

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Franci Vode

**RAZVOJ SISTEMA VODENJA KONTINUIRANIH
PEČI ZA OGREVANJE VLOŽKA PO PREDPISANIH
KRIVULJAH OGREVANJA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana, 2008

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Franci Vode

**RAZVOJ SISTEMA VODENJA KONTINUIRANIH
PEČI ZA OGREVANJE VLOŽKA PO PREDPISANIH
KRIVULJAH OGREVANJA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: Prof. dr. Drago Matko

Ljubljana, 2008

Izjava

“Izjavljam, da sem doktorsko disertacijo samostojno izdelal pod mentorskim vodstvom prof. dr. Draga Matka. Izkazano pomoč sodelavcem sem navedel v zahvali.”

V Ljubljani, 13.06.2008

Franci Vode

Zahvala

Ob zagovoru doktorske disertacije se iskreno zahvaljujem vsem, ki ste kakorkoli pripomogli k temu, da je danes pred vami to delo.

Najprej svojim staršem, Mariji in Francu Vode, ki so mene, moje brate in sestre ves čas izobraževanja spodbujali k učenju in nas pri tem polno podpirali. Svoje sta dodala njihov zgled in vzgoja k vztrajnosti in potrpežljivosti pri delu ter sploh v življenju. Zahvala gre tudi mojim bratom in sestram, s katerimi smo v življenju v domačem okolju počasi odstirali tančico s 'tehničnih čudes' in jih končno usvojili. Mogoče je prav ta stik s tehniko vzbudil tako močno željo po spoznavanju in obvladovanju tehnike. Posebna zahvala gre Mariji Majdi Travnik, ki me je sprejela in vzljubila ter vlila novo veselje življenju.

Zahvaliti se želim vodstvu IMT, direktorici prof. dr. Moniki Jenko, da sem lahko na IMT kot mladi raziskovalec pripravil doktorsko disertacijo.

Nadalje gre zahvala mentorju na Fakulteti za elektrotehniko, prof. dr. Dragu Matku, ki je bil vedno na voljo za vprašanja in je tudi hitro opravil preglede člankov, disertacije itd.

Nadalje želim izreči zahvalo sodelavkam in sodelavcem na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije, ki so s svojim delom in predlogi prispevali k temu delu. Prvi je to gotovo dr. Anton Jaklič, ki me je uvedel v področje toplotne tehnike, bdel nad delom, spodbujal in pomagal pri njem s predlogi ter me spoznal in udomačil z razmerami in načinom dela v industriji.

Zahvaljujem se tudi tehnologom v vroči valjarni ACRONI, d. o. o., s katerimi plodno sodelujemo.

Vinje, 13. junij 2008

Franci Vode

Povzetek

V disertaciji je predstavljen splošen koncept kontroliranega ogrevanja vložka v kontinuirnih pečeh v jeklarski industriji, predstavljen na primeru potisne peči v podjetju ACRONI, d. o. o. Vodenje ogrevanja slabov je izvedeno z regulacijskim sledenjem referenčne krivulje ogrevanja (RKO) vsakega posameznega slaba, pri čemer regulacija temelji na matematičnem modelu ogrevanja slabov, ki deluje v realnem času. RKO je podana kot funkcija časa. Časovno podan potek RKO omogoča elegantno in natančno obravnavo zastojev. Sistem vodenja kot odziv na zastoj v proizvodnji premakne časovno definirano RKO za čas trajanja zastoja. S tem je omogočeno zaprtizančno vodenje ogrevanja slabov tudi med zastoji in sicer še vedno po RKO. Od učinkovite in natančne obravnave zastojev je najbolj odvisna učinkovitost ter energetski prihranki na peči pri uporabi razvitega sistema. Zastoje zato sistematično razdelimo v pet različnih vrst. Zastoje najprej ločimo na tiste, katerih trajanja ne poznamo, in na tiste, katerih trajanje poznamo. Zadnje delimo na predvidene, nepredvidene, zastoje zaradi različnih časov ogrevanja različnih jekel oz. debelin jekel ter na zastoje zaradi sinhronizacije z valjarskimi ogrođji. Slednji omogočajo upoštevanje kapacitet valjarskih prog pri načinu ogrevanja v peči. Za vsako vrsto zastoja določimo časovno premaknitev RKO in podaljšanje intervala pomika slabov. RKO so ločeno definirane za različne začetne temperature s korakom 50 °C. Za potrebe prehoda iz ročnega vodenja v avtomatsko vodenje so začetne RKO posnetek stacionarnega poteka ogrevanja, kakršnega predpisujejo tehnološka navodila o ogrevanju. S tem se izognemo spremembi načina ogrevanja ob uvajanju sistema v proizvodnjo. RKO je možno kadarkoli optimizirati in spremembe RKO vnesti v tabelo RKO v podatkovni zbirki. Na koncu dela je primerjava rezultatov ročnega vodenja z rezultati simulacije avtomatskega vodenja. Avtomatsko vodenje omogoča za faktor 3 tesnejše sledenje končne temperature slabov in za faktor 2 tesnejše sledenje celotne temperaturne krivulje primerjavi z ročnim vodenjem.

Abstract

The aim of this Ph.D. thesis is to present the general concept of controlled stock reheating in continuous furnaces for steel industry, which was realized in pusher-type furnace of ACRONI, d. o. o. Controlled stock reheating is achieved by the use of tracing reference reheating curves (RRC), where the stock temperature control is based on real-time mathematical model of slab reheating process. RRC is defined as a function of time. Such a definition of RRC enables an exact and elegant treatment of delays. The response of furnace control system to the delay in production line is a time shift of RRC for the value of delay duration. This enables a closed-loop control of the slab reheating process during normal operation as well as during delays. Efficiency and precision of furnace control during delays is the main factor for overall efficiency and energy savings of furnace operation. Delays are therefore systematically divided into five delay types. First, delays are divided into delays of known and unknown duration. The last are further divided in scheduled delays, unscheduled delays, delays due to different reheating times of different steel grades, and delays due to synchronization with rolling mills. The last delay type enables consideration of rolling mill capacities in the reheating process in the furnace. For each delay type time shift of RRC and prolongation of drop out interval is determined. RRCs are separately defined for different initial temperatures with a step of 50 °C. To introduce the presented furnace control system (FCS), initial RRC are an imitation of a stationary reheating process, defined by technological reheating guidelines. Using such a RRC for FCS, the material is reheated in the same way as by manual control. RRC can be optimized at any time and the changes can be updated in the RRC table in the database. A comparison of manual and a simulation of automatic control is presented at the end. Automatic control by FCS enables a three times tighter tracing of end material temperature and a two times tighter tracing of whole RRC in comparison to the manual control.

Kazalo

Simboli	v
1 Uvod	1
1.1 Namen dela	1
1.2 Kontinuirne peči	1
1.2.1 Opis potisne peči	4
1.3 Opis problematike	6
1.3.1 Merjenje temperature materiala ali opazovalnik stanj	6
1.3.2 Omejitve peči	6
1.3.3 Motnje procesa ogrevanja	6
1.3.4 Različni načini ogrevanja različnih jekel	6
1.4 Literaturni pregled	7
1.4.1 Optimizacije	7
1.4.2 Vodenje ogrevanja vložka	8
1.5 Predstavitev dela po poglavjih	11
2 Koncept vodenja kontinuirnih peči	12
2.1 Cilji vodenja ogrevanja v peči	12
2.2 Vhodi in izhodi procesa ogrevanja	12
2.3 Vključitev vodenja 2. nivoja na 1. regulacijski nivo	13
2.4 Matematični model ogrevanja vložka	14
2.5 Zaporedje prihoda vložka v peč in optimalnost	14
2.6 Optimiranje referenčnih krivulj ogrevanja	15

