

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Aleksandra Lj. Marjanović

UPRAVLJANJE TEMPERATURNOM  
RASPODELOM U KOTLOVIMA  
TERMOENERGETSKIH SISTEMA NA BAZI  
EXTREMUM SEEKING STRATEGIJE

doktorska disertacija

Beograd 2017.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Aleksandra Lj. Marjanović

THERMAL POWER PLANT BOILER  
TEMPERATURE DISTRIBUTION CONTROL  
BASED ON  
EXTREMUM SEEKING STRATEGY

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017.

Mentor:

dr ŽELJKO ĐUROVIĆ, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr BRANKO KOVAČEVIĆ, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr MIROSLAV KRSTIĆ, redovni profesor  
University of California – San Diego

dr GORAN KVAŠČEV, docent  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr PREDRAG TADIĆ, docent  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

**Naslov teze:** Upravljanje temperaturnom raspodelom u kotlovima termoenergetskih sistema na bazi ekstremum seeking strategije

**Rezime:**

Termoelektrane predstavljaju većinske proizvođače električne energije u svetu, što za posledicu ima stalne pokušaje unapređenja u vidu smanjenja štetnih uticaja na životnu sredinu uz povećanje efikasnosti, raspoloživosti i prihoda. Pomenuti efekti su u direktnoj vezi sa procesom sagorevanja, zbog čega su upravljanje i optimizacija ovog procesa od suštinskog značaja. Ove potrebe su često ograničene mogućnostima nadgledanja procesa sagorevanja. Obično se za sagledavanje ovog procesa analizira neko od dostupnih merenja dobijenih iz hemijskih analizatora sadržaja ugljen-monoksida ili kiseonika u dimnim gasovima, što je korisno za ocenu kvaliteta sagorevanja fosilnih goriva. Međutim, ovo su globalni pokazatelji i ne govore ništa o lokalnoj raspodeli temperatura unutar ložišta.

Analizirani problem je izuzetno kompleksan sa dva aspekta. Prvi je vezan za nepostojanje egzaktnog i brzog modela, pogodnog za korišćenje u realnom vremenu. Ovo je dodatna prepreka u projektovanju adekvatnog kontrolnog algoritma, pa se trajna supervizija plamena u cilju razvijanja i unapređivanja upravljačkih algoritama čini kao validna alternativa. Drugi značajan problem jeste nepostojanje opšte prihvaćenog kvantitativnog kriterijuma performanse koji će biti mera kvaliteta temperaturne raspodele u ložištu. Dodatno, detaljna analiza performansi zavisi i od tačnosti usvojenog modela i rezolucije sa kojom se radi. Velika preciznost modela zahteva duže vreme simuliranja različitih procesa u modelu, što najčešće nije od koristi za upotrebu u realnom vremenu, tj. u onim situacijama u kojima je potrebno trenutno reagovati.

Osnovna ideja disertacije jeste poboljšanje regulacionog ciklusa praćenjem temperature u samom ložištu. Brojni eksperimenti su potvrdili da se procenom raspodele temperature u kotlu stiče jasan uvid u rad i kvalitet procesa sagorevanja, a samim tim i sistema u celosti. Lokalno merenje temperature u kotlu i estimiranje temperaturne raspodele je vrlo kompleksan postupak, zbog nepristupačnosti pri instalaciji odgovarajućih senzorskih sistema (pirometarskog sistema, termoparova), velikog opsega temperatura koje se ostvaruju u kotlu, kao i varijacija u samom opterećenju pod kojim kotao radi. Na raspodelu temperature se može uticati na različite načine: kontrolom protoka vazduha, kvalitetom uglja, procesom odšljakivanja i drugo, međutim najveće mogućnosti nudi regulacija broja aktivnih mlinova i njihovog učešća. Korekcija učešća mlinova se do sada uglavnom koristila za lokalne potrebe (smanjenje opterećenja mlina ukoliko se primeti da dolazi do preopterećenosti karakterisane povećanjem temperature aerosmeše), međutim, sistematične analize njenog uticaja na raspodelu temperature, a samim tim i na celokupni proces

sagorevanja, u dostupnoj literaturi nije bilo. Upravljanje temperaturom u ložištu je postupak koji se može iskoristiti za unapređenje performansi kotla, uključujući i bezbednost i pouzdanost. Ukoliko to nije ispunjeno, može doći do raznih neželjenih ishoda: povećanog taloženja na zidovima pregrejača, ekonomajzera, zagrejača vazduha i drugih podsistema kotla, ubrzane korozije pregrejača i zagrejača, pregrevanja cevi konvekcijom, ali i povećane temperature dimnih gasova na izlazu iz kotla, koja dovodi do gubitaka toplote i smanjenja efikasnosti. Sa finansijskog aspekta, rešenje ovog upravljačkog izazova može doneti višestruke koristi. Prvenstveno, adekvatnim upravljanjem se produžava radni vek komponenti kotla, što direktno utiče na smanjenje troškova remonta. Dodatno, održavanjem temperatura na ulazu u pregrejače u željenim granicama, omogućava se unapređenje procesa ubrizgavanja, a sa time i značajno smanjenje potrebnih vodenih resursa i gubitaka energije koji se tom prilikom ostvaruju. Kotao u termoelektranama je vrlo složen i distribuiran sistem sa velikim brojem ulaza i izlaza. Zbog toga se za njegovu regulaciju preporučuju upravljačke strukture koje se ne zasnivaju na modelu sistema. Jedna od takvih struktura je *extremum seeking* (ES) upravljanje koje ne zahteva eksplicitno poznavanje ulazno-izlazne karakteristike sistema, već samo postojanje ekstremne vrednosti koja odgovara željenom ponašanju sistema u zatvorenoj sprezi i dostupnost merenja ulaza i izlaza. Nagli razvoj i bitni rezultati u oblasti ES usledili su posle 2000. godine, kada je objavljen prvi detaljan dokaz stabilnosti klasične ES strukture korišćenjem tehnike usrednjavanja. Zbog činjenice da ne zahteva model sistema, ES regulaciona struktura je robusna i efikasna u mnogim primenama.

Prilagođenje ovakve strukture regulaciji temperaturne raspodele u ložištu, na osnovu formulisanja kriterijumske funkcije na bazi raspoloživih merenja i ograničenja u sistemu predstavlja jedinstven izazov. Ova disertacija sprovodi najpre temeljnu analizu uticaja korekcije loženja na raspodelu temperature, a zatim predlaže jedinstveni kriterijum kao meru željene simetrije plamena, kao i primenu ES strukture za njegovu optimizaciju. Dodatno, od velikog je značaja pitanje ponašanja ES regulacije u prisustvu poremećaja, što je u tezi posebno razmatrano. Svi eksperimenti su izvedeni na blokovima Termoeletrana Nikola Tesla A i B, a bitni zaključci i ostvareni rezultati su obuhvaćeni ovom disertacijom.

**Ključne reči:** termoelektre, raspodela temperature, optimizacija sagorevanja, preraspodela loženja, *extremum seeking* (ES) upravljanje, potiskivanje poremećaja

**Naučna oblast:** Elektrotehnika i računarstvo

**Uža naučna oblast:** Upravljanje sistemima i obrada signala

**UDK broj:** 621.3

**Dissertation title:** Thermal power plant boiler temperature distribution control based on extremum seeking strategy

**Abstract:**

Thermal power plants are the main producers of electrical energy in the world, and therefore there are constant attempts for improvement in terms of reducing harmful effects on the surroundings, while at the same time increasing efficiency, availability and incomes. Aforementioned effects are directly related to the combustion process, which gives great importance to control and optimization of this process. These requirements are usually constrained by the possibilities of combustion process monitoring. This is mainly done by performing the acquisition of available measurements obtained from the chemical analysis of carbon dioxide and oxygen content in the flue gases, which is useful for the evaluation of fossil fuels combustion. However, these are only global indicators and they provide no information about the local temperature distribution inside the furnace.

The analyzed problem is extremely important from two aspects. The first is related to the unavailability of an exact and fast model, useful for real time use. This is just one of the obstacles when it comes to designing an appropriate control algorithm. Therefore, permanent flame supervision for regulation development and improvement purposes presents a good solution. The other significant problem is the non-existent overall quantitative performance criterion as a measure of furnace temperature distribution quality. Additionally, detailed performance analysis depends on the accuracy of the adopted model and its operating resolution. The better the model the longer the simulation time is, which is usually not convenient for on-line usage when the timely reaction is expected.

The main idea of this dissertation is the improvement of regulation cycle using furnace temperature monitoring. Numerous experiments have shown that furnace temperature estimation provides a clear insight in the performance and quality of combustion process, and therefore the overall system. Local furnace temperature measurement and temperature distribution estimation is a very complicated process. The main reasons for this are the difficulties in sensor system installation (pyrometers, thermo couples), wide range of temperatures, as well as the variations in boiler load. Temperature distribution can be affected by several factors: air flow control, coal quality, ash removal and other, but the greatest influence can be made by active mills number and load regulation. The correction of reallocation of coal over mills was used for local purposes until now, among which is the reduction of mill load when it comes to overload characterized by aeromixture temperature increase. However, available literature lacks systematic analysis of mill load influence on temperature distribution and thus the overall combustion process.

Furnace temperature control can be used for boiler performance improvements, including safety and reliability. Neglecting those objectives can lead to many unwanted outcomes, such as increased deposits of soot and slag on the walls of heaters, reheaters, economizer and other boiler subsystems, faster corrosion of those walls, pipe overheating via convection, but also increased temperature of flue gases which leads to heat losses and decreased efficiency. From financial aspect, solution to this problem would bring many advantages. Firstly, appropriate control prolongs the lifespan of the boiler components, which directly affects maintenance costs. Secondly, water injection process can be improved by maintaining the superheater inlet temperatures within the preset boundaries, which significantly reduces necessary water resources and energy losses. A thermal power plant boiler is a highly complex and distributed system with a large number of inputs and outputs. Therefore, the most suitable control strategies imply using some model-free strategies. One of those structures is the extremum seeking control (ESC) which does not demand explicit knowledge about system input-output characteristics, but only the existence of extreme value corresponding to the desired closed-loop system behavior and the availability of input and output measurements. Rapid development and significant results in ES field came after the year 2000 when the first detailed stability proof, using the averaging technique, was provided for the classic ES structure. Its model-free nature makes it robust and efficient in many applications.

Adaptation of this structure to furnace temperature regulation, using a criterion based on available measurements and posed constraints represents a unique challenge. This dissertation firstly performs thorough analysis of firing correction influence on temperature distribution, and secondly offers a unique criterion as a measure of flame symmetry, as well as an extremum seeking based regulation structure for its optimization. Additionally, an important question of disturbance rejection property of extremum seeking control is discussed. All experiments were performed in thermal power plants Nikola Tesla A and B, and important conclusions and obtained results are included in this dissertation.

**Keywords:** thermal power plants, temperature distribution, combustion optimization, firing reallocation, extremum seeking (ES) control, disturbance rejection

**Research area:** Electrical and Computer Engineering

**Research sub-area:** System control and signal processing

**UDC number:** 621.3

---

# Sadržaj

---

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Karakteristike i mogućnosti unapređenja procesa sagorevanja</b>	<b>8</b>
2.1	Struktura i principi rada kotla u TENT B1 . . . . .	20
2.2	Opis pirometarskog sistema u TENT B1 . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Pregled upravljačkih strategija u termoenergetskim sistemima</b>	<b>31</b>
3.1	Linearna (PID) regulacija . . . . .	35
3.2	Optimalna regulacija . . . . .	37
3.3	Metode veštačke inteligencije . . . . .	40
3.4	Glavni regulator loženja u TENT B1 . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Extremum seeking kao strategija za upravljanje složenim sistemima</b>	<b>48</b>
4.1	Pregled postojećih primena ES u literaturi . . . . .	49
4.2	Elementi ES pristupa . . . . .	51
4.2.1	ESC na bazi gradijenta . . . . .	52
4.2.2	ESC na bazi kliznog režima . . . . .	54
4.2.3	ESC na bazi perturbacionog signala . . . . .	55
4.3	Multivarijabilni ESC . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Modeliranje i upravljanje procesom loženja u kotlu</b>	<b>61</b>
5.1	Akvizicija i analiza pirometarskih merenja . . . . .	61
5.2	Modeliranje raspodele temperature unutar kotla . . . . .	65
5.2.1	Kroskorelaciona analiza mernih signala . . . . .	70
5.2.2	Modeliranje uticaja brzine dozatora na raspodelu temperatura pri- menom WRLS algoritma . . . . .	78



5.2.3	Modeliranje uticaja brzine dozatora na raspodelu temperatura primenom metode konačnih elemenata . . . . .	82
5.3	Primena extremum seeking-a za korekciju loženja u TENT B1 . . . . .	85
5.4	Primena extremum seeking-a za korekciju loženja u TENT A6 . . . . .	94
5.5	Primena extremum seeking-a za regulaciju temperature pare na izlazu iz pregrejača u TENT B1 . . . . .	97
<b>6</b>	<b>Zaključak</b>	<b>100</b>
	<b>Literatura</b>	<b>105</b>

---

## Lista slika

---

2.1	Ostvaldov trougao. . . . .	10
2.2	Prikaz provođenja toplote kroz višeslojni zid. . . . .	12
2.3	Različiti pristupi monitoringu procesa sagorevanja. . . . .	18
2.4	Termoelektrana Nikola Tesla B u Ušću. . . . .	20
2.5	Prikaz dispozicije na kotlu bloka TENT B1 (pre prve faze rekonstrukci). . . . .	22
2.6	Tangencijalni raspored gorionika. . . . .	24
2.7	Pirometarska merna jedinica sa sistemom za otprašivanje i hlađenje. . . . .	27
2.8	Dispozicija pirometara na bloku B1 po visinama. . . . .	29
2.9	Dispozicija pirometara na bloku B1 po poprečnim presecima. . . . .	30
3.1	Upravljačka struktura sa korekcijom: a) reference, b) upravljačkog signala. . . . .	32
3.2	Koordinisani mod: kotao prati. . . . .	34
3.3	Koordinisani mod: turbina prati. . . . .	34
3.4	LQG kontroler sa integrisanom feedforward akcijom. . . . .	37
3.5	LQG kontroler sa koordinisanom feedforward akcijom. . . . .	38
3.6	Jedan primer fazi PID kontrolera. . . . .	43
3.7	Preraspodela loženja. . . . .	47
4.1	Udeo broja radova iz oblasti extremum seeking-a po decenijama u periodu 1960-2017. . . . .	49
4.2	Extremum seeking upravljanje na bazi analogne optimizacije. . . . .	52
4.3	Extremum seeking upravljanje na bazi kliznog režima. . . . .	54
4.4	Extremum seeking upravljanje na bazi sinusoidalnog perturbacionog signala. . . . .	55
4.5	Funkcija četvrtog reda uz Primer 1: $h(\theta) = -3\theta^4 + 4\theta^3 + 12\theta^2 + 6$ . . . . .	58

4.6	Uticaj promene pojačanja $k$ na brzinu konvergencije za fiksne parametre $\omega = 15rad/s$ , $a = 0.1$ : Evolucija parametra $\hat{\theta}$ (levo) i vrednosti kriterijumske funkcije $h$ (desno). . . . .	58
4.7	Uticaj promene amplitude perturbacionog signala na brzinu konvergencije za fiksne parametre $\omega = 15rad/s$ , $k = 6$ : Evolucija parametra $\hat{\theta}$ (levo) i vrednosti kriterijumske funkcije $h$ (desno). . . . .	59
4.8	Extremum seeking struktura za sistem sa više ulaza. . . . .	60
5.1	Primeri nedostajućih i jednobojnih i dvobojnih temperatura na raznim visinama i stranama kotla (levo), odnosno samo jedne od temperatura (desno). . . . .	62
5.2	Primeri sporadičnih merenja visokog intenziteta. . . . .	62
5.3	Merenja temperature bez pojave nepostojećih ili pogrešnih merenja. . . . .	63
5.4	Merenja sa dvobojnih pirometara i odgovarajućih termoparova. . . . .	63
5.5	Brzina odziva termoparova naspram pirometara. . . . .	64
5.6	Brzina odziva termoparova naspram pirometara. . . . .	67
5.7	Brzina odziva termoparova naspram pirometara. . . . .	68
5.8	Promena prostorne raspodele temperature na koti 44 m prilikom zamene mlinova M1 i M5. . . . .	68
5.9	Promena temperatura na levoj i desnoj strani kotla u koordinisanom modu. . . . .	69
5.10	Promena temperatura na levoj i desnoj strani kotla u nekoordinisanom modu. . . . .	70
5.11	Promena brzine dozatora sa vremenom. . . . .	72
5.12	Merenje temperature dvobojnih pirometara na koti 33 m. . . . .	72
5.13	Merenje temperature dvobojnih pirometara na koti 44 m. . . . .	73
5.14	Merenje temperature dvobojnih pirometara na koti 54 m. . . . .	73
5.15	Merenje temperature dvobojnih pirometara na koti 60 m. . . . .	74
5.16	Merenje temperature dvobojnih pirometara na koti 63 m. . . . .	74
5.17	Uticaj opterećenja mlina M1 na razliku temperature na istoj strani zida kotla na različitim kotama: prednja strana kotla (gore), zadnja strana kotla (dole). . . . .	75
5.18	Uticaj mlinova M1 i M4 na pomeranje plamena između prednje i zadnje strane kotla na koti 44 m. . . . .	76
5.19	Uticaj istovremenog opterećenja/rasterećenja mlinova M1 i M5 na razliku temperatura na koti 44 m: T7-T5 na desnoj (gore) i T10-T8 na zadnjoj (dole) strani kotla. . . . .	77

5.20	Rezultati estimacije parametara modela prvog reda: merena i estimirana temperatura (Kota 33 m). . . . .	80
5.21	Rezultati estimacije parametara modela prvog reda: merena i estimirana temperatura (Kota 54 m). . . . .	80
5.22	Rezultati estimacije parametara modela drugog reda: merena i estimirana temperatura (Kota 33 m). . . . .	81
5.23	Rezultati estimacije parametara modela drugog reda: merena i estimirana temperatura (Kota 54 m). . . . .	82
5.24	Rezultati estimacije parametara FEM modela drugog reda: T18. . . . .	84
5.25	Struktura upravljačkog algoritma. . . . .	87
5.26	Prilagođenje ES strukture za upravljanje temperaturnom raspodelom. . . .	87
5.27	Prilagođenje ES strukture za upravljanje temperaturnom raspodelom. . . .	87
5.28	Zahtev za ukupnom brzinom dozatora (srazmerno ukupnom opterećenju) u slabo promenljivim uslovima. . . . .	88
5.29	Preraspodela loženja po aktivnim mlinovima u slabo promenljivim uslovima. . . . .	89
5.30	Estimirane temperature na izlazu modela u slabo promenljivim uslovima. . . .	89
5.31	Estimirane temperature na izlazu modela (poređenje naspramnih) u slabo promenljivim uslovima. . . . .	90
5.32	Zahtev za ukupnom brzinom dozatora (srazmerno ukupnom opterećenju) u visoko nestacionarnim uslovima. . . . .	91
5.33	Preraspodela loženja po aktivnim mlinovima u visoko nestacionarnim uslovima. . . . .	91
5.34	Estimirane temperature na izlazu modela u visoko nestacionarnim uslovima. . . .	92
5.35	Estimirane temperature na izlazu modela (poređenje naspramnih) u slabo promenljivim uslovima. . . . .	92
5.36	Tangencijalni raspored gorionika na bloku A6. . . . .	94
5.37	Kontrolni signal (učestća mlinova) tokom nastupanja poremećaja. . . . .	95
5.38	Kriterijumska funkcija tokom nastupanja poremećaja. . . . .	96
5.39	Kretanje plamena tokom nastupanja poremećaja. Svetlija boja odgovara višoj temperaturi. Izoterme su date u °C . . . . .	96
5.40	Profili temperatura na izlazu iz isparivača šare sa vremenom. . . . .	98
5.41	Temperature pare na izlazu iz isparivača dobijene primenom ES upravljačke. . . .	99

---

## **Lista tabela**

---

- 2.1 Potrošnja kiseonika pri potpunom sagorevanju 1 kg elementa. . . . . 9
- 2.2 Osnovni tehnički podaci za TENT B1 (pre prve faze rekonstrukcije). . . . 21

### Uvod

---

Termoelektrane predstavljaju glavni izvor električne energije u Srbiji. Najveća elektrana Nikola Tesla ima ukupnu instalisanu snagu od 3286 MW i obuhvata termoelektrane Nikola Tesla A i Nikola Tesla B u Obrenovcu, termoelektranu Kolubara u Velikim Crljenima i termoelektranu Morava u Svilajncu. Termoelektrane Nikola Tesla (TENT) obuhvataju i internu železnicu koja godišnje preveze oko 28 miliona tona lignita sa površinskih kopova Kolubara. Globalna istraživanja pokazuju da termoelektrane na uglj proizvode preko 42% ukupne globalne električne energije, što za posledicu ima emitovanje preko 28% ugljen-dioksida u svetu. Zbog ovakvih i drugih neželjenih produkata procesa koji se odvijaju u termoelektranama, unapređenje i optimizacija ovih procesa su od suštinskog značaja. U prilog tome govori i činjenica da su zahtevi tržišta sve stroži po pitanju smanjenja gubitaka i povećanja raspoloživosti i profita. Zbog toga postoji veliki broj radova posvećenih istraživanjima u oblasti modelovanja i modernizacije regulacije u podsistemima termoenergetskih postrojenja [1–5].

Rad i performanse celokupnog sistema u velikoj meri zavise od implementiranog zakona upravljanja, čije je projektovanje uslovljeno trajnim posmatranjem i razumevanjem odgovarajućeg procesa. Tokom decenija su postojali različiti prilazi obezbeđivanju uslova za praćenje procesa koji se odvijaju u termoelektrani sa ciljem detekcije otkaza, preventivnog održavanja i unapređenja regulacionih petlji. Sa teorijske strane, ekspertsko znanje je objedinjeno takozvanim CFD (*computational fluid dynamics*) modelima, koji se zasnivaju na Navije-Stoksovim jednačinama. U termoelektranama CFD se koristi za analizu uticaja različitih geometrija, goriva, načina loženja i drugog, na proces sagorevanja [6–9]. Iako je CFD veoma moćna tehnika za simulaciju različitih fenomena, korišćenje velikih količina podataka, a samim tim i nezanemarljivo trajanje simulacija, je čine neadekvatnom

za upotrebu u takozvanim *online* procedurama, odnosno za rad u realnom vremenu, kada je neophodno blagovremeno reagovati na promene u sistemu. Zbog toga se značajni naponi ulažu u unapređenje monitoringa procesa sagorevanja, koji bi nadomestio nedostatak brzog modela na osnovu koga bi se mogla formirati odgovarajuća upravljačka akcija.

Odgovor prakse na ovu kompleksnu alatku se ogleda u naporima usmerenim ka razvoju i implementaciji različitih tipova senzorskih sistema koji bi ponudili dovoljno informacija o stanju i funkcionisanju svih relevantnih podsistema. Konstrukcija kotlova je najčešće takva da je instalirani sistem za regulaciju koncentrisan više na praćenje parametara pare, nego pokazatelja ponašanja vatre, tj. plamena. Međutim, ložište obezbeđuje toplotnu energiju na kojoj se zasniva rad celokupnog sistema, pa je regulacija ložišta od ključnog značaja za performanse kotla. U velikom broju slučajeva, ovakva regulaciona petlja ili nije uopšte razvijena ili nije dovoljno pouzdana. Naime, dostupno je merenje protoka vazduha i količine korišćenog goriva, koji se mešaju i doprinose procesu sagorevanja, a nakon toga merenja na izlazu iz kotla. Drugim rečima, performanse procesa sagorevanja mogu biti sagledane kroz njegove reaktante, u smislu merenja uglja i protoka vazduha, kao i produkte, odnosno izduvne gasove i analizu pepela. Mnoge termoelektrane se oslanjaju na ograničen broj merenja koja najčešće daju ili previše globalnu informaciju, poput ukupne zahtevane količine uglja, ili informaciju lokalnog karaktera, kao što je višak kiseonika na jednom mestu. Kada je reč o temperaturi, merenje koje se najčešće koristi u regulaciji rada kotla je temperatura gasa na izlazu iz ložišta (*FEGT - furnace exit gas temperature*). Ona se koristi za obezbeđivanje balansa pri prenosu toplote između dva dela kotla, kao i za održavanje temperatura u okviru predefinisanih granica kako bi se izbeglo zašljakivanje i pregrevanje materijala, koje može dovesti do otkaza u sistemu. Međutim, sa stanovišta stvaranja slike o prostornom toplotnom polju, ovo merenje nije od koristi. Međutim, mogućnost praćenja temperature u samom kotlu otvara mogućnosti za korigovanje temperaturnog profila unutar ložišta, a zavisi u velikoj meri od senzorskih mogućnosti. U poslednjih nekoliko godina posebno su interesantne optičke tehnologije, poput pirometara, inteligentnih optičkih radijacionih senzora, koji na neinvazivan način daju mogućnost merenja temperature u ložištu termoelektrana. Beskontaktno merenje je pogodno jer u ložištu kotla ne postoji stalan termički kontakt između senzora i čvrstog tela, osim haotičnog kontakta koji se ostvaruje sa zapaljenim i nezapaljenim česticama uglja i pepela, a samim tim je za postizanje termičke ravnoteže, odnosno merenja temperature okoline, potrebno više vremena. Drugim rečima, kontaktni senzori su intertniji u odnosu na beskontaktno. Postavljanjem adekvatne mreže pirometarskih jedinica na različitim visinama i na različitim tačkama u okviru istog horizontalnog preseka, omogućava se stvaranje 3D prikaza temperaturnog polja u kotlu [10].

Na osnovu takve vizuelizacije prostorne raspodele temperature u kotlu, može se pratiti kretanje žiže plamena, tj. njena pomenost u odnosu na centralni položaj, kao posledica promene različitih parametara sistema. Centralizovan položaj plamena govori u prilog uspešnom procesu sagorevanja, sa svim prethodno pomenutim pratećim benefitima. Na raspodelu temperature se može uticati promenom protoka vazduha, blagovremenim odšljakivanjem, praćenjem i poboljšanjem kvaliteta uglja, ali u najvećoj meri preraspodelom opterećenja između aktivnih mlinova. Kako je uobičajena praksa da se remont ne radi istovremeno za sve mlinove, kao i da se u toku rada rade smene mlinova, stanje mlinova u smislu istrošenosti i drugih karakteristika nije isto. Zbog toga, vrlo često podjednako opterećenje svih mlinova ne rezultuje simetričnom geometrijom plamena i njegovom centralizovanom pozicijom. Sa druge strane, kvalitet uglja nije uniforman, što unosi dodatne poremećaje u simetriji plamena. Informacije iz sistema za vizuelizaciju se mogu koristiti za formiranje upravljačkih veličina u smislu prilagođenja raspodele loženja, raspodele vazduha unutar mlinskog kruga, kao i kontrole tercijalnog vazduha. Sve ove promene su korektivnog tipa i mogu uticati na poboljšanje performansi celokupnog sistema, u smislu efikasnijeg rada, produženja radnog veka i manje emisije štetnih gasova.

Upravljanje temperaturom u ložištu je kritičan parametar koji se može iskoristiti za očuvanje rada i performansi kotla, uključujući i bezbednost i pouzdanost. Ukoliko to nije ispunjeno, može doći do povećanog taloženja na zidovima pregrejača, ekonomajzera, zagrejača vazduha i drugih podsistema kotla, ubrzane korozije pregrejača i zagrejača, mogućeg pregrevanja cevi konvekcijom, izmenjenih uslova rada na koje operateri teže utiču, ali i povećane temperature dimnih gasova na izlasku iz kotla, koja dovodi do gubitaka toplote i smanjenja efikasnosti. Svi prethodno pomenuti efekti mogu se kompenzovati adekvatnim upravljanjem procesom sagorevanja, tj. pravilnom raspodelom temperature u kotlu. Ispravna, adekvatna instrumentacija, kontrolna logika i sistem upravljanja su potrebni kao pomoć operaterima u obezbeđivanju bezbednog, efikasnog i pouzdanog rada procesa. Optimizacija procesa sagorevanja je u velikom meri prisutna tema u inženjerskoj i naučnoj zajednici. Neki od pristupa koriste upravo CFD za smanjenje količine pepela nastalog u procesu sagorevanja [11]. Drugi pristupi kombinuju genetske algoritme sa neuralnim mrežama za povećanje efikasnosti na osnovu modeliranja sadržaja nesagorelog ugljenika [12] ili sa *support vector* mašinama radi smanjenja emisije  $\text{NO}_x$  [13]. Svaki od ovih pristupa se fokusira na rešavanje samo nekog od problema nastalog tokom sagorevanja. Međutim, mali je broj radova dostupnih u literaturi, koji su posvećeni projektovanju upravljačkih strategija za upravljanje prostornom raspodelom temperature, što bi imalo pozitivan uticaj na sve prethodno pomenute neželjene aspekte procesa sagorevanja. Na raspodelu temperature se može uticati na različite načine: kontrolom protoka



vazduha, kvaliteta uglja, procesom odšljakivanja, međutim najveće mogućnosti nudi regulacija broja aktivnih dodavača i njihovog učešća. Korekcija učešća mlinova se do sada uglavnom koristila za lokalne potrebe (smanjenje opterećenja mlina ukoliko se primeti da dolazi do preopterećenja), međutim, sistematične analize njenog uticaja na raspodelu temperature, a samim tim i na celokupni proces sagorevanja, u dostupnoj literaturi nije bilo.

Regulacija temperaturne raspodele je izuzetno kompleksan problem čija složenost potiče od činjenice da je kotao sa svojim pratećim podsistemima raspodeljen sistem sa velikim brojem ulaza i izlaza, dok je negarantovana i promenljiva kalorijska vrednost goriva stalni izvor poremećaja. Neki od pokušaja rešavanja ovakvog problema koriste informaciju o pomeraju plamena u odnosu na centar ložišta [14], dok drugi kombinuju oblikovanje gustine raspodele na osnovu *B-spline* ekspanzije i MPC (*model predictive control*) [15]. Generalno govoreći, postoje dva osnovna pristupa u rešavanju ovog izazova. Jedan se zasniva na detaljnom modeliranju procesa sagorevanja, na osnovu kog se dalje razvija odgovarajući algoritam za regulaciju. Drugi definiše takozvane *model-free* kriterijume i aparate za njihovu optimizaciju, što je predmet istraživanja ove teze.

Jedan od optimizacionih algoritama koji ne zahteva poznavanje modela procesa je ES (*extremum seeking*) algoritam. Prvo pojavljivanje pojma ES zabeleženo je 1922. godine, kada je Maurice Leblanc u svom radu [16] prezentovao idejno rešenje za beskontaktni prenos električne energije sa dalekovoda do tramvaja. Njegov rad je ponudio opis kontrolnog dizajna za održavanje maksimalne snage na osnovu promenljive induktanse koja zavisi od vazdušnog procepa, međutim nije dao nikakav matematički aparat niti praktične rezultate, tako da nema dokaza da je ovakav pristup ikada implementiran. Međutim, njegov rad je poslužio kao osnova za brojna dalja istraživanja. Ideja je bila intuitivna, ulaz perturbovan u odnosu na početno stanje u obliku  $x(0) + \cos(\omega t)$  će dati perturbovan izlaz koji će biti ili u fazi ili u kontra fazi sa signalom na ulazu, što bi ukazalo na smer promene parametra kontrolera kako bi se postigao željeni ekstremum izlaza. Iako su osnove ES teorije postavljene u prvom kvartalu dvadesetog veka, tek tokom Drugog svetskog rata su značajna istraživanja u ovoj oblasti rađena u Rusiji [17, 18], dok se u literaturi na engleskom jeziku ES verovatno prvi put pojavljuje 1951. godine u radu koji daje detalje ES pristupa i primenu u optimizaciji rada motora sa unutrašnjim sagorevanjem, tj. maksimizaciji izlazne snage adekvatnim izborom vremena paljenja [19]. Ovaj rad je popularizovao primenu ES u oblasti upravljanja motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, ali i ukazao na nezanemarljivu ulogu ES u upravljanju procesima. Blackman je dao dobar prikaz ES regulatora u okviru knjige o adaptivnim sistemima upravljanja [20]. Jedan od prvih preglednih radova na temu extremum seeking-a je objavljen 1966.

godine [21]. U tom periodu, radovi su se uglavnom fokusirali na specifične probleme u ES [22–24], dok je detaljnih istraživanja na temu dizajna i stabilnosti ES bilo malo. Prva analiza stabilnosti koristeći teoriju Ljapunova je ponuđena 1971. godine, mada za posebnu klasu sistema [25]. Značaj ES u adaptivnom upravljanju prepoznao je Sternby [26], kao i Astrom i Wittenmark [27] koji su nazvali ES jednim od najperspektivnijih alata u adaptivnom upravljanju.

Nagli razvoj i bitni rezultati u oblasti ES usledili su posle 2000. godine, kada su Krstić i Wang objavili prvi detaljan dokaz stabilnosti klasične ES strukture korišćenjem tehnike usrednjavanja [28]. Iste godine, Krstić je dao predlog unapređenja i naveo potencijalna ograničenja algoritma [29]. Pokazano je da je ES postiže eksponencijalnu stabilnost periodičnog rešenja u  $O(1/\omega)$  okolini optimalnog ravnotežnog stanja. Kao takav, na osnovu izverznih teorema Ljapunova i pitanja robusnosti za peturbovane sisteme [30], ispoljava odgovarajuću lokalnu robusnost u odnosu na poremećaje, ukoliko su poremećaji nekorrelisani sa perturbacionim signalom ES algoritma. Ukoliko je poremećaj stohastički, a perturbacioni signal deterministički, izvođenje dokaza nije pravolinijsko jer se ne može koristiti ni determinističko ni stohastičko usrednjavanje. Relevante rezultate u ovoj oblasti pokazali su Stanković i kolege [31]. U literaturi postoje primene ES u potiskivanju poremećaja [32, 33], međutim strog dokaz konvergencije ESC (*extremum seeking control*) u prisustvu poremećaja nameće stroga ograničenja. Robusni dizajn ES algoritma na bazi numeričke optimizacije je dat u [34], a [35] prikazuje performanse ES kontrolera sa promenljivom upravljačkom amplitudom dovoljnom za potiskivanje poremećaja i nesigurnosti. Rezultati poređenja različitih ES pristupa i njihove konvergencije u primeni na energetska efikasnost sistema za kompresiju pare predstavljeni su u [36].

Ova teza je rezultat intenzivnih istraživanja sprovedenih u termoeletranama TENT-a, a koja su zasnovana na početnim pretpostavkama da je upravljanje temperaturom na osnovu korekcije učešća mlinova kontrolabilan problem, kao i da se kroz princip opservabilnosti iz brojnih dostupnih merenja, može lokalizovati i izdvojiti minimalan skup merenja od značaja, na osnovu kojih se može razviti jednostavan nestacionaran parametarski model, koji istovremeno obuhvata suštinsku dinamiku procesa od interesa, a koji može biti korišćen u testirajućoj fazi predloženog algoritma. Bitna hipoteza se odnosi mogućnost projektovanja ES upravljačke strategije koja bi imala dinamiku bržu od promene parametara procesa i uticaja poremećaja, a istovremeno i sporiju dinamiku od dinamike procesa sagorevanja. Radi opravdavanja ovih pretpostavki, teza obuhvata detaljnu analizu promene raspodele temperature u zavisnosti od opterećenja mlinova i uspostavljanje odgovarajućih ulazno-izlaznih veza. Kao jedan od osnovnih doprinosa, predlaže se novi prilaz regulaciji geometrije plamena kroz formulisanje jedinstvene kriterijumske funkcije na bazi merenja

sa potencijalnim proširenjima u cilju uključivanja ograničenja upravljačkih promenljivih. Dodatno, predstavljen je novi pristup upravljanju temperaturnom raspodelom zasnovan na ES algoritmu, koji se zahvaljujući svojoj adaptivnoj prirodi i činjenici da ne koristi model procesa, pokazao kao vrlo efikasan u regulaciji ovog nestacionarnog procesa, čak i u prisustvu poremećaja.

Nakon Uvoda teza je strukturirana kroz pet poglavlja. Drugo poglavlje daje pregled bitnih globalnih karakteristika bloka u termoelektrani, sa akcentom na blok TENT B1. Detaljno je prikazano kotlovsko postrojenje sa opisom protoka mase u traktovima voda-para i vazduh-dimni gas i objašnjena uloga najznačajnijih aktuatora (ventilatora svežeg vazduha, mlinova,...), kao i principa rada pirometarske jedinice i instalisanog sistema za vizuelizaciju u TENT-u B1. U okviru njega je objašnjena uloga pirometarskog senzorskog sistema u stvaranju 3D slike o temperaturnoj raspodeli u kotlu. Dodatno, u okviru ovog poglavlja data su i teorijski elementi procesa sagorevanja, sa jasno diskutovanim posledicama neadekvatnog temperaturnog polja, tj. postojanja neželjenih, visokih temperatura u kotlu u smislu većih temperaturnih gubitaka, nastupanja postepenih i naglih otkaza, stvaranje velikih količina šljake i čađi, kao i štetnih oksida azota i sumpora. Na osnovu svega toga, istaknuti su značaj unapređenja procesa sagorevanja, kao i mogućnosti njegovog praćenja.

Treće poglavlje daje teorijski pregled konvencionalnih i nekonvencionalnih upravljačkih struktura koje se najčešće koriste u elektroenergetskim postrojenjima i postojećih rešenja u optimizaciji pojedinih podsistema od interesa. Najbrojnije primene se odnose na PID regulatore i njihove modifikacije, koji pokrivaju preko 90% svih upravljačkih struktura u industriji. Zbog velike primene, vremenom su razvijene i naprednije strukture PID regulatora koje obuhvataju i mogućnosti adaptacije strukture i parametara. Dodatno su opisane primene naprednijih upravljačkih algoritama koji se odnose na optimalno upravljanje (minimizaciju/maksimizaciju unapred zadate kriterijumske funkcije) i primenu veštačke inteligencije (neuralne mreže, fazi logika,...). Oni se koriste onda kada linearni zakoni upravljanja ne postižu zadovoljavajuće performanse. Konačno, sa stanovišta unapređenja postojećeg procesa preraspodele loženja bitno je objasniti i trenutno rešenje primarne regulacije u TENT-u B1, koje je opisano u ovom poglavlju.

Četvrto poglavlje nudi rešenje regulacionog zadatka primenom ES upravljanja koje ne zahteva eksplicitno poznavanje ulazno-izlazne karakteristike sistema, već samo postojanje ekstremne vrednosti koja odgovara željenom ponašanju sistema u zatvorenoj sprezi i dostupnost merenja ulaza i izlaza. U okviru ovog poglavlja dat je pregled postojećih primena ES upravljanja u industriji. Detaljno su prikazani opšti principi ES strategije, kao i različitih struktura ovog algoritma dostupnih u literaturi. Posebna pažnja je posvećena

ES strategiji na bazi sinusoidalnog perturbacionog signala i ilustraciji uticaja promene pojedinih značajnih parametara ove strukture na ponašanje postupka optimizacije. Na samom kraju, objašnjeno je proširenje algoritma na multivarijabilnu strukturu, koja će i biti razmatrana u regulaciji raspodele temperature.

Centralni doprinosi ove teze su prikazani u poglavlju pet. Analiza merenja prikupljenih u TENT-u B1 potvrdila je potrebu za unapređenjem postojeće strukture regulacije, kao i inicijalne hipoteze da se na raspodelu temperatura može uticati korekcijom loženja. Detaljna analiza uticaja pojedinih brzina dozatora odgovarajućih aktivnih mlinova na promenu pirometarskim sistemom izmerenih temperatura na različitim visinama i pozicijama data je primenom korelacione analize [37, 38]. U narednom koraku je opisana procedura identifikacije procesa čiji je rezultat dobijanje adaptivnog modela na kome će biti testirana predložena struktura regulacije. Prilagođenje izabrane metode identifikacije nestacionarnim uslovima u kotlovskom postrojenju predloženo je u formi rekurzivnog algoritma, koja omogućava praćenje promena radnih režima uz odgovarajuće prilagođenje parametara modela [39]. Nakon toga je dat opis odgovarajućih koraka u primeni ES strategije u smislu formiranje adekvatne kriterijumske funkcije na osnovu relevantnih merenja prikupljenih sa pirometarskog sistema i izbora parametara kontrolera za konkretan problem korekcije loženja, kao i rezultati simulacije rada ovakve regulacione strukture [40]. Primena ES algoritma je razmatrana i za potrebe regulacije temperature pare na izlazu iz isparivača [41], sa minimalnim izmenama u strukturi. Konačno, kako bi se stvorila jasna slika o univerzalnosti i primenljivosti dobijenih zaključaka i rezultata, predložena upravljačka strategija, sa adekvatnim korekcijama strukture i parametara, je implementirana i na merenjima prikupljenim na bloku TENT A6 [42]. U poslednjem, šestom poglavlju sumirani su ostvareni rezultati i dati mogući pravci daljeg rada.

---

# Karakteristike i mogućnosti unapređenja procesa sagorevanja

---

Proces sagorevanja je brza hemijska reakcija između goriva i oksidansa (kiseonika iz vazduha), prilikom koje se oslobađa toplotna energija. Prilikom sagorevanja elementi poput ugljenika, sumpora i vodonika reaguju sa kiseonikom i rezultuju u odgovarajuće okside. Potrebna količina vazduha, koja obezbeđuje dovoljno kiseonika za potpuno sagorevanje jedinične mase goriva definiše se stehiometrijskim odnosom [43]. Potpuno sagorevanje goriva podrazumeva sagorevanje osnovnih gorivih elemenata goriva i tom prilikom se oslobađa svetao dimni gas. U praksi se za potpuno sagorevanje koristi veća vrednost kiseonika od teorijski preračunate, jer je vreme za sagorevanje ograničeno, a i zbog prisustva inertnih materija, koje otežavaju reakciju. Čak i pod tim uslovima mali procenat uglja (0.5-1%), tj. koksnog ostatka, ne bude sagoren. U slučaju nedovoljne količine vazduha dolazi do nepotpunog sagorevanja, a dimni gas je crn. U opštem slučaju, jednačina materijalnog bilansa sagorevanja goriva u kotlu se može napisati u formi:

$$G_g + G_v + \Delta G_v = G_g + G_p \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right], \quad (2.1)$$

gde je  $G_g$  količina goriva,  $G_v$  količina vazduha koja se organizovano doprema ložištu,  $\Delta G_v$  obuhvata uduvavanje vazduha u ložište, kao i vazduh duž gasnog trakta kotla koji se ne koristi prilikom sagorevanja,  $G_g$  su gasni produkti sagorevanja, a  $G_p$  količina čvrstih produkata sagorevanja, tj. pepela i šljake koji se skupljaju ispod ložišta, elektrofiltra, u levku konvektivnog kanala ili se ispušta u atmosferu sa dimnim gasovima. Prilikom određivanja pomenute količine kiseonika neophodne za potpuno sagorevanje pretpostavlja se da

Tabela 2.1: *Potrošnja kiseonika pri potpunom sagorevanju 1 kg elementa.*

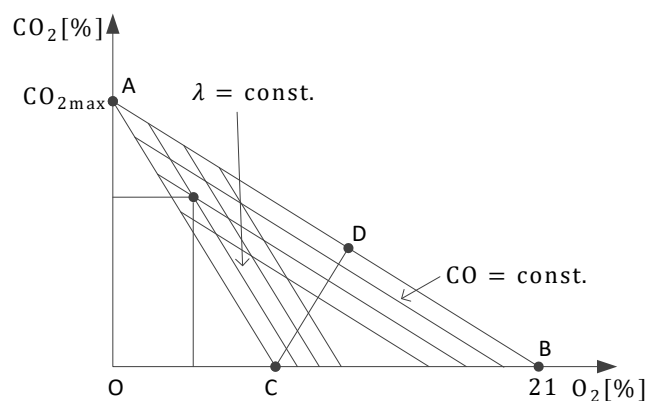
Komponenta	Teorijska vrednost kiseonika [m <sup>3</sup> /kg]	Količina produkta sagorevanja [m <sup>3</sup> /kg]
Ugljenik		
Sagorevanje do CO <sub>2</sub>	1.866	1.866 CO <sub>2</sub>
Sagorevanje do CO	0.933	1.866 CO
Vodonik	5.56	11.12 H <sub>2</sub> O
Ugljenik		
Sagorevanje elem. sumpora	0.7	0.7 SO <sub>2</sub>
Sagorevanje piritnog sumpora	0.96	0.7 SO <sub>2</sub>

radna masa goriva sadrži ugljenik, vodonik i sumpor. U tabeli 2.1 je prikazana potrošnja kiseonika pri potpunom sagorevanju 1 kg pojedinih elemenata u čvrstom gorivu.

