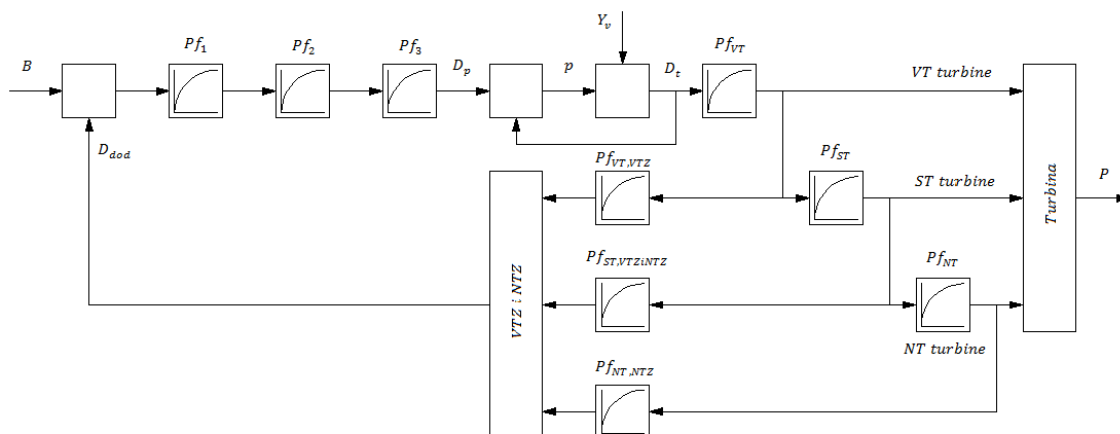
$$e_5 = \frac{h_{NT,u} - h_{NT,o,2}}{h_{NT,u} - h_{NT,i}} \quad (11)$$

$$e_6 = e_4 - \frac{h_{NT,u} - h_{NT,o,3}}{h_{NT,u} - h_{NT,i}} \quad (12)$$

$$e_7 = e_5 - \frac{h_{NT,u} - h_{NT,o,3}}{h_{NT,u} - h_{NT,i}} \quad (13)$$

$$D_{dod} = D_t * n \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 n = & x * K_{vtz1} + (1 - x) * y_1 * K_{vtz2} + (1 - x) * (1 - y_1) * y_2 * K_{vtz3} \\
 & + (1 - x) * (1 - y_1) * (1 - y_2) * y_3 * K_{ntz1} \\
 & + 0,5 * \{(1 - x) * (1 - y_1) * (1 - y_2) * (1 - y_3) * z_1 * K_{ntz2} \\
 & + (1 - x) * (1 - y_1) * (1 - y_2) * (1 - y_3) * z_2 * K_{ntz3} \\
 & + (1 - x) * (1 - y_1) * (1 - y_2) * (1 - y_3) * z_3 * K_{ntz4} \\
 & * [(1 - z_1) + (1 - z_2)]\}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$



Slika 16. Prikaz spajanja matematičkog modela dinamike bloka

Na slici 16 dan je pojednostavljeni prikaz spajanja matematičkog modela dinamike promjene opterećenja bloka. Nazivom  $Pf_i$  označene su sve prijenosne funkcije koje predstavljaju akumulacije raznih elemenata bloka. U tablici 2 dane su vrijednosti svih prijenosnih funkcija korištenih u modelu. Drugim članom u prijenosnim funkcijama  $Pf_{VT,VTZ}$ ,  $Pf_{ST,VTZ:NTZ}$  i  $Pf_{NT,NTZ}$  želi se prikazati utjecaj kašnjenja neke promjene unutar regeneratora napojne vode na generator pare.

Tabela 2. Oznaka i vrijednost prijenosnih funkcija

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| $Pf_1$    | $\frac{1}{105s + 1}$    |
| $Pf_2$    | $\frac{1}{105s + 1}$    |
| $Pf_3$    | $\frac{1}{120s + 1}$    |
| $Pf_{VT}$ | $\frac{1}{T_{hp}s + 1}$ |
| $Pf_{ST}$ | $\frac{1}{T_{mp}s + 1}$ |

|                   |   |
|-------------------|---|
| $Pf_{NT}$         | $\frac{1}{T_{lp}s + 1}$   |
| $Pf_{VT,VTZ}$     | $\frac{K_{VTZ1} * 0,94761}{T_{VTZ1}s + 1} * \frac{1}{2s + 1}$   |
| $Pf_{ST,VTZiNTZ}$ | $\frac{K_{VTZ2}}{T_{VTZ2}s + 1} * \frac{1}{3s + 1} ;$<br>$\frac{K_{VTZ3}}{T_{VTZ3}s + 1} * \frac{1}{4s + 1} ;$<br>$\frac{K_{NTZ1}}{T_{NTZ1}s + 1} * \frac{1}{5s + 1}$ |
| $Pf_{NT,NTZ}$     | $\frac{K_{NTZ2}}{T_{NTZ2}s + 1} * \frac{1}{6s + 1} ;$<br>$\frac{K_{NTZ3}}{T_{NTZ3}s + 1} * \frac{1}{7s + 1} ;$<br>$\frac{K_{NTZ4}}{T_{NTZ4}s + 1} * \frac{1}{8s + 1}$ |

## 5.2. Matematički model mlina ugljena

Matematički model mlina ugljena opisan je jednačbama od (16) do (26). Osnovni model preuzet je iz [7] i [8] te proširen stehiometrijskom jednačbom izgaranja kako bi se odredio potreban maseni tok primarnog zraka.

$$\frac{dM_c}{dt} = \dot{m}_u + \dot{m}_{pov} - k_1 * M_c \quad (16)$$

$$\frac{dM_{pc}}{dt} = k_1 * M_c - \dot{m}_{pc} \quad (17)$$

$$\frac{dM_{pczrak}}{dt} = \dot{m}_{pc} - \dot{m}_i - \dot{m}_{pov} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{pc} = k_5 * \dot{m}_{zrak} * M_{pc} \quad (19)$$

$$\dot{m}_i = k_4 * M_{pczrak} * \left(1 - \frac{w}{k_6}\right) \quad (20)$$

$$\dot{m}_{pov} = k_9 * M_{pczrak} \quad (21)$$

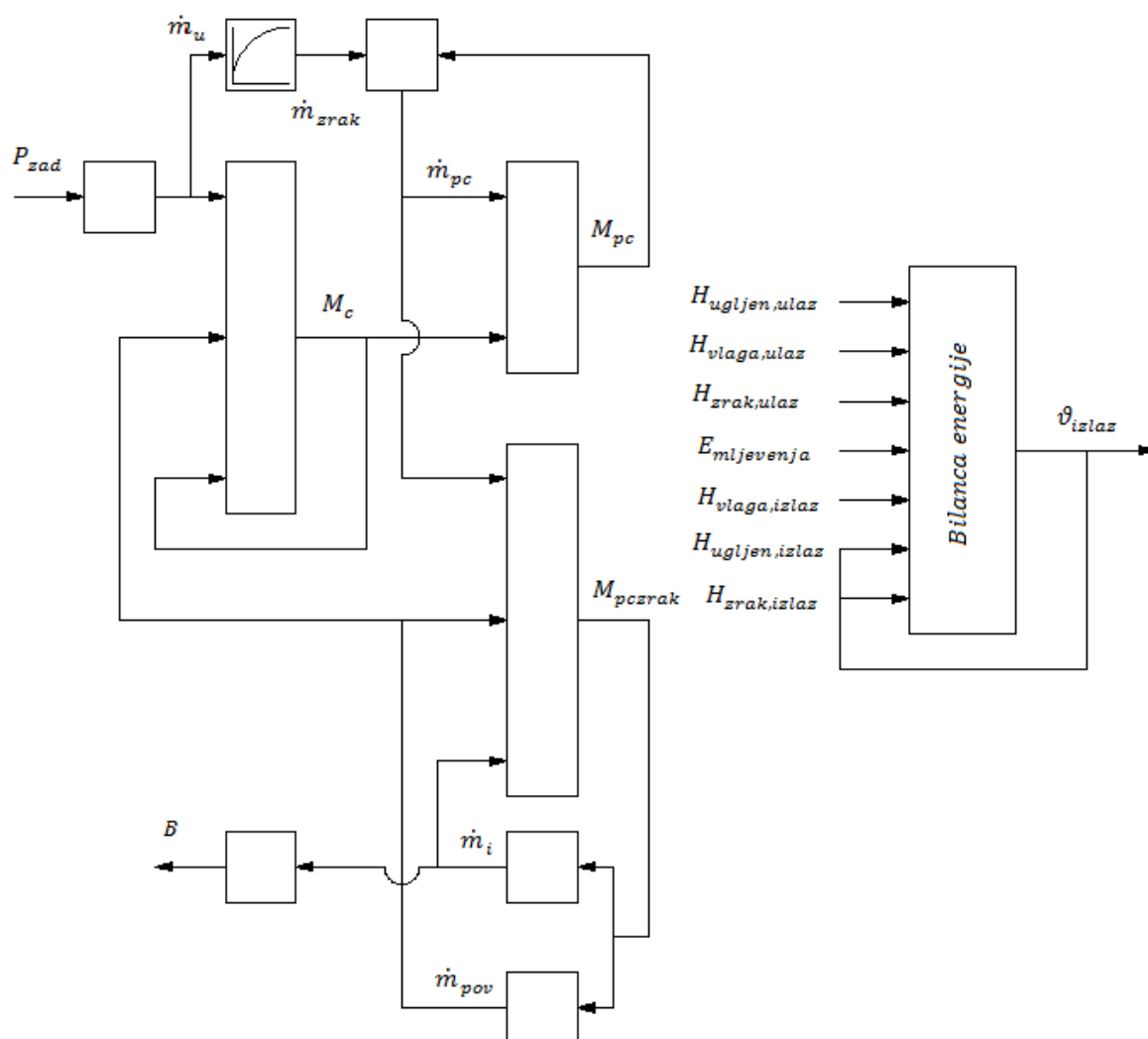
$$\Delta p_{mlin} = k_7 * (1 - e^{-k_8 * M_{pczrak}}) * \Delta p_{pa} \quad (22)$$

$$E = k_2 * M_{pc} + k_3 * M_c + E_0 \quad (23)$$

$$\dot{m}_{zrak} = \dot{m}_u * (1,867 * c + 5,6 * h + 0,7 * s - 0,7 * o) * \frac{\rho_{zrak} * \lambda}{0,21 * 2} \quad (24)$$

$$\dot{m}_u = \frac{\rho_{ugljen} * V_{košare} * n_d}{5} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\vartheta_i}{dt} = \frac{1}{k_{11}} * [ &c_{zrak} * \dot{m}_{zrak} * \vartheta_{zrak} + \varphi_m * c_{voda} * \dot{m}_u * \vartheta_u \\ &+ c_{ugljen} * \dot{m}_u * \vartheta_u + k_{10} * E - c_{ugljen} * \dot{m}_i * \vartheta_i \\ &- c_{zrak} * \dot{m}_{zrak} * \vartheta_i - \varphi_m * L_v * \dot{m}_u ] \end{aligned} \quad (26)$$



Slika 17. Prikaz spajanja matematičkog modela mlina ugljena

Na slici 17 dan je pojednostavljeni prikaz spajanja matematičkog modela mlina ugljena. Bilanca energije služi kako bismo odredili izlaznu temperaturu zraka i usitnjenog ugljena.

### 5.3. Model vođenja bloka

Model vođenja bloka opisan je modelom vođenja mlina i modelom vođenja turbinskog ventila. Koristi se za reguliranje brzine vrtnje dodavača ugljena čime se upravlja izmijenjenom količinom topline u generatoru pare i za reguliranje položaja turbinskog ventila čime se upravlja masenim protokom vodene pare kroz turbinu i postiže određeno opterećenje bloka.

Model vođenja mlina ugljena napravljen je tako da se forsiranje loženja može isključiti po potrebi. U model vođenja mlina uključen je i model regulacije izlazne temperature primarnog zraka koji je opisan jednadžbama od (27) do (29).

$$\vartheta_{zrak} = \frac{\dot{m}_{zrak,hl}}{\dot{m}_{zrak}} * \vartheta_{hl} + \frac{\dot{m}_{zrak,to}}{\dot{m}_{zrak}} * \vartheta_{to} \quad (27)$$

$$\frac{\dot{m}_{zrak,to}}{\dot{m}_{zrak}} = PID f(\vartheta_{zad} - \vartheta_i) \quad (28)$$

$$\frac{\dot{m}_{zrak,hl}}{\dot{m}_{zrak}} = 1 - \frac{\dot{m}_{zrak,to}}{\dot{m}_{zrak}} \quad (29)$$

Brzina vrtnje dodavača opisana je jednadžbom (30). U slučaju isključenja forsiranja loženja članovi  $P_1 (P_{zad} - P)$  i  $P_2(p_{zad} - p)$  se ne uzimaju u obzir.

$$n_d = \left[ \frac{P_{zad}}{m} * (1 - n) + P_1 (P_{zad} - P) + P_2(p_{zad} - p) \right] * \frac{1}{H_d * \rho_{ugljen} * V_{košare} * \eta} \quad (30)$$

Model vođenja turbinskog ventila napravljen je tako da se blok može voditi koordinirano ili s konstantnim tlakom. U slučaju koordiniranog vođenja otvorenost turbinskog ventila je opisana jednadžbom (31), a u slučaju vođenja s konstantnim tlakom otvorenost turbinskog ventila je opisana jednadžbom (32).