2.7	Zastoji in časovno premikanje referenčnih krivulj ogrevanja	16
2.8	Vsebnost kisika v zgorevni atmosferi v peči in nadtlak v peči	17
2.9	Postopno uvajanje in modularnost	17
3	Referenčna krivulja ogrevanja	19
3.1	Določitev časovnega poteka referenčnih krivulj ogrevanja iz tehnoloških predpisov	19
3.1.1	Tehnološki predpisi o ogrevanju	19
3.1.2	Posplošitev predpisov o ogrevanju	20
3.1.3	Tipi založitve in RKO	20
3.1.4	Referenčna krivulja $\tilde{T}_R^{\text{mean}}$	21
3.1.5	Referenčna krivulja \tilde{T}_R^{max}	21
3.1.6	Referenčna krivulja \tilde{T}_R^{min}	22
3.1.7	Referenčna krivulja $\tilde{\Delta T}_R^{\text{max}}$	22
3.1.8	Druge referenčne krivulje	22
3.1.9	Avtomatizacija določanja referenčnih krivulj ogrevanja	23
3.2	Značilni parametri referenčne krivulje ogrevanja	26
3.3	Diskretizacija in interpolacija RKO	27
3.4	Zastoji ogrevanja v peči in RKO	27
3.4.1	Princip premikanja RKO	28
3.4.2	Tabela zastojev	29
3.4.3	Referenčne hitrosti gibanja slabov skozi peč	31
3.4.4	Zastoji z znanim trajanjem	32
3.4.5	Zastoji z neznanim trajanjem	36
3.4.6	Preprečevanje podvajanja zastojev	37
3.4.7	Zastoji pri drugih vrstah kontinuirnih peči	38
4	Določanje napake cone	40
4.1	Izračun referenčne vrednosti RKO	40
4.2	Točka na trenutni krivulji ogrevanja	40
4.3	Odmik KO od RKO	40

4.4	Združevanje napak ogrevancev v napako cone	41
4.4.1	'Mean'–funkcija združevanja	41
4.4.2	'Max'–funkcija združevanja	41
4.4.3	'Min'–funkcija združevanja	42
4.4.4	Lijakasta funkcija združevanja – 'funnel'	42
4.4.5	Uteženo povprečje kot funkcija združevanja	43
4.4.6	Kombinacija uteženega povprečja in lijaka	44
5	Regulacija temperature v conah peči	46
5.1	Omejitve procesa	46
5.1.1	Omejena hitrost spreminjanja (ang. slew-rate) temperature cone	46
5.1.2	Omejen interval vrednosti temperature cone	47
5.2	PID-regulacija ogrevanja vložka	47
5.2.1	PID-regulator	47
5.3	Krmiljenje ogrevanja vložka	49
5.4	Filtriranje conske temperature in omejevanje hitrosti spreminjanja conske temperature	49
5.5	Medsebojna odvisnost temperatur con	50
5.6	Sklep	50
6	Krmiljenje periode pomikanja vložka skozi pečni prostor	51
6.1	Vpliv zastojev z neznanim trajanjem na periodo pomika	51
6.2	Potreben pogoj za sinhronizacijo z napravami za vročo predelavo	51
7	Primerjava rezultatov ročnega vodenja z rezultati avtomatskega vodenja	53
7.1	Simulator potisne peči	53
7.1.1	Simulacija zaprtozančnega obnašanja prvega regulacijskega nivoja	54
7.2	Pogoji izvedbe primerjave	55
7.3	Merila primerjave odzivov	56
7.4	Histogrami vrednosti kriterijskih funkcij	56
7.5	Številčno ovrednotenje histogramov	63

7.6	Komentár rezultatov	63
8	Sklep	64
A	Članek	70

Simboli

Simboli

e		odmik, napaka
E		vektor odmikov, napak
T		tridimenzionalno polje temperatur vložka
\tilde{T}		časovna krivulja skalarne vrednosti temperature
T	[°C]	temperatura - točkovna vrednost
t	[min]	čas; 0 = trenutek vstopa v notranjost peči, individualen za vsak ogrevanec
d	[m]	širina slaba
l	[m]	dolžina
u		regularna veličina
v		hitrost
\hat{x}		pričakovana vrednost - napoved
\bar{x}		vektor vrednosti
J		kriterijska funkcija

Indeksi

C	celotna
dv	zastoji zaradi različnih referenčnih hitrosti slabov
f	filtrirana vrednost spremenljivke
i, k	indeks pozicije v peči
k	krmilni del u
mean	aritmetična srednja vrednost
max	maksimalna vrednost
min	minimalna vrednost
N	zadnja pozicija v peči $i = N$
n	nepredvideni zastoj
nt	zastoj z neznanim trajanjem
ntv	zastoj z neznanim trajanjem - vmesni
PT	pretečen čas
PO	preostal čas
p	peč
pr	predvideni
pp	perioda pomika, interval pomika
ppp	podaljšanje periode pomika
R	referenca
r	regulatorski del u
s	zastoj zaradi širine slabov

t	trenutna vrednost
VP	vroča predelava
v	perioda vzorčenja
Z	premaknitev RKO
z	združen (-a hitrost vseh slabov v peči)

Nadpisi

j	iteracijski indeks
mean	aritmetična srednja vrednost
max	maksimalna vrednost
min	minimalna vrednost

Kratice

PCZ	P redgrevna c ona z goraj; velja tudi za indeks
PCS	P redgrevna c ona s podaj; velja tudi za indeks
OCZ	O grevna c ona z goraj; velja tudi za indeks
OCS	O grevna c ona s podaj; velja tudi za indeks
ICL	I zenačevalna c ona l evo; velja tudi za indeks
ICD	I zenačevalna c ona d esno; velja tudi za indeks
RKO	R eferenčna k rivulja o grevanja
KO	K rivulja o grevanja
PLK	P rogramabilni l ogični k rmilnik
GPC	Ang: G eneralised P redictive C ontrol - Posplošeno prediktivno vodenje
MPC	Ang: M odel based P redictive C ontrol

1 Uvod

1.1 Namen dela

Obstaja več motivov, zaradi katerih me je privlačila avtomatizacija vodenja ogrevanja materiala v kontinuirnih pečeh. Gre za redke, a zelo kompleksne in med seboj sklopljene procese, v katerih se porabljajo velike količine energije in od katerih je odvisna kvaliteta in ponovljivost končnih izdelkov.

V jeklarski industriji se kontinuirne peči uporablja za ogrevanje oz. dogrevanje slabov, gredic, ingotov pred postopki vroče predelave: valjanje, kovanje. Kontinuirne ogrevne peči so najprimernejše za ogrevanja jekel pred vročo predelavo, saj kontinuirno ogrevajo material, ki ga je treba takoj po ogretju vroče preoblikovati. Šaržne peči so za te postopke manj primerne. Naj omenim, da je poraba plina v takšni peči primerljiva s porabo plina v mestu s 50 000 prebivalci. Pri tako veliki porabi energije je ekonomsko smiselno izboljševanje izkoristka ogrevanja za vsako desetinko procenta. Zmanjšanje porabe energentov prinaša tudi razbremenitev okolja z izpusti toplogrednih plinov. Avtomatizacija procesa ogrevanja jekel je smiselna tudi s stališča zagotavljanja ustreznih pogojev za ogrevanje in ponovljivosti le-teh, kar naj ohrani oziroma izboljša kvaliteto izdelkov in ponovljivost proizvodnje. Ponovljivost proizvodnih parametrov je v jeklarski industriji posebej problematična zaradi kompleksnosti mikrostrukturnih procesov, ki potekajo v materialu med ogrevanjem. Pomemben cilj uvajanja avtomatizacije je tudi izboljšanje fleksibilnosti procesa ogrevanja materiala. Fleksibilnost je tu mišljena kot enostavnost konfiguriranja za ogrevanje novih materialov, predgretih materialov, materialov različnih dimenzij. Fleksibilnost igra danes pomembno vlogo v tekmi na trgu izdelkov, ključno vlogo pa ima hitrost uvajanja novih izdelkov.