Vidi se da je za sagorevanje 1 kg ugljenika potrebno 1.866 m<sup>3</sup> kiseonika, prilikom čega se oslobađa 1.866 m<sup>3</sup> ugljendioksida i energija od 33.9 MJ/kg. Prema datoj tabeli, ukupna količina kiseonika koja je neophodna za potpuno sagorevanje 1 kg čvrstog goriva je

$$V_k^0 = 1.866 \frac{C^r}{100} + 5.56 \frac{H^r}{100} + 0.7 \frac{S^r}{100} - \frac{O^r}{100 \cdot 1.428}, \quad (2.2)$$

gde su  $C^r$ ,  $H^r$ ,  $S^r$  i  $O^r$  udeli ugljenika, vodonika, sumpora i kiseonika u gorivu, respektivno. Uz pretpostavku da se u vazduhu nalazi 21% kiseonika,  $V_k^0$  treba podeliti sa 0.21 kako bi se dobila odgovarajuća teorijska količina vazduha. Kao što je već pomenuto, u praksi se potpuno sagorevanje ne može obaviti korišćenjem teorijske količine vazduha, pa se uvodi pojam koeficijenta viška vazduha  $\lambda > 1$  koji predstavlja odnos stvarne i teorijske količine. Koeficijent  $\lambda$  se kreće u granicama od 1.02 do 1.8, a zavisi od vrste, kvaliteta, usitnjenosti goriva, načina sagorevanja, itd. U termoelektrani Nikola Tesla B (TENT B) loženje se odvija u sprašenom sloju, tj. vrši se sagorevanje sprašenog uglja dobijenog sitnjenjem uglja u mlinovima na veoma male čestice, koje se u okviru aero-mešavine uduvavaju u ložište i sagorevaju u kratkom vremenskom periodu. Prednosti ovakvog tipa loženja u odnosu na druge (npr. loženje na rešetkama) su brojne, uključujući manje gubitke usled nepotpunog sagorevanja, mogućnost postizanja većih kapaciteta, itd. Ovakav proces sagorevanja je veoma kompleksan i u opštem slučaju zavisi od sagorevanja svake pojedinačne čestice, pa je zbog toga njegovo modeliranje izuzetno složeno i svodi se na rešavanje sistema diferencijalnih jednačina koje opisuju jednačine difuzije, kretanja vazduha, kretanja nošenih čestica ugljenog praha, razmene toplote i drugo. Za sagorevanje sprašenog goriva koeficijent  $\lambda$  je u opsegu [1.25,1.3] (za odvođenje pepela u čvrstom sta-



Slika 2.1: Ostvaldov trougao.

nju) i [1.1,1.25] (za odvođenje pepela u tečnom stanju). Što su uslovi za sagorevanje bolji, to je koeficijent viška vazduha manji. Drugim rečima, odlika kvalitetnog procesa sagorevanja jeste da se ono odvija sa što manjim viškom vazduha. Koeficijent viška vazduha se određuje analizom dimnih gasova, koja se vrši korišćenjem raznih hemijskih i fizičkih analizatora. Koeficijent viška vazduha u gasovima se određuje na osnovu formula:

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2}, \quad \lambda = \frac{CO_{2max}}{CO_2} \quad (2.3)$$

gde se maksimalni sadržaj ugljendioksida u produktima sagorevanja određuje na osnovu detaljne analiza konkretnog goriva. Za analizu sagorevanja često se koristi Ostvaldov dijagram (trougao) koji se dobija grafičkom predstavom potpunog sagorevanja u pravouglom koordinatnom sistemu u kome apscisa predstavlja sadržaj  $O_2$ , a ordinata sadržaj  $CO_2$  u produktima sagorevanja (slika 2.1). Naime, pri potpunom sagorevanju molarna zavisnost  $CO_2$  od  $O_2$  predstavlja pravu:

$$\frac{O_2}{21} + \frac{CO_2}{CO_{2max}} = 1. \quad (2.4)$$

Ovakva prava AB seče apscisu i ordinatu u 21, tj.  $CO_{2max}$ , respektivno i opisuje potpuno sagorevanje za različite vrednosti koeficijenta viška vazduha i to: tačka A odgovara  $\lambda = 1$  ( $O_2 = 0, CO_2 = CO_{2max}$ ), dok tačka B odgovara  $1/\lambda = 0$ . Bitno je definisati i tačku C koja odgovara sadržaju  $O_2$  pri nepotpunom sagorevanju, kada je  $CO_2 = 0$ , CO je maksimalno. Konačno tačka D predstavlja projekciju tačke C na duž AB i služi za određivanje sadržaja CO. Duži paralelne sa AC predstavljaju geometrijska mesta tačaka sa konstantnim koeficijentom viška vazduha, a duži paralelne sa AB geometrijska mesta tačaka sa konstantnim sadržajem CO.

Dakle, iz analize gasa određuju se sadržaji  $CO_2$  i  $O_2$  koji definišu radnu tačku koja

opisuje proces sagorevanja u datom trenutku. Na osnovu toga se može proceniti da li je sagorevanje potpuno, ukoliko radna tačka leži na duži AB. Dalje se može odrediti koeficijent viška ili manjka vazduha, zavisno da li je radna tačka u trouglu ABC ili u trouglu AOC. Konačno, može se odrediti koeficijent viška vazduha, kao i sadržaja CO koji se inače teže procenjuje jer ga ima malo.

Još jedan bitan pojam koji karakteriše proces sagorevanja jeste entalpija  $I$  (kJ/kg), koja predstavlja količinu toplote koja se dovodi produktima sagorevanja jedinice zapremine ili mase goriva, da bi se zagrejalno od nulte do zadate temperature, pri konstantnom pritisku. Entalpija produkata sagorevanja obuhvata entalpiju gasovitih produkata i letećeg pepela. Entalpija gasovitih produkata (za  $\lambda > 1$ ) se definiše kao suma proizvoda zapremine produkata sagorevanja i njihove odgovarajuće entalpije. Entalpija pepela iz dimnih gasova data je sa:

$$I_p = \frac{A^r}{100} \cdot a_{un} \cdot i_p, \quad (2.5)$$

gde je  $a_{un}$  količina pepela u dimnim gasovima, a  $i_p$  entalpija jednog kilograma pepela. Zavisnost entalpije produkata potpunog sagorevanja od temperature i koeficijenta viška vazduha se najčešće predstavlja  $I - t$  dijagramom, na osnovu kog se može posmatrati promena temperature dimnih gasova od teorijske do one na izlazu iz kotla.

Prenošenje toplote bilo da se radi o iskorišćenju ili onoj nastaloj usled gubitaka, po drugom zakonu termodinamike uvek ima jasno definisan smer, od toplijeg nivoa ka hladnijem. Izdvajaju se tri različita vida prenošenja toplote: kondukcija (provođenje), konvekcija (prelaženje) i radijacija (zračenje). Kondukcija se ostvaruje najčešće kod čvrstih tela, prenosom toplote kroz materijal bez premeštanja sastavnih delova materijala. Tela se mogu klasifikovati u dobre provodnike (metali), poluprovodnike (ugalj, minerali, ...) i loše provodnike (drvo, pepeo, ...). Toplotna snaga koja se provede kroz zid debljine  $d$  i površine  $S$ , koji se nalazi na temperaturnoj razlici  $(t_1 - t_2)$  je jednaka

$$Q = \lambda \frac{S}{d} (t_1 - t_2) [W], \quad (2.6)$$

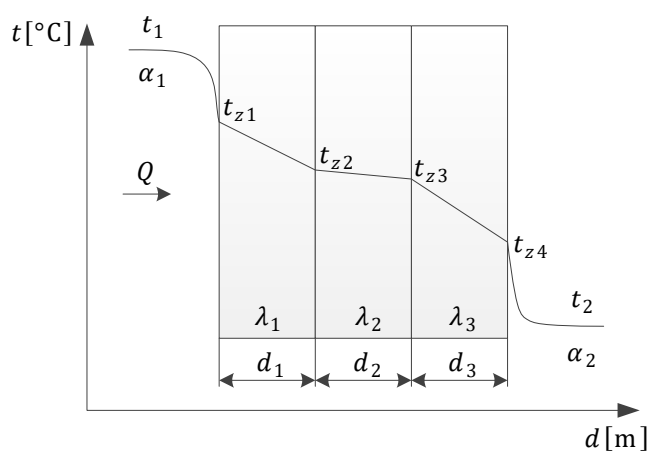
gde je  $\lambda$  koeficijent toplotne provodljivosti i zavisi od strukture materijala, ali i od temperature na kojoj se nalazi. Konvekcija podrazumeva prelaženje toplote sa toplog tela na hladnije i data je Njutnovim zakonom

$$Q = \alpha S (t_1 - t_2) [W], \quad (2.7)$$

gde je  $\alpha$  koeficijent prelaska toplote,  $S$  dodirna površina, a  $(t_1 - t_2)$  temperaturna razlika između dva tela. U kotlovskom postrojenju dolazi do konvekcije prilikom prelaska to-



plote sa produkata sagorevanja na zid kotla, ali i obrnuto sa zida parovodne cevi na fluid, tj. vazduh. Kada bi se posmatrao celokupni proces predavanja toplote sa vrelih gasova (predajnika, produkta sagorevanja) ka kotlovskoj vodi ili pari (prijemniku), osim konvekcije sa predajnika na površinu zida (tj. naslage pepela, šljake) i sa površine zida (naslage sa prijemne strane, kamenac) ka prijemniku, moraju se uzeti u obzir i kondukcije pojedinih slojeva kroz koji toplota prolazi (naslage na predajnoj i prijemnoj strani, metalni zid grejne površi). Drugim rečima, što su naslage na zidovima veće, to su gubici toplote pri prolasku kroz zidove veći, tj. razmena toplote je lošija (slika 2.2).



Slika 2.2: Prikaz provođenja toplote kroz višeslojni zid.

Zajedno sa kondukcijom i konvekcijom, u parnim kotlovima se javlja i radijacija plamena i gasova na metalne zidove. Radijacija podrazumeva prenošenje toplote elektromagnetskim talasima. Svako telo zrači energiju, dok je neka tela apsorbuju, reflektuju ili propuštaju. Tela koja upijaju svu dozračenu toplotnu energiju se nazivaju apsolutno crnim telima (koeficijent apsorpsije je jednak 1), dok čvrsta i tečna tela ne propuštaju toplotnu energiju (koeficijent prozračnosti je 0). Štefan-Bolcmanov zakon uspostavlja vezu između toplotne energije zračenja  $E_c$  i temperature  $t$  za apsolutno crno telo

$$E_c = \sigma_c t^4 = C_c \left( \frac{t}{100} \right)^4 \left[ W/m^2 \right], \quad (2.8)$$

gde je  $C_c$  konstanta zračenja apsolutno crnog tela. Za prirodno, takozvano sivo telo čiji je koeficijent zračenja  $\varepsilon < 1$ , emitovana energija  $E_s$  se dobija kao

$$E_s = \varepsilon E_c. \quad (2.9)$$

Izraz za razmenu toplote između dve površine čije su temperature  $t_1$  i  $t_2$  je dat sa

$$E = C_{1-2} \left[ \left( \frac{t_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.10)$$

gde je  $C_{1-2}$  koeficijent prelaza toplote zračenjem, koji zavisi od koeficijenta zračenja toplijeg tela (plamen ili topao dimni gas) i koeficijenta zračenja, tj. apsorpcije hladnije površine, a iznosi  $3.60 \frac{W}{m^2 K^4}$  za ugalj i  $4.22 \frac{W}{m^2 K^4}$  za mazut.

Dovedena količina toplote se, uz nezaobilazne gubitke, troši za procese zagrevanja vode, isparavanja i pregrevanja pare. Toplotni bilans predstavlja razliku dovedene i utrošene količine toplote, dok se stepen korisnosti kotla definiše kao odnos iskorišćene i unete količine toplote. Stepenn korisnosti kotla se najčešće izražava u procentima i zavisi od ukupnih gubitaka toplote, koji se mogu ispoljiti na nekoliko različitih načina. Najveći kotlovski gubitak se ispoljava na izlaznim dimnim gasovima i nastaje zbog nedovoljne ohlađenosti gasova koji se predaju okolnom vazduhu (iznose 5-12% ukupne toplote), ali i zbog velikog koeficijenta viška vazduha. Na smanjenje koeficijenta viška vazduha se može uticati, ali njegovo umanjeње može dovesti do gubitaka usled hemijske nepotpunosti sagorevanja, pa se na ovom mestu mora praviti kompromis koji se svodi na minimizaciju ukupnih gubitaka ova dva tipa. Sniženje temperature izlaznih gasova zahteva povećanje grejne površine, a istovremeno može da dovede do pojave niskotemperaturne korozije. Povećana temperatura na izlazu u najvećoj meri zavisi od položaja plamena, zaprljanosti cevnog sistema i opterećenja kotla, i slično. Pomenuti gubici usled hemijske nepotpunosti sagorevanja se odnose na toplotu koja bi se oslobodila sagorevanjem preostalih sagorivih materija iz dimnih gasova, a najčešće su prouzrokovani malom količinom vazduha, lošim mešanjem vazduha i goriva, previše niskim ili previše visokim temperaturama u ložištu (što smanjuje brzinu reakcije, odnosno može dovesti do disocijacije proizvoda sagorevanja). Osim toga, postoje i gubici usled mehaničke nepotpunosti sagorevanja, koji se odnose na nesagorele čestice goriva koje u vidu koksa napuštaju kotao, bilo da se odvođe sistemima za transport pepela i šljake ili kroz leteći pepeo. Ovi gubici su karakteristični za čvrsta goriva, i kao takvi povlače sa sobom i gubitke usled fizičke toplote šljake, koji su izraženi posebno ukoliko se šljaka u tečnom stanju odvodi iz kotla. Gubici usled pepela i transporta šljake u čvrstom stanju su zanemarljivi, dok su gubici usled spoljašnjeg hlađenja kotla uvek prisutni u vidu toplote koja se odaje okolini, jer je kotao po pravilu zagrejaniji od okoline. Iako se navedeni oblici gubitaka toplote ne mogu u potpunosti potisnuti, oni uglavnom mogu biti smanjeni adekvatnom regulacijom procesa sagorevanja.

Osim povećanih toplotnih gubitaka koji se ostvaruju kao posledica visokih tempera-

tura, što u velikoj meri zavisi od karakteristika procesa sagorevanja, u ložištu se mogu pojaviti različite vrste otkaza. Porast temperature može biti postepen tokom godina, ali može biti i trenutno, uzrokovan naglim smanjenjem protoka vode ili pare. Višegodišnje taloženje oksida često rezultuje pregrevanjem koje dovodi do postepenog porasta temperature. Velike promene temperature mogu dovesti do oštećenja, deformacije i pucanja materijala. Pojedini delovi sistema imaju značajno skraćen životni vek upravo zbog trajnog izlaganja visokim temperaturama, agresivnom okruženju, koroziji itd. Naravno, neophodno je obezbediti dugoročnu sigurnost korišćenih materijala pri radu na visokim temperaturama i velikim promenama pritiska. Međutim, istraživanja su pokazala da poznavanje srednje temperature i načina na koji erozija i korozija utiču na pojedine elemente sistema, može u velikoj meri doprineti proceni životnog veka kotla i njegovih podsistema. Na taj način može se vršiti prediktivno održavanje, što je danas veoma popularna i važna tema, posebno za velika postrojenja kao što su termoelektrane. Kao rezultat, stiže se bolji uvid u potrebu za zamenom pojedinih komponenti, ali i pravovremeno detektovanje potencijalnih otkaza na postrojenju, što doprinosi bezbednosti u radu, ali i smanjenju troškova. Pokazuje se da je poznavanje raspodele temperature u kotlovima jedna od najvažnijih stavki za prediktivno održavanje, kao i da ostvarivanje odgovarajućeg temperaturnog profila doprinosi smanjenju pojave otkaza na pojedinim delovima ovako složenog sistema. Postoje brojna istraživanja na temu stepena oštećenja usled izlaganja visokim temperaturama i drugim neželjenim pojavama [44]. U zavisnosti od faze u kojoj se detektuje oštećenje, akcije koje se preduzimaju se razlikuju od povremenog posmatranja, preko ograničenog korišćenja do popravke. Istraživanja su pokazala da su deset najčešćih uzroka otkaza u kotlovima [45]: deformacije materijala usled dugoročnog pregrevanja (23.4%), deformacije usled čestih promena režima rada (temperaturne 8.6%, korozija 5.3%), korozija usled pepela (12%), nepovoljan uticaj vodonika (10.6%), kvarovi usled lošeg zavarivanja (9%), kratkoročna pregrevanja (8.8%), erozija (6.5%), oštećenja materijala usled korozije kiseonikom (5.6%), uticaj natrijum-hidroksida (3.5%), oštećenja materijala usled združenog uticaja korozije i povećanog opterećenja (2.6%). Drugim rečima, preko 40% svih otkaza u termoelektranama nastaju kao posledica visokih temperatura.

Pored oštećenja materijala usled visokih temperatura koja mogu dovesti do degradacije performansi, ali i do ozbiljnih posledica u sistemu, veliki problem predstavlja i taloženje i zašljakivanje na zidovima kotla i njegovih podsistema. Šljaka i čađ se javljaju kao posledica istopljenog pepela koji se taloži na površinama koje primaju toplotu zračenjem, kao što su ložište i pojedini delovi pregrejača. Nakon što dospe na ovakvu površinu, pepeo se ohladi i očvrstne. Uticaj ove pojave na performanse ložišta može biti od presudnog značaja. Pravilno upravljanje plamenom, tj. temperaturom u ložištu, omogućava hlađe-

nje pepela i njegovo odstranjivanje posebnim sistemom za transport pepela. Ukoliko se to ne obezbedi, naslage na zidovima cevovoda smanjuju prenos toplote, a time i smanjuju stepen korisnog dejstva kotlovskeg postrojenja. Sa druge strane, mogu ograničiti i protok dimnih gasova, pa je procedura odšljakivanja veoma bitna i treba je redovno sprovesti. Istovremeno, veliki broj vrsta uglja sadži dovoljno sumpora i alkalnih metala da proizvedu korozivne naslage pepela. Kada se dovoljno ohlade sulfati imaju smanjenu korozivnu aktivnost, međutim kada su poluistopljeni oni korodiraju većinu čelika koji se koriste za izradu pregrejača. Održavanjem temperature u odgovarajućem opsegu doprinosi potiskivanju ovakvih neželjenih efekata.

Uporedo sa taloženjem čađi na spoljnim zidovima cevi, na unutrašnjim zidovima se stvara kamenac koji ima slične posledice kao čađ i može dovesti do korozije. Sva goriva osim prirodnog gasa, sadrže činioce koji uzrokuju pojavu korozije na zidovima kotlovskeg komponenti. Neki od ovih činilaca su sumpor, vanadijum i natrijum, a kod modernih kotlova koji se lože otpadom, jedan od glavnih uzroka korozije jeste hlor. Korozija je izražena u tri temperaturna režima. Prvi režim nastupa na temperaturama manjim od 150 °C kada kondenzuje sumporna kiselina. Drugi režim se ostvaruje na temperaturi između 250 °C i 400 °C kada kod kotlova koji se lože ugljem dolazi do formiranja piro-sulfata natrijuma i kalijuma, a kod kotlova loženih otpadom, mešavine hlorida cinka, olova, gvožđa i natrijuma dovode do korozije. Konačno, na temperaturama iznad 550 °C dolazi do korozije zagrejača i pregrejača pepelom, što je kod kotlova loženih ugljem posledica natrijum i kalijum-trisulfata. Čelik razvija otpornost na koroziju zahvaljujući zaštitnom sloju oksida koji se formira na površini materijala. Međutim, svaki proces koji uklanja ovaj oksid ili sprečava nastanak oksida, ubrzava proces korozije. Samim tim otpeljavanje i odšljakivanje uklanjaju zaštitni sloj oksida. Takav, čist čelik je izložen uticaju dimnih gasova visoke temperature, pa se sloj oksida obnavlja. Svakim obnavljanjem, debljina zida cevi se smanjuje, sve dok ne postane previše tanka da izdrži pritisak i pukne. Bilo da se radi o koroziji u ložištu ili o koroziji komponenta koje rade na većoj temperaturi, princip je sličan. Komponente pepela koje imaju nisku tačku topljenja, razlažu zaštitni oksid na zidovima komponenti i dovode čist metal u kontakt sa kiseonikom. Projektovanje adekvatnog zakona upravljanja procesom sagorevanja bi regulisalo ovakve pojave i smanjilo pojavu korozije u ložištu i komponentama poput pregrejača i zagrejača.

Još jedan vrlo bitan aspekt uticaja visokih temperatura jesu štetni produkti procesa sagorevanja. Oksidi azota ( $\text{NO}_x$ ) i sumpora ( $\text{SO}_2$ ) su među vodećim zagađivačima životne sredine. Kako su u poslednjih par godina uslovi za zaštitu životne sredine pooštreni, sprovode se brojne procedure za smanjenje količine  $\text{NO}_x$  u sistemima sagorevanja: korekcija procesa sagorevanja, korišćenje aditiva i alternativnih goriva, uvođenje naprednih

tehnika za nadgledanje i kontrolu procesa sagorevanja. Postoje brojna istraživanja koja se bave razvojem naprednog sistema za nadgledanje i upravljanje, koji pronalazi korelaciju između temperaturnih raspodela i parametara rada kotla. Drugim rečima, adekvatno upravljanje kiseonikom, gorivom, a samim tim i raspodelom temperature, povećava efikasnost procesa sagorevanja, a smanjuje emisiju štetnih gasova. Gorionici koji rade na principu niske koncentracije  $\text{NO}_x$  uglavnom rezultuju dužim plamenom i povećanom sadržajem nesagorelog ugljenika. Mogućnost sekundarnog sagorevanja može dovesti do povećanog taloženja na pregrejačima i zagrejačima vazduha. Sagorevanje koje se najčešće koristi u ovakvom slučaju može dovesti do nedovoljne koncentracije kiseonika u ložištu, a time i povećane temperature na izlazu iz gorionika što može dovesti do pregrevanja pregrejača i zagrejača. Za operatere je od velikog značaja održavanje ove temperature u zadatim granicama, kako bi se minimizovali svi ranije pomenuti neželjeni efekti. U suprotnom, moraju se praviti kompromisi između više bitnih zahteva sistema.

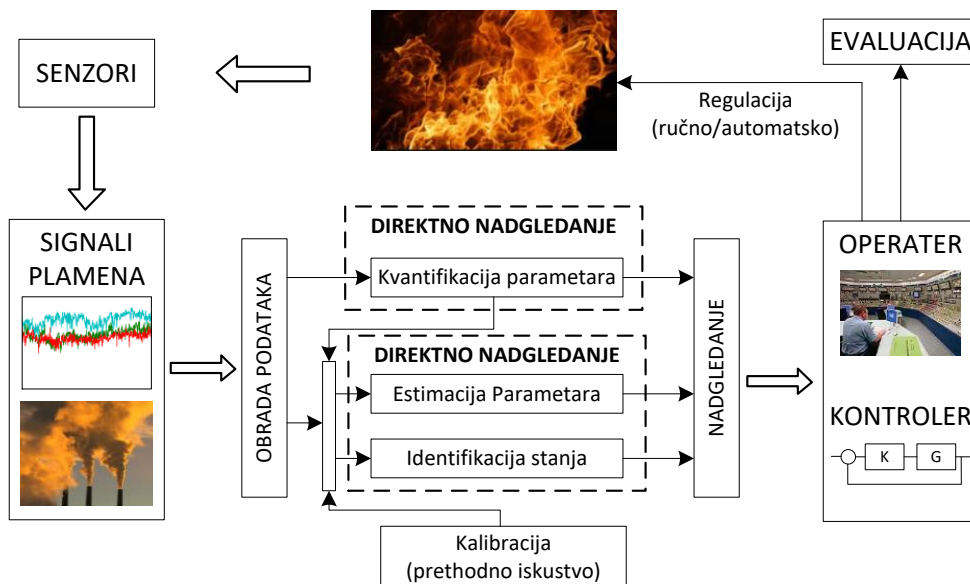
Sa druge strane, rad i performanse celokupnog sistema zavise od implementiranog zakona upravljanja. Konstrukcija kotlova je najčešće takva da je instalirani sistem za regulaciju koncentrisan više na praćenje parametara pare, nego pokazatelja ponašanja vatre, tj. plamena. Međutim, ložište obezbeđuje toplotnu energiju na kojoj se zasniva rad celokupnog sistema, pa je regulacija ložišta od ključnog značaja za performanse kotla. U velikom broju slučajeva, ovakva regulaciona petlja ili nije uopšte razvijena ili nije dovoljno pouzdana. Naime, dostupno je merenje protoka vazduha i količine korišćenog goriva, koji se mešaju i doprinose procesu sagorevanja, a nakon toga merenja na izlazu iz kotla. Sam proces sagorevanja, najčešće nije ispraćen dodatnim merenjima. Osnovna ideja poboljšanja kontrolnog ciklusa uključuje praćenje temperature u samom kotlu, tj. da se osim praćenja temperature u gorioniku i izlazne temperature kotla, obezbedi praćenje i upravljanje temperaturom u samom ložištu. Na raspodelu temperature se može uticati na različite načine: kontrolom protoka vazduha, regulacijom broja aktivnih dodavača i njihovog učešća, kvalitetom uglja, procesom odšljakivanja, i drugo. Upravljanje temperaturom u ložištu je kritičan parametar koji se može iskoristiti za očuvanje rada i performansi kotla, uključujući i bezbednost i pouzdanost. Ukoliko to nije ispunjeno, može doći do nekog do pomenutih ishoda: povećano taloženje na zidovima pregrejača, ekonomajzera, zagrejača vazduha i drugih podsistema kotla, ubrzana korozija pregrejača i zagrejača, moguće pregrevanje cevi konvekcijom, izmenjeni uslovi rada na koje operateri teže utiču, ali i povećana temperatura dimnih gasova na izlasku iz kotla, koja dovodi do gubitaka toplote i smanjenja efikasnosti.

Iz navedenih razloga se jasno vidi da je sagorevanje proces za koji su praćenje ponašanja, upravljanje i optimizacija od suštinskog značaja. Ova priča postaje još važnija

sa stalnim zahtevima za povećanjem efikasnosti uz istovremeno smanjenje potrošnje goriva i štetnih uticaja na prirodnu sredinu. Međutim, potreba za optimizacijom procesa sagorevanja je često ograničena mogućnostima monitoringa i kontrole procesa upravljanja. Često se za sagledavanje procesa sagorevanja analizira sadržaj dimnih gasova, što je korisno za ocenu kvaliteta određenih aspekata procesa, dok sa stanovišta sveukupne optimizacije procesa sagorevanja to nikako nije dovoljno. Sa jedne strane, postoji problem nedostatka dovoljno preciznog modela plamena, tj. alata koji bi vršio dovoljno tačnu predikciju ponašanja čestica plamena u zavisnosti od promenljivih parametara u trenutnom režimu rada. Sa druge strane, nemogućnost adekvatnog monitoringa i dovoljno brze reakcije, doprinose utisku o riziku od neželjene destabilizacije sistema, mehaničkih i termičkih oštećenja, kao i neplaniranih obustava rada sistema. Samim tim, u nedostatku dovoljno pouzdanih i brzih modela za predikciju ponašanja sistema sagorevanja, trajna supervizija plamena u cilju razvijanja i unapređivanja upravljačkih algoritama se čini kao validna alternativa. Drugim rečima, trenutni razvoj i optimizacija regulacije zavisi u velikoj meri od senzorskih mogućnosti. Zbog toga se sve veća pažnja posvećuje razvoju i implementaciji različitih tipova senzorskih sistema koji bi ponudili dovoljno informacija o stvarnom stanju procesa sagorevanja.

Generalno, praćenje procesa sagorevanja se može raditi na različite načine, zavisno od toga za šta se merena informacija koristi, da li je potrebna operateru za manuelno upravljanje ili za dijagnostiku otkaza ili je potrebna za automatsku regulaciju procesa. Takođe, nadgledanje stanja plamena se značajno razlikuje zavisno od toga da li se ono vrši u laboratorijskim ili industrijskim uslovima. Npr. OH\* hemiluminiscencija je vrlo popularan prilaz istraživanju vizuelizacije plamena. Međutim obezbeđivanje uslova za primenu ove metode u realnom vremenu nije jednostavno, jer podrazumeva uspostavljanje željene raspodele OH\* ili praktično tumačenje bilo koje slike koja može biti rezultat snimanja. Postoje i drugi slični pristupi koji bi mogli dati veoma dobre rezultate, međutim, iz praktičnih razloga (visoka cena, potreba za visoko edukovanim osobljem, odgovarajući uslovi za optički pristup, robusnost) se još uvek ne koriste u punom kapacitetu.

Na slici 2.3 je prikazana opšta struktura sistema za akviziciju podataka koji opisuju proces sagorevanja sa različitim prilazima nadgledanju procesa sagorevanja, tj. stanja plamena. Merna oprema daje neku informaciju o ponašanju plamena (temperatura, radijacija, pritisak, ...) u vidu sirovih podataka iz kojih na neki način treba izvući parametre karakteristične za opis plamena u datom trenutku. Jasno je da pojedine veličine moraju biti merene u apsolutnom smislu sa određenom tačnošću, dok se neke druge mere relativno u odnosu na nominalne ili maksimalno dozvoljene vrednosti, itd. Ukoliko se izmerena veličina koristi u svom izvornom obliku, bez naknadnih kompleksnih obrada,



Slika 2.3: *Različiti pristupi monitoringu procesa sagorevanja.*

koje bi omogućile njenu primenu u nadgledanju i upravljanju, govori se o direktnom nadgledanju plamena. Ovakav pristup je idealan, međutim često neostvarljiv u industrijskom okruženju. Za razliku od ovog pristupa, indirektno nadgledanje podrazumeva procenu stanja sistema na osnovu dodatne obrade prikupljenih merenja u onim situacijama kada apsolutna merena veličina ne daje značajnu informaciju. Primer ovog tipa nadgledanja je i pirometarski sistem koji je instaliran na bloku TENT B1. Naime informacija o temperaturi, iako i sama veoma važna kao kvantifikator procesa sagorevanja, koristi se za procenu prostorne raspodele temperature, na osnovu koje se često dalje vrši poređenje sa ranijom raspodelom pod poznatim uslovima, sa ciljem dijagnostike trenutnog stanja plamena. Pojedine metode u indirektnom pristupu se odnose na prevođenje izmerenih veličina u druge značajnije pokazatelje na osnovu korelacije koja među njima postoji. Druge podrazumevaju kompleksno procesiranje velike količine podataka merenih pomoću jednostavnih senzora, tako što najčešće posmatraju proces sagorevanja kao crnu kutiju.

Danas se sve više pažnje posvećuje upravo ovoj temi, a savremeni sistemi za praćenje stanja se često oslanjaju na emisionu spektroskopiju. Jedan od popularnih načina da se posmatra i analizira ponašanje sistema jeste CFD analiza, koja daje prikaz brzine fluida, pritiska, temperature i koncentracije pojedinih supstanci. Analiza omogućava vrlo jednostavno menjanje graničnih uslova, kako bi se sagledao njihov uticaj na promenu temperature i koncentraciju čestica. Treba naglasiti da analiza zavisi od tačnosti usvojenog modela i rezolucije sa kojom se radi. Velika preciznost modela zahteva duže vreme

simuliranja različitih procesa u modelu, pa kao takav ovaj model najčešće nije od koristi za *online* upotrebu, tj. u onim situacijama u kojima je potrebno trenutno reagovati. Brojni eksperimenti su potvrdili da se procenom raspodele temperature u kotlu, uzimajući u obzir više različitih kota, stiže jasan uvid u rad i kvalitet procesa sagorevanja, a samim tim i sistema u celosti. Lokalno merenje temperature u kotlu, a samim tim i estimiranje temperaturne raspodele, je vrlo kompleksan postupak zbog nepristupačnosti pri instalaciji odgovarajućih pouzdanih senzora, ali i velikog opsega temperatura koje se ostvaruju u kotlu, kao i varijacija u samom opterećenju pod kojim kotao radi. Termoparovi koji se najčešće koriste za merenje temperature u kotlovima, daju informaciju o temperaturi zida kotla i temperaturi neposredno uz zid. Na osnovu razlike ove dve informacije stiže se uvid u debljinu sloja naslaga koje postoje na zidu.

Metode za vizuelizaciju plamena su vrlo popularne u mehanici fluida i sagorevanju, jer na osnovu prostorne raspodele relevantnih veličina, nude vrlo intuitivan način za sagledavanje ponašanja kretanja, tj. plamena. Uglavnom se koriste neinvazivne tehnike među kojima su razne vrste optičkih senzora najčešće rešenje. Pirometri su vremenom postali veoma popularan alat u industrijskom monitoringu procesa sagorevanja. Pirometri funkcionišu na bazi procene temperature na osnovu emitovane energije prikupljene optičkim senzorom. Spektralna raspodela energije se može dobiti na osnovu Plankovog zakona radijacije. Temperatura tela može biti procenjena na osnovu merenja detektora radijacije ukoliko su poznati talasna dužina, emisivnost i geometrijski parametar koji opisuje položaj tela u odnosu na optički senzor. Međutim, nekada zbog nestacionarnosti procesa sagorevanja, a nekada zbog nedovoljne preciznosti geometrijskog parametra i emisivnosti, dolazi do grešaka u proceni temperature. Ovakve greške se mogu smanjiti korišćenjem dvobojnih pirometara, koji porede radijaciju na dve bliske talasne dužine i na taj način uspevaju da eliminišu prisutne poremećaje, o čemu će biti više reči kasnije.

U nastavku poglavlja biće opisan parni kotao u TENT B1 sa svojim osnovnim karakteristikama i instaliranim pirometarskim sistemom, kako bi se bolje sagledale mogućnosti nadgledanja procesa sagorevanja i njegovog unapređenja na konkretnom postrojenju.



## 2.1 Struktura i principi rada kotla u TENT B1

Termoelektrana Nikola Tesla B (TENT B) nalazi se na desnoj obali reke Save, 50 km uzvodno od Beograda. Sastoji se iz dve najveće energetske jedinice Srbiji, nominalne snage od 650 MW, koji su pušteni u pogon 1983. i 1985. godine. U inicijalnoj konstalaciji oba bloka su imala jednaku snagu (620 MW), ali je nakon prve faze revitalizacije i modernizacije, koja je obuhvatila ugradnju dodatnog ekonomajzera i naprednog (DCS - *Distributed Control System*) sistema za upravljanje i nadzor, snaga blokova povećana za 30 MW. Radni vek blokova B1 i B2 TENT-a je preko 200.000 sati. U cilju održavanja i poboljšanja dosadašnjih uspešnih proizvodnih rezultata, koji su u većem periodu dosadašnjeg rada bili iznad planiranih i iznad prosečnih za termoelektrane na uglj sličnih karakteristika u svetu, na TENT-u B se sprovode projekti revitalizacije i modernizacije pojedinih sistema u cilju povećanja snage i energetske efikasnosti. Nakon pomenutih unapređenja na bloku B1 iz 2012. godine, zabeležena je rekordna dnevna proizvodnja u januaru 2013. godine, a u martu 2014. godine i najveća mesečna proizvodnja. Ovakvi rezultati podstiču i otvaraju mogućnosti za dalja poboljšanja ovog bloka, koja podrazumevaju i unapređenje regulacionih struktura uz što efikasnije iskorišćenje ugrađenog DCS sistema. Na slici 2.4 je prikazana Termoelektrana Nikola Tesla B.



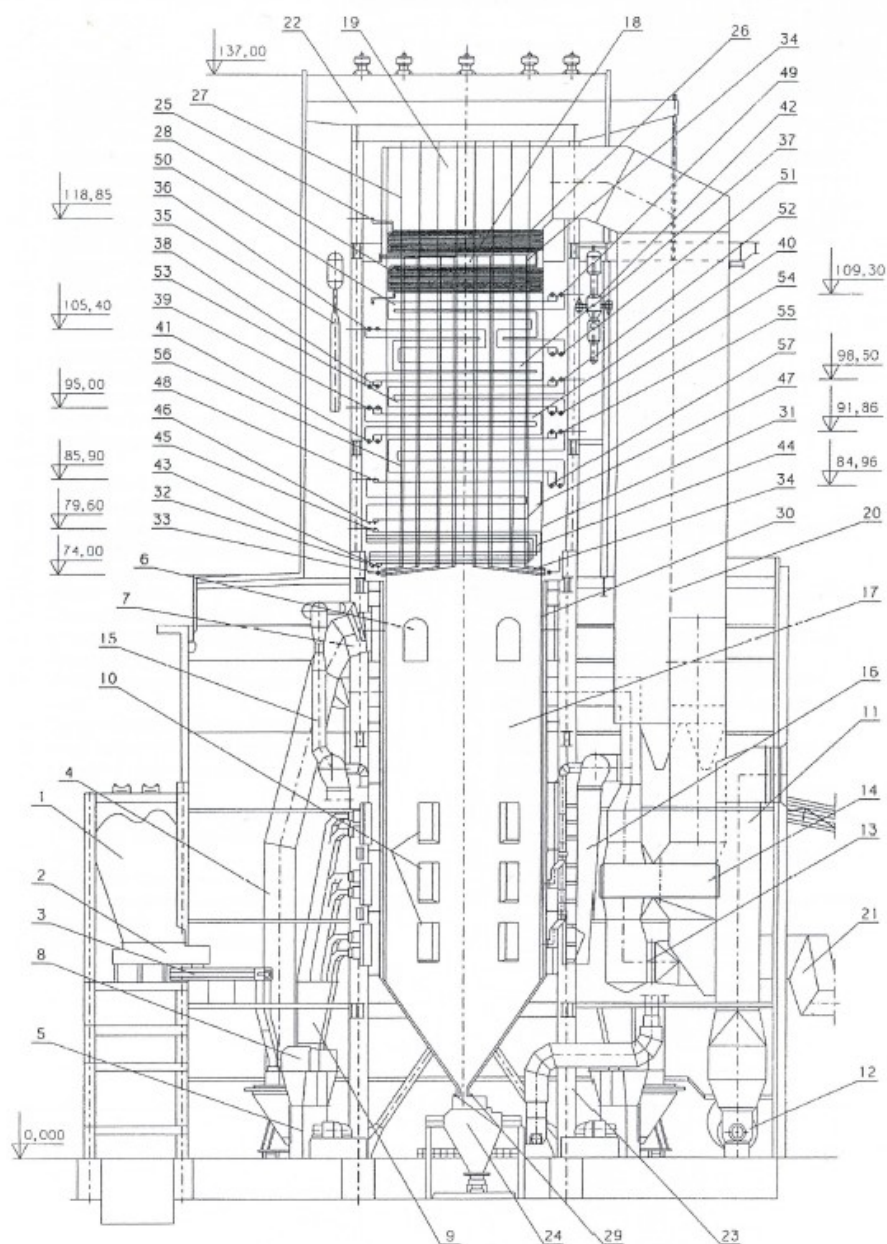
Slika 2.4: Termoelektrana Nikola Tesla B u Ušću.

Parni kotao u TENT B1 je projektovala poljska firma Rafako po licenci kompanije Sulzer [46]. Kotao je dimenzija poprečnog preseka 20×20 m i projektovan je za sagoravanje ugljenog praha pripremljenog u zatvorenom sistemu pripreme, u kome se vrši mlevenje i sušenje radnog goriva. U tabeli 2.2 su dati osnovni tehnički parametri bloka B1, a prikaz strukture kotla je dat na slici 2.5 sa jasno naznačenim najbitnijim elementima.

Osnovne komponente kotla označene na slici su: 1-Bunker za ugalj, 2-Dozator uglja, 3-Mlinski dodavač, 4-Kanal za recirkulaciju vrelih dimnih gasova, 5-Ventilatorski mlin N 400-42, 6-Otvor za recirkulaciju vrelih dimnih gasova, 7-Glava recirkulacionog kanala, 8-Mlinski separator, 9-Kanali za aerosmeše, 10-Gorionik za ugljeni prah, 11-Kanal za hladan vazduh, 12-Ventilator za svež vazduh, 13-Kanal za hladan vazduh od ventilatora do zagrejača vazduha, 14-Regenerativni rotacioni (Ljungštremlj) zagrejač vazduha, 15-Kanal za primarni vazduh, 16-Kanal za sekundarni vazduh, 17-Ložište, 18-Konvektivni gasni kanal, 19-Izlaz dimnih gasova iz konvektivnog kanala, 20-Limeni dimni kanal, 21-Dimni kanal ka elektrofiltru, 22-Noseća konstrukcija, 23-Noseći stubovi, 24-Sistem za odvođenje šljake, 25-Ulazni kolektor zagrejača vode, 26-Prvi (gornji) paket zagrejača vode, 27-Vešaljka za nošenje prvog paketa zagrejača vode, 28-Drugi (donji) paket zagrejača vode, 29-Ulazni (donji) kolektori isparivača, 30-Ozračeni isparivač (zavojne ekranske cevi u ložištu), 31-Cevi konvektivnog isparivača (vertikalne ekranske cevi na zidovima konvektivnog kanala), 32-Prestrujne cevi između izlaznih kolektora vertikalnih ekranskih cevi i ulaznih kolektora nosećih cevi, 33-Ulazni kolektori nosećih cevi, 34-Noseće cevi grejnih površina u konvektivnom gasnom kanalu (drugi deo konvektivnog isparivača), 35-Separator pare, 36-Ulazni kolektori prvog stupnja pregrejača sveže pare, 37-Prvi stupanj pregrejača sveže pare, 38-Izlazni kolektori prvog stupnja pregrejača sveže pare, 39-

Tabela 2.2: Osnovni tehnički podaci za TENT B1 (pre prve faze rekonstrukcije).

Parametar	Jedinica	Vrednost
Snaga bloka	MW	620
Nominalni kapacitet kotla	t/h	1880
Količina međupregrejane pare	t/h	1703
Temperatura napojne vode	degC	259.2
Pritisak sveže pare na izlazu iz kotla	bar	186.5
Temperatura sv pare na izlazu iz kotla	degC	540
Pritisak u kondenzatoru	bar	0,042
Donja toplotna moć uglja	kJ/kg	6700
Specifični utrošak toplote	kJ/KWh	10500
Potrošnja uglja (620 MW)	t/h	850



Slika 2.5: Prikaz dispozicije na kotlu bloka TENT B1 (pre prve faze rekonstrukci).

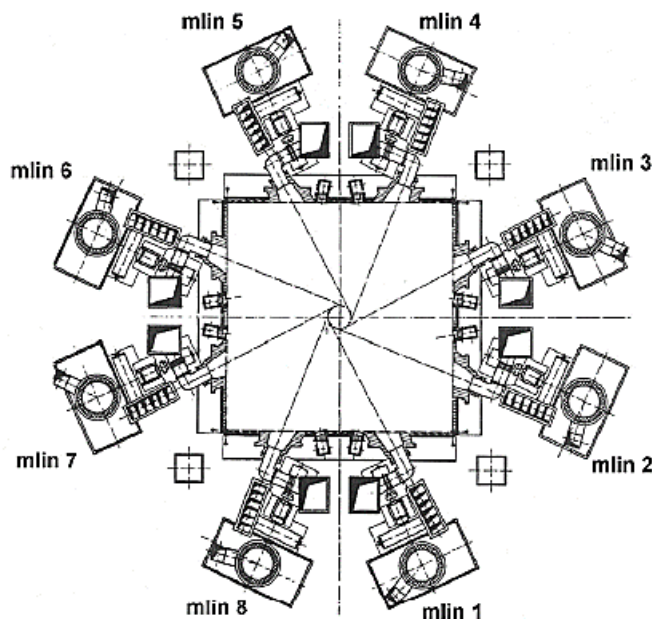
Ulazni kolektori drugog stupnja pregreača sveže pare, 40-Dруги stupanj pregreača sveže pare, 41-Izlazni kolektori drugog stupnja pregreača sveže pare, 42-Razmenjivač toplote između sveže i naknadno pregrejane pare (bifluks), 43-Ulazni kolektori trećeg stupnja pregreača sveže pare, 44-Treći stupanj pregreača sveže pare, 45-Izlazni kolektori trećeg stupnja pregreača sveže pare, 46-Ulazni kolektori četvrtog stupnja pregreača sveže pare, 47-Četvrti stupanj pregreača sveže pare, 48-Izlazni kolektori četvrtog stupnja pregreača sveže pare, 49-Ulazni kolektori prvog stupnja naknadnog pregreača pare, 50-Prvi stupanj naknadnog pregreača pare, 51-Izlazni kolektori prvog stupnja naknadnog pre-

grejača pare, 52-Ulazni kolektori drugog stupnja naknadnog pregrejača pare, 53-Drugi stupanj naknadnog pregrejača pare, 54-Izlazni kolektori drugog stupnja naknadnog pregrejača pare, 55-Ulazni kolektori trećeg (izlaznog) stupnja naknadnog pregrejača pare, 56-Treći (izlazni) stupanj naknadnog pregrejača pare, 57-Izlazni kolektori trećeg (izlaznog) stupnja naknadnog pregrejača pare.

Kao osnovno gorivo u Termoelektrani Nikola Tesla B se koristi ugalj lignit iz kolubarskog basena, koji ima veoma promenljivu donju toplotnu moć (5000-9000 kJ/kg). Pomoćno gorivo, koje se koristi prilikom startovanja bloka i stabilizacije vatre, jeste mazut. Ugalj se iz bunkera, posredstvom dozatora i dodavača, transportuje do recirkulacionih kanala, kroz koji dolazi do mlinova. Blok B1 ima osam mlinova istog kapaciteta (144 t/h), koji se nalaze na nultoj koti kotlarnice. Veza između mlinova i pogonskih motora je ostvarena posredstvom hidrauličnih spojnika tipa Voith. Delimično osušen ugalj se doprema do mlinova, u kojima se vrši dodatno sušenje i mlevenje. Za sušenje uglja dovodi se dimni gas sa vrha ložišta kotla preko recirkulacionih kanala na ulaze u mlinove. Regulacija temperature aerosmeše na izlazu iz mlinova vrši se dovodenjem zagrejanog tj. primarnog vazduha u glave recirkulacionih kanala. Aerosmeša se dalje, preko kanala, dovodi do troetažnih gorionika za ugljeni prah.

Gorionici uglja na kotlu bloka B1 su troetažni, što znači da se aerosmeša dovodi u ložište kroz tri zasebna vertikalno postavljena otvora na svakom gorioniku. Odgovarajućim regulisanjem svakog otvora, postiže se uniformnost u profilu sagorevanja u različitim nivoima ložišta. Na bloku TENT B1 gorionici su postavljeni tangecijalno tako da podstiču vrtložno kretanje produkata sagorevanja što pospešuje sagorevanje i razmenu toplote (slika 2.6). Dodatno ovakva konstrukcija rezultuje stabilnošću procesa sagorevanja i nižim maksimalnim temperaturama plamena.