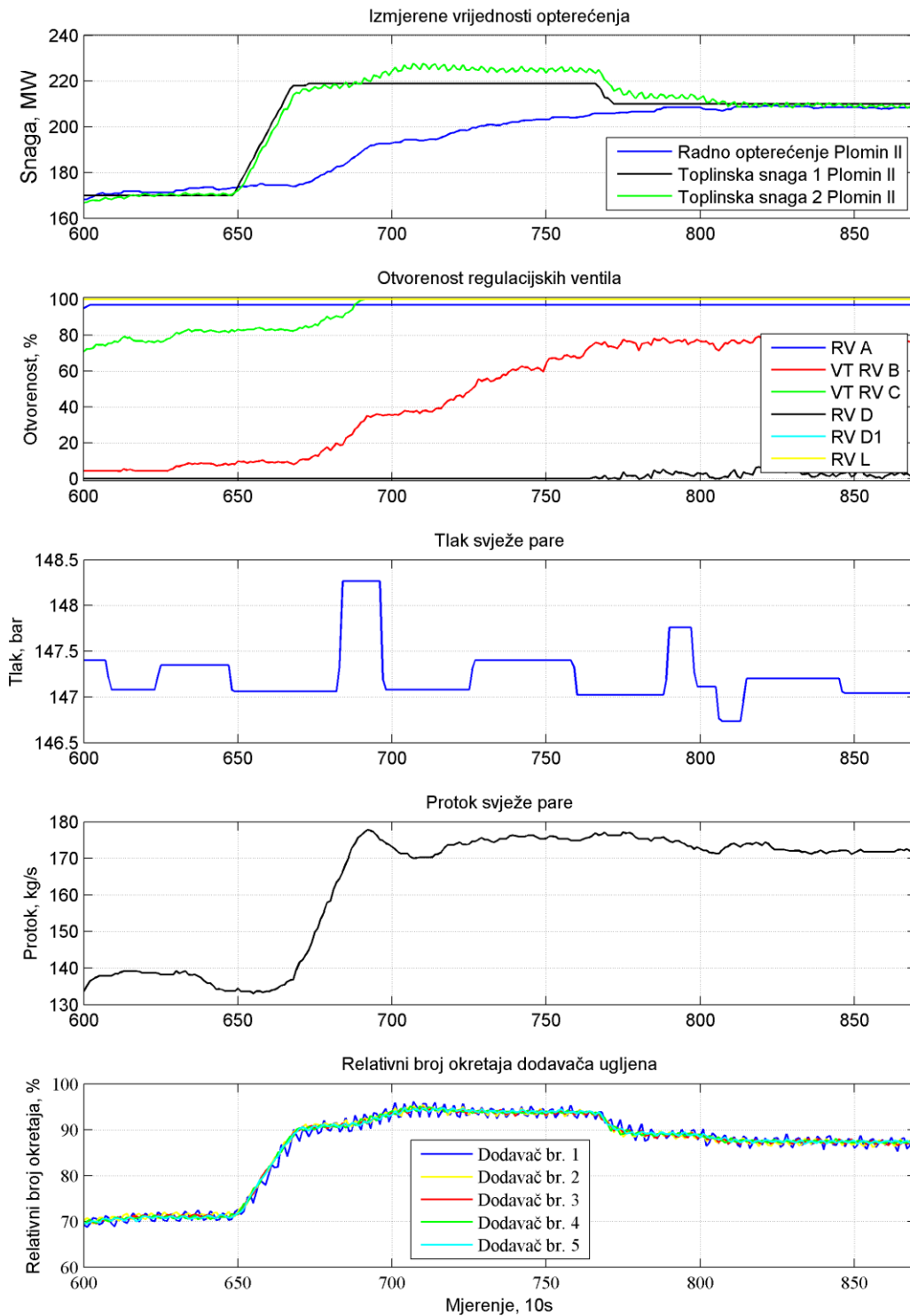
$$Y_v = \frac{P_{zad_0}}{(p * K_s + 1) * m} + PID f(P_{zad} - P) \quad (31)$$

$$Y_v = \frac{P_{zad_0}}{(p_{zad} * K_s + 1) * m} + PID f(p_{zad} - p) \quad (32)$$

U prethodnim jednadžbama član  $\frac{P_{zad_0}}{(p_{zad} * K_s + 1) * m}$  predstavlja početnu vrijednost otvorenosti turbinskog ventila. Svrha tog člana je da osigura uspostavu početnog tlaka i snage za potrebe simulacije.

### 5.4. Mjerenja u Plominu II

Na slici 18 dan je isječak iz rezultata mjerenja koji će poslužiti za prilagođavanje modela dinamike promjene opterećenja bloka pogonskim odzivima. Blok je vođen pod konstantnim tlakom, promjena opterećenja rezultat je povećanja protoka koji je uslijedio nakon povećanog dotoka goriva u zonu loženja generatora pare. Gradijent promjene opterećenja zavisi o otvorenosti 6 regulacijskih ventila i brzine promjene protoka svježe pare. Iako je blok vođen konstantnim tlakom, u radu se događaju oscilacije do 1 bar što je rezultat lošeg osjetnika.

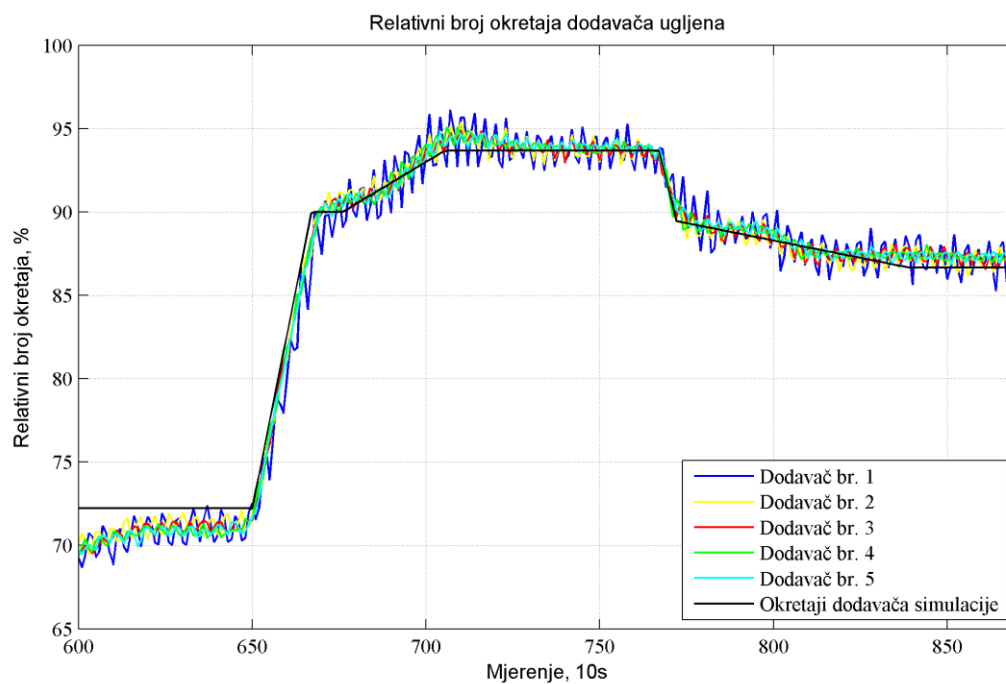
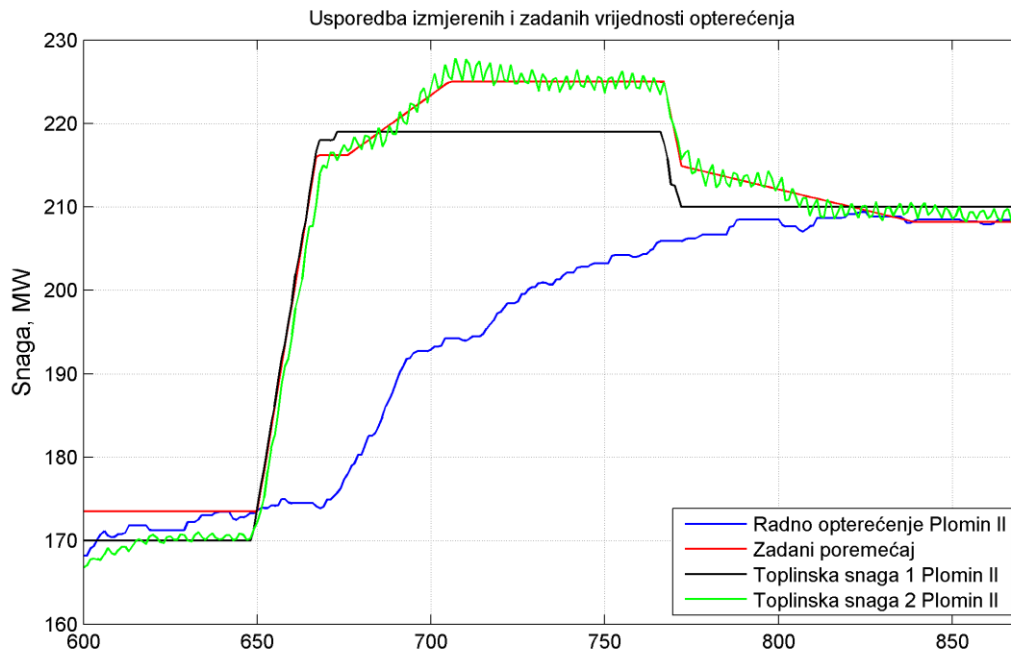


Slika 18. Rezultati mjerenih veličina pri promjeni opterećenja Plomin II

### **5.5. Usporedba rezultata mjerenja i simulacije**

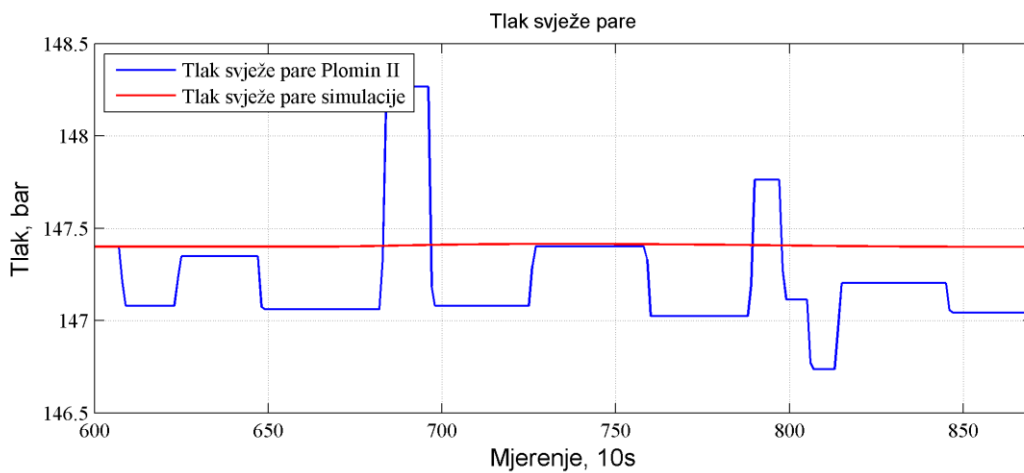
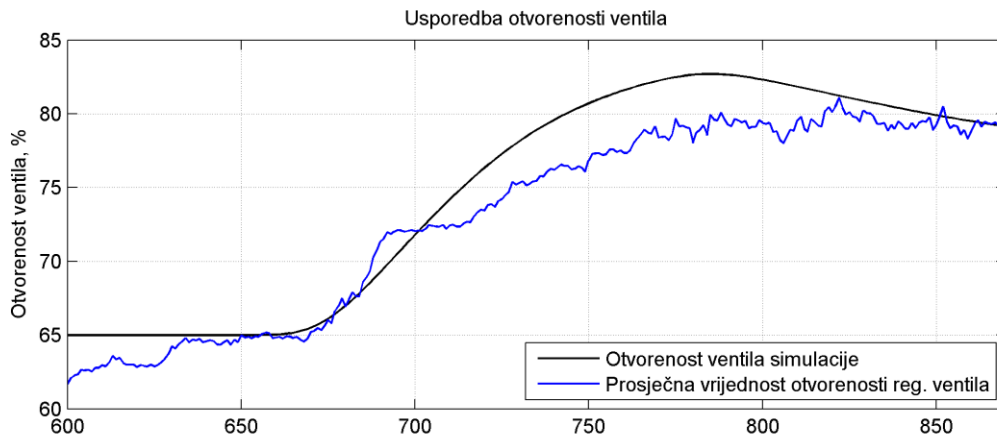
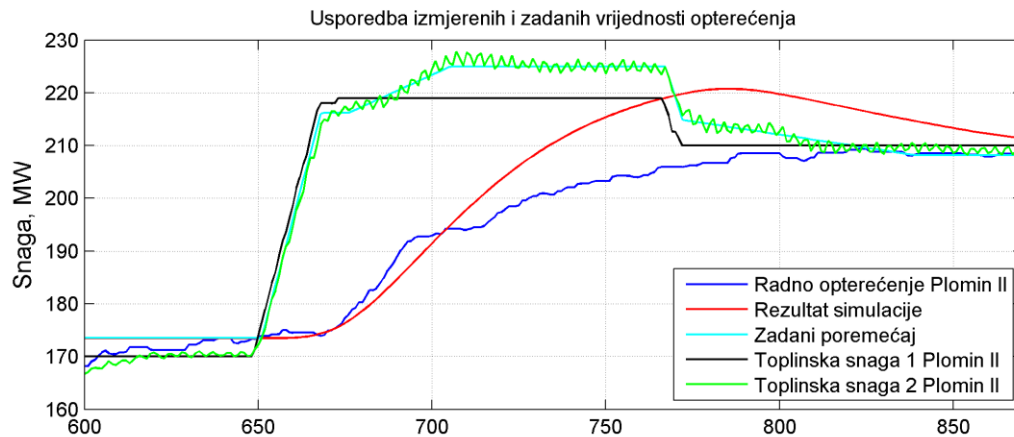
Kako bi se što bolje prilagodio model dinamike promjene opterećenja, zadani poremećaj je napravljen kako bi što bolje aproksimirao mjerenje „Toplinska snaga 2“ u Plominu II. Na slici 19 prikazana je ta usporedba, a iz donjeg se dijagrama vidi da zadani poremećaj uvjetuje i dobro poklapanje broja okretaja dodavača ugljena u simulaciji i broja okretaja dodavača ugljena u mlinu.

Na slici 20 dan je prikaz rezultata promjene snage turbine modela u usporedbi sa stvarnim mjerenjem. Iz toga se može zaključiti da se pomoću modela, u trenutnom obliku, ne može dobro opisati promjena snage u Plominu II. To je posljedica pojednostavljenja modela vođenja pri čemu nije u obzir uzeta kontrola brzine vrtnje, ograničenje brzine otvaranja ventila zbog sigurnosti i zamjena šest različito upravljanih turbinskih ventila jednim ventilom pojednostavljenog vođenja.