Kontinuirne peči se uporabljajo tudi v drugih industrijskih procesih kot sta žganje opeke v opekarški industriji in prehrabna industrija.

Namen dela je zgraditi fleksibilen sistem vodenja kontinuirnih peči, s katerim dosežemo kontrolirano ogrevanja vložka po predpisanih potekih ogrevanja - krivuljah ogrevanja. Vodenje je demonstrirano na primeru potisne peči v podjetju ACRONI, d. o. o..

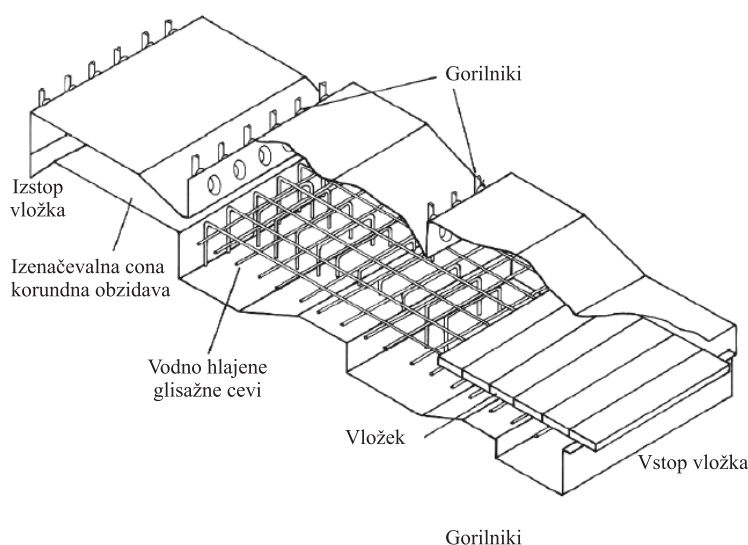
1.2 Kontinuirne peči

V kontinuirni peči material kontinuirno vstopa v peč, se kontinuirno pomika skozi pečni prostor in kontinuirno izstopa iz njega. Pred vročim preoblikovanjem je material v obliki polizdelkov: v slabih, gredicah, ingotih. Pri jeklarskih pečeh se v peč zalaga posamezne ogrevance in pogos-

toma se tudi pomik ogrevancev skozi pečni prostor izvaja v 'korakih'. V nekaterih primerih je pomikanje ogrevancev tudi kontinuirno. Prav tako se material iz peči razloži v 'korakih' in se ga takoj transportira na stroje za vročo predelavo. V teh kontinuirnih pečeh se ogrevanci zalagajo in razlagajo v določenih časovnih intervalih.

Glavne vrste kontinuirnih peči

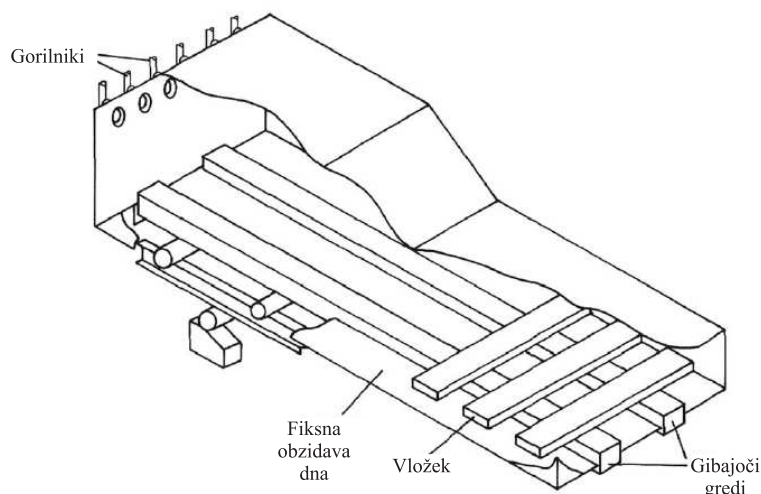
1. Potisna peč. Ime peči izhaja iz načina pomikanja vložka skozi pečni prostor. Vložek se zalaga tesno drug ob drugem in se ga po drsnih tračnicah potiska s potisnim strojem, pri čemer se pred potiskanjem na potisni strani dodaja vložek, ki ga želimo ogrevati (slika 1.1). Potisne peči so kompaktne in imajo visoke ogrevne kapacitete glede na tlorisno površino, ki jo zasedajo.



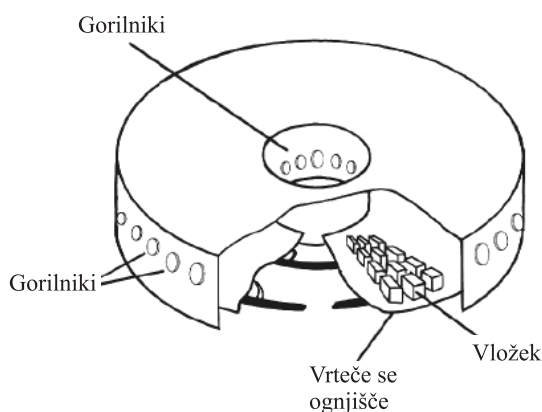
Slika 1.1: Shema potisne peči

Slabost teh peči je v načinu pomikanja vložka skozi pečni prostor, ki onemogoča puščanje praznih mest. Ogrevanje je možno pod in nad vložkom. Gorilniki so razdeljeni vzdolž peči na nekaj con (≥ 2), ki se dodatno delijo na spodnje in zgornje.

2. Koračna peč. Koračne peči se delijo na tiste z gibajočimi se gredmi in na tiste z gibajočim se ognjiščem (slika 1.2). Pri obeh vrstah se vložek pomika v korakih z dviganjem, pomikanjem in spuščanjem materiala iz/na fiksne gredi (koračna peč z gibajočimi se gredmi) ali pa na točkaste podpornike (gibajoče se ognjišče). Navadno je sistem za transport vložka razdeljen na nekaj segmentov, tako da pomikanje vložka lahko izvajamo ločeno. Pomembna prednost teh peči v primerjavi s potisnimi je, da lahko med zalaganjem puščamo prazna mesta v peči, vložek pomikamo naprej in tudi nazaj, s čimer med ogrevanjem lahko povečujemo/zmanjšujemo prazna mesta na prehodih med segmenti. Te vrste peči so mnogo bolj fleksibilne glede možnosti kontroliranega ogrevanja vložka. Prednost teh peči je tudi, da povzročajo manj napak na površini vložka. V teh pečeh ogrevamo slabe, gredice, okrogle profile.
3. Krožna peč. To so peči, pri katerih se vrti dno, po obodu kroga peči pa so razporejene cone (slika 1.3). Uporabljajo se za ogrevanje krajših vložkov poljubnih oblik (ingoti,



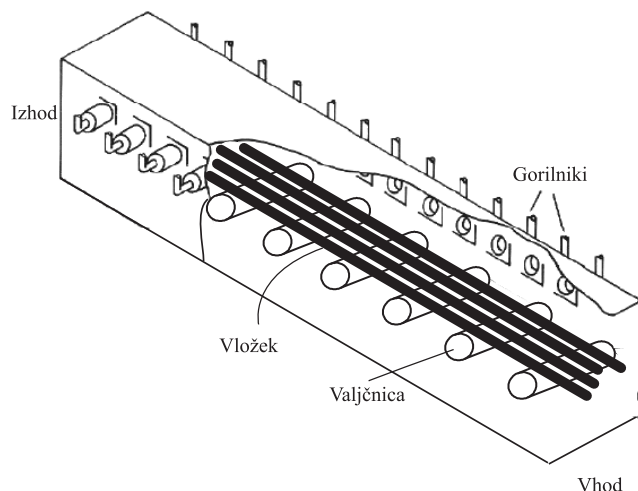
Slika 1.2: Shema koračne peči z gibajočim se ognjiščem



Slika 1.3: Shema krožne peči

gredice). Pri teh pečeh lahko puščamo prazna mesta, ne moremo pa spreminjati dolžine presledka, kot to lahko pri koračnih. Slabost te vrste peči je, da je vrteči se voz pregret, ko pride do zalagalne odprtine, ki je navadno tesno poleg razlagalne odprtine. Nalaganje hladnega vložka na pregret voz povzroča hitro ogrevanje vložka na stičnih površinah ter posledično visoke notranje napetosti v jeklu.