Svež vazduh se dovodi u kotao pomoću dva ventilatora svežeg vazduha. Količina vazduha koja se na ovaj način uvodi u sistem je oko 360 kg/s za blok snage oko 600 MW. Vazduh se zagreva u regenerativnom zagrejaču vazduha korišćenjem toplote dimnih gasova. Zagrejači se nalaze na kraju gasnog trakta, u zoni nižih temperatura dimnih gasova. Kod kotlova srednjeg i većeg kapaciteta najčešće se koriste rotacioni regenerativni zagrejači vazduha, koji se po tipu konstrukcije nazivaju Ljungštrelovim. Da bi se izbegla mogućnost niskotemperaturne korozije u kanalima dimnog gasa predviđeno je prethodno zagrevanje svežeg vazduha u parnim zagrejačima vazduha smeštenim na ulaznim kanalima zagrejača vazduha. Zagrejan vazduh se deli na tri struje: primarni, sekundarni i tercijarni. Takozvani primarni vazduh se dovodi u glavu recirkulacionog kanala radi sušenja uglja, tj. regulacije temperature aerosmeše. Sekundarni vazduh se dovodi u gorionike i obezbeđuje stehiometrijsko sagorevanje, što će biti kasnije detaljnije objašnjeno. Se-



Slika 2.6: *Tangencijalni raspored gorionika.*

kundarni vazduh se u ložište uduvava kroz posebne mlaznice. Gornji sekundarni vazduh se dovodi kroz mlaznice koje se nalaze iznad, a donji sekundarni vazduh se dovodi kroz mlaznice koje se nalaze ispod mlaznica aerosmeše za svaku etažu. Deo sekundarnog vazduha, jezgri vazduh se uvodi kroz krstasto postavljene cevi, tako da svaku mlaznicu aerosmeše deli na četiri dela. Konačno, deo terciarnog vazduha se odvodi ispod rešetke za dogorevanje, dok se ostatak koristi za hlađenje gorionika za pomoćno, tečno gorivo, tj. mazut. Paljenje mazuta se ostvaruje gasom za potpalu, propanbutanom.

Toplota, kao produkt sagorevanja se preko dimnih gasova predaje radnom fluidu (voda ili para), koji cirkuliše kroz cevni sistem (ekonomajzer, isparivač, pregrejače i međupregrejače). Tom prilikom dolazi do isparavanja vode i pregrevanja nastale pare, koja se dalje odvodi u turbinu. Izlazni gasovi iz postrojenja (na izlazu iz dimnjaka) moraju zadovoljavati zakonski propisane standarde o zaštiti životne sredine. U TENT-u B za prečišćavanje dimnih gasova koriste se elektrofiltri. Efikasnost elektrofiltera u otprašivanju je velika i iznosi preko 99%. Oni izdvajaju čestice pepela iz dimnih gasova uticajem elektrostatičkog polja visokog napona, tako što se naelektrisane čestice, tj. pepeo taloži na elektrodama elektrofiltera. Elektrofilterski pepeo se pneumatskim putem transportuje u silose za pepeo. Otpepeljavanja dimnih kanala u kotlarnici se vrši ispod Ljungštrema, a izdvojeni pepeo se takođe pneumatski transportuje u silose. Šljaka iz kotla pada na rešetke za dogorevanje (rostove) i odvodi se vodom u odšljakivač (kracer). U kadi odšljakivača šljaka se hladi vo-

dom, prikuplja se grebačem i prebacuje u drobilicu. Transport šljake obavlja se trakastim transporterima do silosa. Iz silosa se mešavina pepela, šljake i vode hidraulički transportuje na deponiju pepela i šljake. Prečišćen dimni gas se dalje, pomoću dva ventilatora dimnog gasa, kroz dimnjak odvodi u atmosferu.

Napojna voda se preko dva voda dovodi u zagrejač vode (ekonomajzer). Na bloku B1 je 2012. godine ugrađen dodatni ekonomajzer koji je doprineo smanjenju temperature dimnih gasova preko 20 stepeni, a samim tim i povećanju energetske efikasnosti. U ekonomajzeru se napojna voda greje na račun sniženja temperature izlaznih gasova. Sastoji se od cevi prečnika 38 mm sa promenljivom debljinom zida po toku vode (4 mm, 4.5 mm i 5 mm). Cevi se nastavljaju u izlazni kolektor ekonomajzera, odakle se zagrejana voda odvodi u ulazne kolektore isparivača. U cevnom sistemu isparivača voda se zagreva do tačke ključanja i isparava i dalje preko separatora pare, nastavlja do prvog pregrejača pare. U kotlu bloka TENT B1 vodena i parna faza se razdvajaju u separatoru pare. Pri svim opterećenjima većim od 30% od nominalnog, u separator se dovodi para sa isparivača, pa se kaže da kotao tada radi sa suvom bocom. Para se dalje vodi ka pregrejačima pare, koji se nalaze u oblastima u kojima je temperatura predajnika toplote najveća. Prvi pregrejač pare se sastoji od cevi prečnika 51 mm i predstavlja grejnu površinu sa suprotnosmernim nastrujavanjem predajnika i prijemnika toplote, jer je strujanje pare usmereno odozgo nadole. Temperatura sveže pare se pre ulaska u pregrejač dva reguliše ubrizgavanjem vode. Drugi stepen pregrejača sveže pare se sastoji od cevni zmijski prečnika 33.7 mm i takođe ima suprotnosmerno nastrujavanje. Odavde sveža para nastavlja ka razmenjivaču toplote, biflusu, gde sveža para predaje toplotu naknadno pregrejanom pari. Sveža para nastavlja dalje preko drugog hladnjaka do trećeg stupnja pregrejača sveže pare, koji se sastoji od cevni zmijski prečnika 38 mm debljine zida koja se povećava po toku pare (od 4 mm do 7.1 mm). Za razliku od prethodna dva, ovaj stupanj pregrejača je sa istosmernim nastrujavanjem jer sveža para struji odozdo nagore. Odatle se para preko trećeg hladnjaka i četvrtog stepena pregrejača sveže pare koji se sastoji od cevni zmijski prečnika 38 mm (istosmernog nastrujavanja) odvodi parovodom sveže pare u turbinu visokog pritiska. Svi hladnjaci su realizovani kao hladnjaci sa ubrizgavanjem vode u pregrejanu paru (razmenjivači toplote sa mešanjem) i služe za regulaciju njene temperature, takozvanu parnu regulaciju. Para za naknadno pregrevanje na sličan način prolazi kroz tri stepena naknadnog pregrevanja. Kao što je pomenuto, nakon prvog stepena se vodi kroz biflusu i razmenjuje toplotu sa pregrejanom svežom parom. Iz izlaznog kolektora poslednjeg stupnja naknadnog pregrejača, para se odvodi parovodom u turbinu srednjeg pritiska.

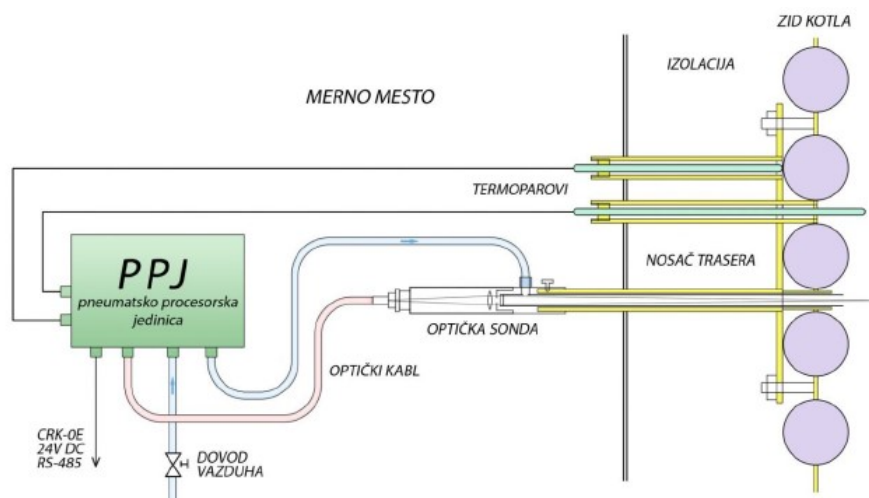


## 2.2 Opis pirometarskog sistema u TENT B1

Jedan od čestih problema u termoelektranama jeste nepoznavanje parametara plamena u ložištima kotlova. To podrazumeva sa jedne strane položaj žiže plamena (u horizontalnoj i vertikalnoj ravni) u odnosu na zidove kotla, a sa druge, jednako važno, poznavanje prostorne raspodele temperature plamena i maksimalne temperature unutar ložišta. Ovo može dovesti do raznih neželjenih pojava, o čemu je bilo više reči u prethodnom poglavlju. Dodatni problemi leže u merenju temperature kontaktnom metodom, jer stalan termički kontakt sa čvrstim telom u ložištu ne postoji. To se svodi na haotični kontakt sa pojedinačnim zapaljenim i nezapaljenim česticama uglja i pepela. Dodatno, za postizanje termičke ravnoteže čime senzor dostiže temperaturu okoline, potrebno je dosta vremena, tj. postoji velika inercija senzora. Rešenje ovakvog problema se može pronaći u uvođenju pirometarskog sistema za merenje i kontrolu raspodele.

Optički radijacioni pirometri predstavljaju beskontakne senzore koji mere temperaturu čestica u ložištu, a koje se nalaze u njegovom vidnom polju. Pirometri predstavljaju sistem sočiva i blendi koji fokusira emitovano zračenje iz odgovarajućeg prostornog ugla na dvobojnu foto-diodu koja se nalazi unutar dvobojnog optoelektronskog modula. Dvobojna foto-dioda konvertuje svetlosne signale iz istog prostornog ugla iz dva bliska opsega talasnih dužina u odgovarajuće električne signale, koji se potom pojačavaju i vode u dvobojnu procesorsku jedinicu na dalju obradu. Ukoliko temperatura unutar modula pređe 65 °C ugrađeni senzor daje signal procesorskoj jedinici da preko ventila iz pneumatskog bloka počne vazdušno hlađenje senzora dok temperatura ne opadne za 5 °C. Dvobojna procesorska jedinica dobijene signale iz dva bliska opsega talasnih dužina obrađuje, vrši temperaturnu kompenzaciju i iz njih procenjuje efektivnu temperaturu. Temperatura se određuje na osnovu izračene energije prema Plankovom zakonu zračenja crnog tela. Posebno su pogodni i praktično nezamenjivi u slučaju beskontaktnog merenja temperature, kakav je slučaj sa ložištem kotla u termoelektrani. Ono što međutim treba imati u vidu je da pirometar meri integralno zračenje svih čestica koje popunjavaju njegovo vidno polje i daje nekakvu srednju temperaturu kao rezultat merenja. Srednja temperatura se računa na osnovu svih zapaljenih čestica koje nemaju istu temperaturu, ali i onih nezapaljenih koje smanjuju temperaturu koju termometar pokazuje. U tom smislu realno povećanje temperature može biti zamaskirano povećanim doprinosom nezapaljivih čestica na optičkom putu.

Za razliku od ovakvih jednobojnih temperatura, na koje nesagorele čestice, dim i prašina utiču u vidu smanjenja efektivne srednje vrednosti, na dvobojne temperature (zbog načina merenja) jako malo utiču pomenute polutransparentne prepreke. Dvobojni pirome-



Slika 2.7: Pirometerska merna jedinica sa sistemom za otprašivanje i hlađenje.

tri koriste takozvane dvobojne (dvostruke) diode koje daju električni odgovor na optički signal na dve efektivne bliske talasne dužine ( $0.96 \mu\text{m}$  i  $1.05 \mu\text{m}$ ). Daju temperaturu koja je relativno bliska (nešto je manja) maksimalnoj temperaturi čestica na optičkom putu koji detektuje optika. Zbog toga se kombinacija ovakva dva pirometra u vidu formiranja razlike temperatura jednobojnog i dvobojnog pirometra, može koristiti kao merilo efikasnosti sagorevanja. Drugim rečima ukoliko je razlika između temperatura manja, to je sagorevanje efikasnije, i obrnuto, ako se srednja temperatura udaljava od maksimalne, broj nesagorelih čestica je veći. Dvobojni pirometri su podešeni da mere temperature u opsegu  $700^\circ\text{C} - 1300^\circ\text{C}$ .

Imajući u vidu prirodu okruženja u kojoj se pirometri nalaze (visoke temperature, za prašivanje i zašljakivanje optičkih komponenti), pirometerski sistemi se najčešće projektuju sa posebnim pneumatskim sistemom za otprašivanje. Takođe, često su elektronske komponente sistema odvojene od optičkih fiberoptičkim kablom. Na slici 2.7 je prikazana pirometerska merna jedinica, koja se sastoji od pneumatskog sistema za otprašivanje optičkog puta, trasera optičke sonde sa priključkom za vazdušno otprašivanje i čišćenje sočiva, dvobojnog (dvokanalnog) optoelektronskog modula, dvobojne (dvokanalne) procesorske jedinice za obradu signala i kutije sa elektromagnetnim ventilima za otprašivanje.

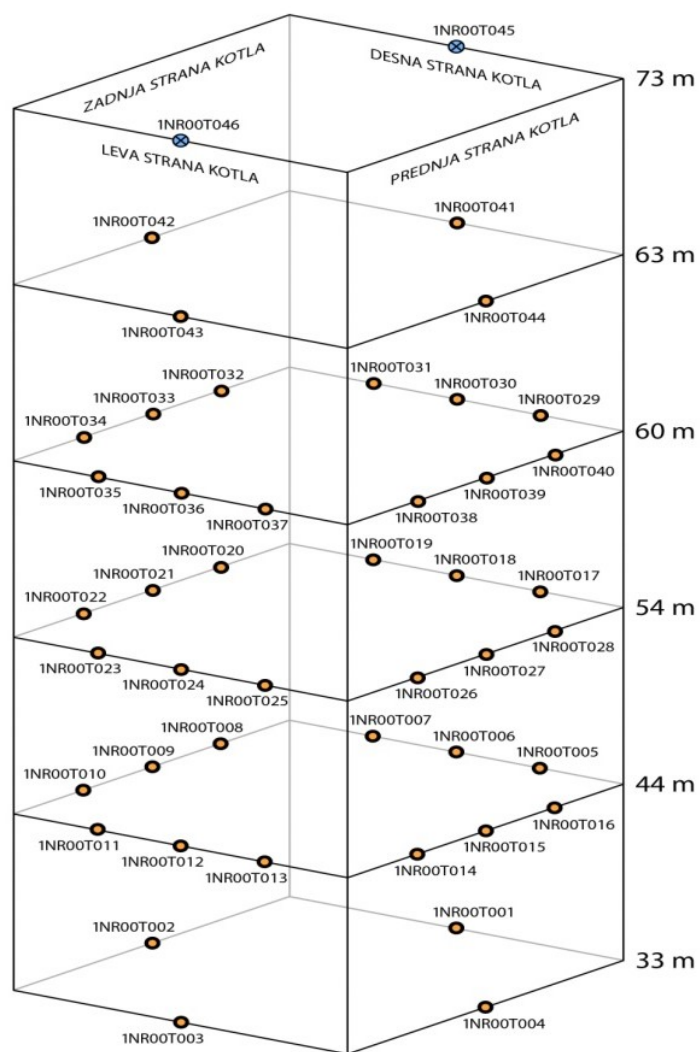
Pneumatsko procesorska jedinica se sastoji od zone elektronike i zona pneumatike. Zona elektronike se sastoji od optoelektronskog pretvarača koji sadrži specijalnu fotodiodu i pojačavački sistem koji pojačava signale unutar dve oblasti talasnih dužina unutar infracrvenog spektra i preko konektorskog kabla ih prosleđuje do obradno-procesorske jedinice. Obradno procesorska jedinica, prima i obrađuje signale iz optoelektronskog



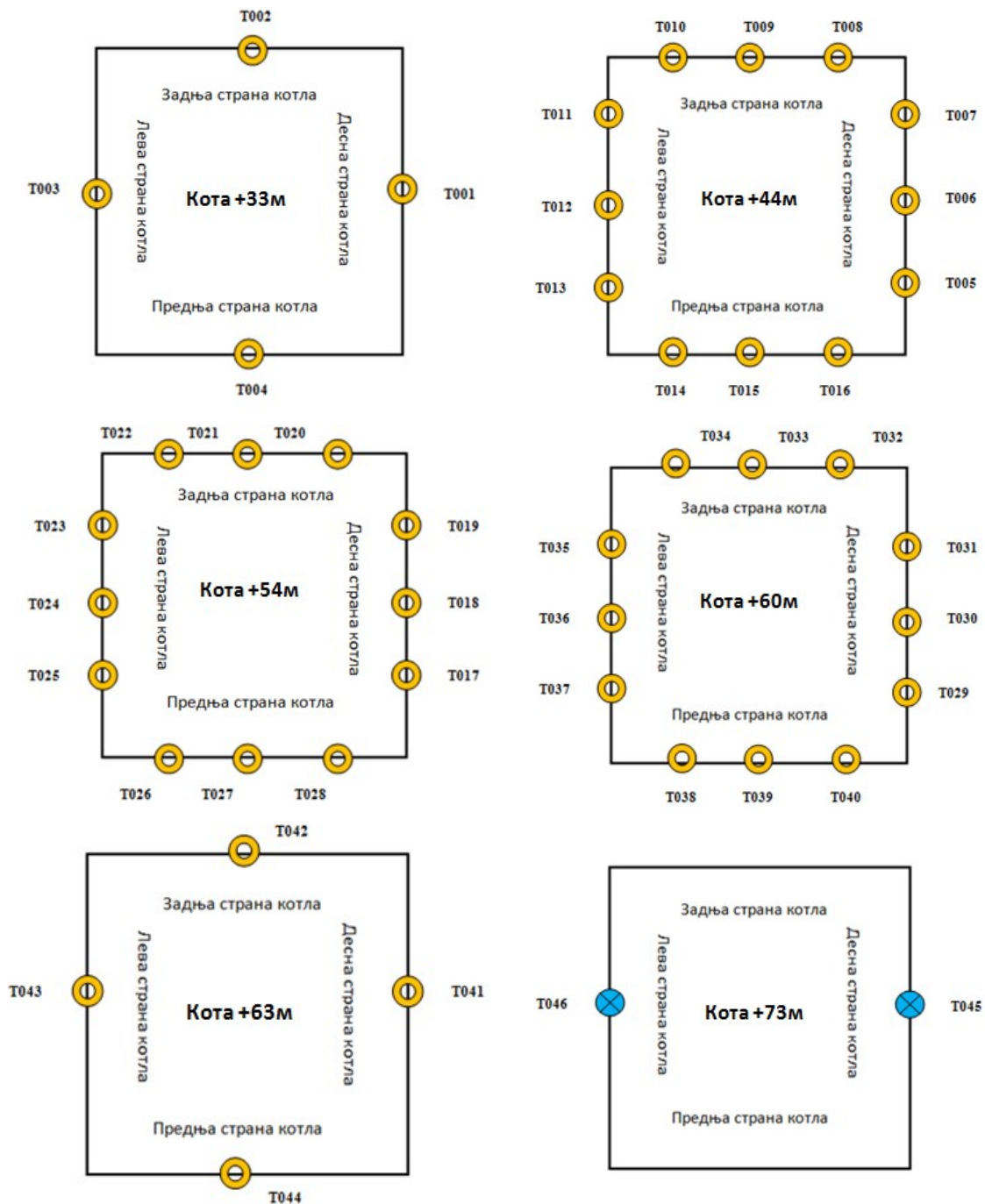
pretvarača, dva termopara i generiše upravljačke signale za pneumatski sistem otprašiva-  
nja optičkog puta. Po dobijenoj komandi iz centralnog upravljačkog sistema, procesor-  
ska jedinica preko RS485 interfejsa prosleđuje centralnom sistemu podatke o trenutnoj  
jednobojuj i dvobojuj temperaturi unutar kotla, temperaturama u neposrednoj blizini i  
na samom zidu kotla, (pokazivanje ugrađenih termoparova) i temperature okoline preko  
senzorske fotodiode. Ovi podaci se potom prosleđuju računarskom sistemu koji preko  
odgovarajućeg softvera računa i na posebnom displeju pokazuje prostornu raspodelu tem-  
perature plamena unutar kotla termoelektrane. Zona pneumatike se sastoji iz sistema ele-  
menata (fitinga) za razvod vazduha, elektromagnetnog ventila, ručnog igličastog ventila  
za ručno štelovanje protoka vazduha, kao i ulaznim i izlaznim granama sa pripadajućim  
uvodnicama. Upravljanje elektromagnetnim ventilom se ostvaruje preko procesorske je-  
dinice koja dobija naredbu, preko softvera.

Postavljanjem mreže pirometarskih jedinica na jednom preseku ložišta, može se dobiti  
informacija o raspodeli temperatura po tom poprečnom preseku. Ukoliko se to uradi za  
više poprečnih preseka tako da se pokrije kompletno ložište, stvara se 3D raspodela tem-  
peratura, kao osnova vizuelizacije procesa sagorevanja. Pirometarski sistem podrazumeva  
i softver za nadgledanje akvizicije i obradu signala sa svih senzora u cilju prikazivanja ras-  
podele temperature na različitim presecima, na osnovu čega se može proceniti i položaj  
termalne žiže (po visini, ali i u odnosu na zidove ložišta).

Pirometarski sistem za vizuelizaciju prostorne raspodele na bloku B1, TENT B u Ob-  
renovcu se sastoji od 44 dvobojuj optička pirometra i 2 dvokanalna nisko temperaturna  
pirometra koji su raspoređeni na šest kota: +33m; +44m i +54m; +60m, +63m i +73m,  
kao što je prikazano na slici 2.8. Raspored pirometara po presecima je diktiran realnim  
stanjem na terenu (postojanje prepreka koje onemogućavaju postavljanje pirometara) i za-  
htevima softvera za optimalnu vizuelizaciju prostorne raspodele. Predložena dispozicija  
po presecima (slika 2.9), tj. optimalan raspored u konkretnim uslovima jeste 4 pirometra  
na kotama 33 i 63m, kao i (dva nisko temperaturna dvokanalna na koti 73m, koji treba  
da omoguće praćenje temperature u procesu startovanja kotla) i po 12 dvobojuj piro-  
metara na kotama 44m, 54m i 60m (gde se očekuje položaj žiže plamena). Procesorska  
jedinica prosleđuje signale jednobojuj i dvobojuj temperature koji nakon odgovarajućeg  
procesiranja na odgovarajućem displeju daju prostornu raspodelu plamena unutar kotla.  
Time je istovremeno otvorena i mogućnost da operater koriguje parametre vezane za rad  
ventilatorskih mlinova (ubacivanje vazduha i goriva) i na taj način menja položaj plamena  
do optimalnog.



Slika 2.8: Dispozicija pirometara na bloku B1 po visinama.



Slika 2.9: Dispozicija pirometara na bloku B1 po poprečnim presecima.

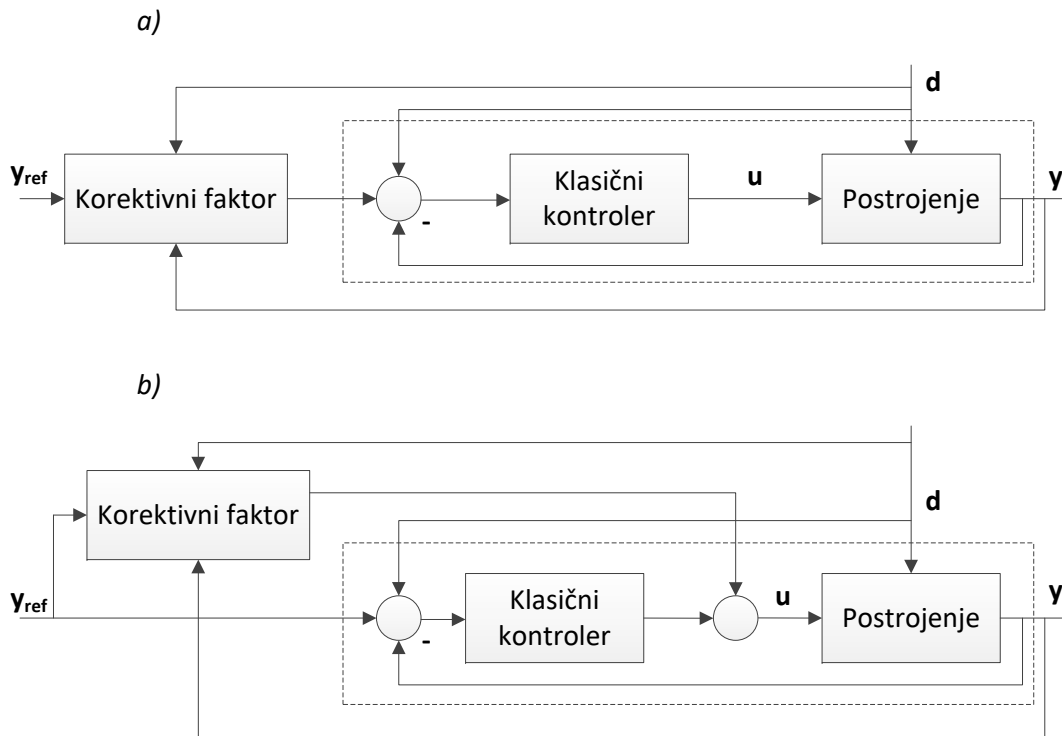
---

# Pregled upravljačkih strategija u termoenergetskim sistemima

---

Uporedo sa rastućim zahtevima po pitanju efikasnosti, zaštite životne sredine, raspoloživosti i finansijskih benefita, povećava se i računarska moć sistema korišćenih u industrijskoj regulaciji, što otvara prostor za proširenja i unapređenja trenutnih kontrolnih algoritama. Za praćenje i upravljanje radom termoelektrane zadužena je složena mreža senzora i aktuatora inkorporirana u brojne regulacione petlje koje imaju za cilj postizanje optimalnih parametara nezavisno od poremećaja u sistemu. Kako su mnoge od regulacionih petlji usko povezane, a neretko i rezultuju suprotstavljenim zahtevima, sveukupna optimizacija predstavlja značajan izazov i često se svodi na traženje kompromisa i rad mimo projektom predviđenih parametara. Jednom podešena struktura i parametri regulatora mogu biti konstantni ukoliko obezbeđuju zadovoljavajuće performanse prilikom raznih faza u radu sistema. Međutim, zbog promenljivih uslova kojima su izloženi pojedini podsistemi termoelektrana, vrlo često se koriste adaptivne upravljačke strukture koje prilagođavaju svoje parametre u skladu sa uslovima rada. Onda kada su poremećaji merljivi, mogu se koristiti i takozvani *feedforward* elementi čija je uloga da modifikuju referentni ili upravljački signal u skladu sa intenzitetom poremećaja, a na osnovu poznavanja njegovog uticaja na referencu odnosno odgovarajuću kontrolnu promenljivu (npr. promena opterećenja ili kvaliteta uglja) (slika 3.1).

Uprkos činjenici da je veliki broj regulisanih promenljivih u termoenergetskim postrojenjima korelisan i da se njihovo ponašanje ne može u potpunosti dekuplovati, većina regulatora je sa jednim ulazom i jednim izlazom (SISO - *Single Input Single Output*) prvenstveno zahvaljujući njihovoj jednostavnosti i intuitivnosti pri podešavanju parametara.



Slika 3.1: Upravljačka struktura sa korekcijom: a) reference, b) upravljačkog signala.

Tako se problem multivarijabilnih regulacionih petlji često svodi na više monovarijabilnih regulacionih petlji. Mane ovakvog pristupa su vidljive kada dođe do poremećaja ili promene nominalnog režima, jer tada spregnutost pojedinih kanala regulacije dolazi do izražaja. Nezavisno od korišćenog upravljačkog algoritma, regulacija bloka se može vršiti na jedan od tri načina [47, 48]:

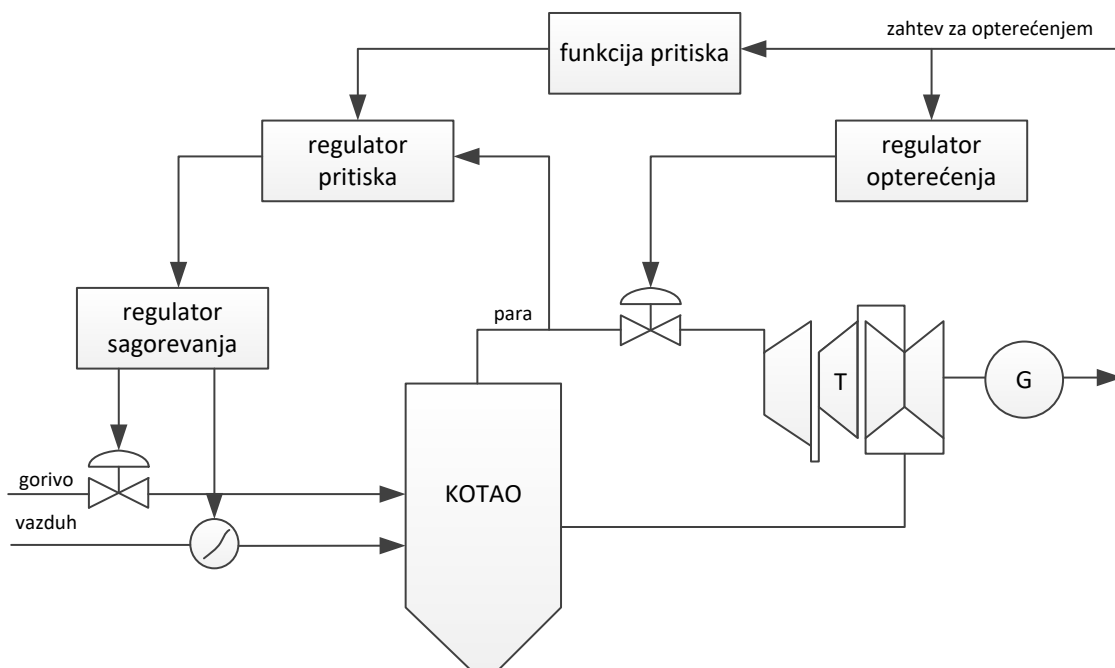
- Turbina vodi - kotao sledi je prvobitno korišćena upravljačka postavka. Osnovna ideja je da promena opterećenja utiče na turbinski ventil, kako bi se obezbedili traženi zahtevi po pitanju referentne snage. U skladu sa promenama protoka i pritiska pare, kotao reguliše količinu uglja i vazduha koji se uvode u ložište. Dobra strana ovakvog pristupa je brz odziv na promenu opterećenja, jer turbina može dovoljno brzo da iskoristi akumulisanu energiju u kotlu, koju kotao onda treba da nadoknadi. Mana ovakvog pristupa se ogleda u smanjenoj stabilnosti pri regulaciji pritiska pare na ulazu u turbinu, koja je posledica inertnosti kotla.
- Kotao vodi - turbina sledi je prvi put razvijen krajem šezdesetih godina prošlog veka. Referentna snaga se koristi za regulisanje procesa sagorevanja u smislu promene korišćene količine uglja i vazduha sa ciljem ostvarivanja odgovarajućeg protoka pare. Uloga turbine je da održava pritisak pare regulacijom turbinskog ventila.

Prednost ovakvog pristupa jeste stabilnost pritiska i temperature pri promeni opterećenja, dok je glavna mana spor odziv zbog nekorišćenja mogućnosti kotla da akumulira energiju.

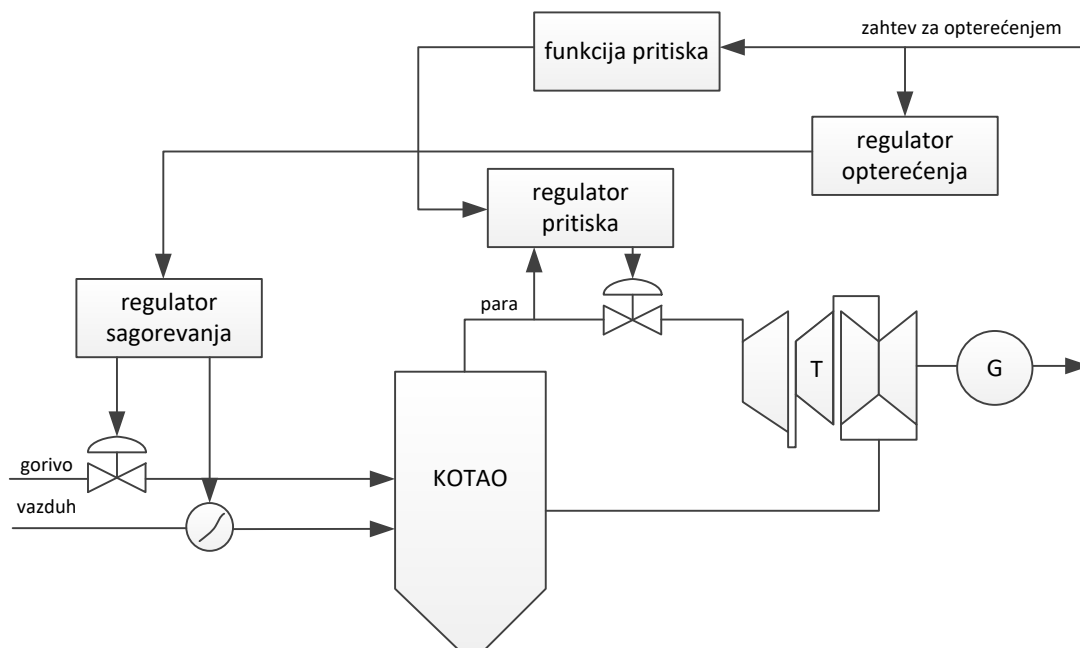
- Koordinisani mod se u velikoj meri počeo koristiti krajem šezdesetih godina. Ovakva struktura ima za cilj da kombinuje prednosti, a time i umanjuje nedostatke prethodna dva moda. U koordinisanom režimu se referentna snaga zadaje uporedo i turbini i kotlu. Na osnovu unapred poznatog nelinearnog preslikavanja dobija se informacija i o referentnoj vrednosti pritiska pare na ulazu u turbinu. Zavisno od kombinovanja upravljačkih i manipuliranih varijabli razlikuju se mod u kom kotao prati i mod u kom turbina prati. U prvom slučaju se na osnovu promene opterećenja reguliše turbinski ventil, a na osnovu referentnog pritiska i ostvarenog pritiska pare se upravlja vazduhom i ugljem korišćenim za sagorevanje (slika 3.2). U drugom slučaju, referentna vrednost opterećenja koriguje količinu uglja i vazduha potrebnih za sagorevanje, a odgovarajuća referentna vrednost pritiska i ostvareni pritisak se koriste za regulaciju turbinskog ventila (slika 3.3).

Tevera je predložio upravljačku strukturu koja može da koristi drugačiju strukturu (kotao prati, turbina prati, koordinisani mod) zavisno od radnih uslova [49]. Izbor odgovarajuće konfiguracije upravljanja se odvija u nekoliko koraka. U prvom koraku se sagledavaju radni uslovi i potrebe bloka. U drugom koraku se ocenjuje rad upravljačke strukture koja je u tom trenutku aktivna. Nakon toga se evaluira rad ostalih struktura pod trenutnim radnim uslovima. Konačno, porede se performanse sve tri strukture i bira se ona koja najviše odgovara takvim uslovima rada.

Korišćenje složenijih kontrolnih algoritama je dodatno dobilo na značaju sa razvojem naprednih sistema za distribuirano upravljanje (DCS - *Distributed Control System*), koji obuhvataju veliki broj kontrolera zaduženih za regulaciju različitih podsistema povezanih komunikacionom mrežom koja omogućava nadgledanje iz kontrolne sobe. Ovi sistemi se prvi put pominju osamdesetih godina prošlog veka, kada su zamenili centralizovanu logiku sa jednim računom u ulozi regulatora (DDS - *Direct Digital Control*). DCS se sastoji iz nekoliko nivoa: nivo senzora i aktuatora koji služi kao veza sa samim procesima, nivo regulatora i nivo za nadgledanje sa odgovarajućim interfejsom (HMI - *Human Machine Interface*) koji je dostupan operaterima u kontrolnoj sobi. Sa razvojem DCS-a, rastu i mogućnosti za unapređivanje upravljačkih algoritama. U termoenergetskim sistemima najzastupljenije su linearne upravljačke strukture, zbog njihove jednostavnosti. Međutim, sa rastućim zahtevima i računarskim resursima, razvijaju se i druge nekonvencionalne upravljačke strukture [50].



Slika 3.2: Koordinisani mod: kotao prati.



Slika 3.3: Koordinisani mod: turbina prati.

### 3.1 Linearna (PID) regulacija

Linearna regulacija je najzastupljeniji vid regulacije u industrijskim postrojenjima. PID regulatori pokrivaju preko 90% upravljačkih zahteva u praksi zahvaljujući svojoj jednostavnosti, intuitivnosti i malom broju podesivih parametara. PID regulatori predstavljaju kombinaciju tri dejstva: proporcionalnog (P), integralnog (I) i diferencijalnog (D), koja su okarakterisana odgovarajućim konstantama, pa je njihov doprinos u formiranju ukupnog upravljanja definisan sa:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.1)$$

gde je  $u(t)$  upravljačka varijabla,  $e(t)$  signal greške određen razlikom referentne i ostvarene vrednosti signala  $e(t) = r(t) - y(t)$ ,  $K_p$  proporcionalno pojačanje,  $T_i$  vremenska konstanta integralnog, a  $T_d$  vremenska konstanta diferencijalnog dejstva.

Drugim rečima, funkcija prenosa koja odgovara strukturi idealnog PID regulatora je:

$$G_{\text{PID}}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (3.2)$$

Diferencijalni član dat u (3.2) nije kauzalan, tj. nije ostvariv u vremenu. Takođe, idealno diferencijalno dejstvo ima rastuću amplitudsku karakteristiku, zbog čega je osetljivo na prisustvo mernog šuma. Iz ovog razloga, realna realizacija diferencijalnog dejstva sadrži i dodatni nisko-propusni filter, čiji se pol postavlja dovoljno daleko od učestanosti propusnog opsega kako se ne bi narušile performanse sistema. Funkcija prenosa realnog PID regulatora je data sa:

$$G_{\text{PID}}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right), \quad (3.3)$$

gde se parametar  $T_f$  obično usvaja iz opsega  $\frac{T_d}{5-20}$ . Iako je podešavanje parametara PID regulatora jednostavnije nego u slučaju drugih upravljačkih algoritama, jer je njihov uticaj na performanse sistema u zatvorenoj sprezi jasno određen, brojna su istraživanja u oblasti određivanja one kombinacije parametara koja će obezbediti projektovano ponašanje sistema. U slučaju kada je model sistema poznat, podešavanje parametara se može jednostavno izvršiti nekom od metoda u frekvencijskom domenu. Međutim, još jedna od prednosti PID regulacije se ogleda u mogućnosti određivanja okvirnih parametara i onda kada model sistema nije na raspolaganju. Među najpopularnije predstavnike ovog (*model-free*) ogranka metoda za podešavanje parametara PID regulatora spadaju Zigler-Nikolsove (*Ziegler-Nichols*) metode. Dve osnovne Z-N metode, predstavljene 1942. go-



dine, predlažu podešavanje parametara PID regulatora na osnovu karakterističnih parametara u frekvencijskom, odnosno vremenskom domenu. Parametri podešeni na ovaj način rezultuju prigušenim oscilatornim ponašanjem sistema, pa se u slučaju drugačijih zahteva parametri dobijeni na ovaj način moraju dodatno fino podesiti. Tokom vremena razvile su se brojne modifikacije ovih, ali i potpuno nove metode koje uzimaju u obzir različite pokazatelje ponašanja sistema prilikom podešavanja parametara PID kontrolera.

Zbog velike važnosti ovih regulatora vremenom su razvijene brojne modifikacije i proširenja osnovne strukture (3.3) za potrebe prevazilaženja nedostataka koje ona ima. Kako se PID regulatori u osnovi projektuju za rad u okolini odgovarajuće radne tačke, veliki broj unapređenja PID regulatora se odnosi na metode za samopodešavanje parametara regulatora zavisno od različitih radnih režima. Sigurd i kolege su predložili analitičko podešavanje parametara PID regulatora za različite tipove procesa [51]. Međutim, za podešavanje parametara PID regulatora mogu se koristiti i metode veštačke inteligencije, što će biti naknadno opisano.

## 3.2 Optimalna regulacija

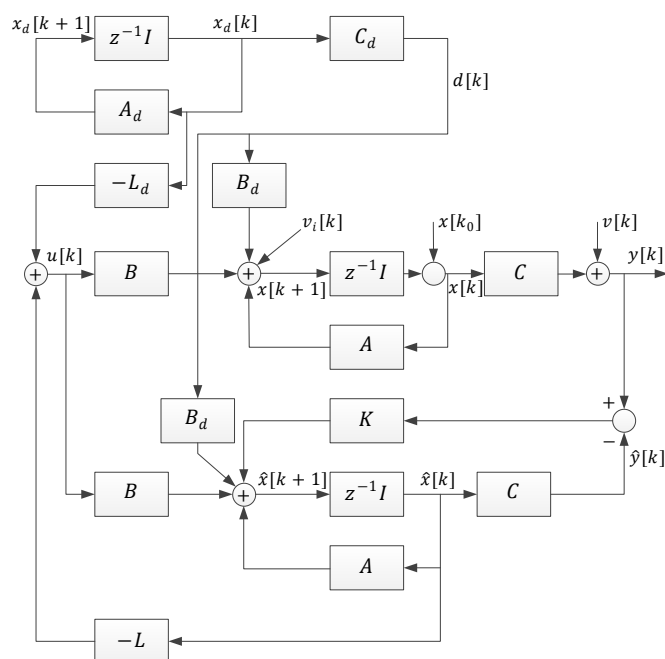
Teorija optimalnog upravljanja se zasniva na nalaženju upravljačkog zakona koji bi vodio ka optimizaciji (minimizaciji ili maksimizaciji) zadatog kriterijuma. Veliki doprinos ranom razvoju optimalnog upravljanja su pedesetih godina prošlog veka dali matematičari Lev Pontryagin i Richard Bellman. Kriterijumska funkcija u opštoj formi za kontinualni slučaj data je sa

$$J = \Phi [x(t_0), t_0, x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} \mathcal{L} [x(t), u(t), t] dt, \quad (3.4)$$

za model čija je jednačina stanja

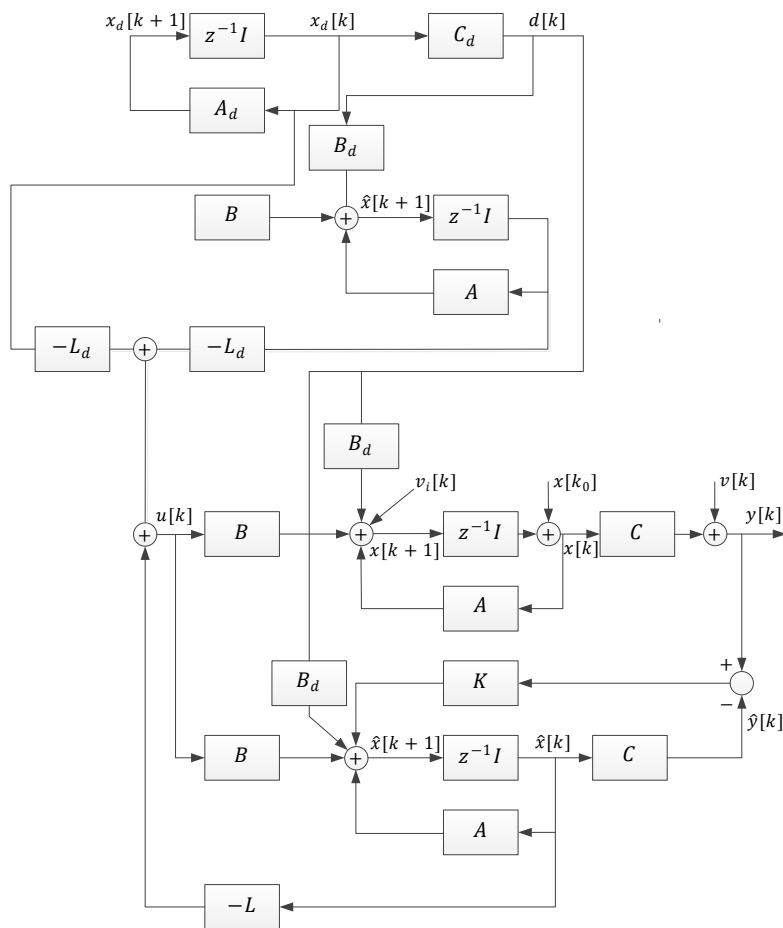
$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t), \quad (3.5)$$

gde je  $u(t)$  upravljački signal,  $x(t)$  je stanje,  $t$  je nezavisna (vremenska) promenljiva, a  $t_0$  i  $t_f$  označavaju početni i krajnji trenutak. Ovakva kriterijumska funkcija nudi velike mogućnosti i može se koristiti za optimizaciju široke klase upravljačkih problema. U najznačajnije tipove optimalnog upravljanja ubrajaju se LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) i odgovarajuće determinističko LQ (*Linear Quadratic*) optimalno upravljanje. LQG regulator se u praksi često koristi onda kada je problem regulacije složen i nestacionaran.



Slika 3.4: LQG kontroler sa integrisanom feedforward akcijom.