Slika 19. Usporedba izmjerenog toplinskog toka i poremećaja kojim se tok želi opisati





Slika 20. Usporedba promjene opterećenja za Plomin II i simulaciju

## **6. Primjena modela za prikaz različitih načina vođenja**

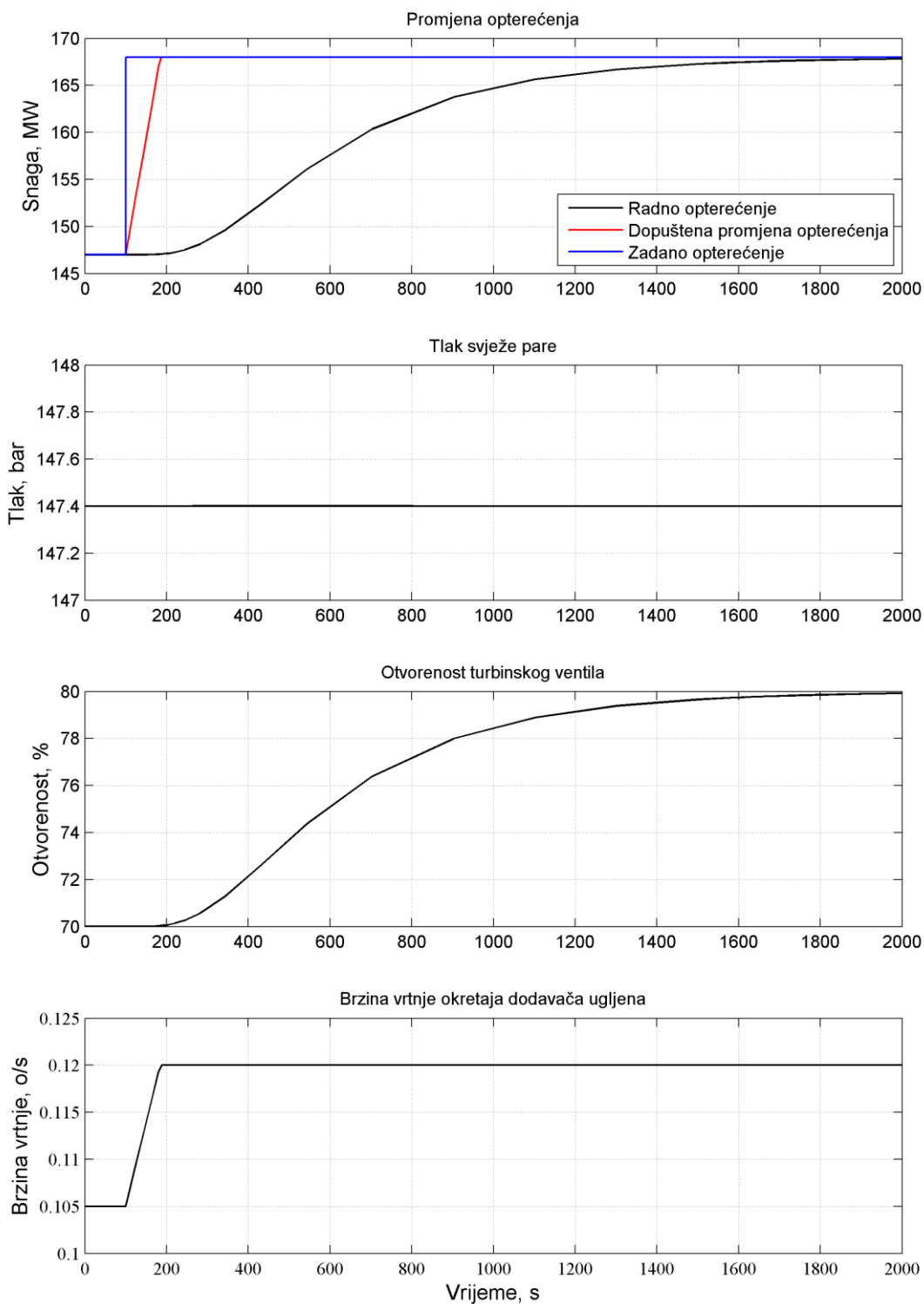
U ovom poglavlju uspoređena je primjena različitih načina vođenja modela termoenergetskog bloka s teorijskim načinima vođenja termoenergetskih blokova.

### **6.1. Vođenje s konstantnim tlakom**

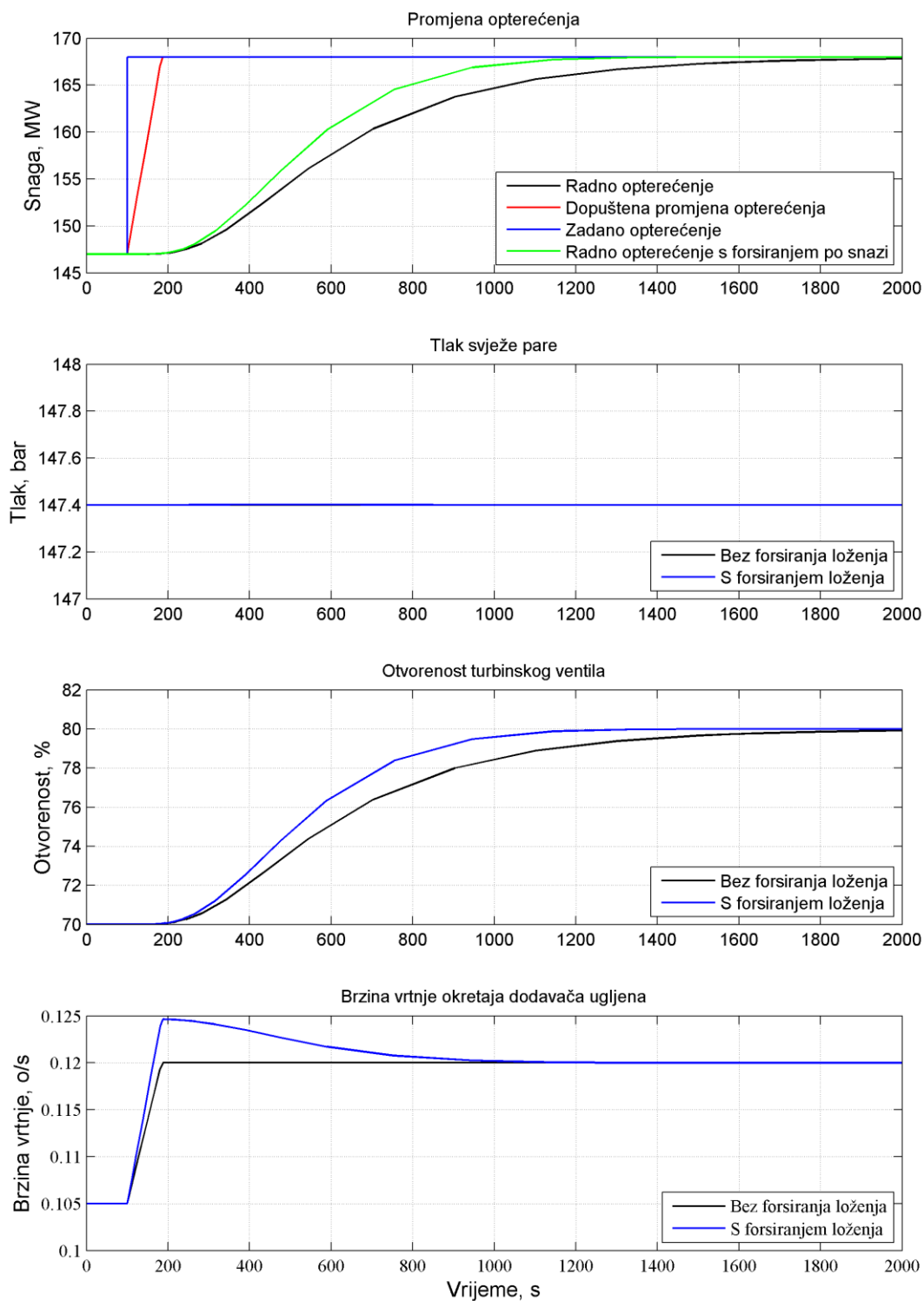
Primarna zadaća vođenja bloka prema konstantnom tlaku je održavanje tlaka na referentnoj vrijednosti. Povećanje snage turbine rezultat je većeg masenog protoka pare kao posljedice većeg toplinskog toka dobivenog izgaranjem goriva. Iz usporedbe odaziva strategije vođenja s konstantnim tlakom u [5] i dijagrama na slici 21 može se zaključiti da postoji velika sličnost te se mogu uočiti iste promjene. Dinamika porasta snage na slici i dijagramu odgovara dinamici otvaranja turbinskog ventila. Otvaranje turbinskog ventila rezultat je djelovanja regulatora na porast tlaka vodene pare u kolektoru generatora pare. Porast tlaka je pak rezultat povećanja masenog toka ugljena u ložište generatora pare koje se izražava preko povećanja brzine vrtnje dodavača ugljena na ulazu u mlin.

#### **6.1.1. Vođenje s konstantnim tlakom i forsiranjem loženja po snazi**

Jedan od načina povećanja brzine promjene snage termoenergetskog bloka je u forsiranju loženja. Takvim se načinom vođenja kratkotrajno povećava maseni tok na razinu koja bi bila prevelika za stacionarni način rada. Ovo rezultira nešto većim toplinskim tokom, odnosno, bržim isparivanjem napojne vode što dovodi do brže promjene opterećenja bloka. U ovom slučaju, signal koji uzrokuje forsiranje loženja nastao je iz razlike zadane i stvarne snage bloka. U modelu se ta razlika množi s proporcionalnim članom te se dobije potrebna vrijednost dodatne brzine vrtnje. Prilikom izbora vrijednosti proporcionalnog člana mora se paziti da odabrana vrijednost ne izaziva nestabilnosti u bloku. Porast vrijednosti uzrokuje bržu promjenu opterećenja, ali prevelika vrijednost dovodi do preskakivanja zadane vrijednosti zbog prolaza više pare kroz turbinu nego je to doista potrebno. Promjena opterećenja za ovaj slučaj prikazana je na slici 22.



Slika 21. Promjena opterećenja bloka pri konstantnom tlaku



Slika 22. Usporedba promjene opterećenja bloka pri konstantnom tlaku s i bez forsiranja loženja

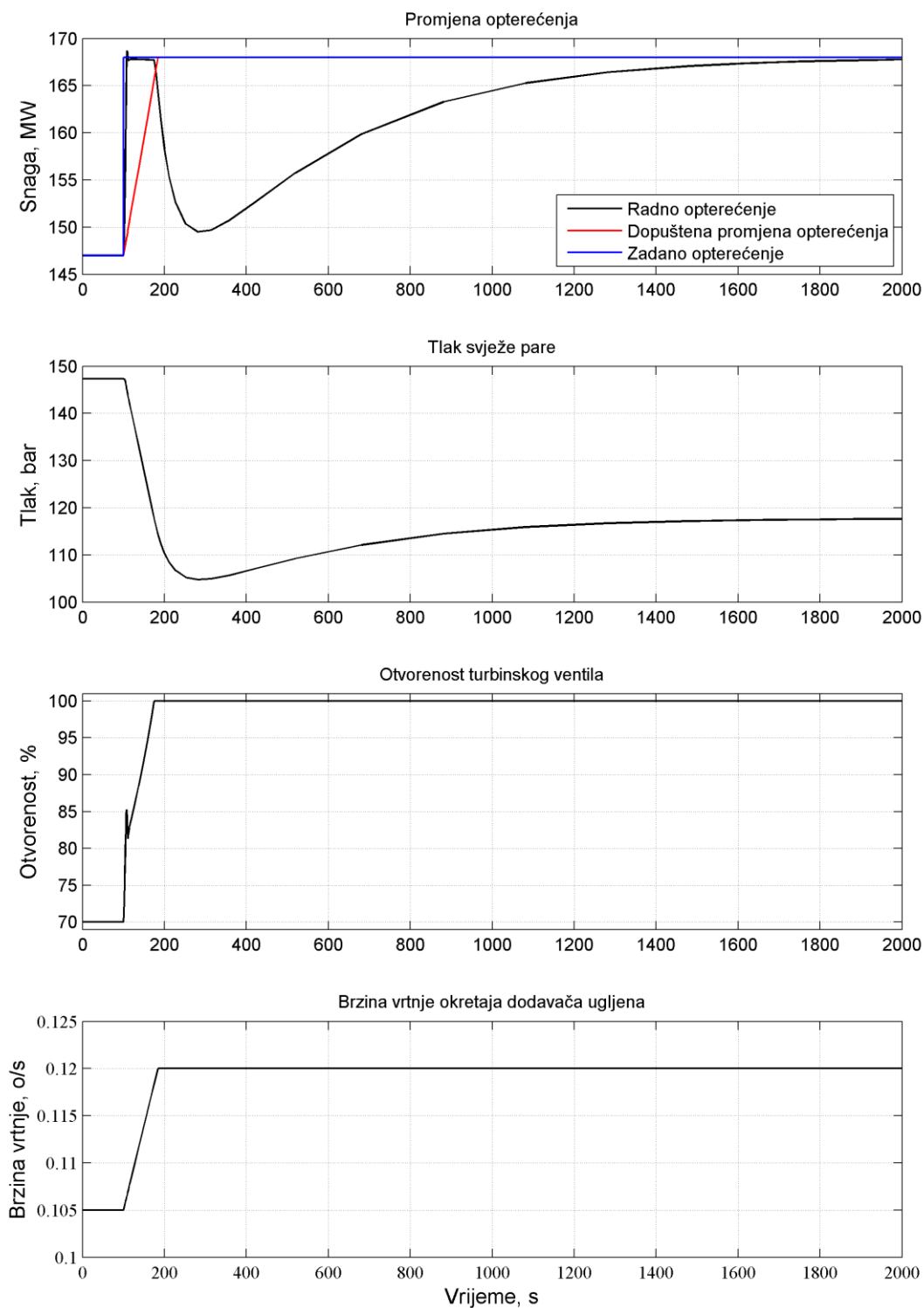
## **6.2. Koordinirano vođenje**

Koordinirano vođenje način je vođenja bloka kod kojeg se istovremeno djeluje na otvaranje turbinskog ventila i povećanje masenog toka goriva kako bi se trenutačno povećalo opterećenje bloka na račun akumulirane pare u kolektoru i cjevovodima generatora pare. Iz usporedbe odaziva strategije koordiniranog vođenja u [5] i dijagrama na slici 23 može se zaključiti da postoji velika sličnost te se mogu uočiti iste promjene. Nagli porast i kratkotrajno držanje snage rezultat je naglog otvaranja turbinskog ventila. Pad snage turbine koji uslijedi nakon početnog skoka rezultat je pada tlaka pare u kolektoru. Daljnje povećanje snage rezultat je povećanog masenog toka goriva u ložište generatora pare.