4. Valjčna kontinuirna peč. Te peči se uporabljajo kot vmesni 'buffer' pri kontinuirnih progah: kontinuirno litje - dogrevanje - valjanje. Vložek se pomika po počasi vrtečih se valjčnicah. Valjčne kontinuirne peči manjših dimenzij se uporablja tudi za toplotne obdelave, žarjenje, kaljenje, sproščanje termičnih napetosti (slika 1.4). Temperature ogrevanja so za te namene precej nižje in redko presegajo 1100 °C. Pri obeh podvrstah se vložek pomika po vrtečih se valjčnicah. Peči imajo večje število con, ker se vložek v njih giblje vzdolžno in so zato preseki teh peči manjši. Posledično je manjši tudi medsebojni vpliv med conami. Število con je navadno večje kot pri potisnih, krožnih in



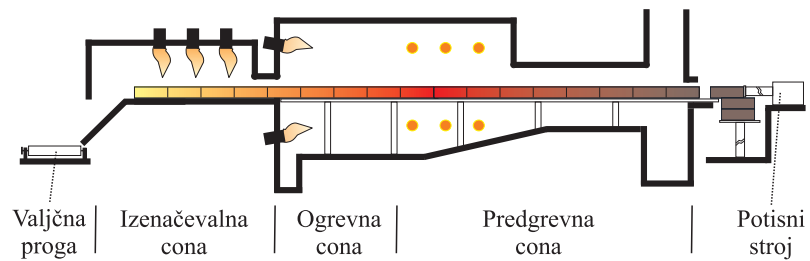
Slika 1.4: Shema valjčne kontinuirne peči

koračnih pečeh.

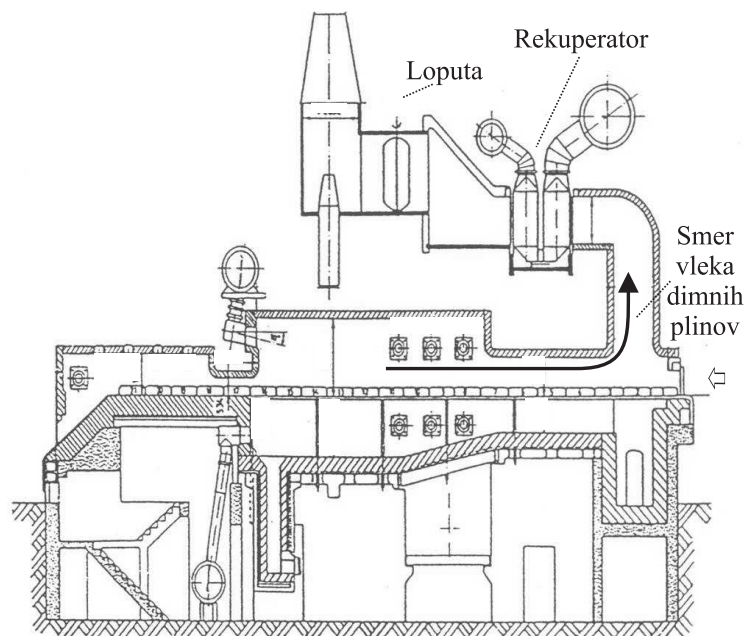
Vsem pečem je skupno, da vložek na neki način potuje skozi pečni prostor, ki je razdeljen na nekaj con. Potisna peč ima s stališča vodenja najbolj neugoden način pomikanja vložka skozi pečni prostor, ker ne omogoča puščanja presledkov med ogrevanci. V nadaljnjih poglavjih sledi prikaz načina kontroliranega ogrevanja vložka v potisni peči. Če nam uspe izvesti vodenje v potisni peči, pomeni, da ga je vsaj tako dobro možno izvesti tudi na drugih vrstah kontinuirnih pečih. Zato si podrobneje oglejmo potisno peč, na kateri bo predstavljeno delovanje sistema vodenja kontinuirnih pečih.

1.2.1 Opis potisne peči

V potisni peči podjetja ACRONI, d. o. o. se slabi z žerjavom zalagajo pred peč, s potisnim strojem se založen slab potisne proti pečnemu prostoru, ta slab pa pred seboj potiska vse druge, ki so v peči, zadnjega pa potisne iz pečnega prostora na valjčno progo (slika 1.5). Potisni stroj se aktivira v poljubnem trenutku. Pečni prostor potisne peči je razdeljen na šest t. i. con: predgrevna cona zgoraj (PCZ), predgrevna cona spodaj (PCS). Zgoraj oz. spodaj pomeni lego glede na slabe. Sledijo ogrevna cona zgoraj (OCZ), ogrevna cona spodaj (OCS) ter izenačevalna cona levo (ICL) in izenačevalna cona desno (ICD). Levo oz. desno se nanaša na stran peči, gledano iz vhoda proti izhodu. Temperatura posamezne cone je regulirana glede na meritev temperature stene v coni in referenco. Peč ima vgrajenih šest regulatorjev za nadzor temperature v vsaki coni peči. Predgrevna in ogrevna cona sta slabo ločeni med seboj, medtem ko sta ogrevna in izenačevalna zadovoljivo (slika 1.5). Tako je možno doseči omejeno temperaturno razliko med posameznimi conami. Temperature con se med normalnim obratovanjem gibljejo med 1000 °C in 1320 °C. Celotna dolžina pečnega prostora je 24,3 m in širina 6,2 m. Maksimalna kapaciteta ogrevanja v peči je 70 t/h. Izgorevni zrak za plinske gorilnike se predgreva v dimniškem rekupektorju, za katerim je vgrajena loputa, s katero se zavira vlek dimnih plinov v dimnik in s tem omogoča vzdrževanje nadtlaka v peči (slika 1.6).



Slika 1.5: Shema potisne peči v podjetju ACRONI, d. o. o.



Slika 1.6: Prerez potisne peči v podjetju ACRONI, d. o. o.

1.3 Opis problematike

1.3.1 Merjenje temperature materiala ali opazovalnik stanj

Material želimo ogreti na temperaturo, primerno za vročo predelavo. Če želimo regulirati temperaturo materiala, moramo za potrebe regulacije imeti na voljo podatek o temperaturi materiala. Temperaturo posameznih ogrevancev v peči je med ogrevanjem mogoče kontinuirno meriti le na površini s pirometri ali pa termografskimi kamerami. Vzdrževanje takšnih merilnih sistemov je pri teh temperaturah drago, daje pa informacije o temperaturi površine materiala, ne pa temperatur v notranjosti. Že zgodaj so se poleg metod merjenja temperatur materiala pojavili tudi prvi matematični modeli za izračun teh temperatur, katerih glavni vhod v model je bila poleg lastnosti materiala še temperatura stene peči. Da bi bil model lahko opazovalnik stanja v realnem času, se je moral izračun napovedi temperature izvršiti v realnem času. Z večanjem računske moči računalnikov je naraščala tudi kompleksnost modelov za napoved temperatur materiala in njihova natančnost. Danes za potrebe vodenja razpolagamo z zadosti natančnimi modeli.

1.3.2 Omejitve peči

Osrednja omejitev kontinuirnih peči je razdelitev pečnega prostora na premajhno število con, ki ne omogoča primernih robnih pogojev za zadoščanje individualnih zahtev posameznih ogrevancev. V posamezni coni peči se navadno nahaja med 4 in 30 ogrevancev, ki imajo v splošnem lahko zelo različne zahteve po ogrevanju, medtem ko temperaturo lahko nastavljamo samo za celotno cono. Proces ima tako več izhodov kot vhodov. Poleg tega peči dosegajo omejene razlike temperatur med posameznimi conami, pri čemer je maksimalna velikost razlike odvisna od obremenitve peči. Maksimalne vrednosti razlik so nekje od 50 °C do 400 °C. Obe omejitvi se izražata v nezmožnosti točnega sledenja referenčnim krivuljam vsakega ogrevanca.