U [52] je opisana primena LQG upravljanja sa promenljivim parametrima za unapređenje mogućnosti termoelektrane da na adekvatan način isprati brze promene u opterećenju. Naime, sam kotao ima sporiju dinamiku od turbine i generatora, pa je ovo upravljanje uvedeno kao korektivni faktor u upravljanju kotlom. U radu je objašnjena razlika između integrisane i koordinisane *feedforward* akcije kod LQG kontrolera (slika 3.4 i 3.5), a dalje razvijanje i testiranje kontrolera za unapređenje postojećeg upravljačkog rešenja je sprovedeno sa LQG kontrolerom sa koordinisanom *feedforward* akcijom od zahteva za opterećenjem kotla ka zahtevanoj količini goriva i protoku napojne vode, održavajući željenu temperaturu pare iza pregrejača, temperaturu u isparivačima i pritisak pare na izlazu.



Slika 3.5: LQG kontroler sa koordinisanom *feedforward* akcijom.

Testiranje predložene strukture na termoelektrani od 265 MW nominalne snage pokazalo je da se maksimalan dozvoljeni gradijent promene opterećenja može podići za 4-8 MW/min. Cordons je ispitivao prednosti primene LQG upravljanja za regulaciju temperatura pare nad optimizovanim PID kontrolerima i pokazao da su one vidljive posebno

za vreme tranzijenta, što je dalje doveo u vezu sa nezanemarljivim ekonomskim benefitima [53]. Ovakve strukture su fleksibilne i u tom smislu se jednostavno mogu prilagoditi optimizaciji drugih upravljačkih petlji u termoelektrani. Pored mnogih primena tradicionalnih optimalnih upravljačkih struktura, brojni su primeri optimizacije upravljačkih struktura koristeći neke od metoda veštačke inteligencije.

### 3.3 Metode veštačke inteligencije

Metode veštačke inteligencije nalaze sve češću primenu u rešavanju problema u praksi. Njihova uloga je posebno značajna onda kada je zadatak kompleksan, bilo da je reč o njegovoj nelinearnosti ili parametrizaciji, ili nedovoljno precizno definisan. Ovakve metode imaju sposobnost učenja i generalizacije, a time i predikcije ponašanja i donošenja odluka, te je njihova primena raznovrsna. Kako je većina procesa koji se odvijaju unutar termoenergetskih postrojenja vrlo složena, sa više ulaza i više izlaza, sa izraženim nelinearnostima i kuplovanjem, teško je postići zadovoljavajuće rezultate korišćenjem konvencionalnih upravljačkih struktura. Danas se većina naprednih algoritama ostvaruje kroz sintezu dve ili više procedura. Često se kombinuju algoritmi koji imaju sposobnost oponašanja, tj. modeliranja funkcionalnih veza između pojedinih parametara sa algoritmima koji dalje koriste prethodno dobijene informacije za optimizaciju unapred predefinisanih kriterijuma. Sa jedne strane, pouzdanost i robusnost ovakvih algoritama u velikoj meri zavisi od dostupnosti i tačnosti obučavajućih podataka. Sa druge strane, postojanje DCS sistema omogućava prikupljanje velikih količina podataka na osnovu kojih mogu uspostaviti veze između pojedinih parametara korišćenjem metoda veštačke inteligencije.

Jedan od popularnih alata za modeliranje procesa bez poznavanja egzaktnih fizičkih procesa jesu neuralne mreže. Neuralne mreže predstavljaju intuitivno najbliži pokušaj da se biološki nervni sistem predstavi matematičkim aparatom. Iako se prvi put koncept neuralnih mreža ozbiljnije pominje četrdesetih godina dvadesetog veka, kada su McCulloch i Pitts dali prvi matematički model neurona, ekspanzija u primeni neuralnih mreža u modeliranju i upravljanju procesima je uzela maha tek osamdesetih godina prošlog veka. Neuralne mreže se sastoje od velikog broja procesirajućih elemenata (čvorova), koji predstavljaju neurone i veza između njih, koje simbolišu sinapse. Podaci se u mrežu dovode preko ulaznog sloja, odakle se prosleđuju jednom ili više skrivenih slojeva, sve do izlaznog sloja. Značaj svake veze je određen težinskim koeficijentima koji daju mogućnost obučavanja neuralnim mrežama, veza između nivoa je određena takozvanim integracionim funkcijama, dok je reakcija svakog procesirajućeg elementa na odgovarajuću kombinaciju ulaza određena aktivacionom funkcijom. Obučavanje neuralnih mreža može biti strukturalno (promena broja nivoa, čvorova, tipova veza) i parametarsko (korigovanje težinskih parametara). Zahvaljujući velikom broju promenljivih parametara, neuralne mreže imaju izraženu mogućnost učenja i generalizacije, zbog čega predstavljaju najrasprostranjeniji vid veštačke inteligencije. Primene neuralnih mreža u termoenergetskim sistemima su višestruke, bilo da je reč o njihovoj ulozi u adaptaciji parametara postojećih kontrolera ili modeliranja složenih procesa sa velikim brojem ulaza u izlaza.

Korišćenje neuralnih mreža za unapređenje postojećih PID regulatora vodi ka takozvanoj inteligentnoj PID regulaciji. Tipična upotreba neuralnih mreža je ilustrovana u [54] gde je kaskadna veza neuralne mreže i PID regulatora korišćena za regulaciju temperature pare ubrzala odziv sistema, ali i rezultovala robusnijim sistemom. Jedno od rešenja za regulaciju temperature pregrejane pare ponuđeno je u [55]. Ponuđena struktura sadrži dve rekurentne neuralne mreže čija je funkcija da reprodukuju inverznu dinamiku dvostepenog procesa ubrizgavanja. Izlazi ovakvih kontrolera na bazi inverzije dinamike služe za kompenzaciju i sabiraju se sa izlazom postojećeg PID kontrolera, a testiranje na simulatoru superkritičnog kotla nominalne snage 600 MW je pokazalo unapređenja po pitanju brzine i preskoka. Adaptivni PID kontroler čiji se parametri podešavaju na bazi gradijentnog algoritma na bazi informacija koje nudi RBF (*radial basis function*) neuralna mreža je prikazan u [56]. Peng i kolege su razmatrali primenu takozvanog imunog PID regulatora, zasnovanog na principima funkcionisanja ljudskog imunog sistema, za regulaciju temperature pare [57]. Adaptaciju samih parametara PID regulatora su sproveli na bazi neuralnih mreža. Predloženi algoritam je testiran u simulacijama i pokazao bolje performanse od konvencionalnog PID kontrolera, sa izraženom robusnošću prilikom promene parametara procesa i u prisustvu poremećaja. Za regulaciju temperature pare [58] predlaže kontrolnu šemu koja se sastoji od dve celine: inverznog kontrolera koji se podešava kroz *online* proces samoobučavanja i dodatnog kontrolera koji čiji je zadatak unapređenje robusnosti sistema. Druge primene neuralnih mreža u strukturi sa PID regularotima mogu se naći u [59].

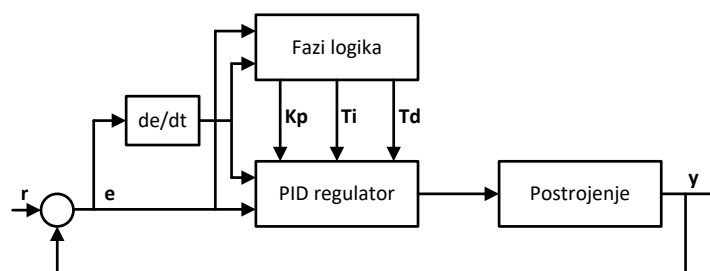
Neuralne mreže su korišćene i za potrebe modeliranja procesa koji se odvijaju u kotlu, a do čijeg fizičkog modela nije jednostavno doći. U [60] je predložen model koji koristi izmerene informacije o količini uglja, temperaturi, pritisku napojne vode i sl. za procenu masenog protoka, temperature i pritiska pare. U poređenju sa realnim merenjima, model je pokazao zadovoljavajuće rezultate, što je omogućilo dalje korišćenje za projektovanje i simulaciju kontrolnih algoritama. U [61] razmatra se upotreba dualnog heurističkog programiranja (DHP) na bazi generalizovanih neuralnih mreža sa radijalnom baznom funkcijom. Predložena struktura na osnovu prilagođenja količine goriva, brzine vazduha za sagorevanje i brzine izlaznih gasova, reguliše pritisak pare, sadržaj kiseonika u izduvnim gasovima i potpritisak u ložištu. Sastoji se od tri neuralne mreže od kojih svaka obavlja drugačiju funkciju: mreže koja modelira vezu između navedenih parametara (mreža modela), mreže koja formira odgovarajuću kriterijumsku funkciju i njene derivate (kritička mreža) i mreže koja na osnovu procenjenih derivata zadaje optimalne upravljačke signale (akciona mreža). Optimizacija sagorevanja minimizacijom emisije štetnih gasova se već dugi niz godina postiže algoritmima veštačke inteligencije. Jedan od dobrih pri-

mera je modeliranje nivoa nesagorelog ugljenika u pepelu u tangencijalno loženom kotlu nominalne snage 300 MW [12] primenom neuralnih mreža. Ulazi ovakvog modela su parametri radnog režima (opterećenje kotla, pozicija ventila sekundarnog vazduha, učešća dodavača, i sl.), kao i parametri uglja (vlažnost, kalorijska vrednost, i sl.), a rezultujuća estimacija nivoa nesagorelog ugljenika je vrlo bliska izmerenoj. Kako efikasnost kotla ne zavisi samo od ovih gubitaka, za dalji postupak optimizacije je korišćen genetski algoritam sa fitnes funkcijom koja opisuje efikasnost kotla kao razliku između 100% i ukupnih toplotnih gubitaka. Slična hibridna struktura korišćena je i za minimizaciju emisije oksida nitrata u kotlu nominalne snage 600 MW [62, 63].

U nekim slučajevima, za modelovanje  $\text{NO}_x$  emisije pouzdanije rezultate je dala SVR (*support vector regression*) metoda [64]. Ova metoda je uvedena pre desetak godina i bazira se na metodi SV (*support vector*) klasifikacije. Ona zavisi samo od podskupa obučavajućeg skupa zato što korišćena kriterijumska funkcija ne gleda podatke koji se nalaze izvan određene margine. Za optimizaciju ovako dobijenog izlaza iz modela korišćen je algoritam baziran na koloniji mrava. Algoritam kolonije mrava se zasniva na principu komunikacije među mravima i odvija se u dva koraka: faza isparavanja feromona i faza pojačavanja feromona srazmerno tačnosti pojedinačnog rešenja. Ovaj algoritam se u regulaciji loženja pokazao kao tačniji od genetskog algoritma, ali mu je potrebno više računarskih resursa da bi se izvršio. Genetski algoritmi koriste operatore reprodukcije, ukrštanja i mutacije da oponašaju prirodne procese evolucije i genetike. U svom radu iz 2009. godine Zheng je sa svojim kolegama dao poređenje različitih optimizacionih algoritama za regulaciju emisije  $\text{NO}_x$  [65]. Pokazano je da u kombinaciji sa SVR metodom za modeliranje procesa, metod kolonije mrava garantuje bolje performanse od PSO (*particle swarm optimization*) metoda i klasičnog genetskog algoritma. Slično, SVR pristup je poređen sa neuralnim mrežama i u proceni kvaliteta uglja, tj. sadržaja ugljenika u uglju [66], gde je takođe dao bolje performanse po pitanju preciznosti. SVR metoda se pokazala efikasno za modeliranje temperature pare uz kompenzaciju nelinearnosti koje su posledica velikih promena u količini uglja i napojne vode prilikom promene opterećenja [67]. Ovakav model je testiran u strukturi sa PID regulatorom sa promenljivim parametrima (gain scheduling PID), koji je obezbedio veću stabilnost i efikasnost od konvencionalnog PID kontrolera. [13] se dodatno osvrće na potrebu za adaptivnim algoritimima, jer se modeli koji opisuju pojedine procese u termoenergetskim sistemima menjaju zajedno sa parametrima poput kvaliteta uglja, stanja mlinova, naslaga čađi i šljake, koji se teško mogu uključiti u proces modeliranja zbog nemogućnosti *online* merenja. Rešenje ovakvog problema sprovedeno je u dva koraka. Najpre je korišćen adaptivni AOSVR (*accurate online SVR*) za potrebe uspostavljanja veze između nivoa  $\text{NO}_x$  i drugih raspoloživih parametara kotla.

Nakon toga, je sprovedena dvokoračna optimizacija sa ograničenjima na bazi genetskih algoritama koja uspostavlja vezu između nivoa  $\text{NO}_x$ , količine  $\text{NH}_3$  i procenta nesagorelog ugljenika u pepelu zavisno od radnih uslova kotla. SV metodologija je uspešno korišćena i za nadgledanje stanja plamena u ložištima [68], kao i za detekciju i izolaciju otkaza u kotlovima termoelektrana [69, 70].

Fazi logika (*fuzzy logic*) je još jedan izuzetno popularan pristup u veštačkoj inteligenciji čije je korene postavio Lofti Zade 1965. godine. Za razliku od Bulove logike koja ima samo dva nivoa istinitosti, fazi logika se zasniva na više nivoa. Veze između ulaza i izlaza fazi sistema se ostvaruju na osnovu fazi pravila koja se formiraju po principu "ako-tada". Prednost fuzzy upravljanja je u tome da nije neophodno precizno poznavati model procesa, što je često slučaj kod termoelektrana koje su izrazito nelinearni procesi. Kombinacija fazi upravljanja i regularnog PID upravljanja može uzeti u obzir dobre osobine oba načina regulacije, tako da će ovako regulisan sistem biti bolje prilagođen na različite poremećaje i nedovoljno poznavanje procesa, a samim tim i modela procesa. Fazi PID kontroler je neka vrsta nelinearnog kontrolera koji se sastoji od niza heurističkih pravila iz kojih se dobija upravljački signal. Odnos između ulaza i izlaza je sličan kao kod konvencionalnog PID kontrolera. U literaturi se mogu naći primeri primene fazi kontrolera za regulaciju pritiska, temperature, učestanosti i drugih bitnih veličina u termoenergetskim postrojenjima. Na slici 3.6 prikazan je blok dijagram fazi PID kontrolera koji ima za ideju da menja parametre konvencionalnog PID-a u zavisnosti od informacije koju mu daje fazi kontroler. Rezultati simulacije ovog rešenja na proces regulacije sagorevanja pokazuju da PID modifikovan na ovaj način ima znatno superiornije performanse od konvencionalnog PID-a.



Slika 3.6: Jedan primer fazi PID kontrolera.

U [71] Kocaarslan i kolege porede konvencionalan PID, sa PI kontrolerom kod koga se proporcionalno i integralno pojačanje podešavaju fazi strukturom (FGPI, *fuzzy gain scheduling* PI) i fazi kontrolerom koji koristi signal greške i njegov izvod za preračunavanje ukupnog upravljanja. U kombinaciji sa dekuplerom ovakvi kontroleri su testirani u



regulaciji snage i entalpije, gde je FGPI pokazao dosta bolje performanse od druga dva kontrolera. Ray i Majumder [72] su iskoristili teoriju dekoplovanja i fazi logiku za regulaciju pritiska i nivoa vode u separatoru pare u različitim radnim režimima. Fazi kontroleri su korišćeni i za regulaciju temperature pregrejane pare [73], pritiska pare [74], primarnu regulaciju [75, 76] i drugo. Ertugrul i saradnici su pokazali da primena GSPI kontrolera na bazi fazi logike za smanjenje odstupanja u frekvenciji obezbeđuje sličan preskok, ali značajno kraće vreme smirenja u odnosu na druge kontrolere. [77] daje pregled različitih metoda za podešavanje parametara PID regulatora za regulaciju učestanosti. Simulirano je ponašanje sistema zatvorene sprege za različite stepene poremećaja (od 1% do 10%) a razmatrani kontroleri su pokazali bolje performanse od konvencionalnih PID regulatora. Fazi adaptivni kontroler je pokazao bolju mogućnost generalizacije, pouzdanost i tačnost u odnosu na PID kontrolere podešavane na bazi genetskih algoritama i PSO metode (*partical swarm optimization*). Druge primene fazi kontrolera u termoenergetskim postrojenjima se mogu naći u [78–81].

### 3.4 Glavni regulator loženja u TENT B1

Glavni regulacioni zahtev bloka B1 termoelektrane TENT B je održavanje pritiska sveže pare ispred turbine na zadatoj vrednosti. S obzirom na kompleksnost ovog regulatora on se može podeliti na tri odvojene celine: prva celina je formiranje referentne vrednosti (SP - *Set Point*) pritiska, druga je glavni regulator bloka, gde se vrši regulacija pritiska. U okviru glavnog regulatora bloka postoji takođe i poseban funkcionalni deo koji se naziva stabilizacija. Treća celina je funkcija preraspodele loženja.

*Formiranje SP pritiska:* U koordinisanom modu rada, kada je turbina u regulaciji snage, a loženje u automatskom režimu rada reguliše pritisak, predviđeno je da se referentna vrednost pritiska sveže pare pred turbinom može zadavati ručno od strane rukovoca ili automatski po takozvanoj krivoj kliznog pritiska.

*Glavni regulator bloka:* Glavni regulator bloka ima za zadatak da održava pritisak sveže pare ispred turbine na zadatoj vrednosti (koja je definisana blokom *Formiranje SP pritiska*). Održavanje pritiska sveže pare ispred turbine se realizuje dobro podešenim PID regulatorom čiji je glavni ulaz greška dobijena kao razlika zadate vrednosti i izmerene vrednosti koja se dobija usrednjavanjem merenja sa tri senzora, a glavni izlaz je upravljački signal koji predstavlja ukupnu brzinu dozatora koji će shodno tome određenu količinu uglja dopremiti do mlinova, a potom mlinovi tu količinu uglja ubacivati u ložište kotla. Na tako dobijeni signal greške dodaje se signal za pripremu ložišta za slučaj promene željene aktivne snage bloka. Naredni ulaz u PID regulator je suma goriva  $W$  i to je signal koji se dobija kao zbir izmerenih brzina dozatora mlinova koji su u radu. Ovaj signal se koristi samo u slučaju prelaska sa ručnog na automatski režim rada, da bi se obezbedio bezudarni prelaz (*bumpless transfer*). Sledeći parametar PID bloka određuje proporcionalno dejstvo,  $K_p$ . Ovaj parametar ima konstantnu vrednost ukoliko je greška po pritisku dovoljno mala, odnosno ukoliko funkcija stabilizacije nije aktivna. Kada se aktivira i funkcija stabilizacije, konstanta proporcionalnosti uzima veću vrednost koja je definisana *look-up* tabelom i što je korekcija po snazi izraženija, to je vrednost ove konstante veća.

Vrlo važan parametar PID regulatora koji se koristi za upravljanje pritiskom sveže pare ispred turbine je vremenska konstanta integralnog dejstva  $T_i$ . Ako je greška koju turbinski ventil realizuje u regulaciji snage mala, u cilju stabilizacije sistema korisno je imati veću vremensku konstantu, međutim za slučaj velike greške (koje obično ukazuju na prelazne režime sa tehničkog minimuma na nominalnu snagu ili obrnuto), pogodno je izabrati manju vrednost vremenske konstante. Postoji i vremenska konstanta diferencijalnog dejstva  $T_d$ , koja je vrlo važna sa stanovišta kvalitetne regulacije pritiska. Slično kao

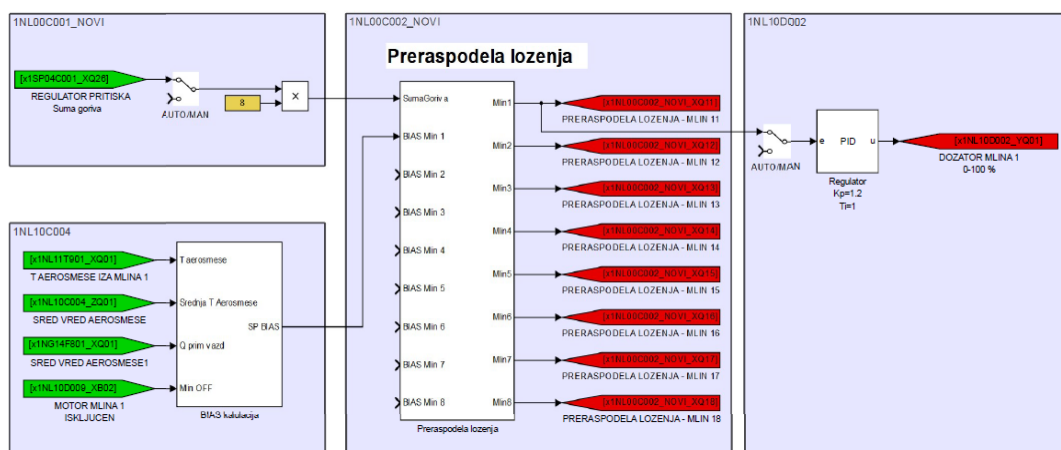
i proporcionalno dejstvo, i diferencijalno dejstvo može uzeti dve vrednosti. Ideja je sledeća: diferencijalno dejstvo je od interesa samo u okolini nominalnog režima rada, dok je u prelaznim (tranzijentnim) režimima snage, ili pri dejstvu stabilizacije, poželjno anulirati dejstvo diferencijalnog člana. Poslednji ulaz predstavlja signal *Track* kojim PID regulator ulazi u takozvanu funkciju *tracking*-a, tj. praćenja. Konačno, u uslovima promene zadate aktivne snage, postoji mogućnost dodatne pripreme ložišta koja se ogleda u direktnom dodavanju određene vrednosti na izlaz iz PID regulatora. Ovakva vrsta pripreme ložišta trenutno deluje na brzine dozatora, pa je njen efekat brži i očigledniji.

Poseban funkcionalni deo u okviru glavnog regulatora bloka je stabilizacija. Tokom nominalnog rada glavni regulator u slučaju smanjivanja pritiska sveže pare povećava brzinu dozatora i na taj način povećava količinu uglja koja se doprema do mlinova, a samim tim i do ložišta kotla. Na taj način će se povećanjem količine aerosmeše u ložištu povećati i parametri pare. Obrnutim postupkom se reaguje ukoliko je pritisak sveže pare veći od nominalnog. Ovaj zadatak regulacije je izuzetno težak s obzirom na dugačke vremenske konstante koje karakterišu vreme od zadavanja komande (povećanje brzine dozatora) do pojave očekivanog rezultata (povećanje pritiska sveže pare).

*Preraspodela loženja:* Preraspodela loženja je funkcionalna jedinica u DCS-u koja ima za zadatak da realizuje komandu koju je izdao glavni regulator loženja, ali da pri tome formira komandu za svaki od dozatora u radu. Naime, glavni regulator loženja generiše kao upravljačku veličinu ukupan zbir obrtaja svih dozatora koji su u funkciji, ne precizirajući koji od njih će se okretati kojom pojedinačnom brzinom. Preraspodela loženja ima za zadatak da preračuna kolikom brzinom svaki od dozatora treba da se okreće. Pri tome, mora da zadovolji četiri uslova:

1. Zbir brzina svih dozatora mora biti jednak zadatom zbiru koji je definisan od strane glavnog regulatora. Ovaj uslov je obavezan i on mora biti ispunjen.
2. Brzina dozatora mora biti veća od definisane minimalne brzine. Ovaj uslov je takođe obavezan.
3. Brzina dozatora mora biti manja ili jednaka od unapred definisane maksimalne brzine i ovaj uslov takođe mora biti uvek ispunjen.
4. Odnosi brzina  $i$ -tog i  $j$ -tog dozatora moraju biti u odnosu u kome stoje njihova učešća, odnosno  $\frac{\omega_i}{\omega_j} = \frac{b_i}{b_j}$ , gde su  $\omega_i$  i  $\omega_j$  brzine dozatora, a  $b_i$  i  $b_j$  su odgovarajuća učešća (koja se još nazivaju bajes ili bias). Ovaj uslov nije obavezan i algoritam koji je realizovan u bloku preraspodela loženja u najviše 8 iteracija pokušava da obezbedi postavljane zahteve. Ukoliko ove zahteve nije moguće ostvariti u tih 8 iteracija, algoritam ostavlja rešenje koje je najpribližnije zahtevanom.

Blok *Preraspodela loženja* (slika 3.7) je dinamička struktura koja ima svoje vremen-



Slika 3.7: Preraspodela loženja.

ske konstante i one su prilagođene i dinamičnom glavnom regulatoru i dinamičnom mehanici dozatora. Pri tome se striktno vodi računa o broju uključenih mlinova, zatim o minimalnom i maksimalnom opterećenju mlinova i dozatora, kao i o trenucima uključivanja ili isključivanja dozatora. O svemu ovome je važno voditi računa, jer ako npr. brzine dozatora nisu u odgovarajućem odnosu, to će uticati na pomeranje žiže plamena, što će dalje imati za posledicu neravnomernu raspodelu temperature u kotlu. Drugim rečima, neki elementi u sistemu će biti pod većom temperaturom od ostalih, što može da ima za posledicu pre vremena otkaz nekog izvršnog organa. Zato je potrebno ovaj deo glavnog regulatora što bolje razumeti i optimizirati. Procedura za preraspodelu loženja je sledeća: sabere se sve brzine obrtaja pojedinih dozatora i oduzmu od zahtevane brzine koju traži glavni regulator loženja. Dalje se ta greška dovodi na diskretizovani PID koji traži rešenje koje je najpribližnije zahtevanom. Preraspodela loženja svakog od mlinova se vrši u nekoliko koraka. Ulazni signal govori o tome da li mlin uopšte radi ili ne. Ako radi onda će se njegov udeo računati po određenom algoritmu, a za slučaj da nije aktivan on nema udela u preraspodeli loženja. Naravno, vodi se računa o tome da li je dozator mlina u ručnom režimu rada i da li je uključen regulator brzine dozatora, koji određuju da li će se na izlaz slati direktno udeo mlina koji je izmeren, ili će se udeo mlina korigovati po algoritmu. Na kraju, kao poslednji ulaz koristi se temperatura aerosmeše iza mlina, da bi se za slučaj povećanja temperature aerosmeše iznad 160 °C izvršila određena korekcija u algoritmu.

Iz svega priloženog vidi se da je ovo jedan kompleksan regulator, koji u sebi ima više regulacionih petlji koje su podeljene u odgovarajuće delove, i kao takve detaljnije opisane i analizirane. Razmotrimo mogućnost unapređenja glavnog regulatora u vidu korekcije preraspodele loženja u skladu sa predstavom raspodele temperatura u kotlu.

---

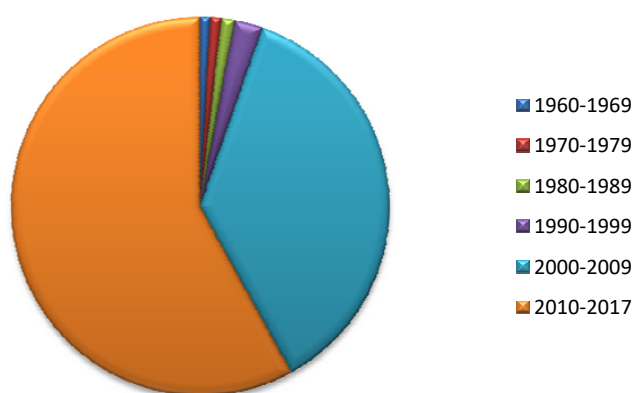
# Extremum seeking kao strategija za upravljanje složenim sistemima

---

Optimizacija u realnom vremenu postaje vremenom sve značajnija tema. Tradicionalni pristup se zasniva na modelu i podrazumeva adaptaciju parametara modela na osnovu dostupnih merenja. Međutim, u situacijama kada je objekat upravljanja složen, svaki numerički pristup modeliranju predstavlja samo malo bolju ili malo lošiju aproksimaciju nelinearnog, nestacionarnog sistema. Ovakav problem imaju tradicionalni optimizacioni algoritmi poput LQR (*linear quadratic regulator*), ali i moderni pristupi kao što je MPC (*model predictive control*). Drugačiji pristup kreće od pretpostavke da model nije dostupan i da je parametre upravljačkog algoritma potrebno odrediti na drugi način. Jedan od predstavnika ovakvog pristupa je *extremum seeking* upravljanje, koje ne zahteva eksplicitno poznavanje ulazno-izlazne karakteristike sistema, već samo postojanje ekstremne vrednosti koja odgovara željenom ponašanju sistema u zatvorenoj sprezi i dostupnost merenja ulaza i izlaza. Upravo zbog činjenice da ne zahteva model sistema, ovakva regulaciona struktura je robusna i efikasna u mnogim primenama. ES upravljanje se može primeniti onda kada je nelinearnost prisutna u samom procesu, u vidu nekakve fizičke nelinearnosti, ali i onda kada je nelinearnost prisutna u samoj kriterijumskoj funkciji koja treba da se minimizuje ili optimizuje. Drugim rečima, ES se može koristiti i za nalaženje odgovarajuće radne tačke koja će obezbediti optimalni izlaz, ali i za podešavanje parametara samog upravljačkog algoritma.

## 4.1 Pregled postojećih primena ES u literaturi

Razvoj oblasti extremum seeking-a nastupio je nakon izvođenja detaljnog dokaza stabilnosti 2000. godine [28]. Pretraga *Google Scholar*-a za publikacijama koji se bave *extremum seeking*-om govori u prilog ovoj činjenici. Na grafiku 4.1 je prikazan ukupan broj objavljenih radova u ovoj oblasti po decenijama. Do 2000. godine ukupan broj objavljenih radova je bio manji od 200, a u prvoj polovini poslednje decenije je već nadmašen broj publikacija u oblasti ES u odnosu na proteklu deceniju. Samo u toku 2016. godine taj broj iznosi više od 1000.



Slika 4.1: Udeo broja radova iz oblasti extremum seeking-a po decenijama u periodu 1960-2017.

Godine 2000. ostvaren je pomak i po pitanju multivarijabilnih ES algoritama [82]. Ubrzo zatim, bitni rezultati su ostvareni u oblasti ES upravljanja diskretnim sistemima [83]. Dodatni teorijski doprinos napravili su 2003. godine Ariyur i Krstić, objavljivanjem knjige *Real-time optimization by extremum seeking control* koja je najcitiranija publikacija u oblasti ES [84]. Usledila su dodatna istraživanja po pitanju konvergencije algoritma [85–87], kao i u oblasti vremenski promenljivih ES algoritama za diskretne sisteme [88]. Značajni teorijski rezultati su podstakli brojne primere primene extremum seeking upravljanja (ESC - *extremum seeking control*) u praksi. Jedan od najbitnijih koraka u implementaciji ESC jeste odabir kriterijumske funkcije. U nekim primenama, odabir kriterijumske funkcije koju treba optimizovati je jednostavan i svodi se na minimizaciju/maksimizaciju izlaza sistema dostupnog za merenje. U drugim, formiranje kriterijumske funkcije zahteva detaljniju analizu procesa, koja rezultuje u kombinovanje dostupnih merenja sa ciljem definisanja kriterijuma optimizacije. Pažljivim izborom, optimizacioni kriterijum može uključiti i dinamiku sistema. U svakom slučaju, zahvaljujući svojoj adaptivnoj prirodi ESC predstavlja odličan alat za upravljanje u realnom vremenu

i u primenama na nestacionarnim sistemima. Neke od najpoznatijih primena ESC je u optimizaciji vremena paljenja kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem [89, 90], u ABS sistemima [91–93], u povećanju efikasnosti fotonaponskih sistema [94, 95], u sistemima za hlađenje [96, 97], kod aksijalnih kompresora [98], u optimizaciji upravljanja rezervoarima sa kontinuiranim mešanjem [99, 100], realizaciji optimalnih sistema inteligentnog osvetljenja [101], za kontrolu protoka vazduha u gorivnim ćelijama [102], podešavanje parametara PID regulatora [103]. U energetskim sistemima ESC je uspešno korišćen za minimizaciju nivoa  $\text{NO}_x$  u termoelektranama na ugalj [104], za traženje super kritičnog  $\text{CO}_2$  zatvorenog Brajtonovog ciklusa u solarnim elektranama sa direktnim grejanjem [105], za postizanje maksimalne efikasnosti kod vetrogeneratora [106, 107], i druge primene.

## 4.2 Elementi ES pristupa

Pretpostavimo generalnu šemu nelinearnog sistema u formi

$$\dot{x} = f(x, u), \quad (4.1)$$

$$y = h(x), \quad (4.2)$$

gde je  $x \in \mathbb{R}^n$  stanje,  $u \in \mathbb{R}$ ,  $y \in \mathbb{R}$  je mera performanse, a funkcije  $f : D \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$  i  $h : D \rightarrow \mathbb{R}$  dovoljno glatke na  $D \subseteq \mathbb{R}^n$ . Pretpostavimo da kriterijumska funkcija 4.2 ima maksimum koji treba ostvariti projektovanjem ESC. Bitno je naglasiti da  $y$  ne mora nužno da se odnosi na izlaz sistema, kako to uobičajena notacija nalaže, već predstavlja izabranu meru željenog ponašanja sistema, koja zavisi od konkretne implementacije. Dodatna pretpostavka je da je sistem stabilan ili stabilizibilan u ravnotežnim stanjima. Ukoliko postoji glatko upravljanje, koje je parametrizovano faktorom  $\theta$

$$u = \alpha(x, \theta), \quad (4.3)$$

tada se sistem u zatvorenoj sprezi može predstaviti sa

$$\dot{x} = f(x, \alpha(x, \theta)). \quad (4.4)$$

Prethodno navedeni uslovi su formalno uvedeni preko tri pretpostavke koje su prvi put formulisane za potrebe izvođenja striktnog dokaza stabilnosti ES algoritma [108].

**Pretpostavka 1** *Postoji glatka funkcija  $l: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$  za koju važi*

$$f(x, \alpha(x, \theta)) = 0 \quad \text{ako i samo ako} \quad x = l(\theta).$$

**Pretpostavka 2** *Za svako  $\theta \in \mathbb{R}$  ravnotežno stanje  $x = l(\theta)$  sistema 4.1 je lokalno eksponencijalno stabilno.*

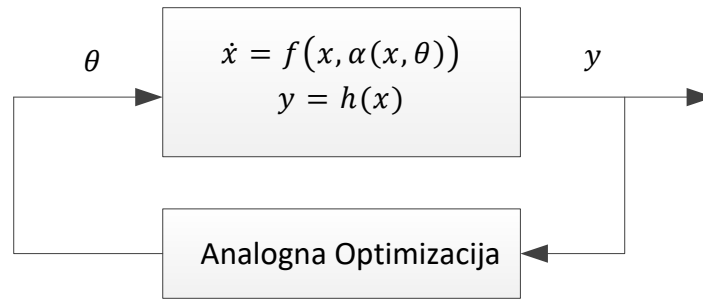
**Pretpostavka 3** *Postoji  $\theta^* \in \mathbb{R}$  tako da važi*

$$(h \circ l)'(\theta^*) = 0$$

$$(h \circ l)''(\theta^*) < 0.$$

Opšta šema ES upravljanja na bazi analogne optimizacije je data na slici 4.2. Nastavak poglavlja biće posvećen pregledu različitih ES pristupa zasnovanih na analognoj optimizaciji, sa akcentom na ES pristup na bazi perturbacionog signala [109].





Slika 4.2: *Extremum seeking upravljanje na bazi analogne optimizacije.*

### 4.2.1 ESC na bazi gradijenta

Razmatra se maksimizacija funkcije date sa 4.2. Ukoliko je poznat izvod funkcije  $dh/d\theta$ , tada se može izabrati zakon za optimizaciju

$$\dot{\theta} = k \frac{dh}{d\theta}, \quad k > 0 \quad (4.5)$$

Ukoliko je  $\theta^*$  vrednost argumenta za koju kriterijum  $h(\theta)$  ima ekstemum, tj. maksimum, tada se može izabrati kandidat za funkciju Ljapunova

$$V = h(\theta^*) - h(\theta). \quad (4.6)$$

U tom slučaju prvi izvod funkcije 4.6 je jednak

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{dh(\theta^*)}{dt} - \frac{dh(\theta)}{dt} = 0 - \frac{dh}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -\frac{dh}{d\theta} \dot{\theta} = -\frac{dh}{d\theta} \cdot k \frac{dh}{d\theta} \\ \dot{V} &= -k \left( \frac{dh}{d\theta} \right)^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Iz prethodne analize se na osnovu direktnog metoda Ljapunova može izvesti zaključak da  $\theta$  konvergira ka invarijantnom skupu za koji važi  $\dot{V} = 0$ , što je na osnovu pretpostavke 3 upravo vrednost  $\theta^*$ , tj. da je ekvilibrjum  $\theta^*$  lokalno asimptotski stabilan. Slično se može pokazati i u slučaju lokalnog minimuma, jednostavnim promenom znaka  $k$  i  $V$ . U opštem slučaju pretpostavka o poznavanju gradijenta je stroga. U jednodimenzionom slučaju se ta pretpostavka može i pojednostaviti poznavanjem znaka gradijenta, odnosno usvajanjem

$$\dot{\theta} = k \cdot \text{sgn} \left( \frac{dh}{d\theta} \right), \quad k > 0 \quad (4.8)$$

Konvergencija se može jednostavno pokazati korišćenjem istog kandidata za funkciju Ljapunova. Međutim, i poznavanje znaka gradijenta je i dalje stroga pretpostavka. Onda kada on nije poznat, može se ići na procenu znaka gradijenta npr. koristeći takozvani *sliding mode* pristup.

U višedimenzionom slučaju ESC na bazi gradijenta bi bio kudikamo komplikovaniji bez svođenja na šemu prikazanu na slici 4.2. Razmatrajmo  $n$ -dimenzioni gradijentni sistem

$$\dot{x} = k\nabla h(x), \quad k > 0. \quad (4.9)$$

Poznato je da su maksimumi funkcije  $h$  stabilna ravnotežna stanja ovog gradijentnog sistema. Drugim rečima, ukoliko postoji gradijent i ukoliko može da se formira upravljanje tako da se nelinearni sistem opisan sa 4.1 i kriterijumskom funkcijom 4.2 ponaša kao gradijentni sistem 4.9, tada se može uspešno projektovati *extremum seeking* upravljanje. Pokazuje se da se konvergencija može postići i onda kada je upravljanje takvo da sistem bude oblika

$$\dot{x} = \frac{\nabla h(x)}{\|\nabla h(x)\|} \quad \text{ili} \quad \dot{x} = \text{sgn}(\nabla h(x))$$

Postavlja se pitanje kako izabrati upravljački signal, a da se dinamički sistem ponaša kao gradijentni sistem 4.9. Razmatrajmo LTI sistem

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, \quad (4.10)$$

čije stanje  $x^*$  obezbeđuje maksimum kriterijumske funkcije  $h(x)$ . Po ugledu na raniju analizu, ukoliko se usvoji kandidat za funkciju Ljapunova u formi

$$V = h(x^*) - h(x), \quad (4.11)$$

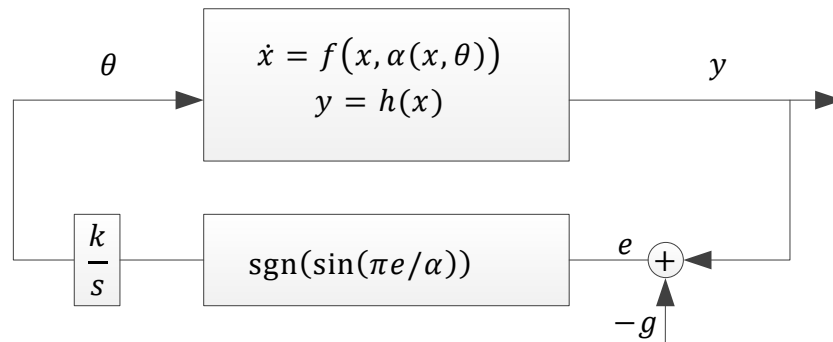
tada važi

$$\dot{V} = -\nabla h(x)^T \cdot \dot{x} = -\nabla h(x)^T \cdot (\mathbf{A}x + \mathbf{B}u), \quad (4.12)$$

odakle se vidi da nalaženje upravljanja koje će obezbediti  $\dot{V} \leq 0$  nije jednostavno čak i kada je gradijent poznat. U slučaju kada je matrica  $\mathbf{B}$  kvadratna i regularna, može se izabrati

$$u = k\mathbf{B}^{-1}(\nabla h(x) - \mathbf{A}x) \quad k > 0, \quad (4.13)$$

za koje izvod kandidata za funkciju Ljapunova postaje  $\dot{V} = -k\|\nabla h(x)\|^2 \leq 0$ , odakle se može zaključiti konvergencija. Međutim, kao što je ranije naglašeno, poznavanje gradijenta je strog zahtev. Dodatno, nalaženje zakona upravljanja koji transformiše nelinearni sistem u gradijentni sistem 4.9 može biti komplikovano ili nemoguće. Zbog toga, uvedene



Slika 4.3: *Extremum seeking upravljanje na bazi kliznog režima.*

pretpostavke 1-3 imaju izuzetan značaj, jer svode ES upravljanje na traženje parametra kontrolera  $\theta^*$  koji obezbeđuje optimizaciju unimodalne mape od reference do izlaznog ekvilibrijuma ( $h \circ l(\theta)$ ).

#### 4.2.2 ESC na bazi kliznog režima

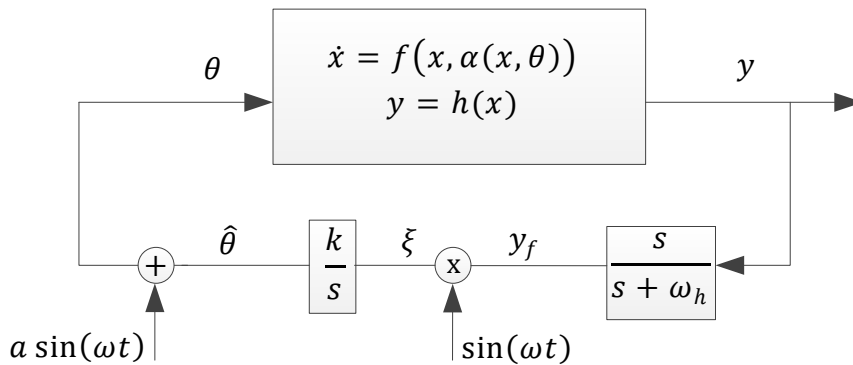
Glavna ideja ovog prisupa jeste da kriterijumska funkcija  $h(\theta)$  prati rastuću ili opadajuću funkciju vremena kretanjem u kliznom režimu. U slučaju maksimizacije funkcije, razmatra se rastuća funkcija vremena. Drugim rečima ovakva postavka se svodi na anuliranje greške praćenja. Ovakva ideja je proširena uvođenjem periodične prekidačke funkcije koja je našla brojne primene u praksi. Uobičajena šema ESC na bazi kliznog režima prikazana je na slici 4.3. Ukoliko sa  $g(t)$  označimo monotonu rastuću funkciju vremena, koju želimo da pratimo, signal greške i njegov izvod su jednaki

$$\begin{aligned} e &= h(\theta) - g(t), \\ \dot{e} &= \frac{dh}{d\theta} \dot{\theta} - \dot{g}(t). \end{aligned} \quad (4.14)$$

Korišćenjem zakona za optimizaciju

$$\dot{\theta} = k \cdot \text{sgn}(\sin(\pi e/\alpha)), \quad k > 0, \quad (4.15)$$

gde je  $\alpha$  pozitivna mala konstanta, klizni režim se ostvaruje za  $k|dh/d\theta| > |\dot{g}(t)|$ , odnosno greška se upravlja ka nuli, odnosno  $\theta$  se kreće ka  $\theta^*$ .



Slika 4.4: *Extremum seeking upravljanje na bazi sinusoidalnog perturbacionog signala.*

### 4.2.3 ESC na bazi perturbacionog signala

ESC na bazi perturbacionog signala je najpopularniji među analognim optimizacionim pristupima. Slika 4.4 predstavlja klasičnu ES strukturu za statički slučaj koja koristi sinusoidalne perturbacije. Na datoj šemi figuriše nekoliko parametara koji određuju ponašanje optimizacionog algoritma, a od čijeg izbora zavise performanse optimizacione procedure: perturbacije su određene amplitudom  $a$  i učestanošću  $\omega$ ,  $\omega_h$  je granična učestanost visoko-propusnog filtra koji ima zadatak da eliminiše jednosmernu komponentu signala  $y$ , a parametar  $k$  određuje brzinu integracije. Visokopropusni filtar nije neophodan u datoj postavci, jer svakako dolazi do množenja sa  $\sin(\omega t)$  prilikom modulacije, međutim doprinosi performansi algoritma pri manjim učestanostima perturbacionog signala, pa se zbog toga često koristi.

Analiza polazi od činjenice da se svaka funkcija  $h$  klase  $C^2$  može aproksimirati Tejlovim redom u okolini tačke  $\theta^*$

$$h(\theta) = h^* + \frac{h'}{1!}(\theta - \theta^*) + \frac{h''}{2!}(\theta - \theta^*)^2 + o(\theta - \theta^*)^2. \quad (4.16)$$

U slučaju kada je  $\theta^*$  tačka u kojoj funkcija ima lokalni ekstremum  $h^*$ , odnosno  $h'(\theta^*) = 0$ , prethodni izraz se svodi na

$$h(\theta) = h^* + \frac{h''}{2!}(\theta - \theta^*)^2. \quad (4.17)$$

U slučaju kada je  $h^*$  maksimum funkcije  $h'' < 0$ . U slučaju da se razmatra lokalni minimum, tj. da je  $h'' > 0$ , u šemi 4.4 treba razmatrati  $k < 0$ . Uvođenje perturbacionog signala ima za cilj nalaženje mere gradijenta  $\frac{dh}{d\theta}$ .