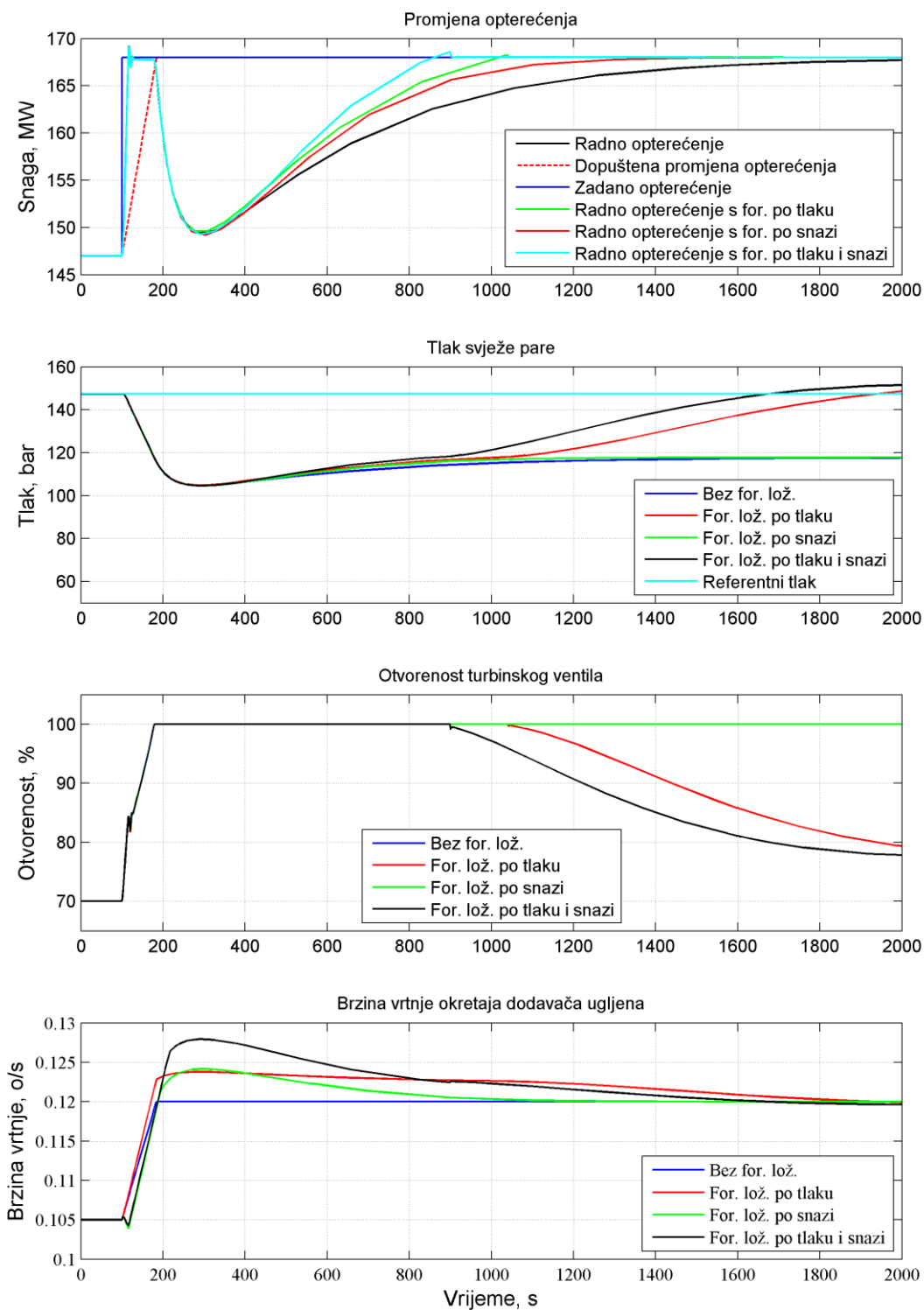
### **6.2.1. Koordinirano vođenje s različitim uzrocima forsiranja loženja**

Kao i kod vođenja s konstantnim tlakom, forsiranjem loženja se želi ubrzati promjena opterećenja bloka. U ovom slučaju, signal koji uzrokuje forsiranje loženja može imati više izvora. Izvori koji su korišteni u modelu su razlika referentnog (početnog) tlaka i stvarnog tlaka pare i razlika zadane i stvarne snage bloka. Ti se izvori množe s proporcionalnim članovima kako bi se dobila potrebna vrijednost dodatne brzine vrtnje. Kao što je već prije napomenuto, vrijednosti proporcionalnih članova ne smiju izazvati nestabilnosti u bloku.

Iz dijagrama promjene opterećenja vidi se da najveći učinak forsiranja ima signal po tlaku i snazi te da takav signal bolje djeluje na stabilnost tlaka pare u kolektoru od samog signala po tlaku. Ovo je rezultat blaže promjene tlaka. Iz dijagrama se isto tako može uočiti da, u slučaju forsiranja po tlaku, tlak u kolektoru raste nakon što se uspostavi zadana snaga bloka. Forsiranjem loženja po tlaku se želi napuniti akumulacija kako bi blok bio u mogućnosti ponovno brzo povećati snagu turbine kada se pojavi potreba za time. Promjena opterećenja za ovaj slučaj prikazana je na slici 24.



Slika 23. Promjena opterećenja bloka pri koordiniranom vođenju



Slika 24. Usporedba promjene opterećenja bloka koordiniranog vođenja s različitim uzrocima forsiranja loženja

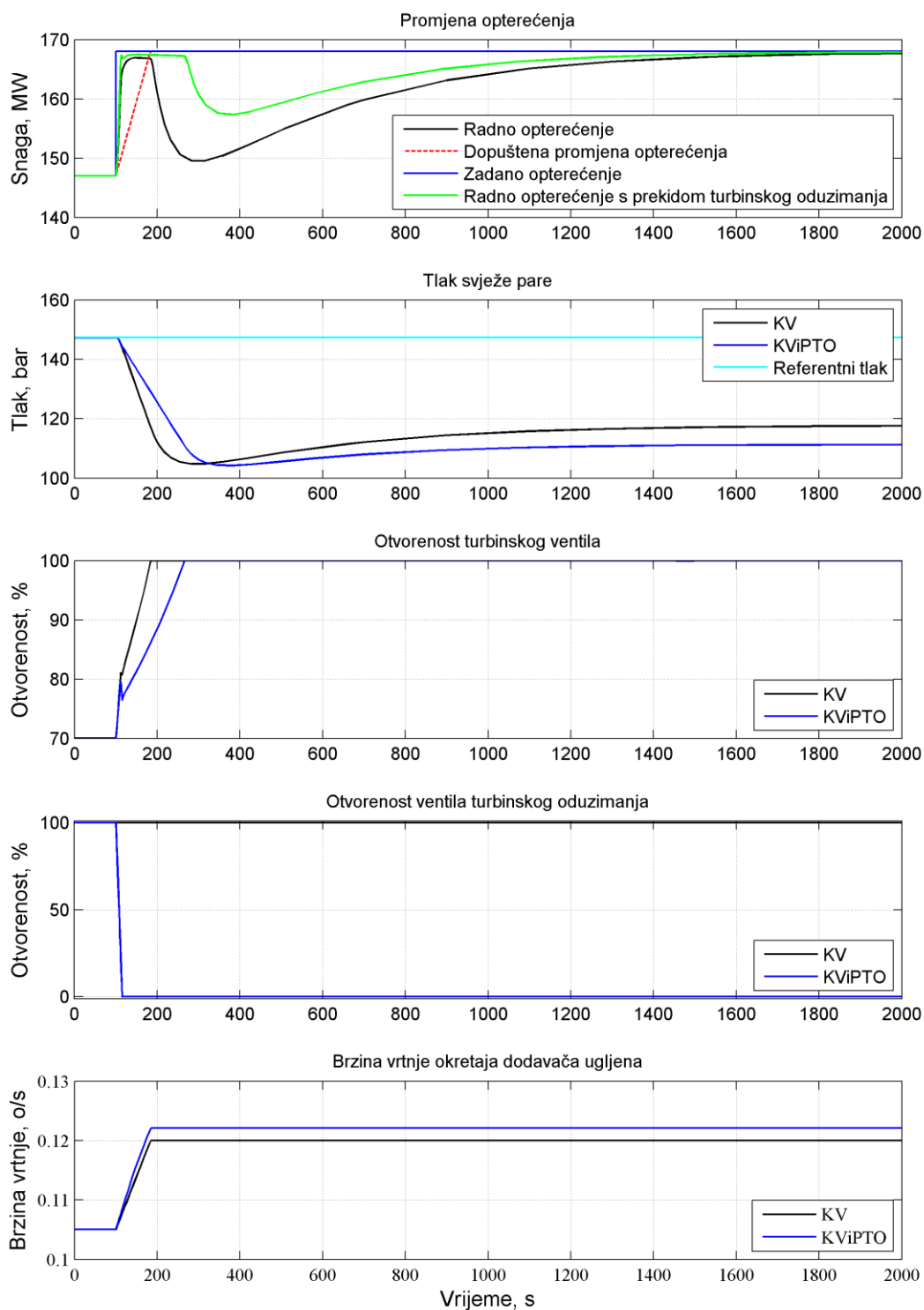
### 6.3. Koordinirano vođenje i prekid turbinskog oduzimanja

Turbinskim oduzimanjima preusmjerava se dio toka vodene pare iz turbine u regeneratore topline napojne vode kako bi napojna voda sa što većom temperaturom ušla u generator pare i time malo povećala termalnu iskoristivost postrojenja, odnosno, smanjila potrošnu goriva. Prekidom jednog ili više turbinskog oduzimanja kratkotrajno se povećava protok pare kroz turbinu, a time i opterećenje bloka, na račun akumulirane topline u regeneratorima napojne vode i elementima generatora pare. Ako se prekid turbinskih oduzimanja ne prati povećanjem dotoka goriva, snaga turbine se, nakon početnog skoka, stacionira ispod prijašnje vrijednosti.

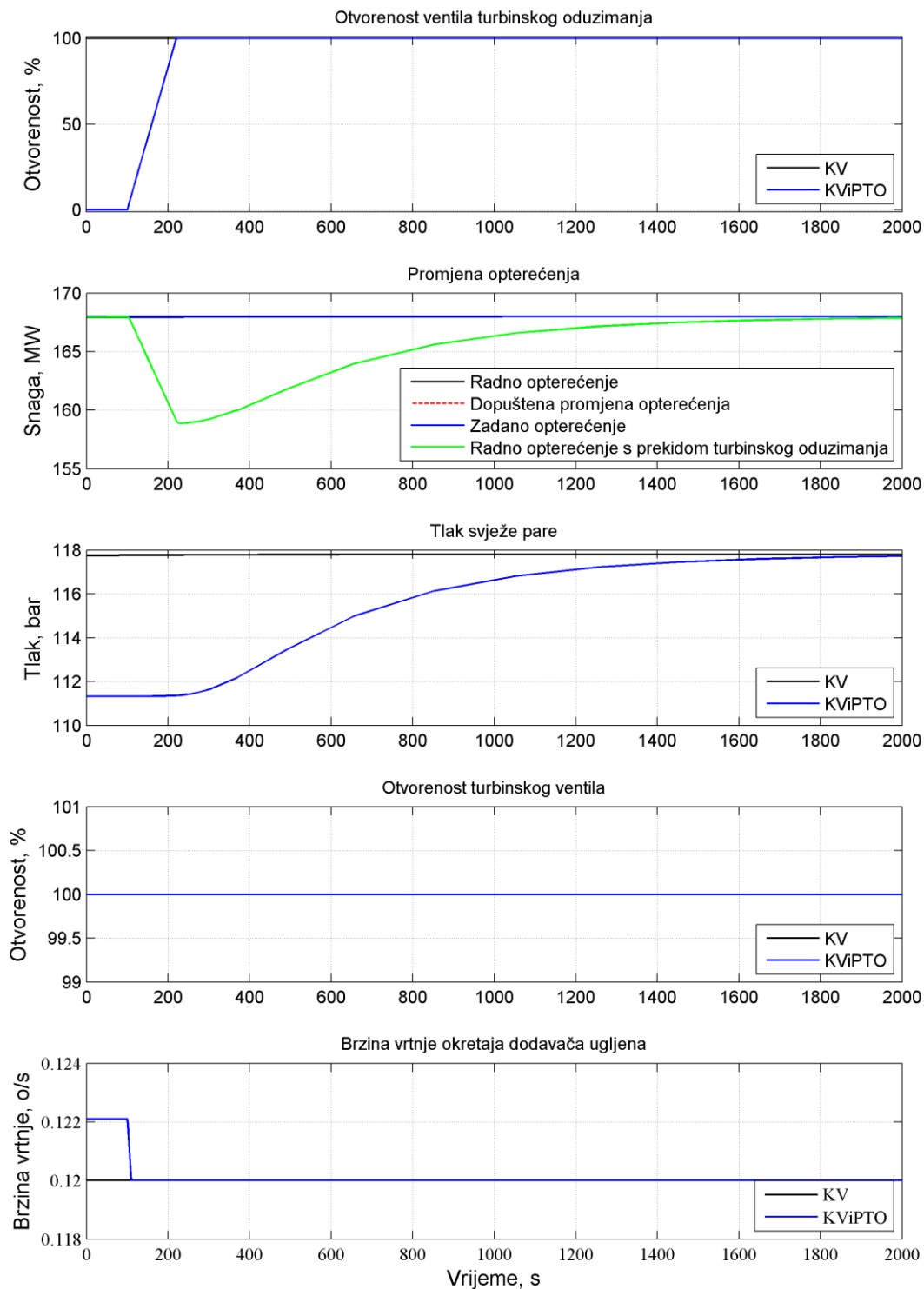
Usporedba promjene snage za samostalno koordinirano vođenje i koordinirano vođenje s prekidom turbinskog oduzimanja prikazana je na dijagramu na slici 25. Za potrebe usporedbe zatvara se ventil prvog visokotlačnog zagrijača napojne vode, a zatvaranje je simulirano u trajanju od 15 sekundi. Iz usporedbe se vidi kako povećanje protoka pare kroz turbinu uzrokuje dvostruko dulji skok snage na račun pada tlaka koji se sporije odvijao u odnosu na samostalno koordinirano vođenje i ublažava pad snage između početnog skoka i dugoročnog povećanja snage. Iz dijagrama broja vrtnje okretaja dodavača ugljena može se zaključiti da prekid turbinskog oduzimanja rezultira većom potrošnjom ugljena, a time i manjom termalnom iskoristivosti.