1.3.3 Motnje procesa ogrevanja

Proces ogrevanja motijo številni vplivi: zastoji pri vročem preoblikovanju, menjavanje vrst, dimenzij in začetnih temperatur materiala, napake na opremi peči, zagoni, ustavitve itd. Peč in procesi vročega preoblikovanja morajo biti medsebojno usklajeni; ogrevanec se iz peči razloži šele, ko so stroji za vroče preoblikovanje pripravljene za obdelavo naslednjega obdelovanca. Vsakršno podaljšanje časa vročega preoblikovanja, napake na teh strojih, menjava orodij itd. povzročijo zastoje tudi na peči. Na ogrevanje posameznega vložka navadno pride večje število motenj, tako da ima praktično vsak slab različne pogoje ogrevanja, zato je peč večino obratovalnega časa v nestacionarnem stanju.

1.3.4 Različni načini ogrevanja različnih jekel

Različna jekla zahtevajo različne končne temperature ogrevanja in tudi različne poteke ogrevanja. Med ogrevanjem potekajo na površini in v globini ogrevanca različni procesi in mikrostrukturne spremembe. Na površini jekel potekajo procesi razogljjevanja/naogljjevanja

površinskih plasti in oksidacija ogrevanega materiala. V odvisnosti od temperature se jeklo nahaja v različnih faznih stanjih. V nekaterih primerih imata sosednji fazni stanji precejšnjo razliko v gostoti, kar ob neenakomerni ogretosti posameznega kosa povzroča notranje napetosti in posledično krivljenje in/ali pokanje ogrevanca. Napetosti v ogrevancu, ki so posledica neenakomerne ogretosti, so glavna omejitev na začetku ogrevanja za nekatera jekla. Za druge vrste jekel se zahteva, da so vsaj neki minimalen čas nad določeno mejno temperaturo. Navadno je pri vseh jeklih podana neka zgornja mejna vrednost temperature, do katere jeklo lahko ogrejemo. Pri vseh jeklih se zahteva predpisana homogenost temperature materiala ob izstopu iz peči.

Pri vseh jeklih želimo, da čim manj jekla odgori s površin ogrevancev, saj to pomeni neposredno izgubo materiala, razen v primerih, ko želimo, da odgorijo površinske poškodbe, zavaljane napake itd. Na količino odgora vložka najbolj vplivata visoka temperatura in čas izpostavljenosti visoki temperaturi. S stališča manjšega odgora je torej ugodnejše, da se vložek ogreje čim hitreje in na čim nižjo temperaturo, ki pa še vedno omogoča nemoteno vročo predelavo. Ta je določena z vrsto in dimenzijami vložka ter s trajanjem valjanja. Iz opisa različnih dogajanj med ogrevanjem je jasno razvidno, da je pomemben tudi način, kako jeklo preide v stanje iz začetne v končno temperaturo, in ne samo končno temperaturno stanje vložka.

1.4 Literaturni pregled

V naslednjem podpoglavju je kratek pregled optimizacij procesa ogrevanja in pristopi za lažje razumevanje koncepta vodenja na osnovi referenčnih krivulj ogrevanja. Sledi obširnejši literaturni pregled vodenja ogrevanja vložka v kontinuirnih pečeh.

1.4.1 Optimizacije

Pojem optimalnosti poteka ogrevanja v kontinuirnih pečeh je širok. Govorimo lahko o optimalni obliki in konstrukciji peči pri določeni kapaciteti, debelini in vrsti vložka ter o optimalnosti nastavitvev peči pri določenih obratovnih pogojih. V sklopu tega dela je zanimiva le optimizacija le-teh. V preteklosti se je optimizacija procesa ogrevanja obravnavala na več načinov. Pike [22] je že leta 1970 optimiziral ogrevanje v potisni peči, pri čemer je imel hkrati dva cilja: odmik končne temperature materiala od referenčne in energetske učinkovitost. Temperaturo materiala je modeliral s strnjnimi parametri, optimizacijo pa je naredil za stacionarno stanje peči. Z zgrajenim orodjem je lahko optimiral tudi potek ogrevanja v prehodnih stanjih. Optimizacije je izvedel 'off-line'. Jeschar [12] je predlagal optimizacijo razporeditve porabe plina vzdolž peči za minimizacijo porabe energije. Pri tem ni upošteval temperature materiala in tako ni mogel upoštevati procesov na površini in v notranjosti ogrevanega materiala, vendar pa njegovi rezultati podajajo smernice za energetske optimalno delovanje peči. Toplotni izkoristki peči in toplotne porabe so boljši, če je relativna ogretost materiala v začetnih conah manjša. Jeschar [12] je izvedel optimizacije 'off-line', in sicer le za stacionarno stanje. Bönish [1] kot tudi Pike [22] sta uporabila zgrajene modele za študij z 'off-line'-simulacijo sistema. Bönish [1] je optimiral vodenje v prehodu iz zastoja v stacionarno stanje ter prehode med različnimi založitvami z metodami avtoadaptiranja.

1.4.2 Vodenje ogrevanja vložka

Vodenje ogrevanja vložka v kontinuirnih pečeh je zahtevna naloga, saj je težko dobiti ustrezne podatke o temperaturi materiala med ogrevanjem. Meritve so težko izvedljive in nezanesljive, modeliranje ogrevanja v kompleksnih geometrijah peči z različnimi fizikalnimi načini prenosa toplote pa ni enostavno in zahteva velike računske moči. Temu primeren je bil razvoj sistemov vodenja v preteklosti.

Osnovni nivo nadzora peči (nivo 1), s katerega se je začela nadgradnja, je osnovan na regulaciji temperature stene peči, na katero se vpliva s pretokom plina v gorilnikih. Ta nivo je bil do sredine 60-ih let izveden s pnevmatskimi regulatorji, kasneje z elektronskimi. Vodenja prvega nivoja se je s posplošenim prediktivnim, multivariabilnim vodenjem lotil Hyun [6]. Regulatorji prvega nivoja zagotavljajo sledenje temperature sten posameznih con glede na referenčne vrednosti le-teh. Regulacijo drugega nivoja tako večina avtorjev ([2], [5], [16], [18], [21], [24], [25]) razume kot regulacijo temperature ogrevanega materiala. Osrednja naloga vodenja ogrevanja na drugem nivoju v teh pečeh je postalo nastavljanje referenčnih temperatur regulatorjem prvega regulacijskega nivoja, posebej ob zastojih in menjavah materiala (nivo 2). V nadaljevanju je pregled vodenja nivoja 2.

Pregled različnih načinov vodenja ogrevanja materiala v kontinuirnih pečeh sta objavila Norberg [19] in Schurko [23]. Kot navajata oba avtorja preglednih člankov, je osnovni problem dostopnost podatka o temperaturi ogrevancev. V literaturi se je do leta 1980 skoraj izključno pojavljalo merjenje temperature površine materiala, vodenje 2. nivoja pa je temeljilo na teh meritvah, kasneje pa je postopoma prevladalo računanje temperatur ogrevancev z matematičnimi modeli, ki ima nekaj prednosti. Kompleksnost in natančnost modelov je z računsko močjo naraščala. Temeljni način vodenja 2. nivoja je krmiljenje con z uporabo t. i. Carpetovih diagramov, ki so stacionarne vrednosti optimalnih temperatur con v peči za material določenih dimenzij s podanim tempom pomikanja. Krmiljenje je bilo nadgrajeno z zaprtozanim vodenjem temperatur materiala. Objavljeni načini vodenja so med seboj zelo raznoliki. Poglejmo primerjavo pomembnejših načinov vodenja glede na določene lastnosti sistemov.