Uvedimo oznaku za grešku estimacije, odnosno signal koji predstavlja odstupanje

estimirane vrednosti parametra,  $\hat{\theta}$  od optimalne vrednosti  $\theta^*$

$$\tilde{\theta} = \theta^* - \hat{\theta}. \quad (4.18)$$

Tada se može dalje pisati

$$\theta - \theta^* = \theta - \hat{\theta} - \tilde{\theta} = a \sin(\omega t) - \tilde{\theta}, \quad (4.19)$$

odnosno kriterijumska funkcija postaje

$$\begin{aligned} y &= h^* + \frac{h''}{2} (a \sin(\omega t) - \tilde{\theta})^2 \\ y &= h^* + \frac{h''}{2} (a^2 \sin^2(\omega t) - 2a \sin(\omega t) \tilde{\theta} + \tilde{\theta}^2) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Korišćenjem veze

$$2 \sin^2(\omega t) = 1 - \cos(2\omega t),$$

prethodna jednakost postaje

$$\begin{aligned} y &= h^* + \frac{h''}{2} \left( \frac{1}{2} a^2 (1 - \cos(2\omega t)) - 2a \sin(\omega t) \tilde{\theta} + \tilde{\theta}^2 \right) \\ y &= h^* + \frac{h''}{4} a^2 - \frac{h''}{4} a^2 \cos(2\omega t) - h'' a \sin(\omega t) \tilde{\theta} + \frac{h''}{2} \tilde{\theta}^2 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Nakon prolaska kroz visokopropusni filter  $s/(s + \omega_h)$  eliminiše se jednosmerna komponenta, pa se na izlazu iz filtra dobija signal

$$y_f = -\frac{h''}{4} a^2 \cos(2\omega t) - h'' a \sin(\omega t) \tilde{\theta} + \frac{h''}{2} \tilde{\theta}^2 \quad (4.22)$$

Sledeći korak je modulacija, odnosno množenje sa  $\sin(\omega t)$ , pa je oblik signala  $\xi$

$$\begin{aligned} \xi &= -\frac{h''}{4} a^2 \cos(2\omega t) \sin(\omega t) - h'' a \sin^2(\omega t) \tilde{\theta} + \frac{h''}{2} \tilde{\theta}^2 \sin(\omega t) \\ \xi &= -\frac{h''}{8} a^2 (\sin(3\omega t) - \sin(\omega t)) - \frac{h''}{2} \tilde{\theta} a (1 - \cos(2\omega t)) + \frac{h''}{2} \tilde{\theta}^2 \sin(\omega t) \\ \xi &= -\frac{h''}{8} a^2 \sin(3\omega t) + \frac{h''}{8} a^2 \sin(\omega t) - \frac{h''}{2} \tilde{\theta} a + \frac{h''}{2} \tilde{\theta} a \cos(2\omega t) + \frac{h''}{2} \tilde{\theta}^2 \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (4.23)$$

Ovakav signal se dovodi na ulaz integratora, gde dolazi do filtriranja viših učestanosti. Sa druge strane razmatra se lokalna stabilnost, na koju članovi koji u sebi sadrže  $\tilde{\theta}^2$  nemaju

uticaj. Drugim rečima na izlazu iz integratora se dobija signal

$$\dot{\hat{\theta}} = k \left( -\frac{h''}{2} \tilde{\theta} a \right) = -\frac{h''}{2} k a \tilde{\theta}. \quad (4.24)$$

Konačno, imajući u vidu da je  $\tilde{\theta} = \theta^* - \hat{\theta}$ , odnosno da je  $\dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\hat{\theta}}$ , gornja jednakost postaje

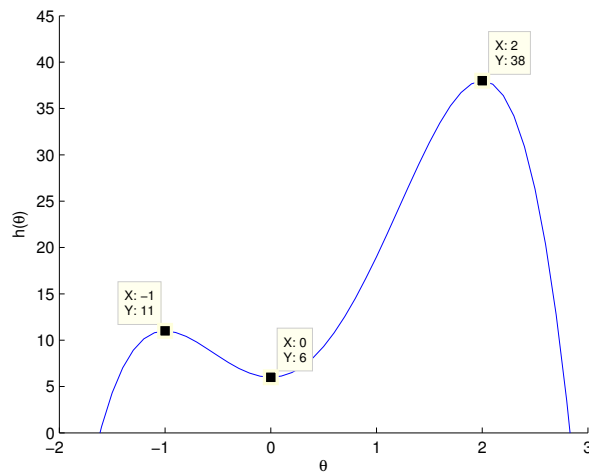
$$\dot{\tilde{\theta}} = \frac{h''}{2} k a \tilde{\theta}. \quad (4.25)$$

Kako su amplituda perturbacionog signala  $a$  i parametar  $k$  pozitivni, a  $h'' < 0$ , može se zaključiti da je reč o stabilnom sistemu. Drugim rečima  $\tilde{\theta} \rightarrow 0$ , odnosno  $\hat{\theta}$  konvergira ka okolini  $\theta^*$ , pa se osobine osnovne ES šeme sa slike 4.4 mogu obuhvatiti sledećom teoremom:

**Teorema 1** *Za sistem sa slike 4.4, signal greške  $y - h^*$  dostiže lokalnu eksponencijalnu konvergenciju ka  $O(a^2 + 1/\omega^2)$  okolini, ukoliko je učestanost perturbacija  $\omega$  mala, a  $\frac{1}{1+L(s)}$  asimptotski stabilno, gde je  $L(s) = \frac{kah''}{2s}$ .*

Za potrebe korektnosti prethodne analize treba imati u vidu da  $k$ ,  $a$  i  $\omega_h$  moraju biti mali u odnosu na učestanost perturbacija  $\omega$ . Iz prethodnog izraza se vidi da na brzinu konvergencije utiče i vrednost  $h''(\theta^*)$ . Odnosno, što je ekstremum "strmiji", to je ova vrednost veća, a konvergencija brža. Dodatno, brzina konvergencije je proporcionalna sa  $1/\omega$ ,  $a$  i  $k$ . Učestanost perturbacija  $\omega$  omogućava razdvajanje vremenskih konstanti između estimacije optimalnog parametra koju vrši integrator i estimacije gradijenta koja se postiže uvođenjem perturbacionih signala. Što je ova učestanost veća, estimacija je bolja. Amplituda perturbacija  $a$  omogućava kompromis između oblasti privlačenja tačke eksteremuma i asimptotske performanse. Naime, što je parametar  $a$  manji, to je manja greška prilikom dostizanja ekstremne vrednosti, ali i manja šansa da se dostigne globalni ekstremum i obrnuto. Parametar integracije  $k$ , zajedno sa parametrom  $a$  određuje brzinu konvergencije. Veća vrednost ovog parametra omogućava bržu konvergenciju. Učestanost visokopropusnog filtra treba birati tako da bude manja od učestanosti perturbacija, kako bi došlo do eliminacije DC komponente, bez narušavanja procene gradijenta. Ilustrovaćemo uticaj ovih parametara kroz sledeći primer.

**Primer 1:** Posmatra se funkcija četvrtog reda  $h(\theta) = -3\theta^4 + 4\theta^3 + 12\theta^2 + 6$ . Funkcija ima lokalni maksimum  $h(\theta = -1) = 11$ , lokalni minimum  $h(\theta = 0) = 6$  i globalni maksimum  $h(\theta = 2) = 38$ . Grafik funkcije je dat na slici 4.5. Kako bi primer bio ilustrativniji, usvojimo početni uslov u okolini lokalnog maksimuma i to levo od njega, npr.  $\hat{\theta}(0) = -1.5$ .



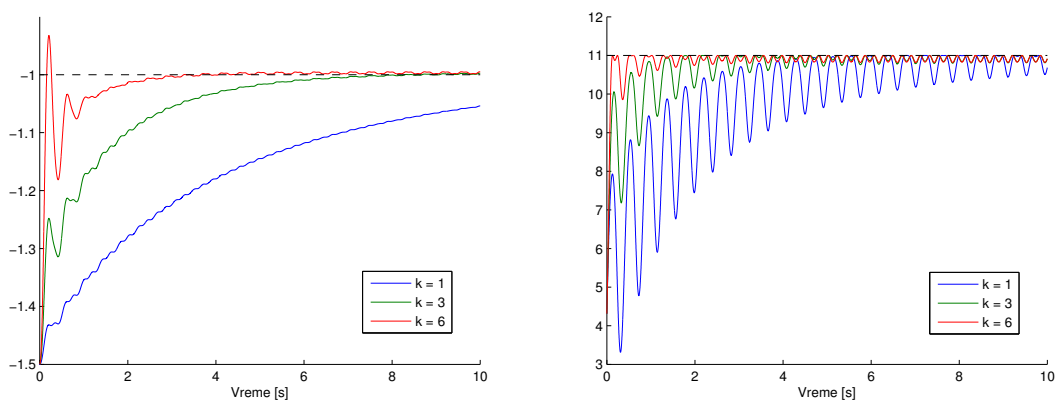
Slika 4.5: Funkcija četvrtog reda uz Primer 1:  $h(\theta) = -3\theta^4 + 4\theta^3 + 12\theta^2 + 6$ .

Ispitajmo ponašanje ES algoritma za različite vrednosti pojedinih parametara.

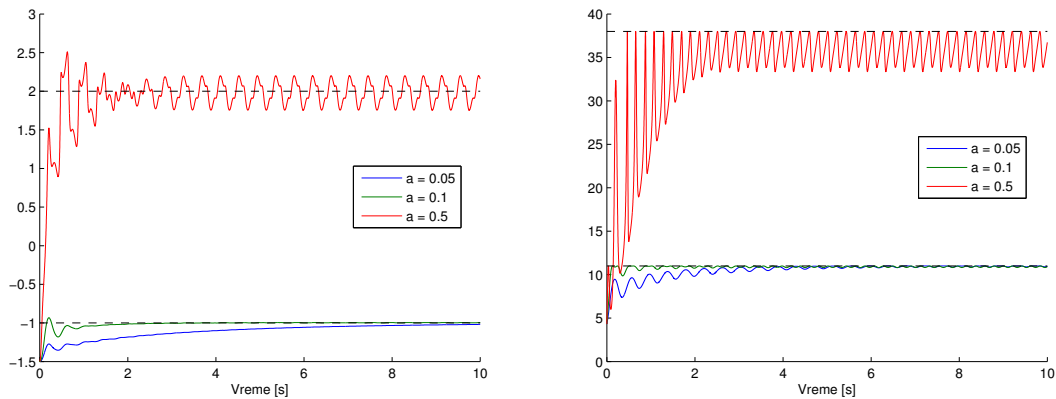
Slika 4.6 pokazuje da se za veće vrednosti parametra  $k$  postiže brža konvergencija. U sva tri slučaja, algoritam konvergira ka lokalnom maksimumu u  $\hat{\theta} = -1$ .

Na slici 4.7 prikazan je uticaj promene parametra  $a$  na brzinu konvergencije za fiksne vrednosti  $\omega = 15\text{rad/s}$  i  $k = 6$ . Za malu vrednost parametra  $a$  algoritam konvergira ka lokalnom maksimumu u tački  $\hat{\theta} = -1$ . Sa povećanjem ovog parametra, raste i brzina konvergencije, pa se za  $a = 0.1$  lokalni maksimum brže dostiže. Međutim, ukoliko vrednost amplitude oscilacija dodatno poveća, algoritam uspeva da preskoči lokalni maksimum i da konverira ka tački globalnog maksimuma  $\hat{\theta} = 2$ .

Kao jedno od mogućih rešenja za prevazilaženje ograničenja ovakvog deterministič-



Slika 4.6: Uticaj promene pojačanja  $k$  na brzinu konvergencije za fiksne parametre  $\omega = 15\text{rad/s}$ ,  $a = 0.1$ : Evolucija parametra  $\hat{\theta}$  (levo) i vrednosti kriterijumske funkcije  $h$  (desno).



Slika 4.7: Uticaj promene amplitude perturbacionog signala na brzinu konvergencije za fiksne parametre  $\omega = 15\text{rad/s}$ ,  $k = 6$ : Evolucija parametra  $\hat{\theta}$  (levo) i vrednosti kriterijumske funkcije  $h$  (desno).

kog ES pristupa po pitanju oblasti privlačenja ekstremuma, koja je određena amplitudom perturbacija, u literaturi se navodi stohastički ES pristup [110]. On polazi od činjenice da prethodno korišćeni perturbacioni signal ima nultu srednju vrednost, kao i beli Gausov šum, pa razmatra uvođenje perturbacije u vidu belog šuma  $\dot{W}(t)$ , gde je  $W(t)$  Vinerov proces (koji opisuje Braunovo kretanje). Međutim, takva perturbacija bi bila dosta agresivna, pa se odgovarajuća šema za stohastički ES pristup može dobiti kada na slici 4.4 sinusoidalni perturbacioni signal zameni sa adekvatno filtriranim signalom belog šuma  $\dot{W}(t)$ .

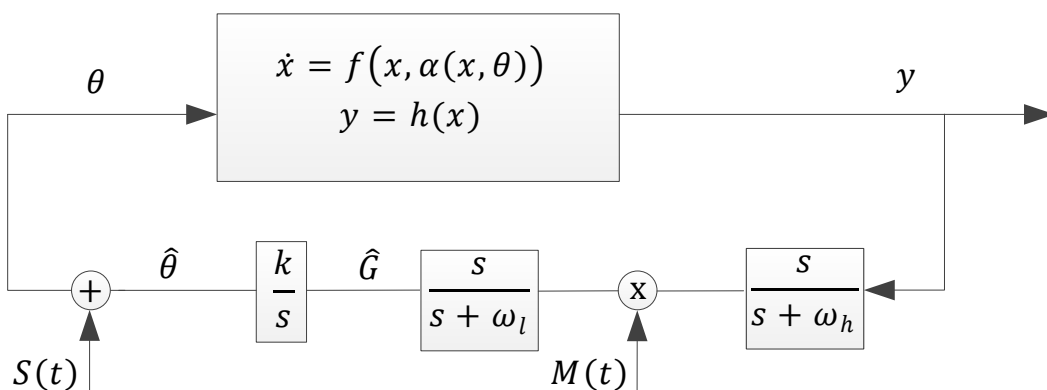


### 4.3 Multivarijabilni ESC

U slučaju multivarijabilnog sistema, kada je ulaz oblika  $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n]^T$ , ranija šema 4.4 se može jednostavno proširiti do strukture prikazane na slici 4.8 [108]. Niskopropusni filter, se može i u ovom slučaju izostaviti, ali slično kao i visokopropusni filter, pomaže konvergenciji. Granična učestanost niskopropusnog filtra se bira da bude manja od učestanosti perturbacionog signala. Neophodne izmene podrazumevaju pobudni signal u formi vektora:

$$\begin{aligned} S(t) &= [a_1 \sin(\omega_1 t) \ a_2 \sin(\omega_2 t) \ \dots \ a_n \sin(\omega_n t)]^T \\ M(t) &= \begin{bmatrix} \frac{2}{a_1} \sin(\omega_1 t) & \frac{2}{a_2} \sin(\omega_2 t) & \dots & \frac{2}{a_n} \sin(\omega_n t) \end{bmatrix}^T, \end{aligned} \quad (4.26)$$

gde se perturbacione učestanosti biraju da budu međusobno različite ( $\omega_i \neq \omega_j$ ), što je uslov za konvergenciju algoritma. Dodatno, ovom uslovu se nekada dodaju i uslovi da odnos između svake dve mora biti racionalan broj ( $\omega_i/\omega_j \in \mathbb{Q}$ ) i da zbir svake dve mora biti različit od treće ( $\omega_i + \omega_j \neq \omega_k$ ). Ovi dodatni uslovi omogućavaju jednostavniju analizu konvergencije algoritma. U slučaju kada je dinamika stabilna, a parametri algoritma izabrani tako da ES algoritam bude sporiji od dinamike sistema, lokalna konvergencija je zagarantovana.



Slika 4.8: *Extremum seeking struktura za sistem sa više ulaza.*

---

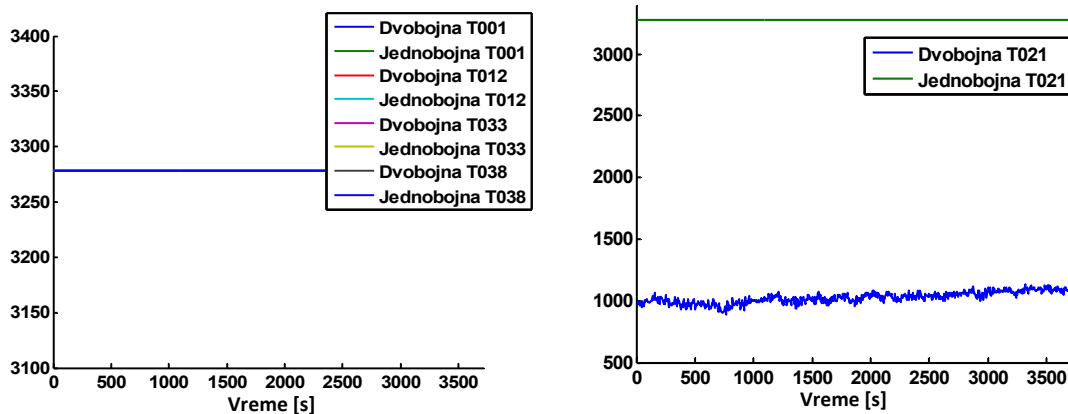
### Modeliranje i upravljanje procesom loženja u kotlu

---

#### 5.1 Akvizicija i analiza pirometarskih merenja

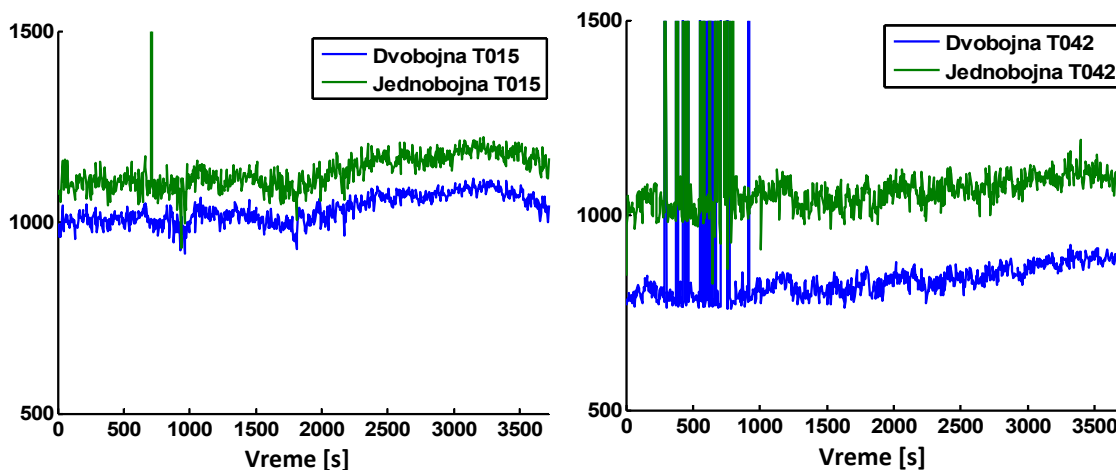
U cilju ispitivanja pouzdanosti i funkcionalnosti pirometarskog sistema, izvršena je detaljna analiza dostupnih merenja temperature na različitim nivoima. Najpre je izvršena uporedna analiza merenja jednobojne i dvobojne temperature. Na slikama 5.1 do 5.3 prikazane su uporedne vrednosti temperatura na raznim kotama i raznim stranama kotla. Slika 5.1 (levo) pokazuje merenja pirometara koja nisu bila dostupna. Nedostajuća merenja se mogu lako uočiti jer imaju konstantno maksimalnu vrednost. Radi ilustracije izabrane su temperature sa različitih strana kotla, na različitim visinama, kako bi bilo jasnije da nedostupnost merenja ne mora biti u vezi lokacijom, tj. sa pirometrima koji su na blisko pozicionirani. Na pojedinim pirometrima nedostupne su informacije i o jednobojnim i o dvobojnim temperaturama, dok kod nekih drugih nedostaje jedna informacija, a druga je dostupna (slika 5.1 (desno)). U takvim situacijama se na osnovu dostupnog merenja može raditi kompenzacija nedostajućeg merenja, tj. na osnovu kretanja jedne temperature se može zaključiti o kretanju druge, ali i o generalnom ponašanju plamena. Ovakva merenja su nekada posledica narušavanja tehničkih uslova za rad pirometarskog mernog i akvizicionog sistema, o čemu se mora voditi računa.

Uvidom u prikupljena merenja, može se izvesti zaključak da osim pojedinih nedostajućih merenja, dolazi i do povremene pojave merenja visokog intenziteta (takozvani *outlier*-i). Primeri ovakvih merenja su prikazani na slikama i interesantno je primetiti da se ne pojavljuju uvek istovremeno i na jednobojnim i na dvobojnim temperaturama (slika



Slika 5.1: Primeri nedostajućih i jednobojskih i dvobojskih temperatura na raznim visinama i stranama kotla (levo), odnosno samo jedne od temperatura (desno).

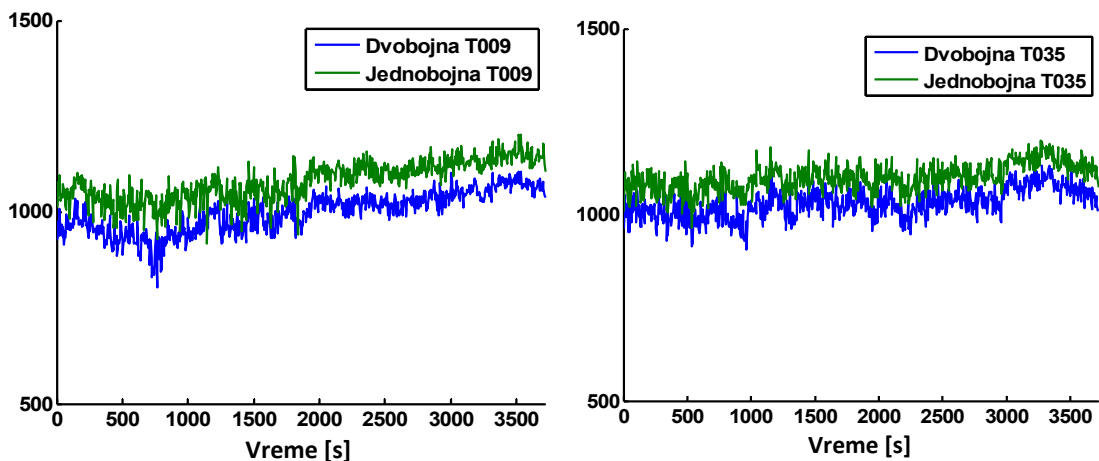
5.2). Ovakve situacije odgovaraju i pojavi prašine na optičkom putu pirometra. Osim toga može se videti da razlika između odgovarajućih jednobojskih i dvobojskih temperatura varira sa lokacijom, ali i vremenom, što svedoči o promenljivoj efikasnosti sagorevanja u različitim delova kotla, tokom vremena.



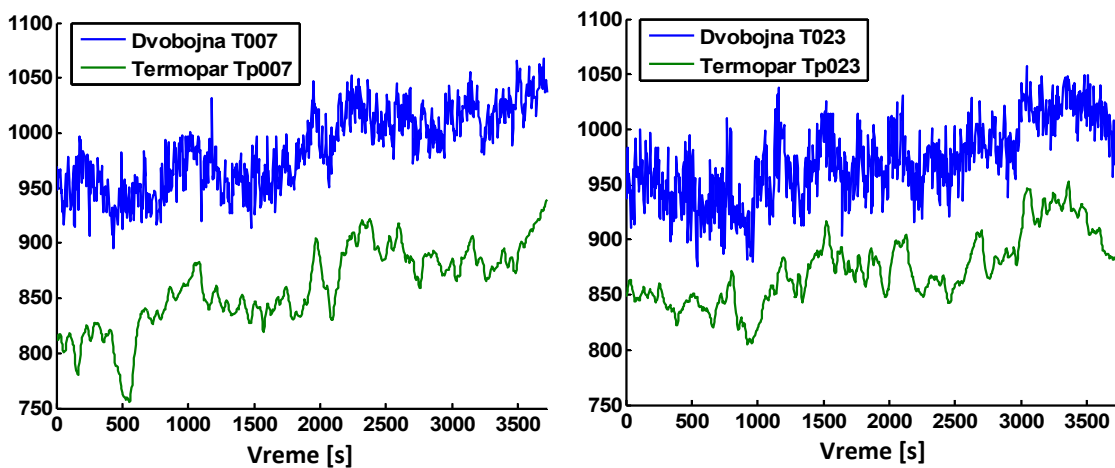
Slika 5.2: Primeri sporadičnih merenja visokog intenziteta.

Naravno, većina raspoloživih merenja je regularna i može se koristiti bez bilo kakve dodatne obrade za izvođenje zaključaka o procesu sagorevanja i raspodeli temperature (5.3). Takva merenja mogu poslužiti i u prevazilaženju prethodno pomenutih neželjenih pojava. Bitno je primetiti da, u skladu sa prirodom merenja temperatura primenom jednobojskih i dvobojskih pirometara, rezultati pokazuju da je jednobojska temperatura uvek veća od dvobojske.

Dodatno, značajno je primetiti da su temperature izmerene pirometarskim sistemom



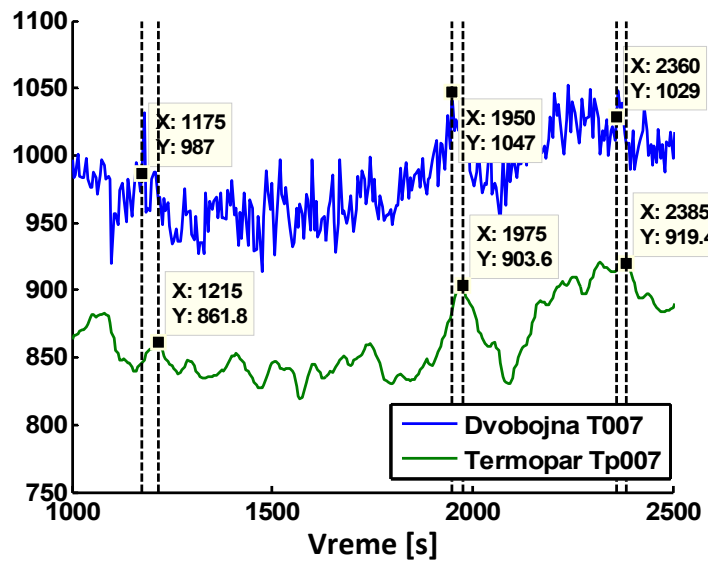
Slika 5.3: Merenja temperature bez pojave nepostojećih ili pogrešnih merenja.



Slika 5.4: Merenja sa dvobojnih pirometara i odgovarajućih termoparova.

veće od temperatura izmerenih kontaktnim merenjem pomoću termoparova. Takav zaključak je takođe očekivan, imajući u vidu razliku u načinu merenja. Slika 5.4. ilustruje činjenicu da odstupanja u merenju temperature termoparovima i pirometrima iznose i do 150 °C. Sa iste slike se može uočiti i da ju merenja sa pirometara zašumljenija, što je posledica čestica prašine koje utiču na formiranje merenja.

Ako se ove temperature detaljnije uporede, vidi se da je njihovo ponašanje tokom vremena slično, tj. vremenski oblici ovih merenja su uporedivi. Ono što se može uočiti jeste određeno vremensko kašnjenje temperatura sa termoparova, u odnosu na temperature sa pirometara. U nekim trenucima to kašnjenje iznosi i po par desetina sekundi, što može biti od presudnog značaja u situacijama kada je potrebno brzo odreagovati (5.5).



Slika 5.5: Brzina odziva termoparova naspram pirometara.

## 5.2 Modeliranje raspodele temperature unutar kotla

Poznavanje matematičkih modela procesa ima veliki značaj za inženjersku praksu, jer je sve veći broj tehničkih rešenja vezanih za inteligentna upravljanja pojedinim sistemima, detekciju otkaza ili preventivno održavanja vezano za poznavanje modela. Istovremeno smo svedoci činjenice da su matematički modeli procesa sve češće u upotrebi i u oblastima koje nisu tehničke (biologija, ekologija, ekonomija,...). Ukoliko su fizički zakoni po kojima se odigravaju procesi u nekom sistemu potpuno poznati, moguće je formirati takozvani model bele-kutije, što podrazumeva da su svi parametri i veličine u modelu sa jasnom fizičkom interpretacijom, a konstante koje se u njima pojavljuju su unapred (apriori) poznate. Sa druge strane se nalaze takozvani modeli tipa crne kutije. Oni su rezultat takozvanog postupka identifikacije, koji se svodi na optimizaciona procedura koja pokušava da prilagodi model prikupljenim mernim podacima. Uprkos činjenici da modeli crne kutije vrlo često pojednostavljaju fizičku prirodu i promene fizičkih veličina u industrijskim procesima, pokazuje se da su to jako dobri mehanizmi za modeliranje dinamičkih sistema. Takođe, vrlo često zahtevaju mnogo manje inženjerskog truda nego postupak formiranja modela bele kutije. Ovakvo modeliranje se drugačije naziva i identifikacija na bazi podataka (*data-driven*), jer koristi velike količine raspoloživih podataka. Ona se može zasnivati na statističkim metodama poput metode glavnih komponenti (PCA - *principal component analysis*), metode najmanjih kvadrata, ali na modernim metodama veštačke inteligencije kao što su neuralne mreže i fazi logika, o čemu je bilo reči u prethodnim poglavljima. Konačno, kombinacijom prve vrste (na bazi modela) i druge vrste (na bazi podataka) metoda nastaju takozvane hibridne metode, koje često daju najbolje rezultate.

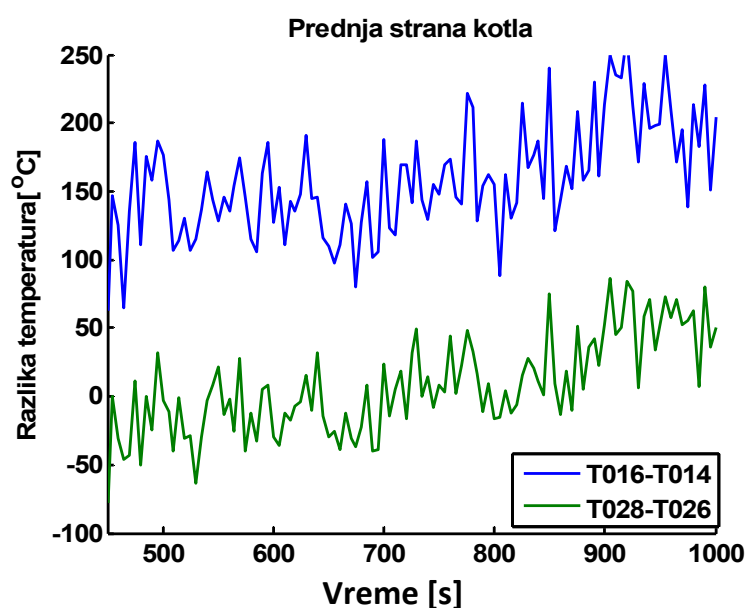
U literaturi je poznato da je modeliranje procesa unutar industrijskih peći ili energetskih kotlova izuzetno složen numerički problem i da se uglavnom realizuje primenom metoda konačnih elemenata ili, specifično, metodom konačnih zapremina. Ovakav pristup modeliranju je krajnje vremenski i računarski zahtevan, nepodesan i može se koristiti samo sa stanovišta analize stacionarnog stanja pod čvrstim pretpostavkama o graničnim uslovima, kalorijskoj vrednosti energenata i stacionarnom protoku fluida. Sa stanovišta upravljanja takvim procesima, mnogo je zahvalnije formirati aproksimativan, linearizovan model u određenom broju tačaka u prostoru dobijen nekom od metoda za identifikaciju sistema. Identifikacija sistema predstavlja postupak konstrukcije modela na osnovu raspoloživih podataka. Ovakav postupak predstavlja problem statistike i u mnogim slučajevima predložene, korišćene tehnike identifikacije vuku svoje korene baš iz ove matematičke discipline. Kao potpuno nezavisna naučna disciplina, identifikacija procesa

je počela da se razvija 60-tih godina prošlog veka, a zasnovana na radovima Astroma i Bolina [111]. Vrlo jak podsticaj za istraživanje u ovoj oblasti došao je i iz Kalmanovih radova koji su posvećeni optimalnom upravljanju [112, 113]. Od tada je oblast identifikacije sistema doživela vrlo brz razvoj. Problem identifikacije sistema se može podeliti u nekoliko koraka: dizajn eksperimenta, prikupljanje podataka, izbor strukture modela, estimacija modela i validacija modela.

Projektovanje eksperimenta podrazumeva izbor koji će signali biti mereni, sa kojom periodom odabiranja i pod kojim pobudnim signalima. Kako bi model bio što informativniji, snimaju se ponašanja sistema pod različitim radnim uslovima, beležeći odzive izabranih veličina, pri raznim pažljivo osmišljenim promenama ulaznih parametara. Nakon ovog izbora eksperiment može da se obavi a merni podaci prikupe. Sledeći problem se odnosi na izbor strukture modela. Ovo je kritičan korak u identifikaciji procesa i mora biti obavljen izuzetno pažljivo. Nakon izbora strukture modela, može se pristupiti estimaciji parametara modela. U tu svrhu literatura nudi nekoliko različitih tehnika, postupaka i postoje odgovarajući softveri koji se mogu pronaći u računarskim bibliotekama. Ovaj korak je možda i najdirektniji jer ne podrazumeva uključivanje specifičnog ekspertskog znanja. Validacija modela je pokušaj da se odgovori na pitanje: da li je dobijeni, najbolji model dovoljno dobar za namenu za koju je isprojektovan. Uobičajene tehnike validacije modela su analiza reziduala, i takozvana kros-validacija. Ukoliko dobijeni model ne zadovolji validaciju, neki ili svi prethodni koraci treba da budu ponovljeni, sve dotle dok se ne dobije model koji prolazi validacioni test.

Za potrebe analize i mogućnosti modeliranja uticaja brzine dozotora pojedinih mlinova u radu, odnosno njima proporcionalnih učešća dodavača, na temperature izmerene pirometarskim sistemom sprovedeni su brojni pažljivo konstituisani i sprovedeni eksperimenti. Kao ključni element testiran je uticaj zamene mlinova na ponašanje prostorne raspodele temperatura. Uz podatke sa pirometarskog sistema, dostupni su i podaci iz DCS arhivskog sistema, koji su korišćeni pri verifikaciji pretpostavki. Jedan od eksperimenta se odnosio na smenu u okviru mlinskog para M4 i M8, gde M4 pada na minimalno učešće, M8 raste do maksimalnog. Praćenjem temperaturnih signala, informacija o njihovoj vezi sa promenom opterećenja se ne može jasno videti. Ovakav rezultat ima smisla imajući u vidu da su poremećaji u kotlu visokog intenziteta zbog stalne promene kvaliteta uglja, mlevenja i sagorevanja, kao i zbog drugih stalno prisutnih poremećaja, na koje se ne može uticati. Takođe, oni se ne mogu blagovremeno izmeriti u smislu njihove kompenzacije aktivnim delovanjem na upravljačke promenljive. Ovakvi poremećaji su direktno preslikani na formiranje vatre i raspodelu temperatura unutar kotla, pa je izuzetno teško sagledati uticaje loženja na pojedinačne temperature, koje se stalno menjaju zbog pomenutih po-

remećaja. Stoga je izvršena je analiza uticaja promene opterećenja pojedinih mlinova na razliku odgovarajućih temperatura u kotlu. Na ovaj način se mogu kompenzovati poremećaji, jer je pretpostavljeno da poremećaj, u okviru određene okoline, deluje konstantno, pa se prilikom formiranja razlike temperature postiže efekat eliminacije poremećaja. Slika 5.6 pokazuje da sa porastom opterećenja mlina M8 raste i razlika temperatura T016-T014, što ukazuje na pomeranje plamena ka desnoj strani kotla. Na istoj slici je prikazan i uticaj pomenute promene u učešću mlinova na promenu temperature na koti 54 m, što svedoči o sličnom uticaju promene loženja na raspodelu temperatura na različitim visinama.

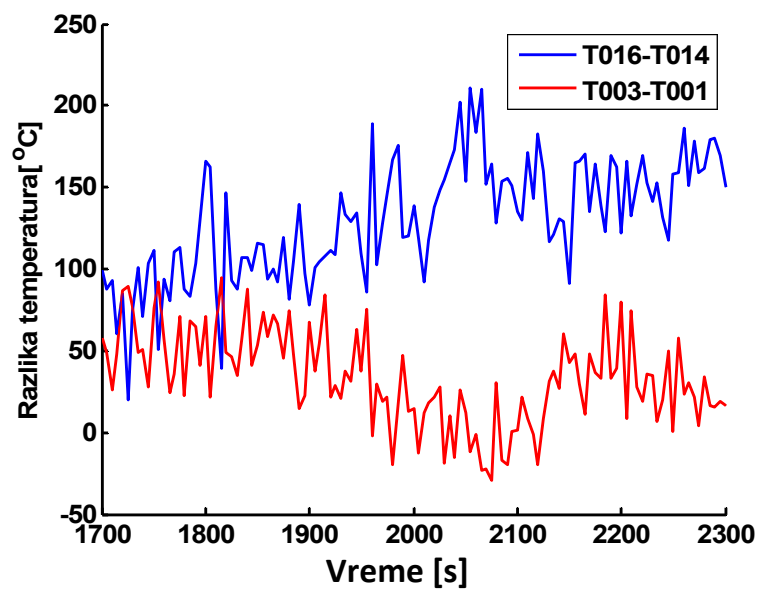


Slika 5.6: Brzina odziva termoparova naspram pirometara.

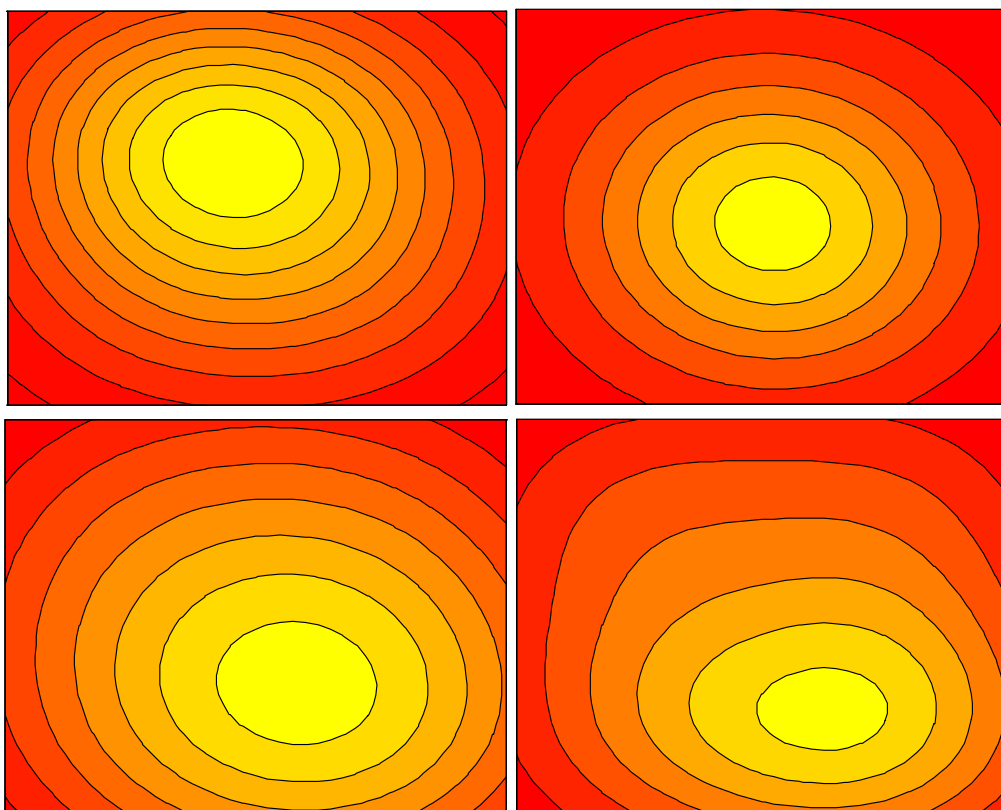
Slični zaključci se mogu izvesti i prilikom smene mlinova M1 i M5 (30ak minuta nakon početka eksperimenta). Naime, prilikom simultanog smanjenja učešća prvog i povećanja učešća petog mlina, vidi se promena u razlici temperatura T016-T014 koja ima tendenciju rasta, što ukazuje na pomeranje plamena ka desnom zidu kotla (slika 5.7). Istovremeno razlika temperatura izmerenih na desnoj strani kotla T003-T001 opada, što govori o kretanju plamena ka prednjoj strani kotla. Ono što je zanimljivo jeste da je na oko 2100 sekundi nastupio poremećaj, nakon čijeg je otklanjanja razlika temperatura ipak nastavila da pada. Ovakvi rezultati ukazuju na potencijalnu mogućnost korekcije regulacije u smislu promene učešća u okviru parova naspramnih mlinova, u cilju regulacije raspodele temperature, tj. položaja plamena u kotlu.

Zanimljivo je pogledati kako se menja prostorna raspodela temperature na nekoj od kota. Na slici 5.8 (kota 44 m) je prikazana zamena mlinova M1 i M5. U trenutku pre pro-





Slika 5.7: Brzina odziva termoparova naspram pirometara.

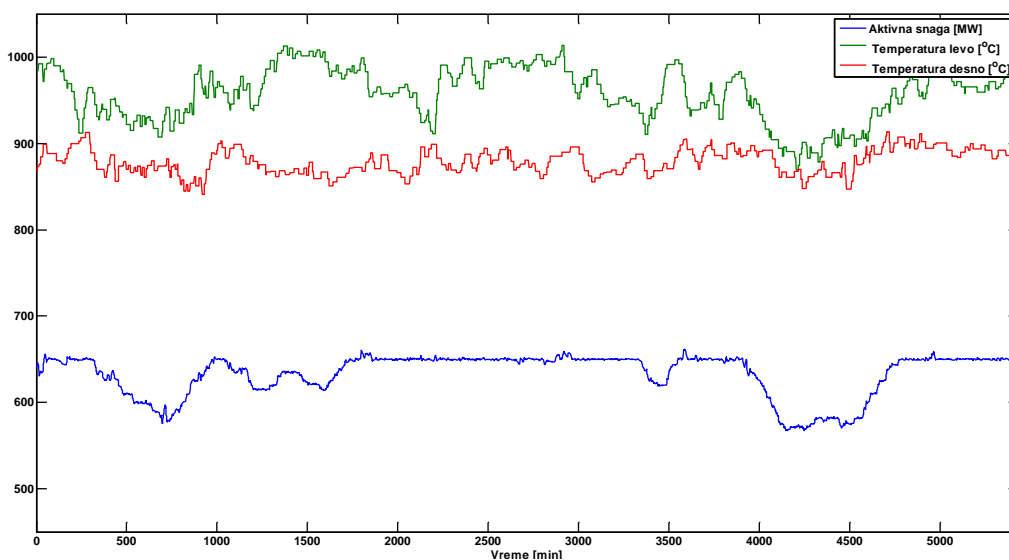


Slika 5.8: Promena prostorne raspodele temperature na koti 44 m prilikom zamene mlinova M1 i M5.

мене уčešća mlinova M1 i M5, види се да је жижа пламена померена из центра ка левом задњем (тј. левом горњем углу на слици). Оваква ситуација има смисла имајући у виду

da mlin M6 u toku ovog eksperimenta nije radio, a u posmatranom vremenskom intervalu dodavač mlina M5 ima manje učešće od ostalih dodavača. Za posledicu plamen se pomera ka delu kotla u kome je pritisak niži, tj. ka dodavaču koji ima manje učešće. Po nastupanju promene učešća mlinova M1 i M5, dolazi do kretanja plamena ka prednjem desnom uglu (tj. donjem desnom na slici). U jednom prelaznom trenutku je čak postignuta zadovoljavajuća simetrija plamena u kotlu, što govori u prilog hipotezi upravljanja plamenom na osnovu korekcije loženja. Iz ove analize se vidi da raspodela temperature u ložištu nije simetrična, tj. da odstupa od idealne, projektovane raspodele [38].

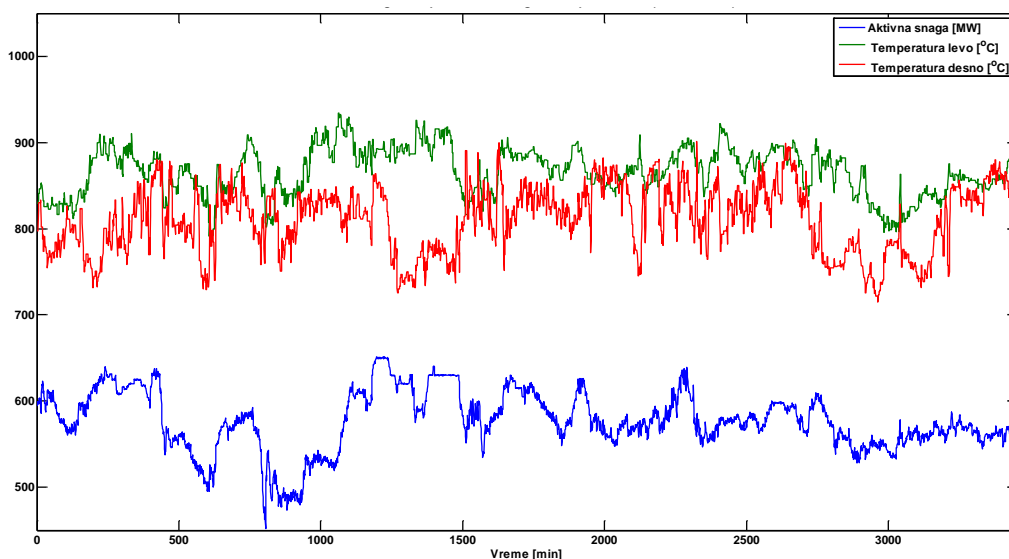
U cilju dodatne ilustracije značaja ostvarivanja ravnomernije raspodele temperaturnog polja, na narednim dijagramima je prikazna promena temperature na levoj i desnoj strani kotla u dužem vremenskom periodu. Na slici 5.9 se primećuje da je tokom ovog vremenskog intervala sistem bio u koordinisanom modu rada, što se može prepoznati po mirnom signalu aktivne snage. Vidi se da je razlika temperatura između leve i desne strane kotla u dugim vremenskim intervalima iznosila i preko sto stepeni. Zanimljivo je međutim da se ta razlika smanjuje na intervalu od 4000 do 4500 minuta. Tada je nastupilo smanjenje aktivne snage, odnosno spuštanje na tehnički minimum i isključenje mlina koji narušava simetriju u kotlu.