Na dijagramu na slici 26 prikazan je utjecaj ponovnog otvaranje ventila turbinskog oduzimanja na snagu, tlak, otvorenost turbinskog ventila i broj vrtnje okretaja dodavača ugljena. Za usporedbu koristi se samostalno koordinirano vođenje kao i u prethodnoj usporedbi. Za potrebe usporedbe otvaranje ventila traje 120 sekundi. Iz dijagrama se vidi da je gradijent pada opterećenja bloka direktno ovisan o brzini promjene otvorenosti ventila turbinskog oduzimanja. Daljnji rast opterećenja rezultat je povećanja tlaka u kolektoru generatora pare koji je pak posljedica povećanja količine isparene napojne vode zbog rasta temperature napojne vode na ulazu. Broj vrtnje okretaja dodavača ugljena, a time i maseni tok ugljena se smanjio jer više nije potrebno napojnoj vodi predati toliko topline.





Slika 25. Usporedba promjene opterećenja pri samostalnom koordiniranom vođenju i koordiniranom vođenju s prekidom turbinskog oduzimanja

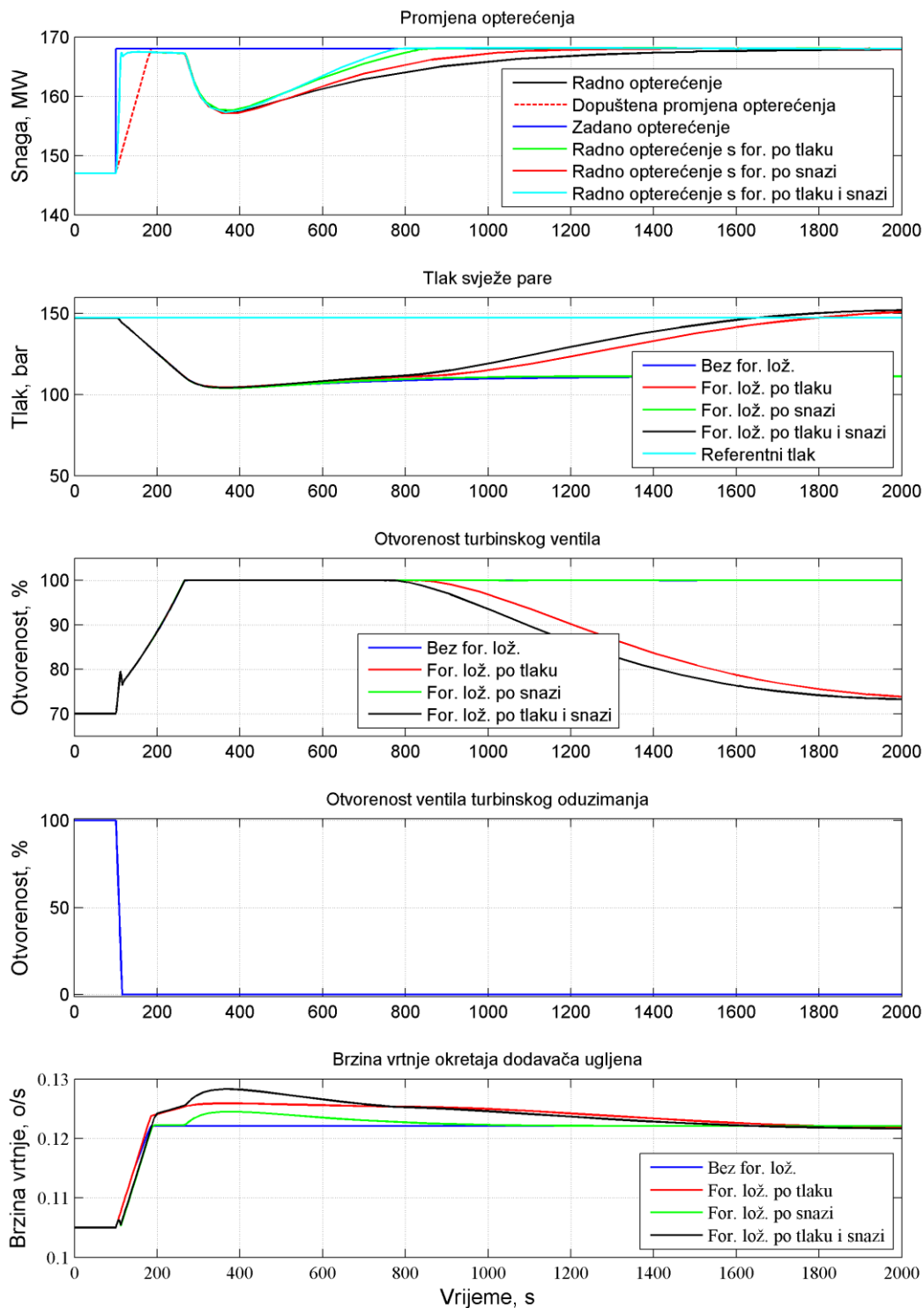


Slika 26. Utjecaj ponovnog otvaranje ventila turbinskog oduzimanja

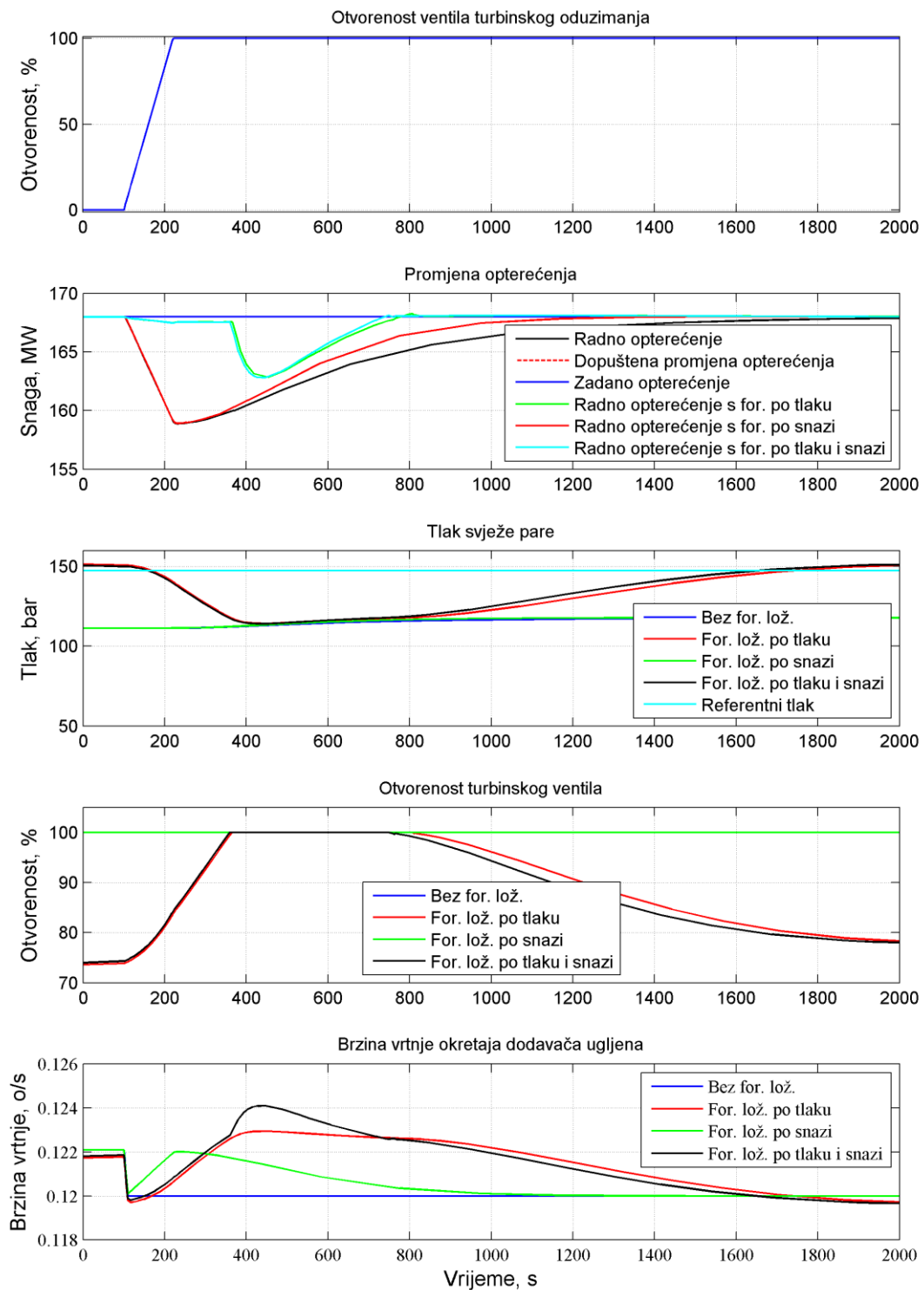
### **6.3.1. Koordinirano vođenje i prekid turbinskog oduzimanja s različitim uzrocima forsiranja loženja**

S ciljem ublažavanja pada opterećenja nakon početnog skoka u koordinirano vođenje s turbinskim oduzimanjem dodan je utjecaj forsiranja loženja na promjenu opterećenja bloka. Iz dijagrama na slici 27 se može zaključiti da, u ovom slučaju, opterećenje padne na istu razinu kao i u prethodnom slučaju, ali se zbog forsiranja loženja brže ostvari zadano opterećenje. Forsiranjem loženja po tlaku osigurava se punjenje akumulacije. Zatvaranje ventila turbinskog oduzimanja je isto kao i u prethodnom slučaju.

Na dijagramima na slici 28 prikazan je utjecaj ponovnog otvaranje ventila turbinskog oduzimanja na snagu, tlak, otvorenost turbinskog ventila i broj vrtnje okretaja dodavača ugljena. Za usporedbu se koristi samostalno koordinirano vođenje. Otvaranje ventila turbinskog oduzimanja traje 120 sekundi. Iz dijagrama se vidi da je gradijent pada opterećenja bloka u slučaju forsiranja po snazi ili bez forsiranja direktno ovisan o brzini promjene otvorenosti ventila turbinskog oduzimanja. U slučaju forsiranja po tlaku i po tlaku i snazi iskorišten je akumulirani tlak kako bi se opterećenje održalo na približno jednakoj razini čime se ublažava pad opterećenja. Pad opterećenja se ne može izbjeći pošto akumulacija nije dovoljno velika, ali se u ovom slučaju zadano opterećenje brže uspostavi. Forsiranjem loženja po tlaku se osigurava punjenje akumulacije nakon što se uspostavi zadano opterećenje kako bi blok mogao brzo odgovoriti na daljnje promjene opterećenja.



Slika 27. Utjecaj forsiranja loženja na promjenu promatranih veličina pri koordiniranom vođenju i prekidom turbinskog oduzimanja



Slika 28. Utjecaj ponovnog otvaranje ventila turbinskog oduzimanja na promjenu promatranih veličina

## 7. Pogon bloka u karakterističnim danima

U ovom poglavlju opisana je primjena modela na pogon termoenergetskog bloka u danima s većim i manjim udjelom proizvodnje iz obnovljivih izvora energije te utjecaj učestalosti promjena na dinamiku promjene opterećenja, dinamiku promjene tlaka, dinamiku otvaranja turbinskog ventila i dinamiku promjene broja vrtnje okretaja dodavača ugljena.