Mesta nadzora temperature materiala

Glede na število točk nadzora temperature materiala v peči lahko ločimo naslednje skupine sistemov ogrevanja:

1. Nadzor v končni točki ogrevanja [5], [28]
2. Nadzor v končni točki vsake cone ogrevne peči [2], [14], [18], [25]
3. Kontinuirni nadzor v vsaki poziciji/času v peči [4]*, [20], [21], [26]

Avtor * ne navaja načina vodenja, pove le, da sistem vodenja sledi referenčnim krivuljam ogrevanja. Za potrebe jeklarske industrije je gotovo najbolj ustrezno vodenje vzdolž celotne krivulje ogrevanja, torej v vsaki poziciji oziroma času v peči.

Uporabljene vrste regulacije referenčnih vrednosti con peči

Neodvisno od števila točk nadzora ogrevanja uporabljajo avtorji pri ogrevanju v kontinuirnih pečeh naslednje vrste regulacije:

- Ni opisano [4], [21]
- PID s krmiljenjem motnje [5], [14], [18]
- Prediktivno vodenje GPC, MPC [2], [20], [24], [25], [26], [28]

Staalman v svojih delih [24] [25] primerja med seboj t. i. 'funnel'-vodenje, MPC in proporcionalno - integrirno - diferencirno (PID) vodenje. 'Funnel'-vodenje, ki ga opisuje Staalman, je način združevanja napak slabov v napako cone, napako pa vodi v neko obliko klasičnega regulatorja, vrste ne navaja. V primerjavi dobi primerljive rezultate s 'funnel'-vodenjem in MPC; v odvisnosti od merila primerjave so rezultati boljši s 'funnel'- oziroma MPC-vodenjem.

S stališča uporabnosti določenih vrst regulacije je najboljša tista, ki omogoča natančnejše sledenje referenčnim vrednostim oziroma krivuljam. Tako denimo način Staalmana [25] in Dahma [2], ki uporabljata prediktivno vodenje za doseganje referenčnih vrednosti temperatur materiala ob koncu vsake cone, dopušča vmes nedefiniran potek ogrevanja. Načeloma lahko dosežemo boljše ujemanje KO z RKO z enostavnejšim regulatorjem, ki pa bo upošteval potek ogrevanja vzdolž celotne KO.

Obravnavanje zastojev

Številni avtorji sistemov vodenja priznavajo pomembnost nadzorovanja ogrevanja med zastoji in v prehodnih stanjih. Pri kontinuirnih ogrevnih pečeh v jeklarski industriji so zastoji navadno številni in pogosti, saj so tesno povezani z delovanjem in zmogljivostmi ogrodij za vročo predelavo. Enostavnejše je pri žarilnih in kalilnih linijah, kjer ni vročega preoblikovanja po ogrevanju in zato ta vzrok zastojev odpade. Prehodna stanja in zastoji pa povzročajo tudi spremembe v vrstah in dimenzijah materiala ter spremembah referenčnih krivulj ogrevanja posameznih materialov.

Obravnavanje zastojev se avtorji lotevajo na različne načine. Nekateri o načinu obravnave zastojev sploh ne pišejo v svojih publikacijah, spet drugi jih ne obravnavajo posebej, nekateri jih delno razčlenijo.

- Obravnavanje zastojev ni opisano [4] [5], [18], [20], [24], [25]
- Skupna obravnavanje vseh zastojev [2], [14]
- Razčlemba zastojev in obravnavanje posameznih vrst zastojev posebej [21]
- Zastoji obravnavani s sprotno optimizacijo RKO [26], [28]

Najbolj splošen je način obravnave zastojev s sprotno optimizacijo RKO. Kljub svoji splošnosti ima omenjeni način pomembne omejitve. Optimizacija mora biti izvršena v realnem času,

za kar je vedno potreben kompromis med kompleksnostjo in natančnostjo modelov, ki še omogočata izračun v realnem času. Tako za sprotno optimizacijo RKO Zhigang [28] in Yoshitani [26] uporabljata linearne modele, v optimizaciji pa upoštevata odmike KO od RKO ter spremembe in absolutne vrednosti regulirnih veličin (temperatur con oziroma pretoka plinov v conah). Nobeden od omenjenih avtorjev pa sistema na aplicira, kot je navedeno v podpoglavju 1.4.2.

Pichler v svojem delu [21] omenja delitev zastojev na tri vrste: krajši zastoji z neznanim trajanjem (1), daljši zastoji z znanim trajanjem (2) in podaljšani zastoji (3), za katere uporablja posebne RKO. Pichler ne omenja, na kakšen način upošteva trajanje zastojev pri zaprtozančnem vodenju. Trdi tudi, da je upravljanje zastojev glavni aspekt varčevanja z energenti.

Leden [14] zastoje upošteva s t. i. multiplikatorji zastojev (ang. delay strategy multipliers), ki zmanjšajo za 'multiplikacijski' faktor krmilno vrednost conskih temperatur. Zastoje upošteva odprtozančno v krmilnem delu, avtor pa ne navaja kako med zastoji deluje zaprtozančno vodenje. Najverjetneje je zaprtozančno vodenje med zastoji blokirano in je takrat celotno vodenje ogrevanja materiala odprtozančno.

Določanje intervala pomika materiala

Zastoji in intervali pomika so med seboj tesno povezani. V prejšnjem podpoglavju smo ugotovili, da nekateri avtorji v publikacijah ne podajajo oziroma le deloma podajajo način obravnave zastojev. Podobno je tudi z določanjem intervala pomika materiala v peči. Določanje intervala polnjenja/praznjenja peči ter sinhronizacijo z valjarskimi ogrodji avtorji v svojih delih

- ne omenjajo [2], [18], [20], [22], [24], [25], [26], [28],
- omenjajo [4], [14], [21] oz.
- razložijo [5].

Najpodrobnejši opis določanja intervala pomika peči navaja Hollander [5] leta 1982, ki pri določanju intervala pomika upošteva:

- širino zadnjega slaba in minimalno referenčno hitrost vseh slabov v peči;
- število peči v obratovanju;
- kapaciteto valjarskih ogrodij;
- korekcijo tempa, če zazna podogretost slabov kljub maksimalnim temperaturam con;
- zahteve posameznih materialov po nekem minimalnem času nad mejno temperaturo.

Hollander je edini avtor, ki podrobneje razčleni določanje intervala pomika, odvisnega od zgoraj omenjenih parametrov. Avtor tudi omenja, da je interval pomika vzvod za nadzor obremenitve peči.

Status sistema vodenja

Avtorji v svoji delih navajajo, da se njihov način vodenja uporablja v industriji, ali pa primerjajo dobljene simulacijske rezultate vodenja z rezultati nekega drugega načina vodenja, npr. ročnega.

- Uporaba v industriji [2], [4], [5], [14], [18], [21], [25]
- Simulacija vodenja in primerjava rezultatov z drugimi načini vodenja [20], [22], [26], [28]

1.5 Predstavitev dela po poglavjih

V 2. poglavju bomo postavili cilje vodenja ogrevanja, določili vhode in izhode procesa ogrevanja, predstavili način povezovanja zgrajenega sistema vodenja v obstoječ sistem regulacij peči ter matematični model ogrevanja vložka v kontinuirnih pečeh. V tem poglavju bodo navedeni tudi koncepti optimizacij ogrevanja ter predstavitev koncepta obravnave zastojev s časovno premaknitvijo RKO. Na koncu bomo predstavili še koncept vodenja nadtlaka v peči in kisika v zgojevni atmosferi ter vidik modularnosti zgrajenega sistema.

V 3. poglavju bomo najprej določili RKO iz tehnoloških predpisov ter predstavili značilne parametre RKO. V nadaljevanju bo predstavljena tabela zakasnitev, v katero shranjujemo vrednosti časovnih premaknitev RKO ter podaljšanja intervala pomika, ker so oboji posledica zastojev. Predstavili bomo delitev zastojev in algoritme izračuna časovnih premaknitev RKO za vsak slab v peči.