Slika 5.9: Promena temperatura na levoj i desnoj strani kotla u koordinisanom modu.

Dodatni primer koji ilustruje neuravnoteženost sagorevanja temperatura po horizontalnom preseku kotla, prikazan je na slici 5.10 kada je najveći deo vremena blok bio u nekoordinisanom modu rada prepoznatljivom po velikim fluktuacijama u aktivnoj snazi. Razlike su i dalje velike, ali ono što je zanimljivo je da je tokom svih ovih vremenskih intervala, temperatura na levoj strani kotla gotovo stalno veća od temperature na desnoj

strani. Gotovo je sigurno da je tokom ovako dugog vremenskog intervala vršena zamena mlinova, pa jedini logičan odgovor ostaje da su mlinovi na pojedinim stranama kotla različiti karakteristika (kapaciteta, trenutnog stanja radnog kola, trenutnog broja obrtaja. . .), pa samim tim i različiti ventilacionih sposobnosti, što značajno narušava geometriju ložišta. Ovakve analize samo dodatno naglašavaju značaj pokušaja da se uniformiše temperaturna raspodela unutar kotla.



Slika 5.10: Promena temperatura na levoj i desnoj strani kotla u nekoordinisanom modu.

### 5.2.1 Kroskorelaciona analiza mernih signala

Za detaljno ispitvanje prethodno uočenih veza između opterećenja mlina i temperatura u kotlu biće primenjena korelaciona analiza. Korelaciona analiza [114] spada u neparatarske metode identifikacije. Zasniva se na analizi vremenskih oblika signala i polazi od predstave sistema u formi:

$$y(n) = \sum_{k=1}^{\infty} h(k)u(n-k) + v(n), \quad (5.1)$$

gde je  $y(n)$  izlaz sistema, a  $u(n)$  ulaz sistema nekorelisan sa signalom šuma  $v(n)$ . Korelaciona analiza se zasniva na pretpostavci da su poznate procene autokorelacione funkcije  $R_u(k) = \hat{E}\{u(n)u(n-k)\}$  i kroskorelacione funkcije  $R_{yu}(k) = \hat{E}\{y(n)u(n-k)\}$ , jer se tada mogu odrediti odbirci impulsnog odziva na osnovu veze

$$\hat{R}_{yu}(m) = \sum_{k=1}^N h(k)\hat{R}_u(k-m). \quad (5.2)$$

Za uspešnu primenu korelacione metode potrebno je rešiti tri osnovna problema. Prvi je perzistentnost pobudnog signala, drugi je prisustvo mernog šuma i osetljivost cele procedure na mernu nesigurnost, a treći je nestacionarnost signala. Perzistentnost pobude je osobina koja je direktno vezana za korelisanost ulaznog signala. Što autokorelaciona funkcija ovog procesa više liči impulsnom signalu, odnosno što je taj signal bliži belom procesu, perzistentnost je zadovoljena u većoj meri, a samim tim je i efikasnost identifikacione procedure veća. Drugi problem je generalni problem koji se pojavljuje u svakoj tehnici modeliranja procesa, zbog neminovnog prisustva mernog šuma pri eksperimentima, pa se o tome mora voditi računa prilikom izvođenja eksperimenata. Konačno, primena korelacione metode podrazumeva stacionarnost procesa na ulazu i izlazu, bar u smislu slabe stacionarnosti. Ovo je pretpostavka koju je u opštem slučaju teško zadovoljiti. Ovakav problem se prevazilazi prozorovanjem signala, tj. izdvajanjem dovoljno kratkih sekvenci za koje se stacionarnost može pretpostaviti. Naravno, sekvence dobijene primenom prozorskih funkcija ne mogu biti preterano kratke, kako bi računanje statistika bilo smisljeno.

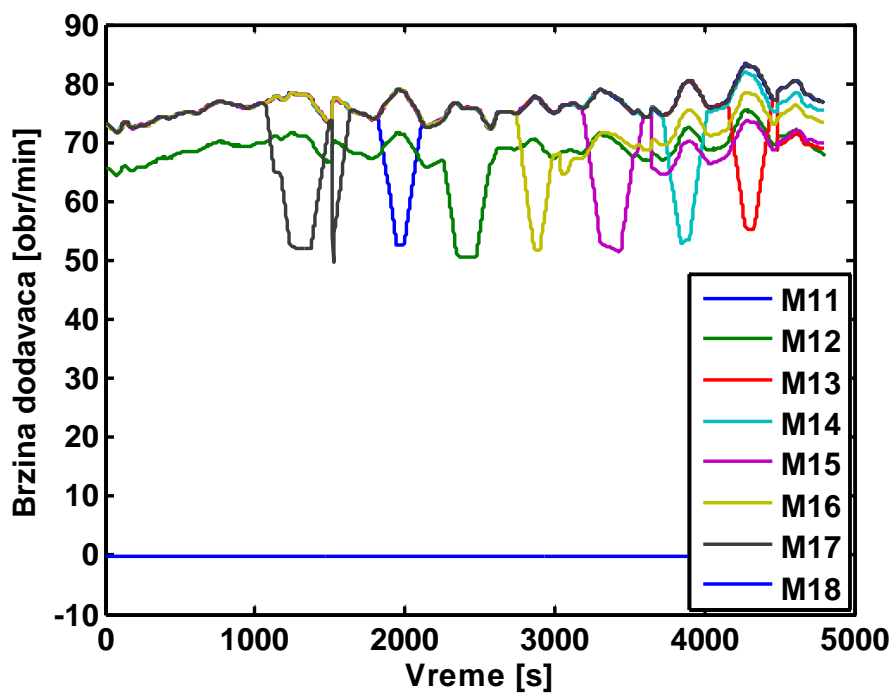
Iako se primenom korelacione analize može izvršiti identifikacija sistema, tj. određivanje odbiraka impulsnog odziva, u okviru ovog poglavlja korelaciona analiza se koristi za sagledavanje prirode veze između pojedinih ulaznih i izlaznih signala, a ne i njihovih funkcionalnih zavisnosti. Posmatrani proces, od učešća dodavača na ulazu do pirometarskih temperatura na izlazu je izuzetno zahtevan upravljački problem, te je korelaciona analiza korišćena kao aparat za uočavanje potencijalnih uprošćenja ovakve regulacione strukture. Nepomerena procena kroskorelacione funkcije između ulaznog i izlaznog signala data je sa

$$\hat{R}_{yu}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} u(k)y(k+m). \quad (5.3)$$

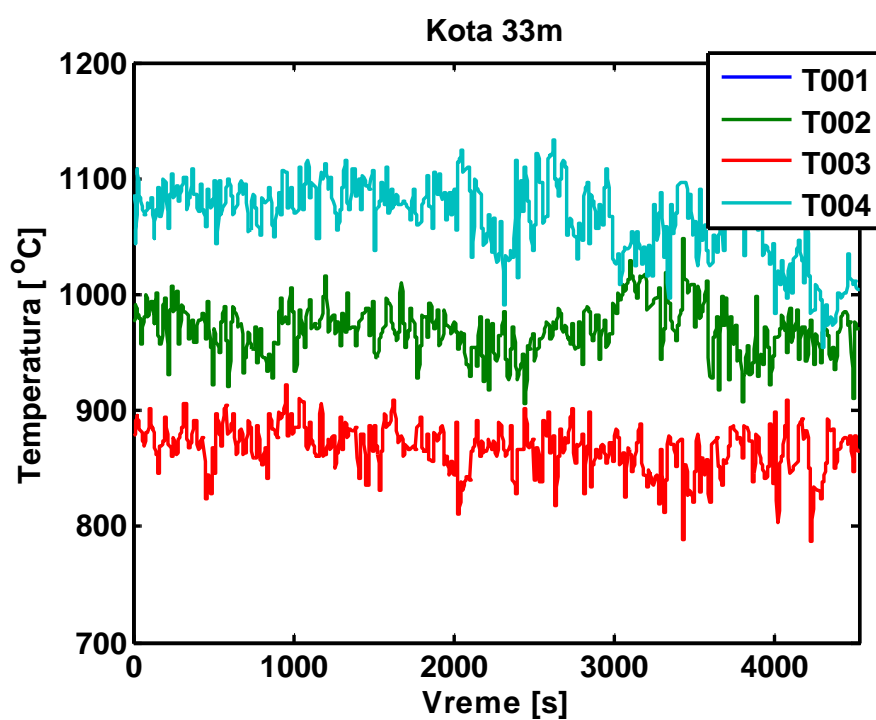
Kroskorelaciona funkcija će biti blizu nule onda kada signali nisu korelisani, odnosno imaće velike vrednosti za izraženo korelisane signale. Za potrebe ove analize snimljena je velika količina signala kroz različite eksperimente [37]. Na slici 5.11 je prikazana promena brzina dozatora tokom jednog takvog eksperimenta. Sa slike se može primetiti da mlin M8 nije bio aktivan za vreme eksperimenta. Odgovarajuće promene temperatura su prikazane na slikama 5.12 do 5.16.

Nad ovim signalima sprovedena je kroskorelaciona analiza u smislu ispitivanja veze između opterećenja pojedinih mlinova i temperatura merenih pirometarskim sistemom. Kao što je ranije objašnjeno, kako bi se u potpunosti sagledao uticaj pojedinih mlinova na promenu temperaturnog profila u kotlu, korelaciona analiza je primenjena na signale brzine dozatora, koji su srazmerni opterećenju mlinova i razlika odgovarajućih pirome-

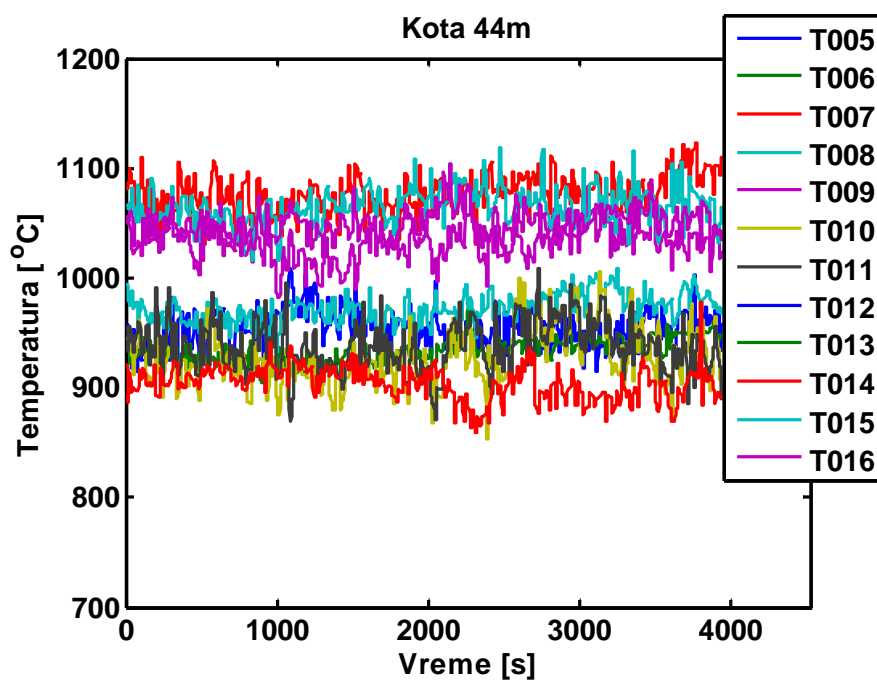
tarskih temperatura. Najznačajniji rezultati korelacione analize su prikazani i diskutovani u nastavku poglavlja.



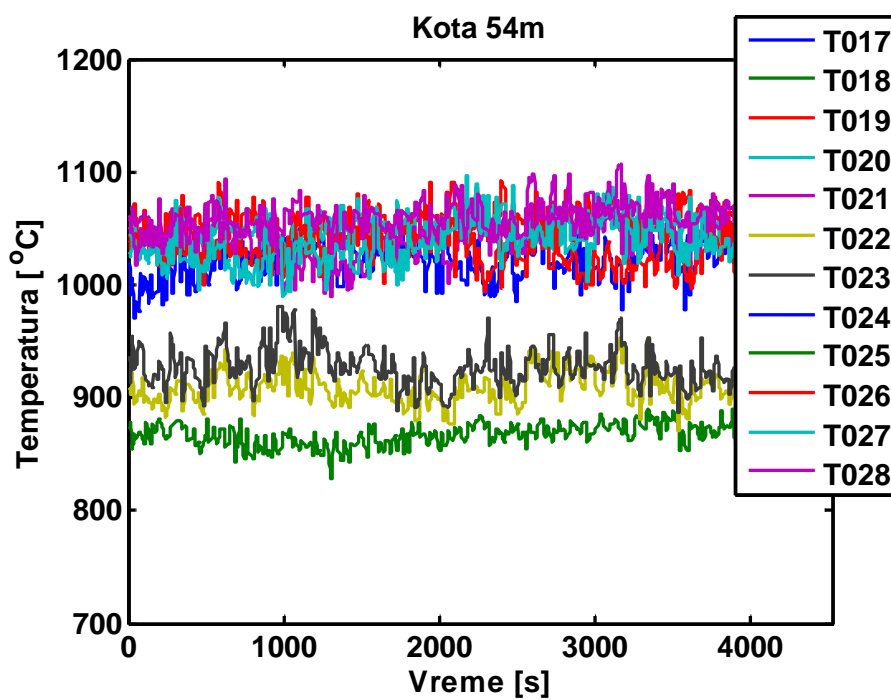
Slika 5.11: Promena brzine dozatora sa vremenom.



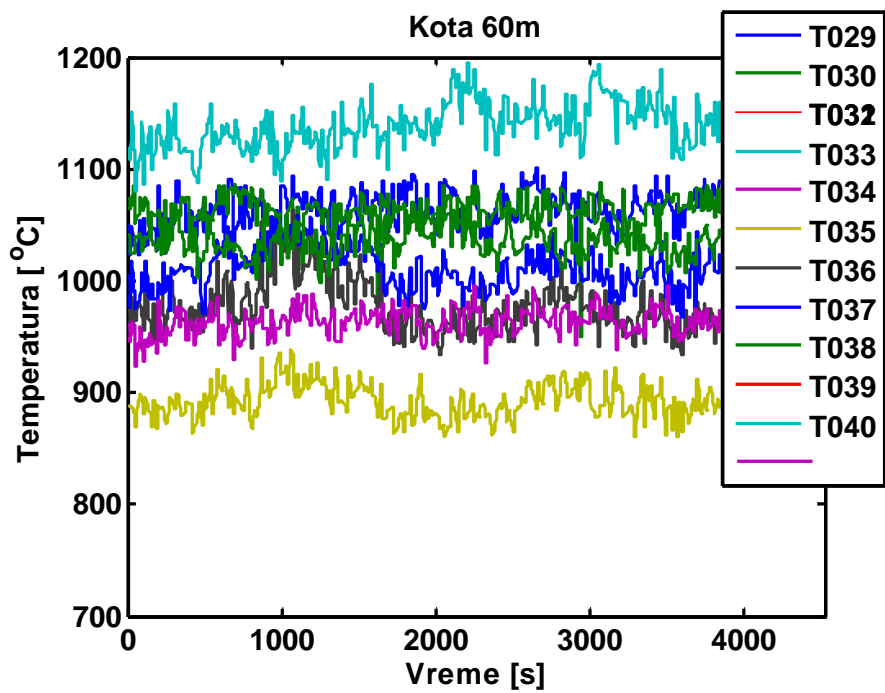
Slika 5.12: Merenje temperature dvobojnih pirometara na koti 33 m.



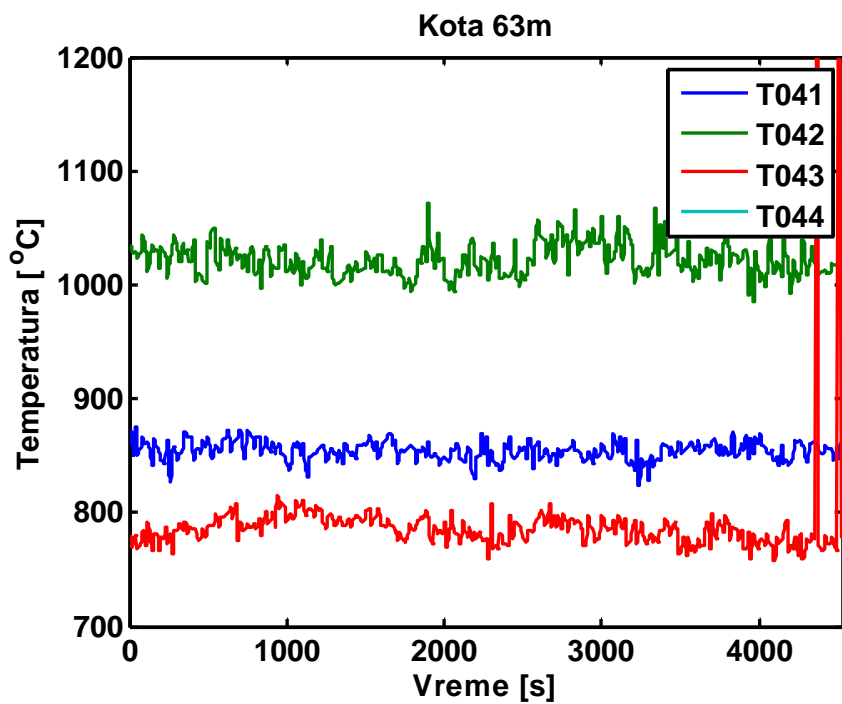
Slika 5.13: *Merenje temperature dvobojnih pirometara na koti 44 m.*



Slika 5.14: *Merenje temperature dvobojnih pirometara na koti 54 m.*

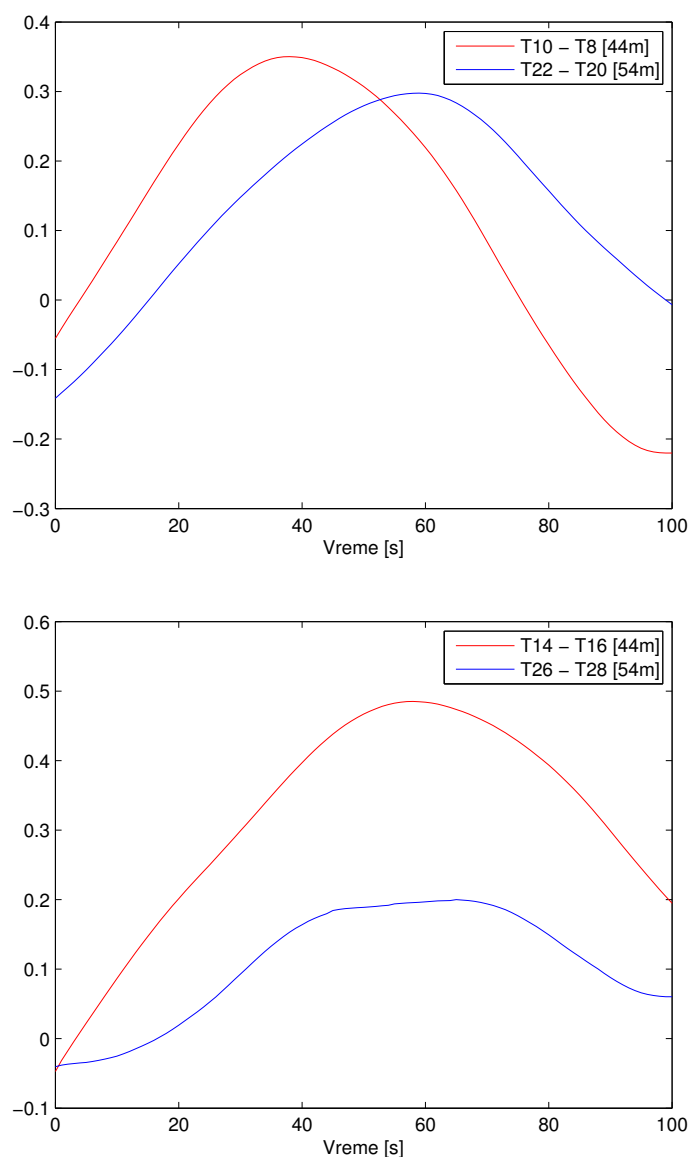


Slika 5.15: Merenje temperature dvobojnih pirometara na koti 60 m.



Slika 5.16: Merenje temperature dvobojnih pirometara na koti 63 m.

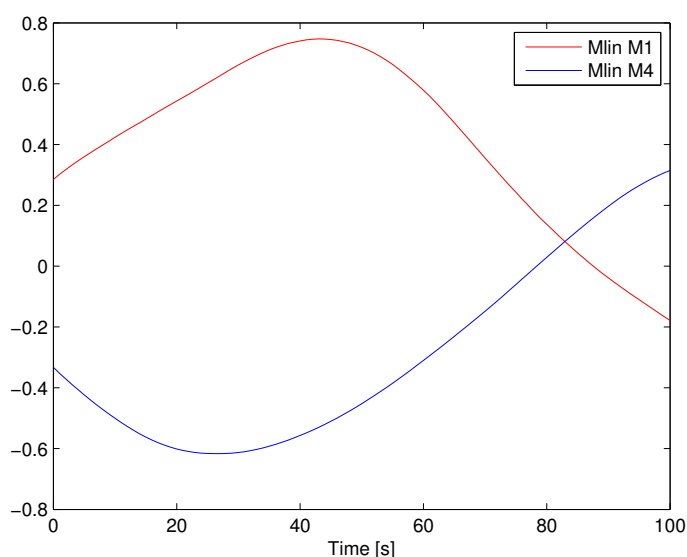
Na slici 5.17 se prikazuje korelacija između signala koji predstavlja opterećenje mlina M1 i razliku temperatura na prednjoj i zadnjoj strani kotla, na različitim visinama (44 m i 54 m). Sa grafika se može videti da je uticaj mlina M1 pozitivan na razliku temperatura između leve i desne strane na prednjim i zadnjim zidovima kotla. Ovakav rezultat je važan jer govori da se sa povećanjem opterećenja mlina M1 povećava razlika u temperaturama u korist leve strane, odnosno povećava se razlika T14-T16 i T26-T28, što govori o pomeranju plamena ka levoj strani kotla. Istovremeno, dati grafici pokazuju i da je karakter uticaja mlina M1 isti po različitim visinama, što daje uvid i u prostornu raspodelu temperature.



Slika 5.17: Uticaj opterećenja mlina M1 na razliku temperature na istoj strani zida kotla na različitim kotama: prednja strana kotla (gore), zadnja strana kotla (dole).

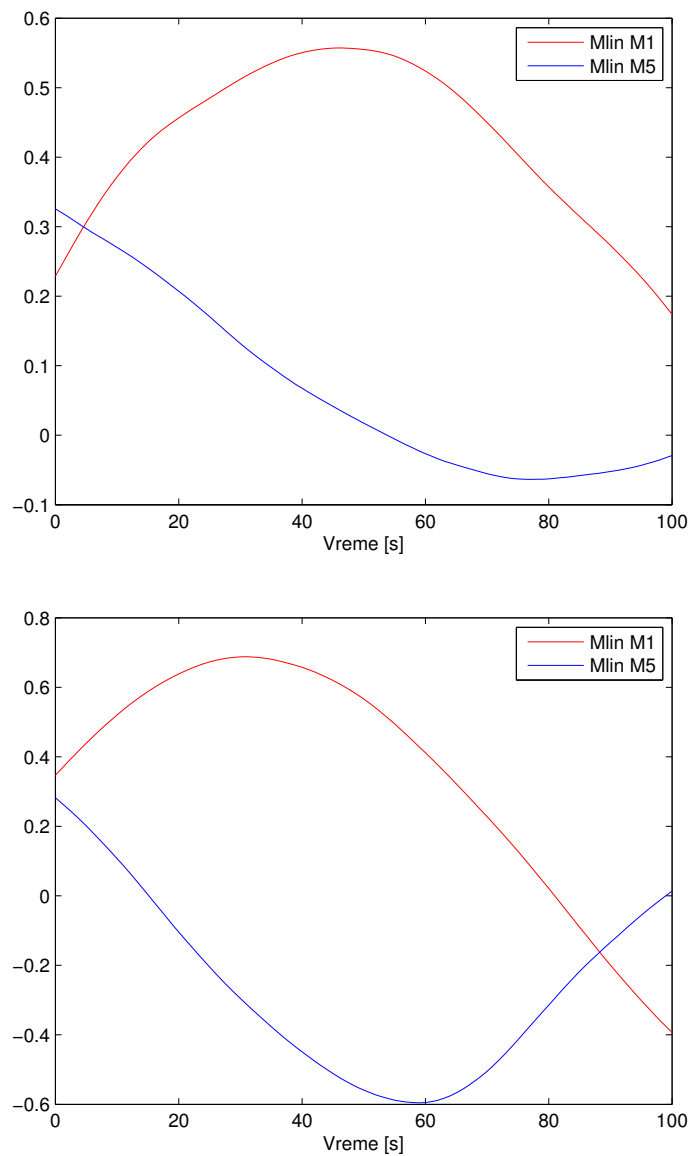


U narednom koraku izvršena je analiza uticaja M1 i M4 na promenu temperaturnog polja unutar kotla, kada je reč o kretanju plamena od zadnje ka prednjoj strani i obrnuto. Sa slike (5.18) se vidi da je opterećenje mlina M1 pozitivno korelisano sa razlikom temperatura  $T7-T5$ , što govori o pomeranju plamena od prednje ka zadnjoj strani kotla. Sa druge strane, korelacija sa mlinom M4 je negativna, što potvrđuje očekivani rezultat da povećanje opterećenja mlina M4 pomera plamen od zadnje ka prednjoj strani. U skladu sa ovim rezultatima, žiža plamena se može pomerati od prednje ka zadnjoj strani korekcijama opterećenja odgovarajućih mlinova.



Slika 5.18: Uticaj mlinova M1 i M4 na pomeranje plamena između prednje i zadnje strane kotla na koti 44 m.

Konačno, na slici 5.19 prikazan je uticaj istovremenog opterećenja/rasterećenja mlinova M1 i M5 na razliku temperatura na desnoj i zadnjoj strani kotla. U ovom režimu rada mlinovi M1 i M5 su u automatskom režimu rada, a pobudni signal je predstavljen promenom međusobnog opterećenja mlinova. Na slici 5.19 (gore) se vidi da razlika temperatura  $T7-T5$  raste sa porastom opterećenja mlina M1, a rasterećenjem mlina M5. Na taj način postiže se pomeranje plamena ka zadnjoj strani kotla. Slično tome, na slici 5.19 (dole) je prikazan uticaj na pomeranje plamena ka levoj strani kotla, jer je razlika  $T10-T8$  pozitivno korelisana sa opterećenjem mlina M1, a negativno korelisana sa opterećenjem mlina M5. Na osnovu ove analize se može zaključiti da se rasterećenjem/opterećenjem naspramnih mlinova žiža plamena može pomerati po tom pravcu. Primenom prethodne analiza na svaki od mlinova, potvrđena je mogućnost generalizacije prethodnih rezultata. Drugim rečima, povećanjem opterećenja svakog mlina, žiža plamena se pomera od njega.



Slika 5.19: Uticaj istovremenog opterećenja/rasterćenja mlinova M1 i M5 na razliku temperatura na koti 44 m: T7-T5 na desnoj (gore) i T10-T8 na zadnjoj (dole) strani kotla.

Na osnovu ovakvog zaključka može se reći da se na pomeranje žiže plamena u potpunosti može uticati pomeranjem po četiri ose koje spajaju naspramne mlinove u okviru mlinskog para. Na taj način se problem regulacije pojednostavljuje, smanjenjem broja upravljačkih veličina sa osam, koje se odnose na opterećenje svakog mlina pojedinačno, na četiri koje govore o preraspodeli opterećenja u okviru mlinskog para. Ovakav rezultat je veoma bitan za dalje projektovanje regulacione strukture.

## 5.2.2 Modeliranje uticaja brzine dozatora na raspodelu temperatura primenom WRLS algoritma

U okviru ove celine razmatra se modeliranje uticaja promene brzina dozatora, koja je srazmerna količini uglja kojom određeni mlin snabdeva kotao na promenu izmerenih temperatura, a sa ciljem kasnijeg testiranja predložene upravljačke strategije. Predložen je model koji pretpostavlja da temperatura u svakom trenutku zavisi od brzina dozatora i prethodno izmerenih temperatura u kotlu. U zavisnosti od toga koliko se prethodnih odbiraka uzima u obzir prilikom modeliranja procesa, red sistema se može menjati, a sa njim i broj parametara procesa.

Ideja estimacije parametara linearnog modela se sastoji od estimacije koeficijenata modela i estimacije željenog izlaza, na osnovu adekvatno izabrane kriterijumske funkcije koja određuje zavisnost kvaliteta estimacije od razlike između merenog i estimiranog izlaza. Kod dinamičkih, nestacionarnih sistema od velikog značaja je rekurzivni pristup u estimaciji parametara, koji omogućava stalno ažuriranje parametara modela u skladu sa različitim režimima rada. Pretpostavimo strukturu modela procesa [39]

$$T_i(k) = - \sum_{n=1}^N a_{in}(k) T_n(k-1) + \sum_{m=1}^M b_{im}(k) d_m(k-1) + \zeta(k), \quad (5.4)$$

gde su  $T_i$  i  $d_m$  odgovarajuće izlazne temperature sa pirometara i ulazne brzine dodavača, respektivno,  $N = 44$  je broj temperatura koji se uzima u obzir pri modeliranju procesa,  $M = 8$  je broj ulaza u modelu,  $i = \overline{1, N}$  je indeks estimirane izlazne temperature, a  $\zeta(k)$  je šum merenja. Koeficijenti  $a_{in}$  i  $b_{im}$  su nepoznati parametri modela, koji se u toku rekurzivne procedure menjaju u skladu sa ponašanjem sistema. Prethodna jednačina se može zapisati i u formi linearne regresije

$$T_i(k) = W^T(k) X_i(k) + \zeta(k), \quad (5.5)$$

gde je  $W^T(k) = [-T_1(k-1) \dots -T_N(k-1) \quad d_1(k-1) \dots d_M(k-1)]$  regresioni vektor, a  $X_i^T(k) = [a_{i1} \dots a_{iN} \quad b_{i1} \dots b_{iM}]$  vektor nepoznatih parametara, koji u opštem slučaju zavisi od vremena, ali je vremenski indeks izostavljen radi jednostavnijeg zapisa. Problem identifikacije parametara modela se dalje svodi na adekvatan izbor kriterijumske funkcije. U ovom poglavlju se razmatra primena rekurzivnog algoritma najmanjih kvadrata (RLS - *recursive least squares*) sa eksponencijalno otežinjenim faktorom zaboravljanja (WRLS - *weighted recursive least squares*). Osnovna razlika u odnosu na originalnu RLS postavku jeste ograničena memorija, tj. ograničen uticaj ranijih merenja na proces estimacije pa-

parametara. Drugim rečima, uvođenjem faktora zaboravljanja, starijim merenjima se dodeljuje manja težina, kako bi algoritam bio osetljiviji i bolje ispratio promene u parametrima. To se postiže uvođenjem kriterijumske funkcije u obliku

$$J_{\rho}(k) = \sum_{i=0}^k \rho^{k-i} e^2(i), \quad (5.6)$$

gde je  $\rho \in (0, 1]$  faktor zaboravljanja, a  $e(k) = d(k) - W^T(k-1)X(k)$  greška predikcije. U stacionarnim uslovima, izborom  $\rho = 1$ , algoritam se svodi na klasičan RLS pristup. Međutim, za vremenski promenljive parametre, kada je adaptacija parametara spora, izborom  $\rho < 1$ , obezbeđuje se različit uticaj, tj. različit stepen zaboravljanja prethodnih merenja u procesu estimacije parametara. Manja vrednost faktora zaboravljanja rezultuje bržom adaptacijom parametara, jer starija merenja dobijaju manji značaj, odnosno memorija algoritma je manja (za  $\rho$  blisko vrednosti 1, memorija algoritma je oko  $\tau = \frac{1}{1-\rho}$ ). Samim tim, varijansa procene parametara se povećava, jer je algoritam osetljiviji na nova, zašumljena merenja. Sa druge strane minimizacija kriterijuma 5.6 se svoji na rekurzivnu formu:

$$\hat{W}(k) = \hat{W}(k-1) + K(k)e(k), \quad (5.7)$$

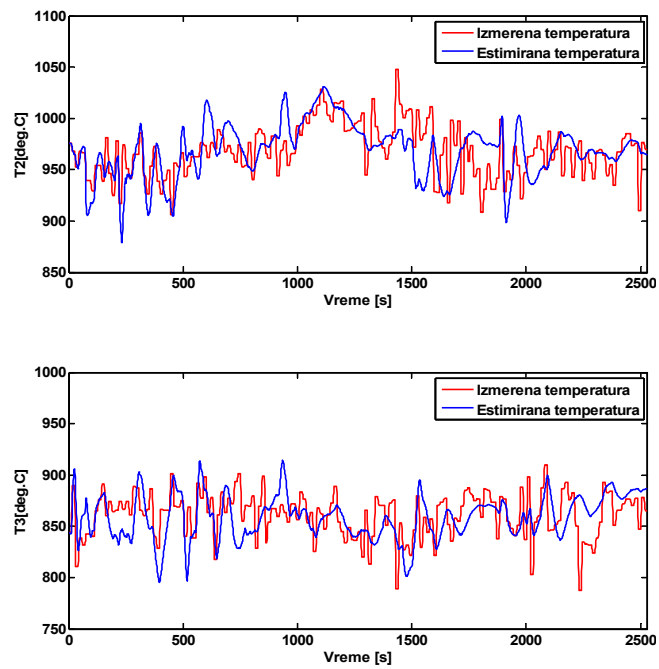
gde je

$$K(k) = P(k-1)X(k)[\rho + X(k)P(k-1)X(k)]^{-1}, \quad (5.8)$$

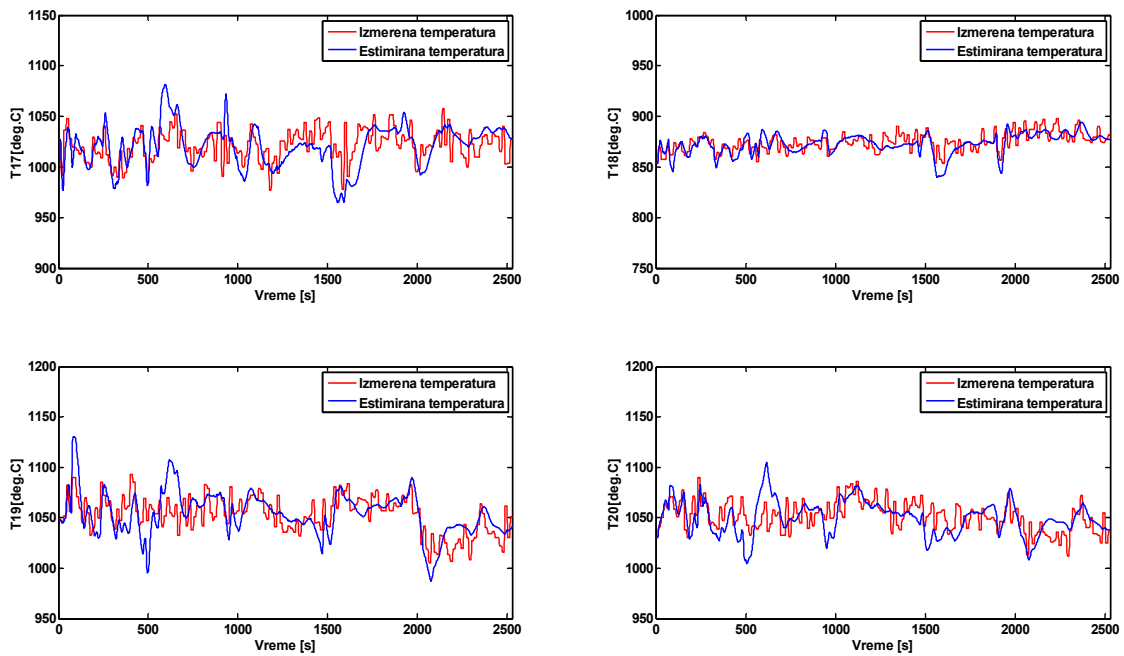
a matrica pojačanja  $P(k)$

$$P(k) = \frac{1}{\rho} [P(k-1) - K(k)X^T(k)P(k-1)]. \quad (5.9)$$

Na slikama 5.20 i 5.21 prikazani su rezultati estimacije za pojedine temperature zajedno sa realnim, izmerenim temperaturama na pojedinim nivoima. Primećuje se da, iako na pojedinim segmentima estimirane temperature u velikoj meri odgovaraju merenim, na pojedinim mestima ipak postoje primetna odstupanja. Zbog toga je u nastavku ponuđena identifikacija modela sistemom drugog reda.



Slika 5.20: Rezultati estimacije parametara modela prvog reda: merena i estimirana temperatura (Kota 33 m).



Slika 5.21: Rezultati estimacije parametara modela prvog reda: merena i estimirana temperatura (Kota 54 m).

U skladu sa uvedenim oznakama, nova predložena struktura modela drugog reda je

$$T_i(k) = - \sum_{n=1}^N (a_{in}(k) T_n(k-1) + a_{i(n+N)}(k) T_n(k-2)) + \sum_{m=1}^M b_{im}(k) d_m(k-1) + \zeta(k), \quad (5.10)$$

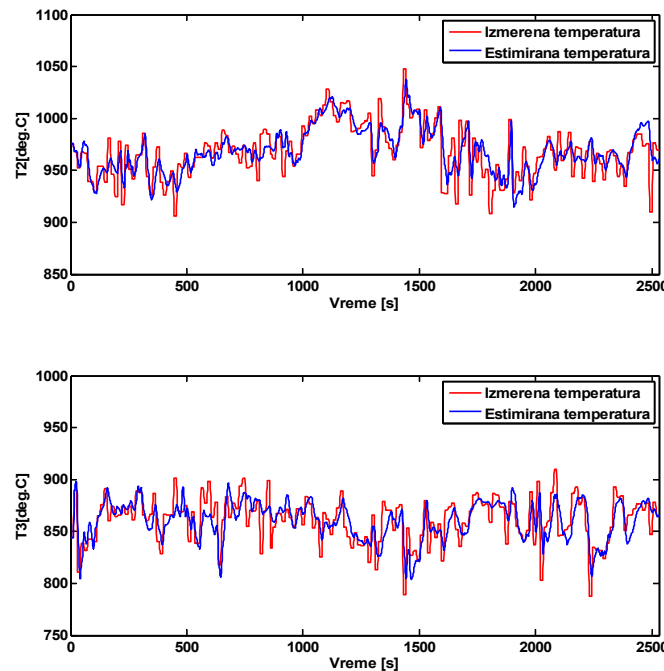
i ona se može zapisati u formi (5.5), gde su

$$W^T(k) = [-T_1(k-1) \dots -T_N(k-1) -T_1(k-2) \dots -T_N(k-2) d_1(k-1) \dots d_M(k-1)], \quad (5.11)$$

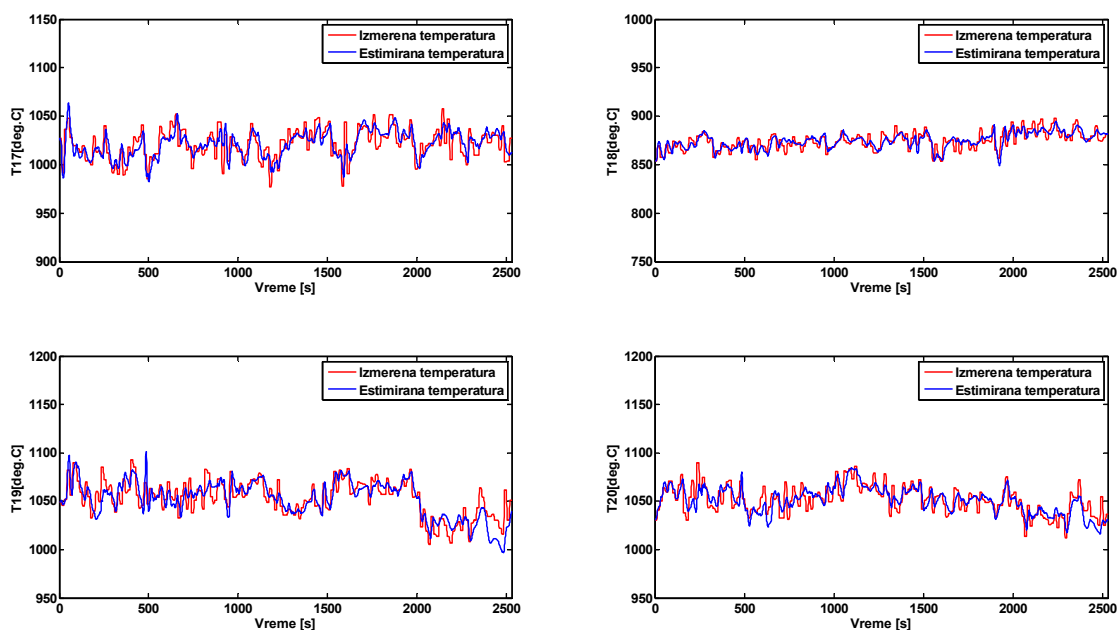
$$X_i^T(k) = [a_{i1} \dots a_{iN} a_{iN+1} \dots a_{i2N} b_{i1} \dots b_{iM}]. \quad (5.12)$$

Dalja procedura rekurzivne estimacije parametara je ista, pri čemu su dobijeni rezultati dosta bolji.

Slike 5.22 i 5.23 ilustruju ponašanje predloženog modela u poređenju sa sistemom. Sa slika se vidi da model uspešno prati dinamiku procesa i da se kao takav dalje može koristiti prilikom predlaganja i testiranja odgovarajuće strukture i parametara kontrolnog algoritma.



Slika 5.22: Rezultati estimacije parametara modela drugog reda: merena i estimirana temperatura (Kota 33 m).



Slika 5.23: Rezultati estimacije parametara modela drugog reda: merena i estimirana temperatura (Kota 54 m).

### 5.2.3 Modeliranje uticaja brzine dozatora na raspodelu temperatura primenom metode konačnih elemenata

Sa idejom da se dodatno ispita uspešnost prethodnih modela, razvijen je kompleksan model na bazi metoda konačnih elemenata (FEM - *finite element method*) koji bi na adekvatan način simulirao različite fizičke i hemijske procese koji su od ključnog značaja za proračun raspodele temperature u procesu sagorevanja u ugljem loženim kotlovima ([115–117]). U preliminarnim simulacijama se krenulo od nešto jednostavnije geometrije kotla. Pretpostavljena je struktura pravougaonog paralelopipeda, sa pravougaonim otvorima za uduvanje aero-mešavine, sekundarnog vazduha i vazduha za recirkulaciju. Uz to su postavljeni i odgovarajući granični uslovi koji definišu brzinu protoka goriva i vazduha, vrednosti temperature i masenog udela reaktanata koji određuju sastav aero-mešavine. Izlaz je određen graničnim uslovom koji opisuje ponašanje viška vazduha. Granični uslovi u blizini zidova kotla su opisani takozvanim "funkcijama zida".

Trenutna fizika modela procesa sagorevanja unutar kotla obuhvata protok multikomponentnog fluida sa prenosom mase, efekat sagorevanja i prenos toplote. Maseni balansi koji opisuju prenos i reakcije su dati jednačinama difuzije i konvekcije u stacionarnom stanju:

$$\nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + \vec{u} \nabla c_i = R_i, \quad (5.13)$$

gde su  $D_i$  i  $c_i$  koeficijent difuzije i koncentracija reaktanta  $i$ , respektivno,  $\vec{u}$  je vektor brzine, a  $R_i$  je brzina generisanja  $i$ -tog reaktanta ( $\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$ ). Kada se turbulentni model koristi u COMSOL Reacting Flow interfejsu, brzina generisanja reaktanta  $i$  koji nastaje iz reakcije  $j$  se modeluje pomoću *eddy-dissipation* modela  $r_{\text{ED},j}$

$$R_{ij} = v_{ij}M_i r_{\text{ED},j}. \quad (5.14)$$

U prethodnoj jednačini  $v$  predstavlja stehiometrijski koeficijent, a  $M_i$  označava molarnu masu reaktanta  $i$ . Brzina reakcije  $r_{\text{ED}}$  definisana *eddy-dissipation* modelom je data sa [115]:

$$r_{\text{ED},j} = \frac{\alpha_j}{\tau} \rho \min \left[ \min \left( \frac{\omega_r}{v_{rj}M_r} \right), \beta \sum_p \left( \frac{\omega_p}{v_{pj}M_p} \right) \right], \quad (5.15)$$

gde je  $\tau$  efektivno vreme mešanja pri turbulenciji,  $\rho$  je gustina mešavine,  $\omega$  je maseni udeo reaktanta, a parametar  $\beta$  modelira aktivacionu energiju [115]. Karakteristike reaktanata su označene indeksom  $r$ , a produkta reakcije indeksom  $p$ .