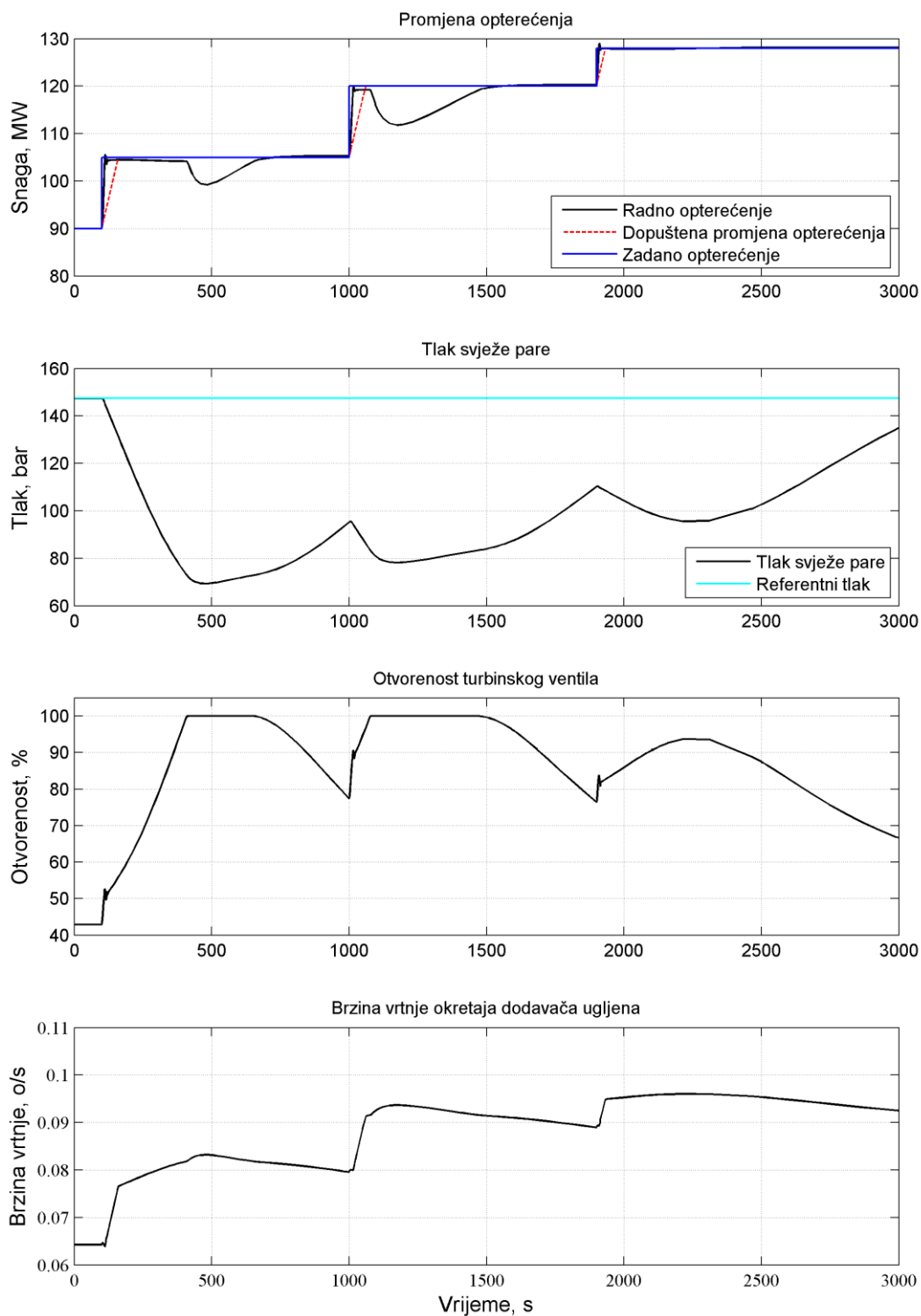
### 7.1. Rad u ljetnom razdoblju

Budući da je ovo period godine kada na ovim područjima ima puno sunčanih dana, udio proizvedene energije iz vjetra i Sunca raste te se javlja češća potreba za promjenom snage. Za potrebe opisa, opterećenje bloka radi blizu minimalne snage prema koordiniranom načinu vođenja s forsiranjem po tlaku i snazi kako bismo brzo povećali opterećenje bloka.

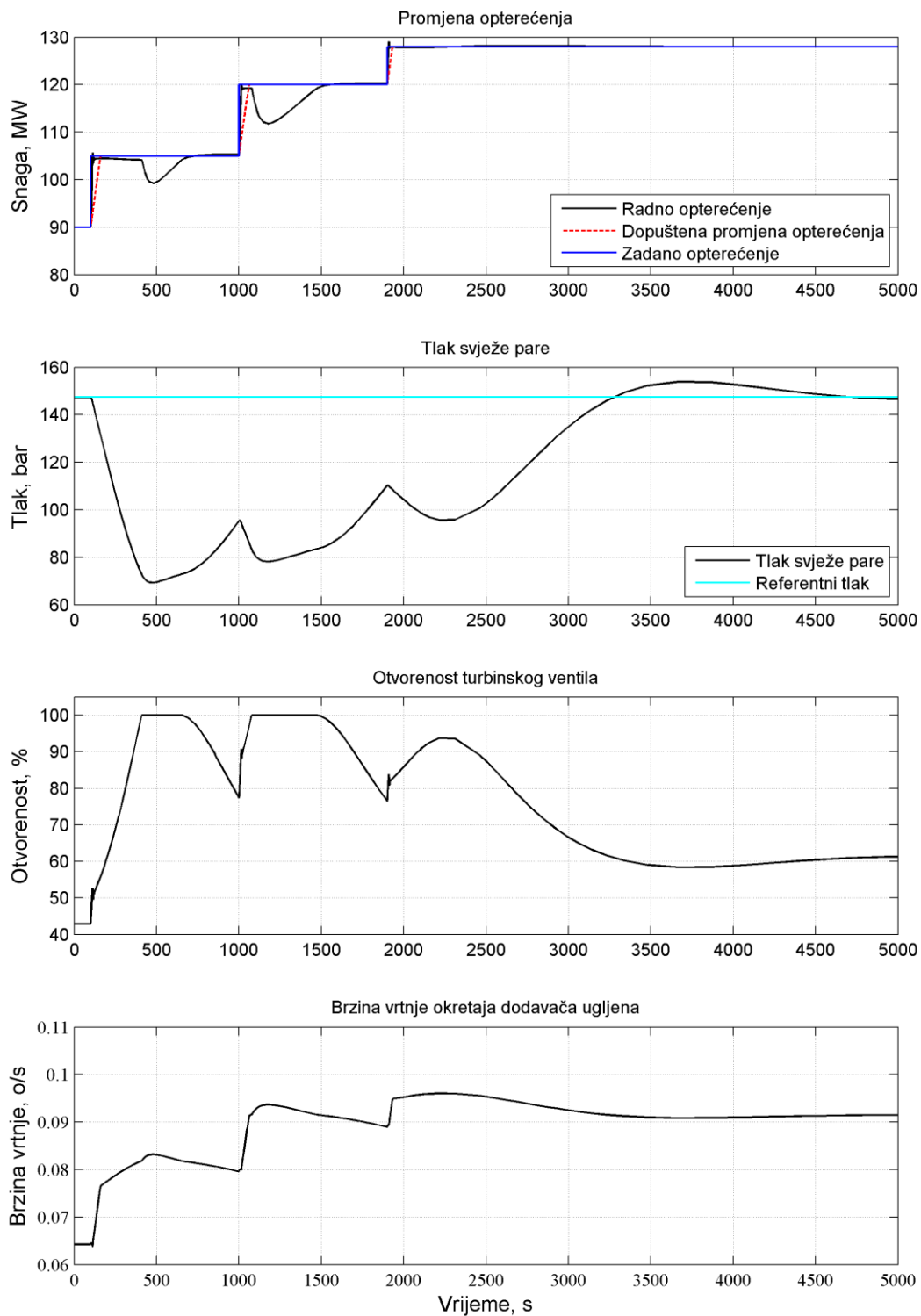
Za prvi slučaj prikazan na dijagramima na slici 29 uzete su tri promjene povećanja opterećenja, razmaka 900 sekundi ili 15 minuta. Prve dvije promjene su iznosa 15 MW, a treća je iznosa 8 MW. U prva dva skoka vidi se pad opterećenja nakon početnog skoka koji je nastao nakon potpunog otvaranja turbinskog ventila i pražnjenja akumulacije. Zbog početnog tlaka, pad opterećenja nakon prve promjene je blaži od pada nakon druge promjene. Kod treće promjene opterećenja, blok je u mogućnosti dati brzu promjenu opterećenja bez naknadnog pada. Ovo je posljedica dovoljno male promjene opterećenja i dovoljne akumulacije tlaka. Na slici 30 prikazan je potrebiti period ponovne uspostave stacionarnog ponašanja promatranih veličina koji u ovom slučaju iznosi 3100 sekundi ili 52 minute.

Za drugi slučaj prikazan na dijagramima na slici 31 uzete su tri promjene opterećenja, međusobnog razmaka 1200 i 600 sekundi ili 20 i 10 minuta. Prva promjena iznosi 18 MW, druga 12 MW, a treća 8 MW. Nakon prve promjene opterećenja, opterećenje traje kraće te postigne veći pad u usporedbi s prvim slučajem. Ovakva promjena je posljedica veće promjene opterećenja. U razmaku između prve i druge promjene opterećenja, tlak pare u kolektoru narastao je s 48% na 85% referentnog tlaka. Druga promjena opterećenja se dulje drži zbog akumuliranog tlaka, ali se ni u ovom slučaju ne može izbjeći pad opterećenja. U razmaku između druge i treće promjene rast tlaka pare u kolektoru nije bio dovoljan niti da pokrije početni skok. Na istoj slici prikazan je utjecaj dodavanja prekida turbinskog oduzimanja u vođenju bloka. Iz slike se može zaključiti da prekid turbinskog oduzimanja ublažuje padove opterećenja kod prve i druge promjene opterećenja, a kod treće promjene malo skraćuje potrebno razdoblje uspostave zadanog opterećenja.

Iz predstavljenog se može zaključiti da je blok u ovom slučaju dobro prilagođen za brze promjene opterećenja iznosa do 8 MW za razmak između trenutnog i prethodnog opterećenja većeg od 15 minuta, osrednje ako promjena opterećenja iznosi više od 15 MW, a loše prilagođen za razmak između trenutne i prethodne promjene manji od 10 minuta.

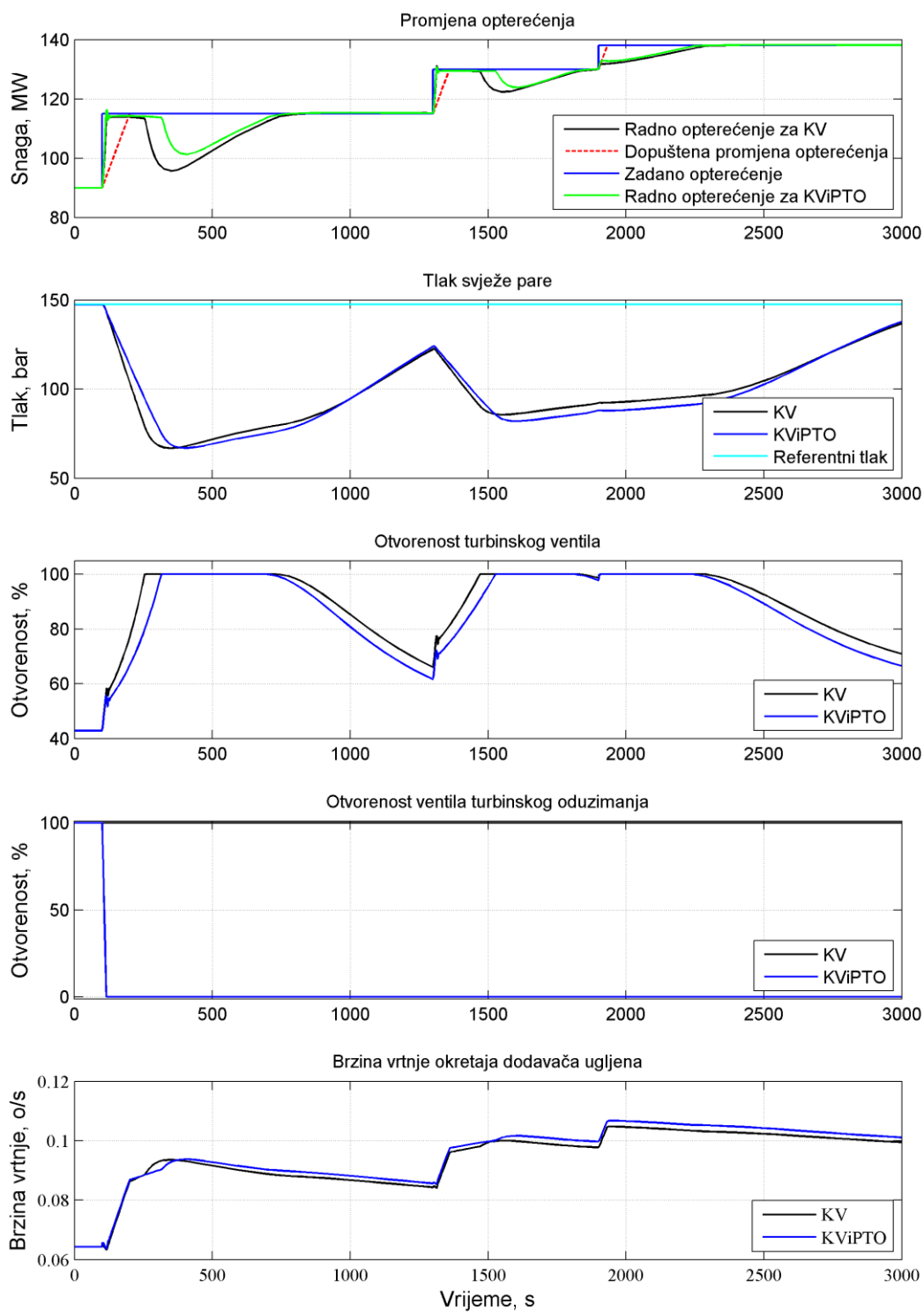


Slika 29. Promjena opterećenja prvog slučaja u ljetnom razdoblju



Slika 30. Promjena opterećenja prvog slučaja u ljetnom razdoblju s razdobljem stabilizacije