V 4. poglavju bomo predstavili določanje napake posameznih slabov ter načine združevanja le-teh v napako cone, kar definiramo s funkcijo združevanja. Predstavljenih bo več funkcij združevanja.

V 5. poglavju bomo predstavili regulacijsko zanko za vodenje temperature vložka, ki upošteva omejitve regulirne veličine in njeno hitrost spreminjanja. Predstavljen bo tudi odprtozančni prispevek vodenja k celokupni vrednosti regulirne veličine.

V 6. poglavju bomo predstavili način krmiljenja pomikanja vložka skozi pečni prostor in merilo za preverjanje pravilnosti izračuna sinhronizacije z valjarskimi ogrodji.

V 7. poglavju bo predstavljena primerjava rezultatov ročnega vodenja s simulacijskimi rezultati vodenja z zgrajenim sistemom. Primerjava bo izvedena na istih nizih založitve. Predstavili bomo merila za primerjavo odzivov, čemur bodo sledili rezultati. Ujemanje RKO s KO bo predstavljeno v obliki histogramov vrednosti kriterijskih funkcij, pri čemer bomo histograme dodatno numerično ovrednotili.

Sklep disertacije je v poglavju 8.

V dodatku A je članek avtorja disertacije v reviji *Steel Research Int.* [27].

2 Koncept vodenja kontinuirnih peči

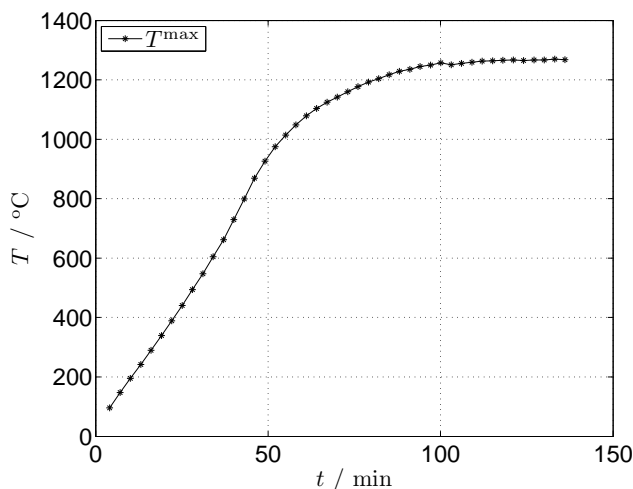
V tem poglavju je predstavljen koncept kontroliranega ogrevanja materiala v kontinuirnih pečeh. Predstavljeni so cilji vodenja, opis peči z vidika vpliva na vodenje ogrevanja, način povezave vodenja ogrevanja materiala z vodenjem peči in možnost nadgradnje sistema z optimizacijami referenčnih krivulj ogrevanja in optimizacijo zaporedja ogrevanja posameznih tipov založitve.

2.1 Cilji vodenja ogrevanja v peči

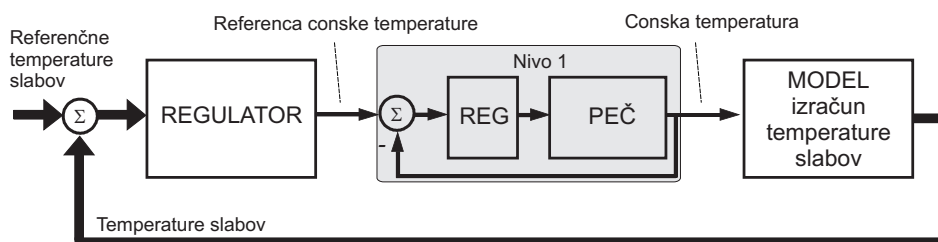
Želimo zgraditi sistem vodenja ogrevanja vložka v kontinuirnih pečeh, ki omogoča ogrevanje vložka po predpisanih referenčnih krivuljah ogrevanja (RKO) vseh ogrevancev v peči, pri čemer RKO podaja časovni razvoj temperature ogrevanca, kot je prikazano na sliki 2.1. Želimo, da se je sistem zmožen prilagajati zastojem na linijah vroče predelave in da ogrevanje prilagodi kapacitetam procesov vroče predelave. Pri tem mora upoštevati omejitve materiala: maksimalna dovoljena temperatura, maksimalna temperaturna razlika v materialu. Želimo, da sistem vodenja ogrevanja materiala upošteva omejitve peči: hitrost spreminjanja conskih temperatur in maksimalne razlike med posameznimi conami. Ker gre za dimenzijsko velike ogrevance, je pomembna homogenost temperature materiala. Zato naj referenčna krivulja ogrevanja obsega več karakterističnih vrednosti temperatur materiala: aritmetično srednjo vrednost temperature T^{mean} , maksimalno vrednost T^{max} , minimalno vrednost T^{min} in maksimalno temperaturno razliko znotraj ogrevanca ΔT^{max} . Sistem naj bo zgrajen tako, da je možna enostavna zamenjava referenčnih krivulj ogrevanja. Začetne krivulje ogrevanja naj bodo čimbolj podobne tistim v proizvodnji. Za toplo založene materiale naj bodo njim prilagojene referenčne krivulje, enako tudi za različne dimenzije materialov.

2.2 Vhodi in izhodi procesa ogrevanja

Pečni prostor potisne peč v ACRONI je razdeljen na šest con (slika 1.5) in vsaki coni lahko nastavljamo referenčno vrednost temperature, kot je opisano v podpoglavju 1.2.1. Poleg tega v peč lahko za industrijske razmere poljubno hitro zalagamo nove slabe. Čas zalaganja oziroma pomika slabov skozi peč je najprikladnejše podajati z intervalom polnjenja/praznjenja peči; včasih se uporablja izraz interval pomika, perioda pomika, ritem pomika ali pa samo ritem. S stališča vodenja ogrevanja materiala so to edini vhodi, preko katerih lahko vplivamo na potek ogrevanja, skupaj torej sedem vhodov.



Slika 2.1: RKO podaja časovni razvoj izbrane karakteristične vrednosti ogrevanca (T^{\max}) v odvisnosti od časa.



Slika 2.2: Povezava prvega in drugega regulacijskega nivoja

Slabe želimo ogrevati po predpisani krivulji ogrevanja. V potisni peči je pri širini slabov 1000 mm in uporabni dolžini peči 25 m hkrati 25 slabov. Če želimo nadzirati eno samo karakteristično temperaturo slaba, npr. T^{mean} imamo sistem s 25 izhodi, na ogrevanje pa lahko vplivamo preko temperatur con (6 vhodov) in ritma peči (1 vhod), torej skupaj sedem vhodov. Sistem ima 7 vhodov in približno 25 izhodov, pri čemer je število izhodov odvisno od širine slabov. Sistem je torej multivariabilen, vhodov je manj kot izhodov, s tem se uvršča med funkcionalno nevodljive procese.

2.3 Vključitev vodenja 2. nivoja na 1. regulacijski nivo

V literaturi se skoraj izključno pojavlja kaskadni način povezovanja prvega in drugega regulacijskega nivoja, kot je prikazano na sliki 2.2. Prvi regulacijski nivo je navadno izveden na programabilnih logičnih krmilnikih (PLK) ali pa na drugih industrijskih izvedbah regulatorjev. Naloga drugega nivoja regulacije je, da ustrezno nastavlja referenčne vrednosti regulatorjev prvega nivoja. Nekateri modeli za izračun temperatur ogrevancev potrebujejo podatek o pretoku kurilnega plina. V plinsko kurjenih ogrevnih pečeh je v regulaciji prvega nivoja skrita še regulacija, ki uravnava razmerje plin-zrak. Mešalno razmerje plin-zrak ima vpliv na izkoristek

zgorevanja in na delež kisika O_2 v atmosferi peči.