U procesu sagorevanja pretpostavljene su tri egzotermne reakcije, sagorevanje ugljenika  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ , i reakcije volatila:



Sa ciljem pojednostavljivanja modela, usvojeno je da su reakcije trenutno, što je postignuto postavljanjem konstanti brzine reakcije na veoma visoke vrednosti.

Toplota reakcije (npr. promena u entalpiji koja prati svaku reakciju) je definisana toplotom koja nastaje od produkata i reaktanata:

$$\Delta H_{\text{reaction}} = \sum_{\text{products}} \Delta H_f - \sum_{\text{reactants}} \Delta H_f. \quad (5.18)$$

Toplota  $\Delta H_f$  za svaki reaktant i produkt je preuzeta iz [116]. Oslobođanje toplote je uključeno u model dodavanjem opcije postojanja toplotnog izvora u *COMSOL Heat Transfer* u *Fluids* korisničkom interfejsu. Primenjeni toplotni izvor ( $\text{W}/\text{m}^3$ ) je definisan sa:

$$q = \sum_k r_{\text{ED},k} \Delta H_{f,k}, \quad (5.19)$$

gde indeks  $k = \{1, 2, 3\}$  obuhvata sve tri pretpostavljene hemijske reakcije.



Za tačnu predikciju raspodele temperature, neophodno je uključiti zavisnost toplotnih kapaciteta reaktanata od temperature. U trenutnom modelu, toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku je procenjen interpolacijom u tri tačke za svaki reaktant, kao u [116]. Toplotni kapacitet mešavine  $c_{p,mix}$ , se računa kao srednja vrednost pojedinačnih toplotnih kapaciteta ponderisanih odgovarajućim masenim udelima:

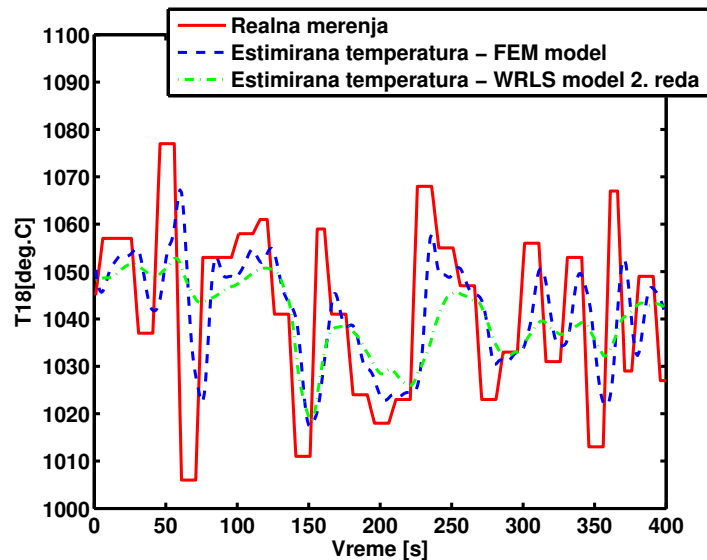
$$c_{p,mix} = \sum_i \frac{\omega_i C_{p,i}}{M_i}. \quad (5.20)$$

Konačno, prenos toplote je modelovan sa:

$$\rho c_{p,mix} \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eq} \nabla T) + q, \quad (5.21)$$

gde je  $k_{eq}$  ekvivalentni koeficijent kondukcije aero-smeše, sračunat kao srednja vrednost pojedinačnih koeficijenata kondukcije ponderisanih odgovarajućim masenim udelima. Dodatno, za koeficijent kondukcije je pretpostavljeno da zavisi od temperature, prema modelu iz *COMSOL Material Library*.

Simulacije su izvršene koristeći *COMSOL Multiphysics* softver. Slika 5.24 pokazuje da estimacija temperature korišćenjem FEM modela očigledno uključuje i neku dinamiku koja je zanemarena WRLS modelima. Međutim, dodatna analiza vodi do zaključka da odstupanja od oko 15 °C između modela ipak potvrđuju primenljivost jednostavnijih WRLS modela za svrhe testiranja projektovane regulacione strukture.



Slika 5.24: Rezultati estimacije parametara FEM modela drugog reda: T18.

## 5.3 Primena extremum seeking-a za korekciju loženja u TENT B1

Dosadašnja analiza uticaja brzina dozatora pokazala je da se njihovo ponašanje može posmatrati po parovima. Drugim rečima, pokazalo se da se korekcijom učešća u okviru para naspramnih dodavača može pomerati žiža plamena po osi koja je određena položajem dodavača. Na taj način se broj kontrolnih ulaza smanjuje na četiri. Takođe, bitan zaključak koji je ranije izveden jeste da je uticaj dodavača na temperature koje su merene na istoj strani kotla, a na različitim visinama, sličan. Zbog toga je moguće pratiti ponašanje temperatura na jednom nivou, tj. kontrolisati raspodelu temperatura na jednoj koti, a na osnovu toga, izvoditi slične zaključke i za ostale poprečne preseke [118]. Dakle, za potrebe projektovanja kontrolera broj izlaza iz sistema se može svesti na dvanaest, koliko je temperatura u svakom od tri središnja nivoa.

Jedan od najbitnijih koraka u implementaciji ovog algoritma jeste problem formulisanja kriterijumske funkcije koja bi na odgovarajući način opisala simetriju u geometriji plamena. Kako je loženje kotla tangencijalno, tj. takvo da formira žižu loptastog oblika, sa temperaturom koja opada sa udaljavanjem od centra, predložena kriterijumska funkcija je oblika

$$J_n = \sum_{i=17}^{22} (T_i - T_{i+k})^2, \quad (5.22)$$

gde parametar  $k = 6$  obezbeđuje formiranje razlike između naspramnih temperatura. Očekivano je da će razlika između svake dve naspramne temperature biti bliska nuli, ukoliko je žiža plamena podjednako udaljena od razmatranih senzora. Minimizacija ovakve kriterijumske funkcije bi rezultovala u elipsoidni oblik jezgra plamena, što je manje zahtevno po upravljačke signale od loptastog oblika, a bez značajnih neželjenih efekata po performanse. U idealnom slučaju, minimizacija ove funkcije bi rezultovala jednakim učešćima dodavača, međutim kako najčešće mlinovi nisu u istom stanju, učešća dodavača variraju. Takođe, iz praktičnih razloga učešća dodavača se kreću u opsegu [0.8, 1.2]. Ovakav opseg učešća dodavača govori o tome da je odnos u okviru jednog para u opsegu [2/3, 3/2]. Ovakvo ograničenje po upravljačkom signalu se u kriterijumsku funkciju može uvesti u formi dodatnog člana

$$J = J_n + J_c, \quad J_c = \sum_{i=1}^4 C \cdot \left[ \max \left( \frac{n_i - n_{\max}}{n_{\max}}, 0, \frac{n_{\min} - n_i}{n_{\min}} \right) \right]^2, \quad (5.23)$$

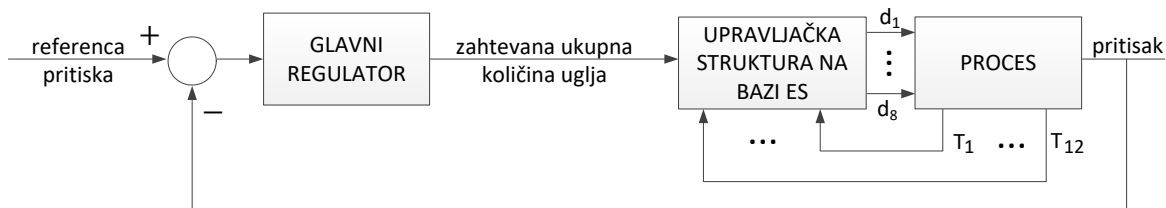
gde su  $n_{\min} = 2/3$  i  $n_{\max} = 3/2$ , a  $C$  je konstanta koja određuje značaj ovog člana u odnosu

na prethodni deo kriterijuma  $J_n$ . Dodatni, korekcionni član u kriterijumskoj funkciji,  $J_c$ , je jednak nuli kada je učešće mlina u okviru zadatih granica i raste kako se učešće udaljava od dozvoljenog opsega. Formulirana kriterijumska funkcija je konveksna sa jasno izraženim minimumom jednakim nuli koji odgovara simetričnom plamenu, pa se rešavanje ovog problema svodi na minimizaciju kriterijumske f-je (5.23).

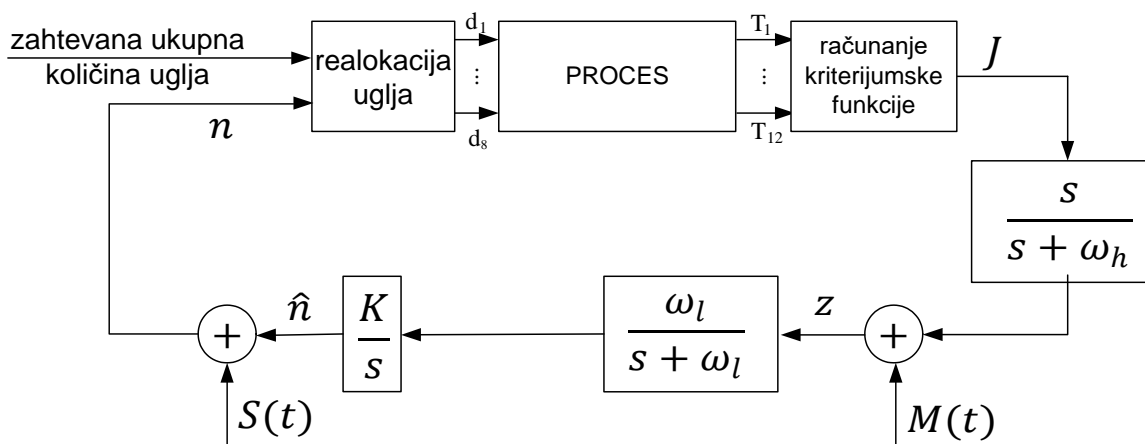
Za testiranje predložene upravljačke strukture korišćen je prethodno razvijeni model drugog reda sa vremenski promenljivim parametrima. Realni sistem obuhvata procese sa različitim dinamikom. Glavni regulator radi sa periodom odabiranja od  $T = 200$  ms, zbog brzih promena pritiska. Međutim, temperatura se sporo menja sa vremenom, tako da se podaci sa pirometara prikupljaju sa periodom od  $T = 1$  ms. Zbog toga je perioda sa kojom radi upravljački algoritam, tj. perioda sa kojom se izvršavaju simulacije jednaka  $T = 1$  ms. Glavni regulator zadaje zahtev za ukupnom količinom uglja neophodnom za postizanje referentne snage, uz održavanje pritiska sveže pare ispred turbine. Zahtev za ukupnom količinom uglja je srazmeran ukupnoj brzini svih dodavača. Kao takav, on se prosleđuje predloženom kontrolnom algoritmu i najpre se deli na četiri jednaka podzateva, po jedan za svaki mlinski par. Struktura predloženog kontrolnog algoritma je data na slikama 5.25 i 5.26. Slika 5.25 pokazuje vezu između glavnog regulatora i predložene unutrašnje petlje regulacije, a 5.26 daje detaljnije prilagođenje ES strukture za konkretnu primenu u preraspodeli loženja sa ciljem upravljanja raspodelom temperature. Zadatak ekstremum seeking algoritma jeste da odredi optimalne odnose u okviru svakog od četiri mlinska para koji će za posledicu imati simetričnu raspodelu temperature. Parametri kontrolera se mogu odrediti empirijski u skladu sa prethodno zadatim ograničenjima.

Prilikom izbora učestanosti perturbacija posebna pažnja se mora posvetiti jasnoj razmaknutosti vremenskih skala dinamike samog sistema, ES algoritma i promena u parametara sistema. Naime, kontroler mora da bude sporiji od najsporijeg pola sistema, ali istovremeno i brži od brzine promena koje se dešavaju u sistemu. Zbog toga su detaljno razmatrane brzine promena parametara sistema pri značajnim promenama u zahtevima, poput dizanja aktivne snage bloka sa minimalne na maksimalnu. Najveća vremenska konstanta modelirane dinamike procesa je oko 40 sekundi. Sa druge strane, temperaturni proces u ložištu je visoko nestacionaran, ne samo zbog poremećaja, već i zbog promenljivih zahteva u smislu referenci aktivne snage, protoka pare i pritiska. U cilju ilustracije ovih fenomena, analizirano je ponašanje sistema tokom promene aktivne snage bloka sa 0 MW na 350 MW, koja odgovara najvećoj promeni u parametrima sistema. Uobičajeni gradijent snage je od 2 do 5 MW/min. Slika 5.27 pokazuje promenu jednog od parametara WRLS algoritma tokom ovog tranzijenta. Vremenska konstanta koja odgovara ovakvom procesu je oko 500 sec. Dakle, perturbacioni signali treba da imaju vremensku

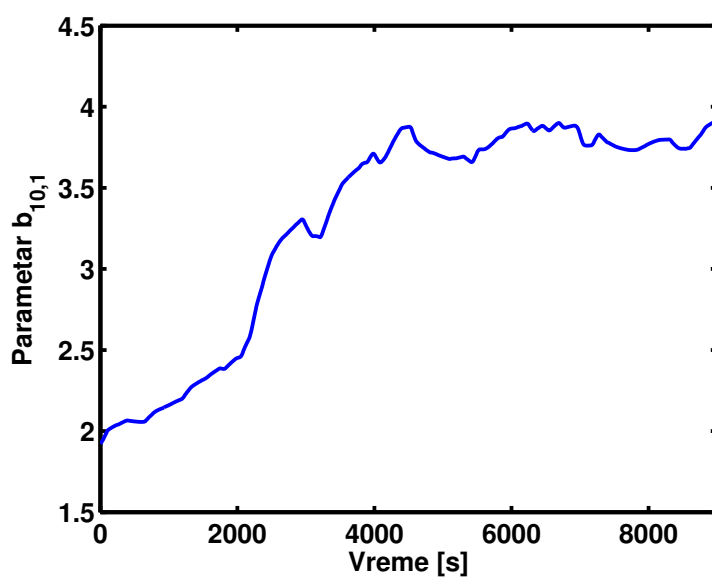
skalu između 40 i 500 sekundi.



Slika 5.25: Struktura upravljačkog algoritma.



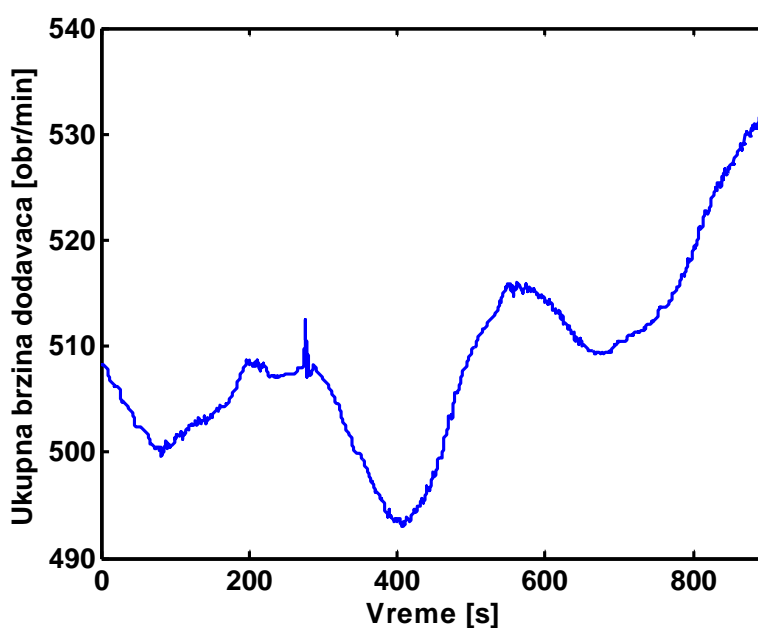
Slika 5.26: Prilagođenje ES strukture za upravljanje temperaturnom raspodelom.



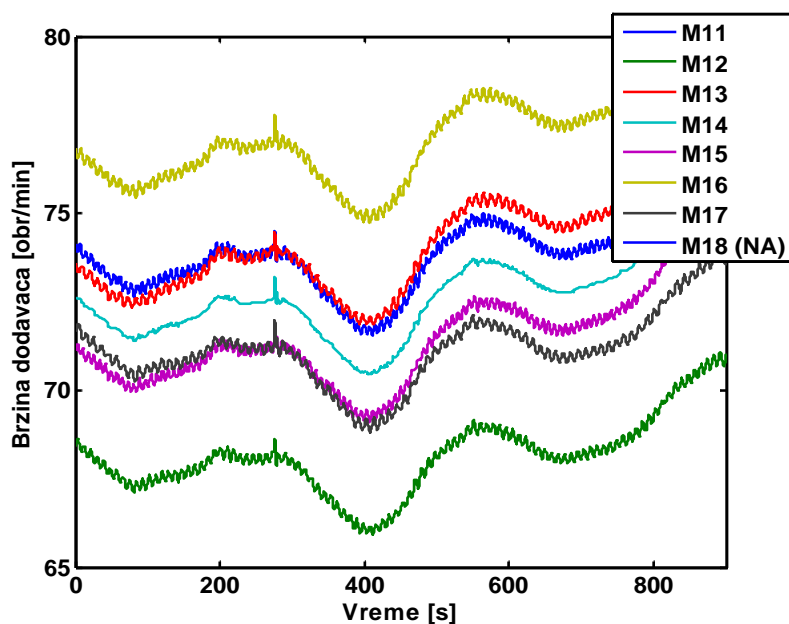
Slika 5.27: Prilagođenje ES strukture za upravljanje temperaturnom raspodelom.

Kako je uobičajena situacija u termoelektranama da jedan od mlinova nije aktivan, predložena je modifikacija predstavljene strukture preraspodele loženja. Umesto da se ukupna referentna količina uglja deli na četiri jednaka dela koji se dalje prosleđuju opisanom algoritmu koji bi odredio optimalnu podelu u okviru svakog para, najpre se 1/7 ukupne količine dodeljuje mlinu koji je u paru sa mlinom koji nije aktivan (npr. ukoliko mlin M8 nije aktivan, mlinu M4 se dodeljuje 1/7 ukupnog opterećenja), dok se preostali deo ukupnog zahteva za ugljem deli na tri para aktivnih mlinova, u okviru kojih se preraspodela vrši na osnovu ES algoritma.

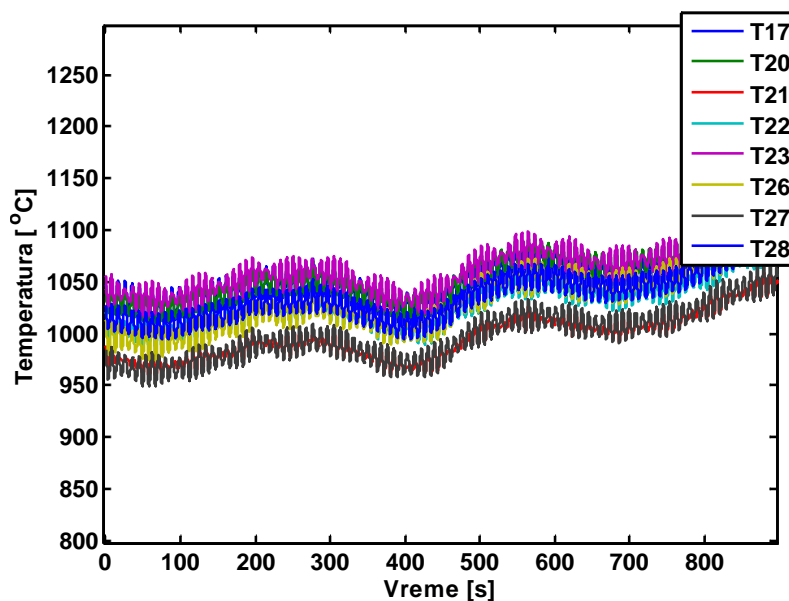
Analizirajmo najpre situaciju u kojoj se parametri modela malo menjaju, tj. nema velikih promena u radnom režimu. Amplitude perturbacija uvedenih u kontrolni algoritam su  $a = 0.001$ , dok su njihove usvojene učestanosti 0.8, 0.7 i 0.6 rad/s. Izborom ovih parametara, kao i preostalih parametara kontrolnog algoritma može se uticati na brzinu konvergencije parametara kontrolera ka optimalnim vrednostima. Na slici 5.28 je prikazana ukupna zahtevana brzina dozatora, koja je srazmerna ukupnom opterećenju mlinova diktiranom od strane glavnog regulatora. Slika 5.29 pokazuje upravljanje koje predlaže ES kontroler u cilju održavanja simetrije plamena. Kako nema značajnih promena u parametrima modela, preraspodela loženja je približno konstantna tokom vremena. Ono što se može videti sa slike jeste da je brzina dozatora mlina M14 jedina koja ne prolazi direktno kroz ES algoritam (na tom ulazu nisu prisutne periodične perturbacije), već se tom mlinu u startu dodeljuje 100% učešće.



Slika 5.28: Zahtev za ukupnom brzinom dozatora (srazmerno ukupnom opterećenju) u slabo promenljivim uslovima.



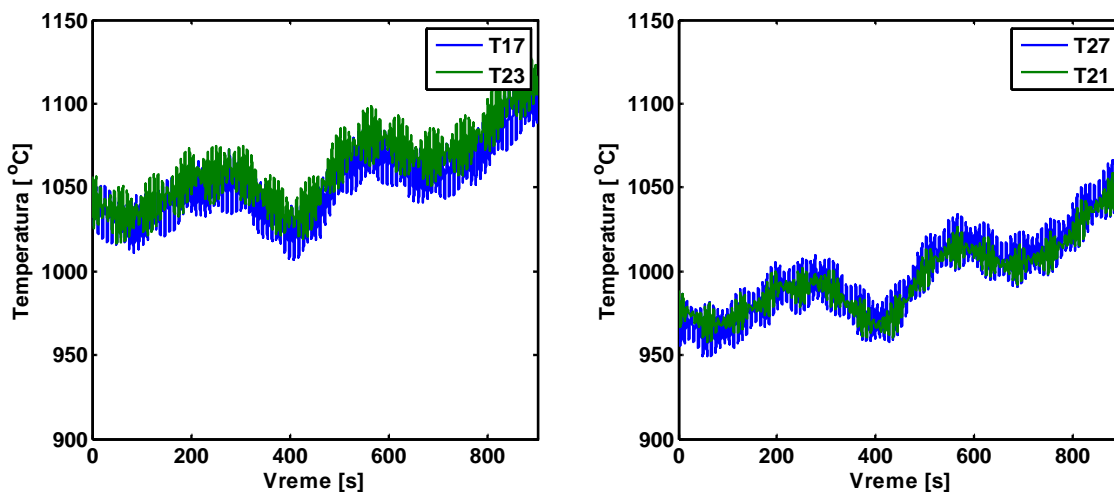
Slika 5.29: Preraspodela loženja po aktivnim mlinovima u slabo promenljivim uslovima.



Slika 5.30: Estimirane temperature na izlazu modela u slabo promenljivim uslovima.

Slika 5.30 pokazuje ponašanje estimiranih temperatura na izlazu modela . Može se videti se da se sve temperature nalaze u rasponu od 100 °C, što je u startu pokazatelj potencijala koji nudi ES upravljanje. Detaljnijom analizom prikazanom na slici 5.31 dolazi se do zaključka da, u skladu sa postavljenim kriterijumom za optimizaciju, kontroler uspeva da smanji razlike između naspramnih temperatura na oko 10 °C. Jedna od posledica prirode ES strategije upravljanja jeste postojanje oscilacija u izlaznim signalima, koje se dalje koriste za procenu gradijenta kriterijumske funkcije. Amplitude osilacija se mogu

smanjiti dodatnim podešavanjem parametara kontrolera. Kao i kod drugih upravljačkih rešenja, konvencionalnih i nekonvencionalnih, i ovde se postavlja pitanje kompromisa između brzine (konvergencije) i amplituda upravljačkih signala.

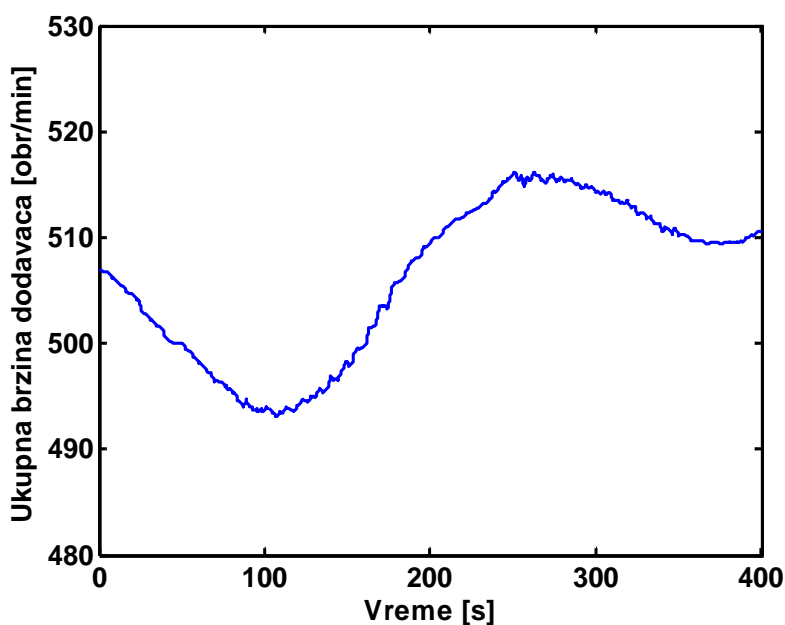


Slika 5.31: *Estimirane temperature na izlazu modela (poređenje naspramnih) u slabo promenljivim uslovima.*

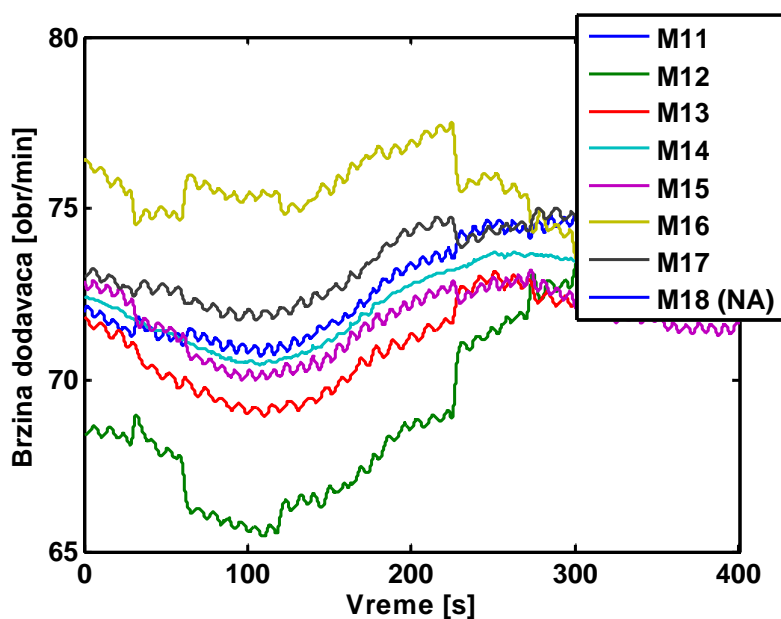
Analizirajmo sada performanse ES kontrolera u visoko nestacionarnim uslovima. Parametri modela opisuju ponašanje sistema prilikom učestanih smena mlinova rađenih za potrebe prikupljanja i analize što raznovrsnijih uslova rada sistema. I za vreme prikupljanja ovih podataka mlin M8 nije bio aktivan. Na slici 5.32 je prikazan zahtev za ukupnom brzinom dozatora, srazmeran ukupnom opterećenju aktivnih mlinova. Za razliku od prethodnog slučaja kada su učešća dodavača bila praktično konstantna tokom vremena, ovde se vidi da se učešća menjaju u skladu sa promenjenim parametrima modela koji opisuju uslove u samom kotlu.

U skladu sa promenama učešća dodavača, menjaju se i temperature na izlazu modela. Zbog naglih promena u parametrima modela prisutne su i veće promene temperatura u odnosu na prethodni slučaj. Iako su razmatrani poremećaji u sistemu značajni i rezultuju vidnim udarom u različitim fizičkim veličinama, ovakva brzina promene parametara uglavnom odstupa od realne situacije, pa samim tim i neće biti ovako brzih promena u temperaturi. Međutim, prikazan je drastičan slučaj kao siguran pokazatelj da će i sa jednostavnijim izazovima regulaciona struktura moći da se izbori. Dodatno, sa slika 5.34 i 5.35 se vidi da se temperature na naspramnim stranama kotla održavaju i dalje u bliskim opsezima (u najdrastičnijem slučaju razlika je oko 40 °C stepeni).

Za potrebe testiranja ovom prilikom prikupljenih podataka, rađeno je prilagođenje algoritma u skladu sa ukupnim brojem aktivnih mlinova. Algoritam se može u ovom smislu



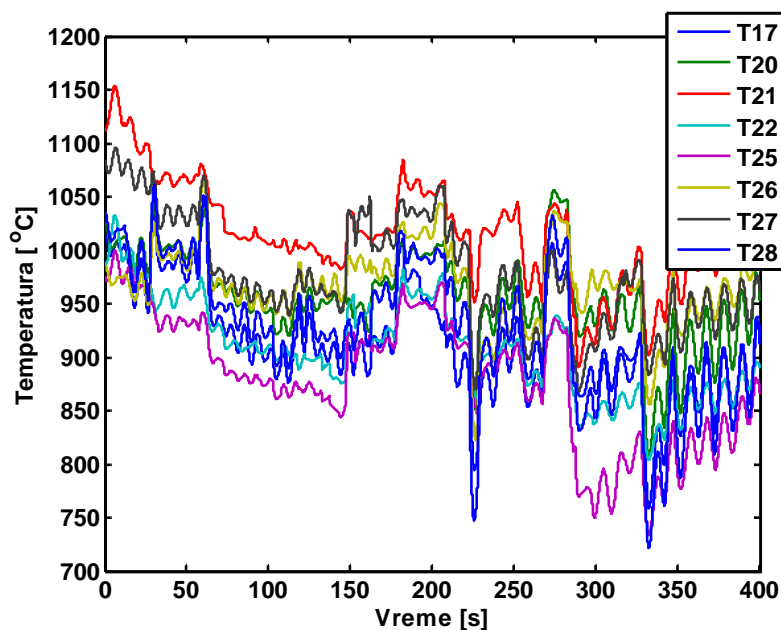
Slika 5.32: Zahtev za ukupnom brzinom dozatora (srazmerno ukupnom opterećenju) u visoko nestacionarnim uslovima.



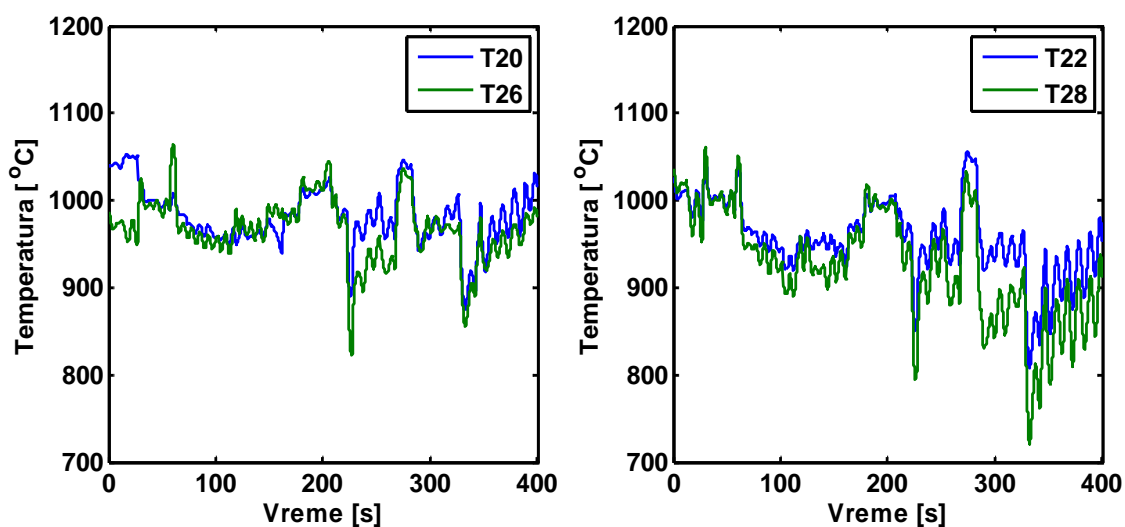
Slika 5.33: Preraspodela loženja po aktivnim mlinovima u visoko nestacionarnim uslovima.

jednostavno generalizovati. Dodatni izazov ovom prilikom bila su i kontaminirana (u nekim slučajevima čak i neupotrebljiva) merenja temperature sa pirometara, pa je algoritam testiran uz adekvatno prilagođenje te vrste. Dakle, pre formiranja kriterijumske funkcije i zatvaranja povratne sprege, moraju se analizirati i merenja sa pirometara (o čemu je ranije bilo reči). Ukoliko se primeti da neka od merenja temperature nisu adekvatna (npr. dobija





Slika 5.34: *Estimirane temperature na izlazu modela u visoko nestacionarnim uslovima.*



Slika 5.35: *Estimirane temperature na izlazu modela (poređenje naspramnih) u slabo promenljivim uslovima.*

se nerealna informacija o maksimalnoj vrednosti iz opsega), takvo merenje treba na odgovarajući način isključiti/zameniti prilikom formiranja kriterijumske funkcije. Jedna od mogućnosti jeste zamena takvog merenja drugim bliskim merenjem temperature, druga bi bila potpuno isključivanje tog merenja i njegovog para iz kriterijumske funkcije, treća jeste da se na osnovu modela estimirana nedostajuće merenje, što je najzahtevnija opcija jer podrazumeva adekvatan i pouzdan model koji opisuje temperaturne profile tokom vremena, ali istovremeno i najkorisnija opcija jer nema zanemarivanja merenja koja su

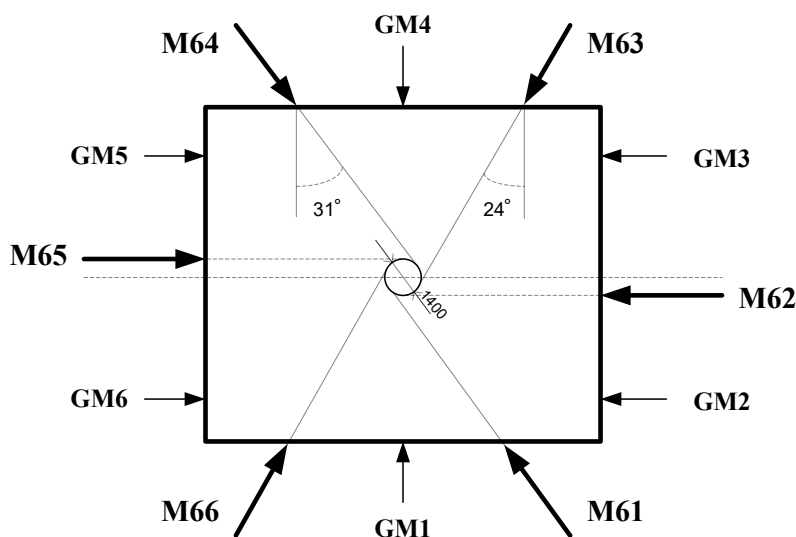
korektna.

Dobijeni rezultati pokazuju da se regulacija na bazi ES, koja po prirodi ne zahteva postojanje modela procesa, može uspešno koristiti u regulaciji preraspodele loženja. Odgovarajućim izborom parametara kontrolera, može se uticati na brzinu samog kontrolera, a samim tim i na performanse regulisanog sistema. Ovakva struktura je zbog svoje adaptivne strukture robusna na razne poremećaje u sistemu, ali nudi i mogućnosti prilagođenja različitim radnim režimima.

## 5.4 Primena extremum seeking-a za korekciju loženja u TENT A6

Sa ciljem da se pokaže mogućnost generalizacije izvedenih zaključaka u smislu uticaja opterećenja mlinova na preraspodelu temperature i korišćenja predstavljene ES strukture za regulaciju tog procesa, slični eksperimenti su sprovedni na bloku Termoelektrane Nikola Tesla A6 [40, 42, 119]. Termoelektrana TENT A ima nominalnu snagu od 1650 MW, od čega blok A6 obezbeđuje 350 MW. U kontekstu preraspodele loženja na osnovu merenja prikupljenih sa pirometarskog sistema, najznačajnije razlike u odnosu na blok B1 su: 1. manji broj aktivnih mlinova: blok A6 ima šest tangencijalno postavljenih mlinova, odnosno tri mlinska para 5.36, i 2. drugačija dispozicija pirometara u skladu sa geometrijom kotla: po 4 pirometra na visinama 17 m i 51 m, odnosno po 12 pirometara na visinama 25 m, 38 m i 43 m. Primena predložene upravljačke strukture dala je i u ovom slučaju veoma dobre rezultate.

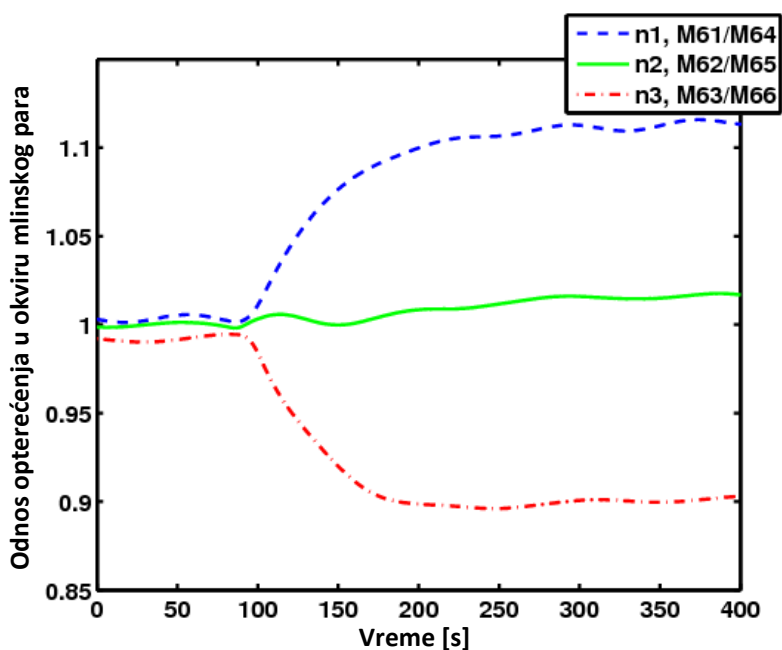
Dodatno, analizirano je ponašanje ES strukture u prisustvu poremećaja. Naime, sa slike 5.37 se vidi da su u ustaljenom stanju sva tri odnosa opterećenja u okviru mlinskih parova oko jedinice. U parametrima modela je uveden poremećaj u trenutku  $t = 90$  s. Nakon tranzijenta od oko 100 s, kontrolni signali su ušli u novo stacionarno stanje. Odnos opterećenja mlinova u okviru drugog para je ostao približno isti, dok su se preostala dva odnosa promenila u pokušaju da minimizuju zadatu kriterijumsku funkciju, koja je zadata u formi (5.23). U signalima su prisutne i sinusoidalne perturbacije odgovarajućih učestanosti. Kao rezultat, kontrolni algoritam povećava učešće mlina M1 na oko 55% a mlina



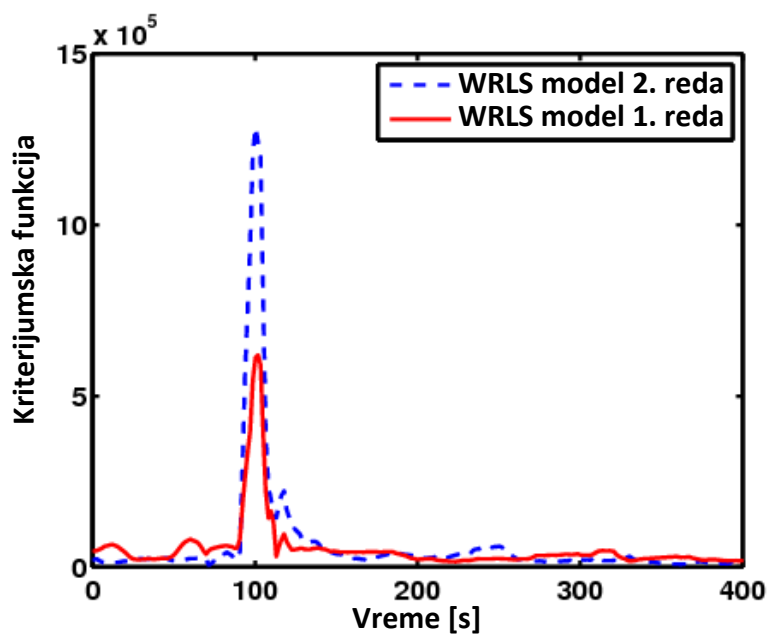
Slika 5.36: Tangencijalni raspored gorionika na bloku A6.

M4 na oko 45% u okviru ovog mlinskog para. Sličan scenario je zadesio i mlinski par M3-M5. Još jednom je pokazano da na geometriju plamena utiče odnos brzina dozera u okviru mlinskog para, a ne same brzine dozera. Ovakva neosetljivost geometrije plamena na same brzine je upravo ono što omogućava primenu ES algoritma, koji bi inače bio teško primenljiv u uslovima brzo promenljivih parametara procesa. Međutim, u ovom slučaju ES algoritam uspeva da se prilagodi i dovede kontrolne varijable do novih vrednosti, koje obezbeđuju minimizaciju kriterijumske funkcije 5.38.

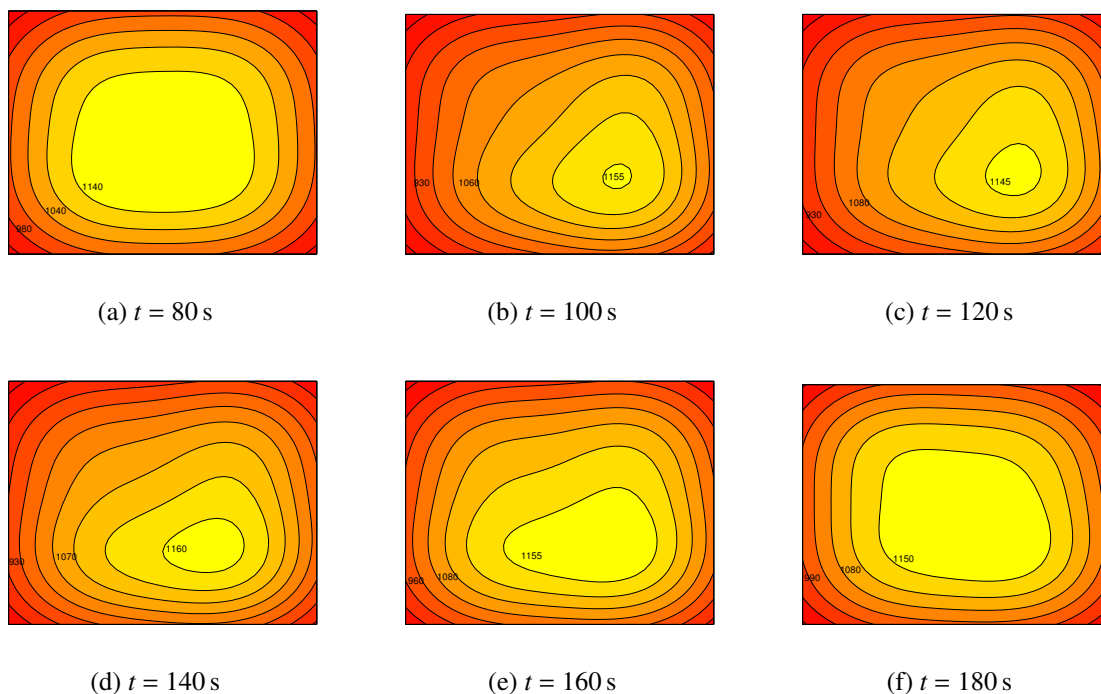
Slika 5.39 pokazuje procenu promene 2D temperaturnog polja na osnovu konačnog broja merenja u vremenskom intervalu od 100 sekundi nakon nastupanja poremećaja u parametrima modela. Vidi se da nakon nastupanja poremećaja u  $t = 90$  s, plamen polako počinje da se pomera ka prednjem desnom uglu kotla. Pik u kriterijumskoj funkciji odgovara položaju plamena najbližem prednjem desnom uglu kotla, na oko  $t = 100$  s. Kako ES algoritam uspeva da prilagodi kontrolne signale, plamen se polako vraća nazad ka centru ložišta, nakon čega se tu i održava na osnovu novih optimalnih upravljačkih signala.



Slika 5.37: Kontrolni signal (učešća mlinova) tokom nastupanja poremećaja.



Slika 5.38: Kriterijumska funkcija tokom nastupanja poremećaja.



Slika 5.39: Kretanje plamena tokom nastupanja poremećaja. Svetlija boja odgovara višoj temperaturi. Izoterme su date u  $^{\circ}\text{C}$

## 5.5 Primena extremum seeking-a za regulaciju temperature pare na izlazu iz pregrejača u TENT B1

Temperatura pregrejane pare na izlazu iz pregrejača pare je promenljiva i zavisi od niza faktora kao što su: opterećenje kotla, pritisak u parovodu, kvalitet goriva, temperatura napojne vode, koeficijent viška vazduha na izlazu iz ložišta, položaj gorionika, zašljakivanje grejnih površina u ložištu, kvalitet ugljenog praha itd. Neki od ovih faktora se menjaju češće, a neki ređe, ali zbog njih pregrejači pare moraju da budu tako dimenzionisani, kako bi se pri svim radnim uslovima u određenom radnom režimu kotla obezbedila nominalna temperatura pare. Na bloku TENT B1 postoje 4 pregrejača pare, pa zbog toga postoje ubrizgavanja vode na tri različita nivoa. Regulacija se vrši u smislu smanjenja temperature pregrejane pare, pa se ovi regulatori nazivaju i hladnjacima (iako su kapljice vode na jako visokim temperaturama od oko  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mada je to mnogo manje od temperature pare i zida parovoda koje se kreću u opsegu  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ovi hladnjaci pare sa ubrizgavanjem snižavaju temperaturu pare putem raspršivanja vode u struju pare. Ovakav način regulacije temperature pare našao je veliku primenu zbog velike efikasnosti koja zavisi od površine ubrizgane vode (tj. kvaliteta raspršivanja), relativne brzine vode i pare, i od temperaturne razlike između fluida.