Slika 31. Promjena opterećenja drugog slučaja u ljetnom razdoblju

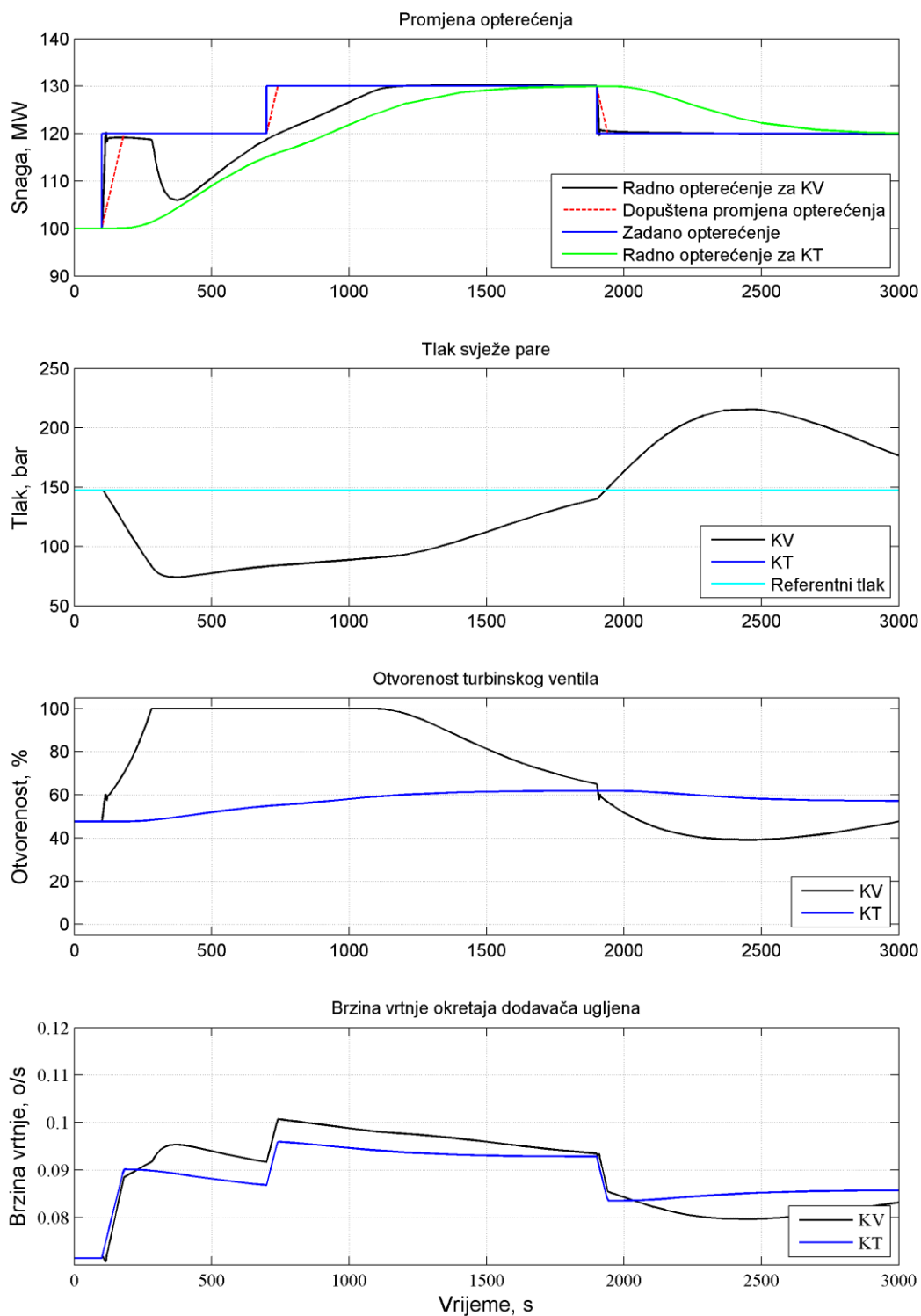
Za treći slučaj prikazan na dijagramima na slici 32 uspoređeno je koordinirano vođenje s forsiranjem po tlaku i snazi i vođenje s konstantnim tlakom s forsiranjem po snazi za tri uzastopne promjene opterećenja. Prva promjena opterećenja iznosi 20 MW, druga 10 MW, a treća -10 MW. Razmak između prve i druge je 600 sekundi ili 10 minuta, a između druge i treće 1200 sekundi ili 20 minuta. Iz dijagrama se vidi prednost koordiniranog vođenja koje je u stanju brzo promijeniti opterećenje bloka, a više izvora signala forsiranje rezultira bržim postizanjem zadanog opterećenja. Nedostatak ovakvog vođenja vidi se kod smanjivanja opterećenja pri čemu, zbog brzog djelovanja turbinskog ventila, tlak pare u kolektoru naglo raste zbog čega može doći do prekoračenja dopuštenih napreznja unutar elemenata generatora pare. Vođenje s konstantnim tlakom nije pogodno za brze promjene opterećenja, ali je zato sigurnije za pogon bloka.

Iz predstavljenog se može zaključiti da je koordinirano vođenje bolje ako želimo ostvariti brzi rast opterećenja, a za smanjivanje opterećenje se mora ili koristi vođenje s konstantnim tlakom ili se tlak mora držati na dovoljno niskoj razini pri kojoj brzo zatvaranje turbinskog ventila neće uzrokovati prelaženje dopuštenog tlaka pare u kolektoru.

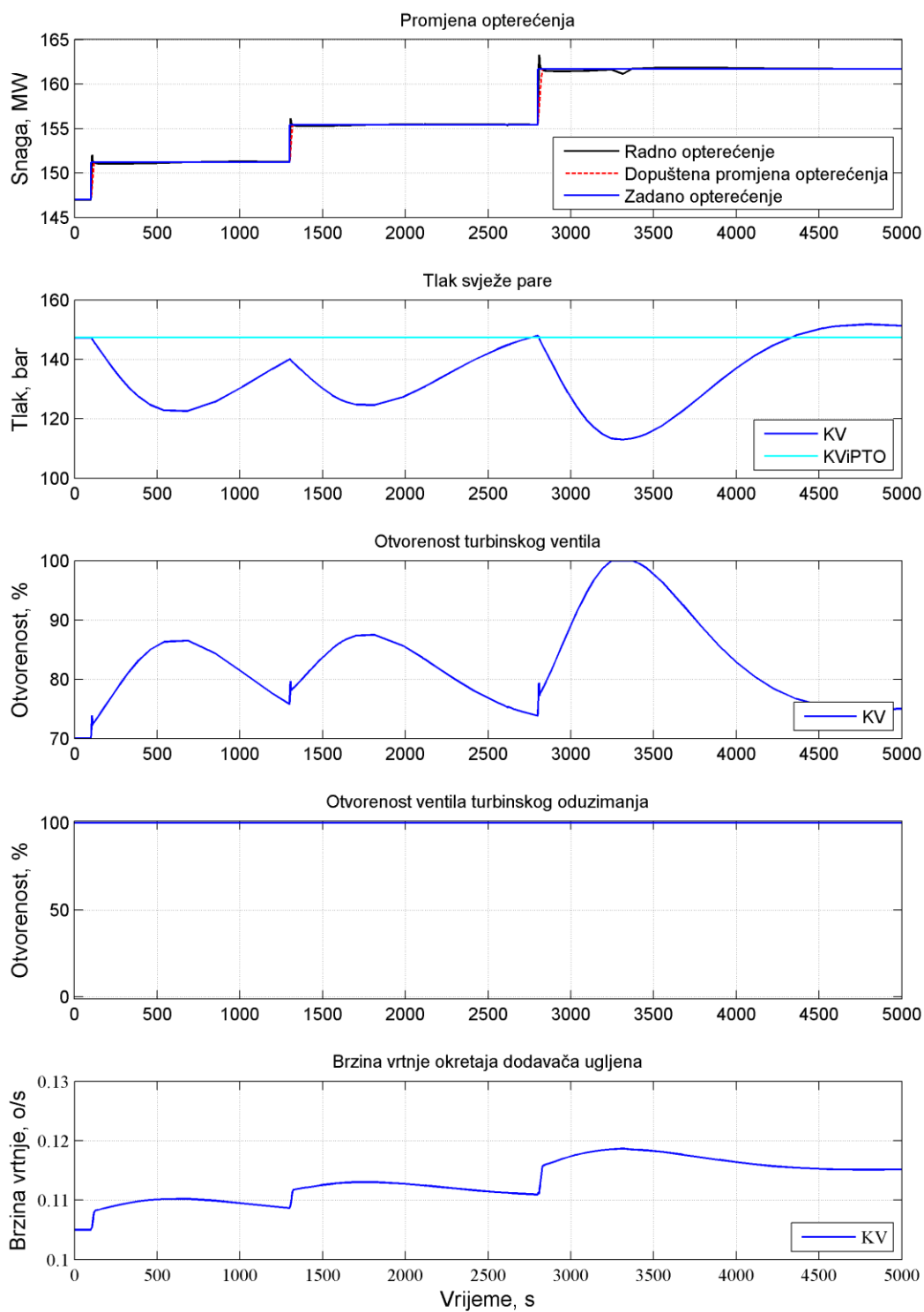
## **7.2. Rad u zimskom razdoblju**

Budući da je ovo period godine kada na ovim područjima nema puno sunčanih dana udio proizvedene energije iz vjetra i Sunca je manji nego ljeti te su rjeđe potrebe za promjenom snage. Za potrebe opisa, opterećenje bloka radi na sredini raspona opterećenja prema koordiniranom načinu vođenja s forsiranjem po tlaku i snazi kako bi brzo povećali opterećenje bloka.

Slučaj u zimskom razdoblju prikazan je na dijagramima na slici 33. Uzete su tri promjene opterećenja, razmaka 1200 i 1500 sekundi ili 20 i 25 minuta. Prva i druga promjena iznosi 4 MW, a treća 6 MW. Iz dijagrama promjene opterećenja vidi se da blok brzo reagira na promjenu zadanog opterećenja te da su potrebni skokovi i razmaci dovoljni kako bi se izbjegao pad opterećenja.



Slika 32. Promjena opterećenja u trećem slučaju u ljetnom razdoblju



Slika 33. Promjena opterećenja u zimskom razdoblju

## 8. Tehno-ekonomska analiza osjetljivosti za slučaj Plomina II

Tehno-ekonomska analiza provedena je kako bi se utvrdilo za koje cijene otkupa električne energije i za koje iznose naknada pružanja pomoćnih usluga sekundarne regulacije frekvencije i snage razmjene i tercijarne regulacije za uravnoteženje sustava se isplati pružati takve usluge. Analiza se temelji na usporedbi dvaju slučajeva svedenih na jedan sat rada. U obzir se uzima dobit od prodane električne energije i trošak proizvodnje te energije. Pretpostavljeno je da se sva proizvedena električna energija proda. Trošak proizvodnje se sastoji samo od varijabilnog troška određenog cijenom i potrošnjom goriva. U prvom slučaju blok radi pri nominalnom opterećenju i proizvodi 210 MWh, u drugom slučaju blok radi pri 70% nominalnog opterećenja i proizvodi 147 MWh. U tablici 3 prikazana je potrošnja ugljena za oba slučaja.

Tabela 3. Potrošnja ugljena

| Proizvedena električna energija [MWh] | Iskoristivost [%] | Potrošnja ugljena [t/h] |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| 210                                   | 37                | 85,14                   |
| 147                                   | 34,75             | 63,45                   |

Kako bi se odredio prihod od prodane električne energije, pretpostavlja se da cijena otkupa iznosi 80, 60 i 40 €/MWh. U tablici 4 prikazan je prihod.

Tabela 4. Prihod od proizvedene električne energije

| Cijena električne energije na tržištu [€/MWh] | Proizvedena električna energija [MWh] |       |       |      |
|---|---------------------------------------|-------|-------|------|
|   |                                       | 80    | 60    | 40   |
|   | 210                                   | 16800 | 12600 | 8400 |
|   | 147                                   | 11760 | 8820  | 5880 |

Kako bi se odredio trošak proizvodnje električne energije, pretpostavlja se da cijena ugljena iznosi 65, 60 i 55 €/t. U tablici 5 prikazan je trošak.

Tabela 5. Trošak proizvodnje

| Cijena ugljena [€/t] | Potrošnja ugljena [t/h] |         |         |         |
|----------------------|-------------------------|---------|---------|---------|
|                      |                         | 65      | 60      | 55      |
|                      | 85,14                   | 5533,78 | 5108,11 | 4682,43 |
|                      | 63,45                   | 4124,46 | 3807,19 | 3489,93 |

Razlikom prihoda i troška ostvaruje se dobit u oba slučaja prikazana u tablici 6.

Tabela 6. Dobit jednog sata pogona

|                      | Otkupna cijena električne energije [€/MWh] | Količina proizvedene energije po satu [MWh] |          |          |          |
|----------------------|--|---|----------|----------|----------|
| Cijena ugljena [€/t] |  |   | 65       | 60       | 55       |
|                      | 80   | 210   | 11266,22 | 11691,89 | 12117,57 |
|                      |  | 147   | 7635,54  | 7952,81  | 8270,07  |
|                      | 60   | 210   | 7066,22  | 7491,89  | 7917,57  |
|                      |  | 147   | 4695,54  | 5012,81  | 5330,07  |
|                      | 40   | 210   | 2866,22  | 3291,89  | 3717,57  |
|                      |  | 147   | 1755,54  | 2072,81  | 2390,07  |

Potreban iznos naknade za pružanje pomoćne usluge sekundarne regulacije odredi se jednadžbom (33).

$$C_{sek} = \frac{\text{Raz. dobiti} - \frac{1}{3} * \text{Raz. proiz. ele. ene.} * \text{Cijena ele. ene.} * (1,2 - 0,8)}{2 * \text{Razlika proiz. ele. ene.}} \quad (33)$$

Pretpostavljeno je da blok trećinu vremena radi s 30% većim opterećenjem i trećinu vremena s 30% nižim opterećenjem zbog čega se u jednadžbi množi s 1/3. Pretpostavljeno je i da se električna energija otkupljuje pri 20% većoj cijeni kada bloka radi s većim opterećenjem i 20% nižoj cijeni kada bloka radi s nižim opterećenjem. U tablici 7 prikazani su rezultati.