Na velike razlike između temperatura po granama isparivača utiče broj aktivnih mlinova, raspoloživost i preraspodela količine toplog vazduha, kvalitet uglja, radno stanje mlinova, način rada sistema ZVP i opterećenje kotla (bloka). Osnovnim projektom predviđeno je da se nominalna snaga bloka ostvaruje sa 6 mlinova u radu. Međutim, zbog stanja kotla (zaprljanost i nezaptivenost), kao i stanja habajućih delova mlinova, najčešće nije moguće sa garantovanim ugljem i 6 mlinova u radu, postići snagu od 620 MW (prema osnovnom projektu). Iz navedenih razloga najčešće je u pogonu 7 mlinova. Mlinovi ubacuju smešu ugljenog praha i vazduha tangencijalno u ložište kotla, i obrazuju vrtložno kretanje oko vertikalne ose. Nedostatak jednog mlina u pogonu (goriva i pripadajućeg vazduha) stvara nesimetriju u popunjenosti ložišnog prostora, što utiče na termičko opterećenje zone isparivača, a time i na razlike temperatura u granama. Ovaj problem rešava se odgovarajućim podešavanjem ostalih mlinova u radu. Slika 5.40 prikazuje kretanje temperature na izlazu iz pregrejača za promene brzine dozatora date na slici 5.11. Sa nje se vidi da se maksimalna razlika između temperatura dostiže do  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

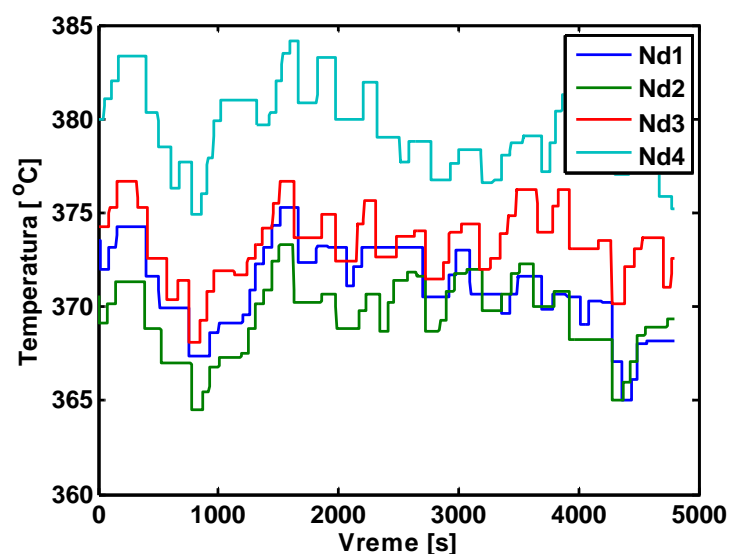
Analiza u okviru ovog poglavlja ispituje mogućnost korekcije procesa loženja za regulaciju temperatura pare na izlazu iz isparivača zarad kvalitetnije kasnije regulacije temperature u granama pregrejača [41]. Za potrebe analize uticaja promene učešća dodavača

na ove temperature, napravljen je niz eksperimenata, sa različitim sastavom aktivnih mlinova. Pokazuje se da ponašanje ovih temperatura varira sa brojem i strukturom aktivnih mlinova. Međutim, ono što je zajedničko za sve sve eksperimente, a što se analizom temperaturnih profila može zaključiti jeste da se zavisnost ovih temperatura od promene učešća dodavača može opisati modelom drugog reda. Primenom ranije opisane metode identifikacije, formiran je jednostavan model drugog reda, koji opisuje uticaj učešća dodavača na temperature na izlazu iz isparivača. Dobijanje ovakvog jednog modela je omogućilo testiranje odgovarajuće ES strukture.

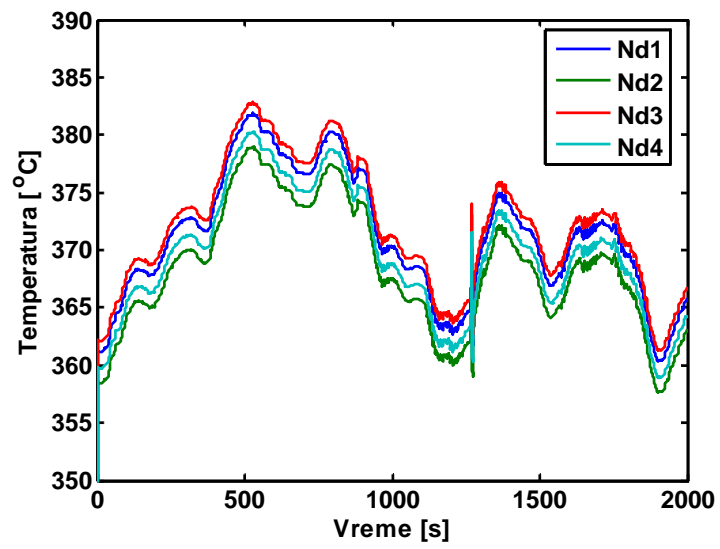
Kako je generalna ideja unapređenja procesa ubrizgavanja upravo u održavanju temperatura na izlazu iz isparivača na što približnijim vrednostima, može se definisati odgovarajuća kriterijumska funkcija ES algoritma upravljanja tako da ima minimum u nuli kada su sve temperature jednake. Takav kriterijum bi mogao u sebi da sadrži meru razlike između svake od temperatura i srednje vrednosti:

$$J = \sum_{i=1}^4 (T_i - T_{sr})^2, T_{sr} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 T_i \quad (5.24)$$

Rezultat testiranja ovakve strukture upravljanja, uz adekvatno podešene parametre kontrolera je prikazan na slici 5.41. Ono što se može primetiti jeste da se zavisno od reference za ukupnim opterećenjem temperature menjaju, međutim njihove razlike su male i iznose do 2 °C. Drugim rečima, upravljački algoritam uspeva da svede razliku temperatura na minimalnu, iako je jedan od mlinova nije u pogonu.



Slika 5.40: Profili temperatura na izlazu iz isparivača šare sa vremenom.



Slika 5.41: *Temperature pare na izlazu iz isparivača dobijene primenom ES upravljačke.*



---

### Zaključak

---

Proces sagorevanja u kotlovima termoelektrana predstavlja jedan od ključnih procesa od čije adekvatne regulacije zavisi efikasnost i raspoloživost celog sistema. Uspešno rešavanje ovog upravljačkog zadatka donosi mnogobrojne benefite poput kvalitetnog održavanja parametara pare, smanjenja zagađenja životne sredine, smanjenja naslaga pepela i čađi, povećanja efikasnosti i pouzdanosti izbegavanjem velikih oscilacija pritiska i temperature, prolongirane izloženost pojedinih komponenata visokim temperaturama, i druge. U tom smislu, formulisanje odgovarajućeg upravljačkog algoritma zahteva posedovanje teoretskih i praktičnih znanja koja bi rezultovala formulisanjem kriterijuma koji bi obuhvatio sve prethodno navedene aspekte i njihovu međusobnu povezanost.

Mogućnosti unapređenja upravljačkog algoritma u velikoj meri zavise od raspoloživih informacija o samom sistemu. Zbog toga se, kao jedan od koraka modernizacije termoelektrana, sve češće uvode novi senzorski sistemi, koji su otporniji na visoke temperature i korozivna okruženja, a koji su distribuirani, tj. postavljeni u vidu senzorske mreže kako bi se stvorio što bolji uvid u procese koji se odvijaju u kotlu. Popularan senzorski sistem za primenu u vizuelizaciji procesa sagorevanja se oslanja na radijacione pirometre, koji na osnovu zračenja svih čestica koje se nalaze u njihovom vidnom polju stvaraju informaciju o temperaturi. Postavljanjem mreže pirometara po jednom preseku ložišta može se doći do 2D, a proširenjem te mreže po različitim visinama i do 3D predstave temperaturnog polja u ložištu kotla termoelektrane. Osnovna ideja ove teze je analiza mogućnosti upravljanja geometrijom plamena na osnovu korekcije raspodele loženja. Sa tim ciljem sprovedeni su brojni eksperimenti u Termoelektranama Nikola Tesla A i B, na osnovu kojih su izvedeni zaključci o trenutnim potrebama za unapređenjem procesa loženja i uticaju preraspodele loženja na prostornu raspodelu temperatura, a na osnovu njih

predloženo i rešenje regulacije koje postiže prethodno definisani cilj u smislu simetrije plamena u ložištu.

U prvom koraku izvršena je analiza prikupljenih merenja sa pirometarskog sistema. Na osnovu nje se moglo uočiti da su neka od merenja dvobojnih temperatura privremeno ili trajno bila nedostupna, kao i da su neka od merenja konstantno imala odstupanja od stvarne vrednosti. Analiza je pokazala da su neke od ovih pojava prouzrokovane nedovoljno dobrim uslovima za rad pirometarskog mernog sistema. U tim slučajevima, bilo je bilo neophodno izvršiti dodatnu digitalnu predobradu prikupljenih merenja. U te svrhe su korišćene informacije o temperaturi sa jednobojnog pirometra, temperaturi izmerenoj na termoparovima, kao i metode predikcije nedostajućih merenja. Takođe, uočena je i povremena pojava merenja visokog intenziteta (*outlier-a*). Pojavljivanje ovakvih merenja nije neobično, imajući u vidu da je unutrašnjost kotla visoko nestacionarna okolina u kojoj se sagorele i nesagorele čestice brzo kreću, što svakako utiče na informaciju koju daje senzor. Ovakva merenja je trebalo uočiti i kompenzovati kako ne bi uticala na kasnije preračunavanje upravljačkih signala.

Nakon toga, na osnovu pažljivo osmišljenih eksperimenata, koji bi na najbolji način prikazali zavisnosti između pojedinih ulaznih i izlaznih veličina, izvedeno je nekoliko veoma bitnih zaključaka. Na prvom mestu je posmatrano temperaturno polje u kotlu tokom dužeg vremenskog perioda i uočeno je da ono najčešće nije u skladu sa željenom simetrijom plamena. To je dodatno potkrepljeno i posmatranjem temperatura dimnog gasa na levoj i desnoj strani kotla, koje se tokom dužeg vremenskog perioda razlikuju preko 100 °C. Ovo nesumnjivo govori o potrebi za unapređenjem postojećeg regulacionog rešenja. Takođe, iz posmatranja 2D raspodele temperature, kao i temperatura dimnog gasa, vidi se da se u pojedinim vremenskim intervalima, sa promenom opterećenja među mlinovima žiža plamena pomerala ka centru, odnosno temperature na levoj i desnoj strani kotla su bivale bliske. Na osnovu toga je izveden zaključak da se na raspodelu temperature u kotlu može uticati odgovarajućom preraspodelom opterećenja između mlinova.

Detaljnija ispitivanja su izvršena korelacionom analizom između brzina dozatora, koje su srazmerne učešćima dodavača, odnosno opterećenju mlinova i temperatura izmerenih pirometarskim sistemom. Zapravo, budući da su temperaturna merenja često pod uticajem raznih poremećaja, a pod pretpostavkom da ti poremećaji imaju lokalni karakter, tj. da utiču na isti način na merenje bliskih pirometara, u korelacionoj analizi su umesto temperatura, korišćene razlike odgovarajućih temperatura. Osim efekta potiskivanja poremećaja, ovakav izbor se pokazao koristan i sa stanovišta zaključivanja o kretanju plamena. Naime, posmatrajući jedan poprečni presek ložišta, i razliku temperatura izmerenih na istom zidu, može se reći da povećanje te razlike govori o pomeranju plamena ka onom

pirometru u čiju korist se razlika povećava. Na taj način je uočeno da se povećanjem opterećenja mlina, tj. učešća odgovarajućeg dodavača, žiža plamena pomera od pripadajućeg gorionika. Ovakav zaključak je potvrđen za sve mlinove. Dodatno, pokazano je da se ovo rezonovanje može proširiti po svim visinama, tj. da je uticaj opterećenja mlina istog karaktera na različitim kotama. Veoma bitan zaključak je da se istovremenim opterećenjem/rasterećenjem naspramnih mlinova u okviru para postiže pomeranje plamena po toj osi. Ovakvi zaključci kudikamo pojednostavljaju projektovanje upravljačkog zakona, jer sa jedne strane svode broj ulaza, koji odgovaraju brzinama dozatora, na dvostruko manji, a sa druge strane omogućavaju posmatranje raspodele temperature u okviru jednog poprečnog preseka.

Najčešći pristup u praksi jeste regulacija PID regulatorima i njihovim modifikacijama, zbog njihove jednostavnosti i intuitivnosti. Međutim, zbog ograničenosti njihovih performansi na okolinu radne tačke za koju su projektovni, ovakve regulacione strukture najčešće nailaze na probleme pri promeni radnog režima ili drugim značajnim promenama poput ispada nekog od mlinova, ili rada na tehničkom minimumu. Zbog toga je u okviru ove teze predstavljena adaptivna struktura regulatora, koja osim mogućnosti promene svojih parametara radi boljeg ispunjavanja regulacionih zahteva, ima i takozvanu *model-free* prirodu, koja je od velikog značaja pri regulaciji kompleksnih procesa čije je egzaktne modele teško identifikovati. Kao takva, *extremum seeking* strategija na bazi sinusoidalnih perturbacija predstavlja rešenje koje se u realnom vremenu može prilagoditi novim uslovima rada kotla, a koje je istovremeno i robusno i kao što se pokazalo otporno na različite poremećaje. Za izlaze ove upravljačke strukture usvojene su preraspodele učešća dodavača u okviru svakog mlinskog para. Ulazi u kontrolni algoritam jesu temperature u okviru jednog poprečnog preseka, koje se u prvom koraku predloženog algoritma objedinjuju u jedinstvenu skalaranu kriterijumsku funkciju. Ova kriterijumska funkcija, osim temperaturnih merenja sadrži i informaciju o ograničenjima upravljačkih signala i izabrana je da bude konveksna sa minimumom koji odgovara centralnoj, simetričnoj geometriji plamena.

Testiranja predložene upravljačke strukture su sprovedena nad adaptivnim modelom procesa razvijenim u prezentovanoj tezi, koji kao ulaze ima brzine dozatora, a kao izlaze temperature pirometara. Estimacija parametara je izvršena na osnovu WRLS algoritma sa fiksnim parametrom zaboravljanja, a poređeni su rezultati identifikacije modelom prvog i drugog reda. Kao što je očekivano, identifikacija modelom drugog reda je pokazala bolje performanse u smislu praćenja dinamike procesa. Dodatno, kako bi se pokazala valjanost ovakvog modela, izvršeno je njegovo poređenje sa složenijim modelom na bazi metode konačnih elemenata (FEM) koji je obuhvatio bitne fizičke i hemijske jednačine

procesa sagorevanja. Kao rezultat, pokazano je da usvojeni WRLS model drugog reda daje nešto lošije rezultate od složenog FEM modela, međutim odstupanja u estimiranim temperaturama između ova dva modela nisu značajna, te je WRLS struktura izabrana za dalja testiranja projektovanog kontrolnog algoritma. U okviru disertacije su dosada pomenuti rezultati prikazani nad merenjima prikupljenim na bloku TENT B1. Sa ciljem da se pokaže primenljivost ovih zaključaka i u kotlovima drugih termoenergetskih postrojenja sa sličnim karakteristikama, slični eksperimenti su sprovedeni i na bloku TENT A6. Ispitano je i ponašanje ES algoritma u prisustvu poremećaja u parametrima modela. Rezultati pokazuju da je algoritmu potreban prihvatljiv vremenski period da na ovakav poremećaj odreaguje i preraspodeli opterećenja u okviru mlinskih parova, nakon čega se žiža plamena vraća nazad u centar ložišta.

Dodatno je prikazano da se ES strategija može koristiti i za uravnoteženje drugih temperatura koje su takođe posledica neadekvatne raspodele opterećenja po mlinovima, a to su temperature na izlazima iz isparivača. Ideja regulacije jeste održavanje ovih temperatura na bliskim vrednostima kako bi se smanjili kasniji upravljački naponi prilikom procesa ubrizgavanja, a sve sa ciljem ostvarivanja zadatih temperatura na izlazima iz pregrejača. ES algoritam se i u ovom slučaju pokazao kao dobar alat i dao obećavajuće rezultate koji bi vodili ka značajnom povećanju efikasnosti, a smanjenu troškova.

Na osnovu izvršenih analiza nameće se zaključak da se povezivanje sistema za vizuelizaciju procesa sagorevanja i korekcije upravljačkih veličina loženja može uspešno iskoristiti u regulaciji raspodele temperatura u kotlu. Dalji koraci u istraživanju bi se odnosili na implementaciju predložene strukture na realnom sistemu u vidu nadogradnje na postojeći DCS sistem sa kojim bi zajedno radila na unapređenju sveukupnih performansi kotla. Naravno, za početak bi to podrazumevalo da se ovakva upravljačka struktura iskoristi za izračunavanje vrednosti upravljačkih signala koje bi bile preporučene operateru, ne nužno i realizuje u realnom vremenu. Predložena struktura upravljanja ostavlja i mogućnost da rukovalac bloka, iz tehničkih razloga, fiksira učešće nekog od mlinova, kako bi sprečio velike devijacije temperatura aerosmeše. Takođe, značajno bi bilo dodatno testirati ponašanje sistema u otežanim uslovima rada, poput rada na tehničkom minimumu.

Dodatna unapređenja predložene strukture bi se mogla kretati u pravcu uvođenja dodatnog stepena slobode u vidu nejednake raspodele učešća po mlinskim parovima. Naime, može se desiti da neki od mlinova, kod koga je vremenom došlo do degradacije performansi, uz sve napore ne uspeva u dovoljnoj meri da doprinese simetriji plamena. U tom slučaju, njegov uticaj bi trebalo kompenzovati povećanjem opterećenja okolnih mlinova na odgovarajući način. Dodatno, ovakve situacije bi mogle sugerisati da u radu nekog od mlinova postoji problem. Drugim rečima, trajnim praćenjem zahteva za ukupnim opte-

rećenjem mlinova i signala preraspodele opterećenja po mlinovima, bi se mogla i raditi i procena stanja mlinova. Ovakvi koraci bi vodili ka razvijanju jedinstvenog ekspertskeg sistema koji bi na osnovu broja aktivnih mlinova i izlaza kontrolnog algoritma sa jedne strane radio na optimizaciji procesa sagorevanja, a sa druge strane učestvovao u preventivnom održavanju, što je pitanje od velikog značaja u naučnoj i inženjerskoj zajednici.

---

## Literatura

---

- [1] C. Yin, S. Caillat, J.-L. Harion, B. Baudoin, and E. Perez, “Investigation of the flow, combustion, heat-transfer and emissions from a 609MW utility tangentially fired pulverized-coal boiler,” *Fuel*, vol. 81, no. 8, pp. 997–1006, 2002.
- [2] D. Flynn, *Thermal power plant simulation and control*. The Institution of Engineering and Technology, 2003.
- [3] M. Stöllinger, B. Naud, D. Roekaerts, N. Beishuizen, and S. Heinz, “PDF modeling and simulations of pulverized coal combustion—Part 1: Theory and modeling,” *Combustion and Flame*, vol. 160, no. 2, pp. 384–395, 2013.
- [4] —, “PDF modeling and simulations of pulverized coal combustion—Part 2: Application,” *Combustion and Flame*, vol. 160, no. 2, pp. 396–410, 2013.
- [5] W. Wójcik, K. Gromaszek, Z. Shegebayeva, B. Suleimenov, and B. Aron, “Optimal control for combustion process,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 90, no. 4, pp. 157–160, 2014.
- [6] C. Coimbra, J. Azevedo, and M. Carvalho, “3-D numerical model for predicting NO<sub>x</sub> emissions from an industrial pulverized coal combustor,” *Fuel*, vol. 73, no. 7, pp. 1128–1134, 1994.
- [7] R. Saripalli, T. Wang, and B. Day, “Simulation of combustion and thermal flow in an industrial boiler,” in *Proceedings of 27th Industrial Energy Technology Conference, New Orleans, Louisiana*, 2005.
- [8] T. Asotani, T. Yamashita, H. Tominaga, Y. Uesugi, Y. Itaya, and S. Mori, “Prediction of ignition behavior in a tangentially fired pulverized coal boiler using CFD,” *Fuel*, vol. 87, no. 4, pp. 482–490, 2008.

- [9] E. Korytnyi, R. Saveliev, M. Perelman, B. Chudnovsky, and E. Bar-Ziv, “Computational fluid dynamic simulations of coal-fired utility boilers: An engineering tool,” *Fuel*, vol. 88, no. 1, pp. 9–18, 2009.
- [10] H.-C. Zhou, C. Lou, Q. Cheng, Z. Jiang, J. He, B. Huang, Z. Pei, and C. Lu, “Experimental investigations on visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale pulverized-coal-fired boiler furnace,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 30, no. 1, pp. 1699–1706, 2005.
- [11] H. B. Vuthaluru and R. Vuthaluru, “Control of ash related problems in a large scale tangentially fired boiler using CFD modelling,” *Applied Energy*, vol. 87, no. 4, pp. 1418–1426, 2010.
- [12] Z. Hao, X. Qian, K. Cen, and F. Jianren, “Optimizing pulverized coal combustion performance based on ANN and GA,” *Fuel Processing Technology*, vol. 85, no. 2, pp. 113–124, 2004.
- [13] F. Si, C. E. Romero, Z. Yao, E. Schuster, Z. Xu, R. L. Morey, and B. N. Liebowitz, “Optimization of coal-fired boiler SCRs based on modified support vector machine models and genetic algorithms,” *Fuel*, vol. 88, no. 5, pp. 806–816, 2009.
- [14] X.-f. Wang and H.-c. Zhou, “Simulation on an optimal combustion control strategy for 3-D temperature distributions in tangentially pc-fired utility boiler furnaces,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 17, no. 2, pp. 305–308, 2005.
- [15] X. Sun, H. Yue, and H. Wang, “Modelling and control of the flame temperature distribution using probability density function shaping,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 28, no. 5, pp. 401–428, 2006.
- [16] M. Leblanc, “Sur l’électrification des chemins de fer au moyen de courants alternatifs de fréquence élevée,” *Revue Generale de l’Electricite*, 1922.
- [17] V. Kazakevich, “Technique of automatic control of different processes to maximum or to minimum,” USSR Patent No 66 335, 1943.
- [18] ———, “On extremum seeking,” Ph.D. dissertation, Moscow High Technical University, 1944.
- [19] C. Draper and Y. Li, *Principles of optimizing control systems and an application to the internal combustion engine*. American Society of Mechanical Engineers, 1951.

- [20] P. Blackman, "Extremum-seeking regulators," in *An exposition of adaptive control*. New York: Macmillan, 1962, pp. 36–50.
- [21] M. Hamza, "Extremum control of continuous systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 11, no. 2, pp. 182–189, 1966.
- [22] I. Morosanov, "Method of extremum control," *Automatic and Remote Control*, vol. 18, pp. 1077–1092, 1957.
- [23] S. Meerkov, "Asymptotic methods for investigating a class of forced states in extremal systems," *Automatic and Remote Control*, vol. 12, pp. 1916–1920, 1967.
- [24] —, "Asymptotic methods for investigating stability of continuous systems of automatic optimization subjected to disturbance action (in russian)," *Avtomatika i Telemekhanika*, vol. 12, pp. 14–24, 1968.
- [25] J. Luxat and L. Lees, "Stability of peak-holding control systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, no. 1, pp. 11–15, 1971.
- [26] J. Sternby, "Extremum control systems: An area for adaptive control?" in *Joint Automatic Control Conference*, no. 17, 1980, p. 8.
- [27] K. Åström and B. Wittenmark, "Adaptive control," *NY: Addison-Wesley*, 1989.
- [28] M. Krstić and H.-H. Wang, "Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems," *Automatica*, vol. 36, no. 4, pp. 595–601, 2000.
- [29] M. Krstić, "Performance improvement and limitations in extremum seeking control," *Systems & Control Letters*, vol. 39, no. 5, pp. 313–326, 2000.
- [30] H. Khalil, *Nonlinear Systems*. Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- [31] M. Stankovic, K. Johansson, and D. Stipanovic, "Distributed seeking of nash equilibria with applications to mobile sensor networks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, no. 4, pp. 904–919, 2012.
- [32] S. Brunton, X. Fu, and J. Kutz, "Extremum-seeking control of a mode-locked laser," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 49, no. 10, pp. 852–861, 2013.
- [33] B. Hunnekens, M. Haring, N. Wouw, and H. Nijmeijer, "Steady-state performance optimization for variable-gain motion control using extremum seeking," in *2012*



- IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2012, pp. 3796–3801.
- [34] C. Zhang and R. Ordonez, “Extremum seeking control based on numerical optimization and state regulation - Part II: Robust and adaptive control design,” in *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, 2006, pp. 4460–4465.
- [35] H. Yu and Ü. Özgüner, “Adaptive tracking control via extremum-seeking method,” *{IFAC} Proceedings Volumes*, vol. 38, no. 1, pp. 259 – 264, 2005, 16th {IFAC} World Congress.
- [36] M. Guay and D. Burns, “A comparison of extremum seeking algorithms applied to vapor compression system optimization,” in *2014 American Control Conference*, 2014, pp. 1076–1081.
- [37] G. Kvaščev, M. Jakovljević, V. Stevanović, and Ž. Đurović, “One approach to combustion control in thermal power plants,” in *POWER-GEN Europe conference*, 2013.
- [38] A. Marjanović, M. Jakovljević, G. Kvaščev, and Ž. Đurović, “Combustion process control based on flame visualization,” in *Power turbines Europe 2013*. Lisbon, Portugal, 2013.
- [39] A. Marjanović, S. Vujnović, V. Papić, and P. Todorov, “Robust adaptive parameter estimation of the thermal power plant combustion process,” in *IcETRAN 2014*. Vrnjačka Banja, Serbia, 2014, pp. AUI1.1.1–5.
- [40] A. Marjanović, M. Krstić, Ž. Đurović, G. Kvaščev, and V. Papić, “Combustion distribution control using the extremum seeking algorithm,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 570, no. 5. IOP Publishing, 2014, p. 052001.
- [41] A. Marjanović, P. Tadić, L. Cokić, and Ž. Đurović, “On possibility of modeling the influence of coal firing process correction on steam drum outlet temperature in thermal power plant,” in *XIII International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM2016*. Nis, Serbia, 2016, pp. 1–4.
- [42] A. Marjanović, M. Krstić, Ž. Đurović, and B. Kovačević, “Control of thermal power plant combustion distribution using extremum seeking,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016.

- [43] Z. Mićević, *Kotlovska postrojenja, udžbenik za obuku pogonskog osoblja*. Klub NT, Beograd, 1999.
- [44] H. Furtado and I. May, “High temperature degradation in power plants and refineries,” *Materials Research*, vol. 7, no. 1, pp. 103–110, 2004.
- [45] D. French, *Metallurgical failures in fossil fired boilers*. John Wiley & Sons, 1993.
- [46] Rafako, *Pogonska dokumentacija za blok B1*. Firma Rafako, Poljska, 2012.
- [47] T. Russell, “Utility front end controls,” *Instrument Society of America*, pp. 113–122, 1988.
- [48] H. Gery, “The evolution of coordinated control,” in *Inst. Soc. Amer. Power Symp*, 1988, pp. 109–112.
- [49] A. Tevera, “Intelligent supervisor for automatic generation control in a thermoelectric power unit,” Master’s thesis, National Centre for Research and Technology Development, Mexico.(In Spanish), 1995.
- [50] R. Sampath, S. S. Dhami, and S. Srivastava, “A review of structure & performance of thermal power plant controllers,” *International Journal on Emerging Technologies*, vol. 7, no. 1, p. 25, 2016.
- [51] A. Mishra, “A study on PID controller design for systems with time delay,” Ph.D. dissertation, National Institute of Technology Rourkela, 2011.
- [52] J. H. Mortensen, T. Moelbak, P. Andersen, and T. S. Pedersen, “Optimization of boiler control to improve the load-following capability of power-plant units,” *Control Engineering Practice*, vol. 6, no. 12, pp. 1531–1539, 1998.
- [53] B. Codrons, “LQG control of steam temperature in power plants,” in *European Control Conference (ECC)*, 2003. IEEE, 2003, pp. 2333–2338.
- [54] W. Zhu and J. P. Sun, “Based on the BP neural network-PID series control boiler main-steam temperature system research,” in *Advanced Materials Research*, vol. 354. Trans Tech Publ, 2012, pp. 968–973.
- [55] L. Ma and K. Y. Lee, “Neural network based superheater steam temperature control for a large-scale supercritical boiler unit,” in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*. IEEE, 2011, pp. 1–8.

- [56] J. Zhang, G. Hou, and J. Zhang, "Adaptive neuro-control system for superheated steam temperature of power plant over wide range operation," in *Intelligent Systems Design and Applications, 2006. ISDA'06. Sixth International Conference on*, vol. 1. IEEE, 2006, pp. 138–141.
- [57] D. Peng, H. Zhang, C. Huang, F. Xia, and H. Li, "Immune PID cascade control based on neural network for main steam temperature system," in *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2011 9th World Congress on*. IEEE, 2011, pp. 480–484.
- [58] D.-G. Peng, P. Yang, Z.-P. Wang, and Y.-H. Yang, "Adaptive inverse control based on parallel self-learning neural networks and its applications," in *Machine Learning and Cybernetics, 2004. Proceedings of 2004 International Conference on*, vol. 1. IEEE, 2004, pp. 392–396.
- [59] L. Ma, Y. Lin, and K. Y. Lee, "Superheater steam temperature control for a 300mw boiler unit with inverse dynamic process models," in *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*. IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [60] J. Smrekar, M. Assadi, M. Fast, I. Kuštrin, and S. De, "Development of artificial neural network model for a coal-fired boiler using real plant data," *Energy*, vol. 34, no. 2, pp. 144–152, 2009.
- [61] S. Shao-jian, L. Bi-lian, S. Chang-cheng, and L. Xiao-feng, "Optimal control for boiler combustion system based on DHP method and generalized RBF network," in *Control and Automation, 2009. ICCA 2009. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 2254–2259.
- [62] Z. Hao, C. Kefa, and M. Jianbo, "Combining neural network and genetic algorithms to optimize low NO<sub>x</sub> pulverized coal combustion," *Fuel*, vol. 80, no. 15, pp. 2163–2169, 2001.
- [63] H. Zhou, K. Cen, and J. Fan, "Modeling and optimization of the NO<sub>x</sub> emission characteristics of a tangentially fired boiler with artificial neural networks," *Energy*, vol. 29, no. 1, pp. 167–183, 2004.
- [64] L. Zheng, H. Zhou, C. Wang, and K. Cen, "Combining support vector regression and ant colony optimization to reduce NO<sub>x</sub> emissions in coal-fired utility boilers," *Energy & Fuels*, vol. 22, no. 2, pp. 1034–1040, 2008.

- [65] L.-G. Zheng, H. Zhou, K.-F. Cen, and C.-L. Wang, "A comparative study of optimization algorithms for low NO<sub>x</sub> combustion modification at a coal-fired utility boiler," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 2, pp. 2780–2793, 2009.
- [66] Q. Xie, H. Fu, X. Wang, and Y. Zuo, "SVR based prediction modeling for carbon content of pulverized coal in primary air pipe of thermal power plant boiler," in *Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese*. IEEE, 2016, pp. 2235–2240.
- [67] O.-S. Kwon, W.-H. Jung, and H. Heo, "Steam temperature controller with LS-SVR-based predictor and PID gain scheduler in thermal power plant," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, no. 2, pp. 557–565, 2013.
- [68] L. Dao-guang, L. Li-xia, L. Chang-liang, and C. Jing, "Flame furnace in thermal power plant condition monitoring using SVM," in *Intelligent Computation Technology and Automation, 2009. ICICTA'09. Second International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2009, pp. 67–70.
- [69] K.-Y. Chen, L.-S. Chen, M.-C. Chen, and C.-L. Lee, "Using SVM based method for equipment fault detection in a thermal power plant," *Computers in industry*, vol. 62, no. 1, pp. 42–50, 2011.
- [70] M. Samanazari, A. Ramezani, S. Rajabi, and A. Chaibakhsh, "Using one-class support vector machine for the fault diagnosis of an industrial once-through Benson boiler," *The Modares Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 41–47, 2015.
- [71] I. Kocaarslan, E. Çam, and H. Tiryaki, "A fuzzy logic controller application for thermal power plants," *Energy conversion and management*, vol. 47, no. 4, pp. 442–458, 2006.
- [72] K. S. Ray and D. D. Majumder, "Fuzzy logic control of a nonlinear multivariable steam generating unit using decoupling theory," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, no. 4, pp. 539–558, 1985.
- [73] A. Sanchez-Lopez, G. Arroyo-Figueroa, and A. Villavicencio-Ramirez, "Advanced control algorithms for steam temperature regulation of thermal power plants," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 26, no. 10, pp. 779–785, 2004.

- [74] X.-J. Liu, F. Lara-Rosano, and C. Chan, “Neurofuzzy network modelling and control of steam pressure in 300MW steam-boiler system,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 16, no. 5, pp. 431–440, 2003.
- [75] E. Cam and I. Kocaarslan, “Load frequency control in two area power systems using fuzzy logic controller,” *Energy Conversion and Management*, vol. 46, no. 2, pp. 233–243, 2005.
- [76] S. K. Vavilala, R. Srinivas, and M. Suman, “Load frequency control of two area interconnected power system using conventional and intelligent controllers,” *power*, vol. 12, pp. 4–6, 2014.
- [77] M. M. Ismail and M. M. Hassan, “Load frequency control adaptation using artificial intelligent techniques for one and two different areas power system,” *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 12–23, 2012.
- [78] T. Rangaswamy, J. Shanmugam, and T. Thyagarajan, “Fuzzy based coordinated controller for thermal power plant,” in *Power Electronics, 2006. IICPE 2006. India International Conference on*. IEEE, 2006, pp. 377–382.
- [79] A. Ghaffari and F. M. Asi, “Application of fuzzy logic control to steam power plants,” *ASME PET DIV PUBL PD, ASME, NEW YORK, NY,(USA), 1994,*, vol. 64, no. 6, pp. 45–51, 1994.
- [80] J.-W. Kim and S. W. Kim, “Design of incremental fuzzy PI controllers for a gas-turbine plant,” *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 8, no. 3, pp. 410–414, 2003.
- [81] I. Kocaarslan and E. Cam, “An adaptive control application in a large thermal combined power plant,” *Energy conversion and Management*, vol. 48, no. 1, pp. 174–183, 2007.
- [82] M. Rotea, “Analysis of multivariable extremum seeking algorithms,” in *American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000*, vol. 1, no. 6. IEEE, 2000, pp. 433–437.
- [83] J.-Y. Choi, M. Krstic, K. Ariyur, and J. S. Lee, “Extremum seeking control for discrete-time systems,” *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 47, no. 2, pp. 318–323, 2002.

- [84] K. Ariyur and M. Krstic, *Real-time optimization by extremum-seeking control*. John Wiley & Sons, 2003.
- [85] Y. Tan, D. Nešić, and I. Mareels, “On non-local stability properties of extremum seeking control,” *Automatica*, vol. 42, no. 6, pp. 889–903, 2006.
- [86] V. Adetola and M. Guay, “Parameter convergence in adaptive extremum-seeking control,” *Automatica*, vol. 43, no. 1, pp. 105–110, 2007.
- [87] D. Nešić, “Extremum seeking control: Convergence analysis,” *European Journal of Control*, vol. 15, no. 3-4, pp. 331–347, 2009.
- [88] M. Guay, “A time-varying extremum-seeking control approach for discrete-time systems,” *Journal of Process Control*, vol. 24, no. 3, pp. 98–112, 2014.
- [89] N. Killingsworth, S. Aceves, D. Flowers, and M. Krstic, “Extremum seeking tuning of an experimental HCCI engine combustion timing controller,” in *American Control Conference, 2007. ACC’07*. IEEE, 2007, pp. 3665–3670.
- [90] N. Killingsworth, S. Aceves, D. Flowers, F. Espinosa-Loza, and M. Krstic, “HCCI engine combustion-timing control: Optimizing gains and fuel consumption via extremum seeking,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 1350–1361, 2009.
- [91] S. Drakunov, U. Ozguner, P. Dix, and B. Ashrafi, “ABS control using optimum search via sliding modes,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 79–85, 1995.
- [92] H. Yu and U. Ozguner, “Extremum-seeking control strategy for abs system with time delay,” in *American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002*, vol. 5. IEEE, 2002, pp. 3753–3758.
- [93] C. Zhang and R. Ordóñez, “Numerical optimization-based extremum seeking control with application to abs design,” *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 3, pp. 454–467, 2007.
- [94] W. Nwesaty, A. I. Bratcu, and A. Hably, “Extremum seeking control techniques applied to photovoltaic systems with multimodal power curves,” in *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2013 International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 85–90.

- [95] P. Lei, Y. Li, Q. Chen, and J. E. Seem, “Extremum seeking control based integration of mppt and degradation detection for photovoltaic arrays,” in *American Control Conference (ACC), 2010*. IEEE, 2010, pp. 3536–3541.
- [96] Y. Li, M. Rotea, G.-C. Chiu, L. Mongeau, and I.-S. Paek, “Extremum seeking control of a tunable thermoacoustic cooler,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 527–536, 2005.
- [97] P. Li, Y. Li, and J. E. Seem, “Extremum seeking control for efficient and reliable operation of air-side economizers,” in *American Control Conference, 2009. ACC’09*. IEEE, 2009, pp. 20–25.
- [98] H.-H. Wang, S. Yeung, and M. Krstic, “Experimental application of extremum seeking on an axial-flow compressor,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 300–309, 2000.
- [99] M. Guay, D. Dochain, and M. Perrier, “Adaptive extremum seeking control of continuous stirred tank bioreactors with unknown growth kinetics,” *Automatica*, vol. 40, no. 5, pp. 881–888, 2004.
- [100] ———, “Adaptive extremum-seeking control of nonisothermal continuous stirred tank reactors,” *Chemical Engineering Science*, vol. 60, no. 13, pp. 3671–3681, 2005.
- [101] C. Yin, B. Stark, Y. Chen, and S.-m. Zhong, “Adaptive minimum energy cognitive lighting control: Integer order vs fractional order strategies in sliding mode based extremum seeking,” *Mechatronics*, vol. 23, no. 7, pp. 863–872, 2013.
- [102] Y. A. Chang and S. J. Moura, “Air flow control in fuel cell systems: an extremum seeking approach,” in *American Control Conference, 2009. ACC’09*. IEEE, 2009, pp. 1052–1059.
- [103] N. Killingsworth and M. Krstic, “PID tuning using extremum seeking: online, model-free performance optimization,” *IEEE control systems*, vol. 26, no. 1, pp. 70–79, 2006.
- [104] E. Schuster, C. Romero, Z. Yao, and F. Si, “Integrated real-time optimization of boiler and post-combustion system in coal-based power plants via extremum seeking,” in *Control Applications (CCA), 2010 IEEE International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 2184–2189.

- [105] R. Singh, M. Kearney, and C. Manzie, “Extremum-seeking control of a supercritical carbon-dioxide closed Brayton cycle in a direct-heated solar thermal power plant,” *Energy*, vol. 60, pp. 380–387, 2013.
- [106] A. Ghaffari, M. Krstic, and S. Seshagiri, “Power optimization and control in wind energy conversion systems using extremum seeking,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22, no. 5, pp. 1684–1695, 2014.
- [107] J. Creaby, Y. Li, and J. Seem, “Maximizing wind turbine energy capture using multivariable extremum seeking control,” *Wind Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 361–387, 2009.
- [108] H.-H. Wang and M. Krstic, “Extremum seeking for limit cycle minimization,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no. 12, pp. 2432–2436, 2000.
- [109] C. Zhang and R. Ordóñez, *Extremum-seeking control and applications: a numerical optimization-based approach*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [110] S.-J. Liu and M. Krstic, *Stochastic averaging and stochastic extremum seeking*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [111] K. J. Åström and T. Bohlin, “Numerical identification of linear dynamic systems from normal operating records,” in *PH Hammond: Theory of Self-Adaptive Control Systems*. Plenum Press, 1966, pp. 96–111.
- [112] R. Kalman, “Contributions to the theory of optimal control,” *Boletín de la Sociedad Matemática Mexicana*, pp. 149–166, 1960.
- [113] —, “When is a linear control system optimal,” *Journal of Basic Engineering*, vol. 86, no. 1, pp. 51–60, 1964.
- [114] L. Ljung, *System identification*. Wiley Online Library, 1999.
- [115] B. Magnussen and B. Hjertager, “On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion,” *Symposium (International) on Combustion*, vol. 16, no. 1, pp. 719 – 729, 1977.
- [116] A. Frassoldati, T. Faravelli, and E. Ranzi, “The ignition, combustion and flame structure of carbon monoxide/hydrogen mixtures. Note 1: Detailed kinetic modeling of syngas combustion also in presence of nitrogen compounds,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 3471–3485, 2007.



- [117] C. da Silva, M. L. Indrusiak, and A. Beskow, “CFD analysis of the pulverized coal combustion processes in a 160 MWe tangentially-fired-boiler of a thermal power plant,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 427–436, 2010.
- [118] Ž. Đurović and colleagues, *Studija analize mogućnosti uvođenja sistema za vizuelizaciju procesa sagorevanja za korekciju regulacije kotla TENT B1*. Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2016.
- [119] ———, *Studija analize mogućnosti uvođenja sistema za vizuelizaciju procesa sagorevanja kao korektivnog faktora upravljanja, regulacije i zaštite na kotlu TENT A6*. Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2013.

## Biografija – Aleksandra Marjanović

Aleksandra Lj. Marjanović je rođena 16.09.1986. godine u Valjevu. Osnovnu i srednju školu je završila u Valjevu. Elektrotehnički fakultet u Beogradu je upisala 2005. godine. Na Odseku za signale i sisteme diplomirala je 2009. godine sa prosečnom ocenom 9.89. Master studije na istom odseku završila je sa prosečnom ocenom 10.00. Doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu je upisala 2010. godine na modulu Upravljanje sistemima i obrada signala, gde je položila sve ispite sa prosečnom ocenom 10.00. Mentor doktorske teze joj je prof. dr Željko Đurović.

Po završetku osnovnih studija 2009. godine dobila je stipendiju Fondacije dr Zoran Đinđić za stručno usavršavanje u Nemačkoj, gde je u periodu od šest meseci (jun-decembar) obavljala praksu na Institutu IHP GmbH, Innovations for High Performance Microelectronics, System Department, kao član tima MIMAX projekta. U toku jula 2013. godine, Aleksandra Marjanović je boravila na Univerzitetu u San Dijegu, Kalifornija (UCSD, Cymer Center for Control Systems and Dynamics), pod nadzorom prof. Miroslava Krstića. U toku 2013. i 2014. godine bila je polaznik kurseva Evropskog instituta za upravljanje (EECI – European Embedded Control Institute).

Aleksandra Marjanović je izabrana u zvanje saradnika u nastavi na Odseku za Signale i sisteme na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu oktobra 2010. godine. Od oktobra 2011. godine izabrana je u zvanje asistenta pri istoj katedri, gde je angažovana na računskim i laboratorijskim vežbama iz više predmeta. Jedan je od koautora udžbenika Signali i sistemi – Zbirka rešenih zadataka, koji se koristi u izvođenju nastave na predmetu Signali i sistemi. U toku rada na Fakultetu, učestvovala je na nekoliko projekata, između ostalog: FP7 projekat PRODI (Power plants robustification based on fault detection and isolation algorithms), projekat Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Povećanje energetske efikasnosti i raspoloživosti u sistemima za proizvodnju i prenos električne energije razvojem novih metoda za dijagnostiku i ranu detekciju otkaza, EUREKA projekat NEUROTEMP (New Approach to Temperature Process Control Based on Soft Computing Methods), TEMPUS projekat NeReLa, projekat bilateralne saradnje između Italije i Srbije RODEO (Robust decentralized estimation for large-scale system),...

Oblast istraživanja Aleksandre Marjanović obuhvata obradu signala, teoriju estimacije, prepoznavanje oblika, modeliranje i identifikaciju sistema i njihovu primenu u optimizaciji procesa upravljanja i projektovanju tehnika za detekciju i izolaciju otkaza. Dosadašnji rezultati kandidata prikazani su kroz nekoliko publikacija i to: 7 radova u međunarodnim časopisima, 2 rad u domaćem časopisu, 16 radova na međunarodnim konferencijama, 12 radova na domaćim konferencijama (dato u prilogu Spisak publikacija).

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Александра Марјановић

Број индекса 5015/2010

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Управљање температурном расподелом у котловима термоенергетских система

на бази extremum seeking стратегије

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 22.06.2017.

А. Марјановић

**Изјава о истоветности штампане и електронске  
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Александра Марјановић

Број индекса 2015/2010

Студијски програм Електротехника и рачунарство  
(модул Управљање системима и обрада сигнала)

Наслов рада Управљање температурном расподелом у котловима  
термоенергетских система на бази extremum seeking стратегије

Ментор Жељко Ђуровић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**

У Београду, 22.06.2017.

*А. Марјановић*

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Управљање температурном расподелом у котловима термоенергетских  
система на бази extremum seeking стратегије

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.  
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 22.06.2017.

А. Марјановић

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.