Tabela 7. Potrebna naknada za isplativost pružanja usluge sekundarne regulacije

|                      | Otkupna cijena električne energije [€/MWh] |       |       |       |
|----------------------|--|-------|-------|-------|
| Cijena ugljena [€/t] |  | 65    | 60    | 55    |
|                      | 80   | 23,48 | 24,34 | 25,20 |
|                      | 60   | 14,81 | 15,68 | 16,54 |
|                      | 40   | 6,15  | 7,01  | 7,87  |

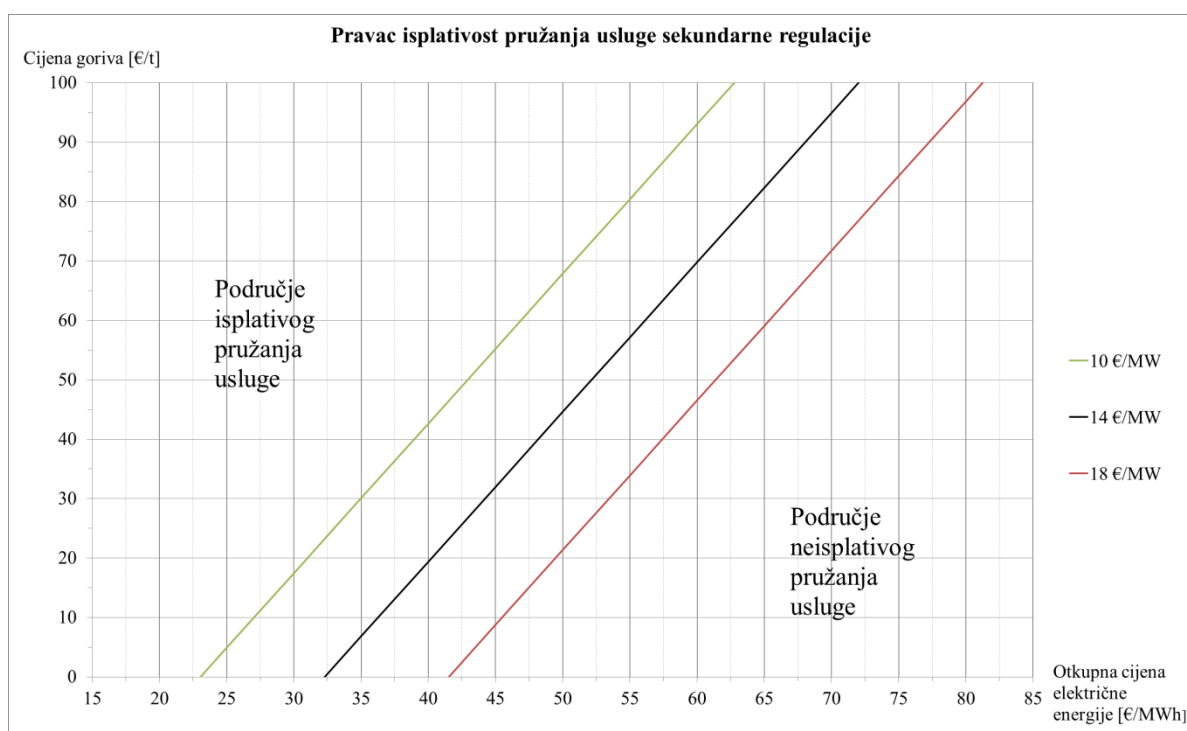
Potreban iznos naknade za pružanje pomoćne usluge tercijarne regulacije odredi se jednadžbom (34). Rezultati su prikazani u tablici 8.

$$C_{ter} = \frac{\text{Razlika dobiti}}{\text{Proizvedena energija u 2. slučaju}} \quad (34)$$

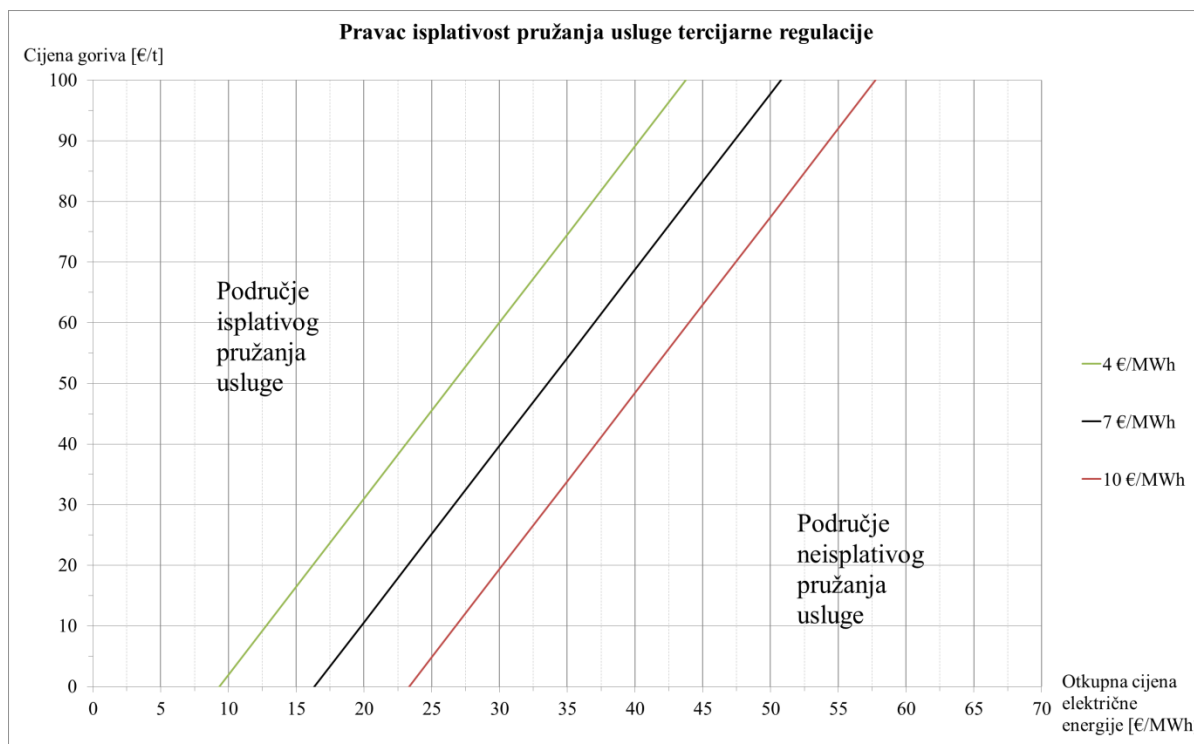
Tabela 8. Potrebna naknada za isplativost pružanja usluge tercijarne regulacije

|                      | Otkupna cijena električne energije [€/MWh] |       |       |       |
|----------------------|--|-------|-------|-------|
| Cijena ugljena [€/t] |  | 65    | 60    | 55    |
|                      | 80   | 24,70 | 25,44 | 26,17 |
|                      | 60   | 16,13 | 16,86 | 17,60 |
|                      | 40   | 7,56  | 8,29  | 9,03  |

Kako bi se pružio bolji uvid u prikazane rezultate analize, na slici 34 i slici 35 su prikazani pravci jedinične cijene pružanja usluge. Ako se točka presijecanja pravca otkupne cijene električne energije i pravca cijene goriva nalazi lijevo od pravca određenog jediničnom cijenom, isplativije je pružati uslugu, tj. zarada je veća nego u slučaju rada pri nominalnom opterećenju.



Slika 34. Isplativost pružanja usluge sekundarne regulacije ovisno o cijeni goriva, otkupnoj cijeni električne energije i nadoknadi



Slika 35. Isplativost pružanja usluge tercijarne regulacije ovisno o cijeni goriva, otkupnoj cijeni električne energije i nadoknadi

Ako se uzme da naknada za pružanje sekundarne regulacije iznosi 14,23 €/MW, a naknada za pružanje tercijarne regulacije iznosi 6,61 €/MWh, pružanje pomoćnih usluga termoelektrani Plomin se isplati jedino u slučajevima kada je otkupna cijena električne energije dovoljno niska ili kada je cijena goriva dovoljno visoka.



## Zaključak

Ratificiranjem Pariškog sporazuma, dekarbonizacija energetskeg sektora postala je prioritet mnogih država. Poboljšavanje fleksibilnosti elektroenergetskog sustava je nužan uvjet povećanja udjela obnovljivih izvora energije. Postojeća konvencionalna termoenergetska postrojenja mogu pridonijeti fleksibilnosti elektroenergetskog sustava kroz ciljane retrofite. Starost i ograničena fleksibilnost postojećih termoenergetskih postrojenja glavni su pokretači modernizacije postrojenja. Operatori termoenergetskih postrojenja namijenjenih radu s konstantnim opterećenjem mogu značajno profitirati povećavanjem iskoristivosti i fleksibilnosti tih postrojenja.

Na isplativost retrofita značajno utječe dostupnost opcija naknade fleksibilnosti. Bez postojanja takvih opcija, organizacija tržišta sputava investicije u poboljšavanje fleksibilnosti. S rastom kapaciteta obnovljivih izvora energije, tržišta je potrebno organizirati kako bi se poticala ugradnja retrofita za poboljšanje fleksibilnosti. Specifične koristi retrofita postrojenja pod utjecajem su dostupnosti drugih mogućnosti fleksibilnosti kao što su fleksibilnost proizvodnje iz drugih izvora (plinske termoelektrane, nuklearne elektrane, hidroelektrane...), potrošnje i prekogranične trgovine električnom energijom. Dostupnost ovih opcija značajno varira između energetskeg sustava zbog strukturnih, ekonomskih i geografskih čimbenika.

Doprinosom smanjenju potrošnje ugljena poboljšavanjem fleksibilnosti i iskoristivosti produjila bi se trajnost trenutnih ugljenokopa i smanjila potreba za novim izvorima. Dugotrajno gledano, dekarbonizacija će dovesti do isključivanja mnogih konvencionalnih termoenergetskih postrojenja pogonjenih ugljenom.

Utjecaj, a time i isplativost, retrofita na neko termoenergetsko postrojenje moguće je odrediti korištenjem matematičkog modela. Složenost takvog modela značajno ovisi o vrsti retrofita i razini pojednostavljenja uzetih u obzir. Matematičkim modelom bloka moguće je dobro prikazati promjene raznih veličina unutar termoenergetskog postrojenja, a kako bismo smanjili grešku između stvarne vrijednosti i vrijednosti dobivene modelom potrebno je dobro poznavanje sustava vođenja i uzročno-posljedičnih veza.

Strategijom, načinom i pravilnim prilagođavanjem vođenja bloka moguće je značajno pridonijeti brzini promjene opterećenja i sigurnosti rada. Prilagođenost fleksibilnog rada bloka potrebama elektroenergetskog sustava najviše ovisi o veličinama i učestalostima promjene opterećenja koji se pojavljuju u sustavu.

Isplativost pružanja pomoćnih usluga najviše ovisi o poticajima koji se nude unutar elektroenergetskog sustava. Kako bi se odredila isplativost takvog rada potrebno je poznavati dugoročno kretanje otkupnih cijena električne energije i cijena goriva pošto se usluge ugovaraju na razdoblje od minimalno jedne godine.

## Literatura

- [1] Agora Energiewende (2017): Flexibility in thermal power plants – With a focus on existing coal-fired power plants
- [2] Henderson C.: Increasing the flexibility of coal-fired power plants, IEA Clean Coal Center, 2014.
- [3] Termoelektrana Plomin 2, Končar – inženjering za energetiku i transport d.d., 2004.
- [4] Zahtjev za utvrđivanje objedinjenih uvjeta zaštite okoliša za postojeće postrojenje TE Plomin 2, HEP-Proizvodnja d.o.o., 2013.
- [5] Šerman N., Lončar D.: Utjecaj tehnološke opreme i strategije vođenja na dinamičke performance termoenergetskog bloka, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2009.
- [6] Franković V.: Upravljanje mlinovima ugljena u termoelektranama na ugljen, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2011.
- [7] Niemczyk, P. (2010). Model-based Fuel Flow Control for Fossil-fired Power Plants
- [8] Pradeebha P., Pappa N., Vasanthi D.: Modeling and Control of Coal Mill, Department of Instrumentation Engineering, Madras Institute of Technology, Anna University, India, 2013.
- [9] Pomoćne usluge, angažiranost elektrana i posljedični troškovi u sustavu Republike Hrvatske, HEP-Proizvodnja d.o.o., 2015.

## Prilog

### 1. Korištene vrijednosti u modelu

% Karakteristike bloka

```
Pzad1=0.6*210;  
Pzad2=0.9*210;  
Ts=60; %Vremenska konstanta u modelu promjene tlaka svježe pare -  
predstavlja volumen mase pare akumulirane u cjevovodima bloka  
Ks=1.67546; %Pojačanje u modelu promjene tlaka svježe pare  
Khp=0.26; %Udio visokotlačnog dijela u snazi turbine  
Thp=0.27; %Vremenska konstanta visokotlačnog dijela turbine  
Kmp=0.295; %Udio srednjetačnog dijela u snazi turbine  
Tmp=2; %Vremenska konstanta međupregijača i srednjetačnog dijela  
turbine  
Klp=1-Khp-Kmp; %Udio niskotlačnog dijela u snazi turbine  
Tlp=3; %Vremenska konstanta niskotlačnog dijela turbine  
Tv=1; %Vremenska konstanta servomotora regulacijskog ventila  
p=147.4; % bar  
eta=0.31686;
```

% Karakteristike zagrijača napojne vode

```
Kvtz1=0.99404;  
Tvtz1=10;  
x=0.076924;  
Kvtz2=0.99824;  
Tvtz2=10;  
y1=0.049129;  
Kvtz3=0.9935;  
Tvtz3=10;  
y2=0.03864;  
Kntz1=0.99366;  
Tntz1=10;  
y3=0.054577;  
Kntz2=0.99371;  
Tntz2=10;  
z1=0.11438;  
Kntz3=0.99375;  
Tntz3=10;  
z2=0.12027;  
Kntz4=0.99404;  
Tntz4=10;  
z3=0.04046;
```

% Karakteristike mlina ugljena

```
%win=22.22222; % kg/s Maseni tok ugljena u mlin  
nd=1.5; % s^-1 Okretaji dodavača ugljena pri nominalnom opterećenju  
V=0.021164*10; % m^3 Volumen košare  
rou=700; % kg/m^3 Prosječna gustoća ugljena  
w=0.25; % rad/s Kutna brzina mlina  $0 < w/k < 1$   
E0=39; % %  
fim=15; % %  
thtt=280; % °C
```

```
thta=20; % °C
thth=20; % °C
thtoutzad=85; % °C
cair=1.12; % KJ/kgK
cw=4.180; % KJ/kgK
cc=1.3; % KJ/kgK
Lv=2260; % KJ/kg
Ppa=0.2; % bar Diferencijal tlaka
k1=0.03; % 1/s
k2=0.02; % 1/kg
k3=0.04; % 1/kg
k4=0.9; % 1/s
k5=0.002; % 1/kg
k6=2.5; % rad/s
k7=3.7; %
k8=0.2; % 1/kg
k9=0.4; % 1/s
k10=8; % W
k11=4e3; % °C/J

% Karakteristike goriva

c=0.4111;
h=0.0276;
s=0.0041;
o=0.0989;
n=0.0122;
w=0.0598;
a=0.03863;
O2min=1.867*c+5.6*h+0.7*s-0.7*o; % m^3/kg
lambda=1;
Vzraka=lambda*O2min/0.21;
rozraka=1; % kg/m^3
mzraka=Vzraka*rozraka;

% Karakteristike regulatora
% Regulacija ventila po tlaku P=1,I=0.1
% Regulacija ventila po sanzi P=0.02,I=0.0125
% Forsiranje po snazi P1=0.25
% Forsiranje po tlaku P2=0.1
% Regulacija temperature u mlinu P=1,I=0.001
```

### 2. Model u Simulinku