Povezava prvega in drugega regulacijskega nivoja, kot je prikazana na sliki 2.2 je kaskadna in v regulacijskem žargonu pri kaskedni vezavi regulatorjev govorimo o glavnem regulatorju (drugi nivo) in pomožnem regulatorju (prvi nivo). V nadaljevanju uporabljamo izraz prvi regulacijski nivo in drugi regulacijski nivo, ker pomensko ločuje nivo nadzora. Prvi nivo regulacije v jeklarski industriji se vedno nanaša na temperature peči, drugi nivo pa na temperature ogrevanega materiala.

2.4 Matematični model ogrevanja vložka

Za potrebe reguliranja temperature v notranjosti ogrevancev neizogibno potrebujemo matematične modele za izračun temperatur ogrevancev. Pri potisni peči v ACRONI, d. o. o., uporabljamo matematični model, ki v redni proizvodnji 'on-line' izračunava temperaturo materiala v treh prostorskih dimenzijah [10]. Model izračunava temperaturna polja posameznih slabov zapiše v datoteke, ki ji potem za potrebe vodenja preberemo in iz njih izluščimo informacije, ki jih potrebujemo. Model poleg tega zagotavlja kompletno sledenje materiala: vrste in dimenzije jekla, pozicije in čase v peči, čase založitve Model te podatke dinamično spremlja in tvori potrebne podatkovne zapise, ki omogočajo arhivsko sledenje toka materiala (vrste jekla, dimenzije, čas vstopa v peč in izstopa iz nje), potekov ogrevanja materiala (temperaturna polja slabov v vsaki poziciji) in meritev na peči (temperature con, pirometrске meritve temperatur na površini slabov, nadtlak v peči, delež O_2 v zgorevni atmosferi, pretoki zgorevnega plina in zraka po posameznih conah, ...).

Temeljni problem pri simulaciji ogrevanja v kontinuirnih pečeh je določitev robnih pogojev na zunanjih ploskvah ogrevancev. Mehanizmi prenosa na robnih ploskvah so prevajanje, konvekcija in sevanje. Vsaka ploskev ima navadno različne robne pogoje ogrevanja. Nekatere ploskve so odprte proti pečnemu prostoru, druge so v senci sosednjih ogrevancev, tretje so na pomičnih gredah ali glisažnih ceveh, po katerih material drsi, nekatere so položene na dno peči (izenačevalna cona potisne peči). Vodilni mehanizem pri višjih temperaturah postane sevanje (σT^4). Prenos toplote s sevanjem je možno zelo natančno modelirati z emitiranjem delcev iz ploskvic pečnega prostora in vložka pod različnimi prostorskimi koti ter njihovega spremljanja do ciljnih ploskvic. Če iz vsake ploskvice emitiramo primerno veliko število delcev, dobimo statističen opis medsebojnega vpliva sevanja ploskev. Sevalni prispevek k ogrevanju je pri uporabljenem modelu [10] izračunan z zgoraj opisanim načinom emitiranja in sledenja delcev. Enak način izračuna sevanja avtor uporabi tudi pri aplikaciji modela na drugih pečeh [7], [8], [9], [11].

2.5 Zaporedje prihoda vložka v peč in optimalnost

Proces ogrevanja slabov v potisni peči je funkcionalno nevodljiv. Posledica tega je, da v nekaterih situacijah ob prehodih med različnimi materiali peč ne more zagotoviti ogrevalnih pogojev, kakršne si želimo. Smiselno se je takšnim situacijam izogibati, kolikor je le mogoče. Eden od načinov je optimizacija zaporedja prihoda vložka v peč. S takšno optimizacijo želimo v nekem določenem proizvodnem obdobju, npr. 3 dni, optimirati zaporedje prihodov posameznih

tipov založitve pred peč tako, da bodo sosednje razlike med referenčnima krivuljama ogrevanja čim manjše. Kritejska funkcija optimizacije je podobnost referenčnih krivulj ogrevanja. Naj omenim, da referenčna krivulja opisuje celoten potek ogrevanja, torej tudi čas ogrevanja in končno temperaturo materiala. Velikost razlike teh dveh parametrov najbolj vpliva na doseganje referenčnih krivulj slabov v prehodih med tipi založitve.

V proizvodnih podjetjih se pojavljajo različni načini določanja zaporedja prihoda v peč, kakor tudi na vse druge proizvodne agregate. Strnemo jih lahko v tri skupine:

1. Proizvodno zaporedje je enako zaporedju prihoda naročil.
2. Proizvodno zaporedje se določa sproti glede na urgentnost in zaporedje prihodov naročil ter optimalnost zaporedja.
3. Proizvodno zaporedje se optimira in planira daleč v prihodnost (npr. 1 leto). Kupec ob naročilu izve termin proizvodnje in dobave.

Prehode je najoptimalnejše izvesti v tretjem primeru, manj optimalno v drugem, v prvem pa so prehodi določeni z zaporedjem naročil.

2.6 Optimiranje referenčnih krivulj ogrevanja

V podpoglavju 1.3.4 so kratko opisana različna fizikalna dogajanja v jeklih med ogrevanjem, ki vplivajo na kvaliteto in izplen proizvodnje. Ko govorimo o optimalnosti procesa ogrevanja, moramo poleg izpolnjevanja zahtev smiselno vključiti tudi energetske vidike. Nekaj teh zahtev si med seboj nasprotuje. Optimiranje referenčnih krivulj ni enostavna naloga. Najenostavnejši način optimizacije izhaja iz praktičnih izkušenj. Med ogrevanjem v pečeh prihaja do zelo različnih pogojev in nemalokrat se izkaže, da ima neki ogrevanec, ki se ni ogreval po predpisih, boljši izplen, boljšo mikrostrukturo, boljše mehanske lastnosti, manjšo porabo energije itd. Če stanje materiala med ogrevanjem spremljamo in beležimo (npr. samodejno), je možna rekonstrukcija ogrevanja, takšne primere pa je smiselno simulacijsko preizkusiti 'off-line' in na osnovi takšnega 'izjemnega' dogodka vpeljati modificiran način ogrevanja, novo referenčno krivuljo.

Sistemi vodenja nekaterih avtorjev, npr. Dahm [2], omogočajo, da sistem posname krivuljo ogrevanja, ki jo doseže ekspert z ročnim vodenjem. To je druga, enostavna metoda optimizacije.

Bolj zapleten način je optimizacija procesa na osnovi modelov. Ta lahko daje le tako točen rezultat, kot je točen model. Ko govorimo o temperaturi in temperaturnih razlikah je to možno, težje je z modeli za napovedovanje naogljivenja / razogljivenja, mikrostrukture, formacije škake, termičnih napetosti v jeklu in energetske učinkovitosti. Optimizacije ogrevanja, objavljene do sedaj, se osredinjajo na optimizacije posameznih vidikov, npr. energetskega, Jeschar [12]. Pike [22] optimira odmike končne temperature materiala od referenčne in energetske učinkovitost. Glede na zahteve in omejitve posamezne vrste jekla se za optimizacijo največkrat uporablja samo določene vidike optimalnosti. Računska zahtevnost teh optimizacij je navadno visoka.

Jeschar [12] kot rezultat optimizacijskih preizkusov navaja boljšo energetska učinkovitost ogrevanja, če so ogrevanci v začetnih conah relativno slabo ogreti in se večina ogrevanja zgodi bolj proti koncu peči, in nasprotno: energetska učinkovitost je slabša, če so ogrevanci v začetnih conah relativno bolj ogreti. Odvod dimnih plinov v pečeh, ki jih je preučeval Jeschar, je izveden na vhodu peči, kot je izvedeno tudi pri potisni peči (slika 1.6). Logična razlaga njegovega rezultata je, da dimni plini s svojim potovanjem od konca peči proti njeni vstopni strani in dimniku oddajo več toplote ogrevancem, če so ti v primerjavi z dimnim plinom bolj hladni, in nasprotno. Peč ima torej tem boljši energetski izkoristek, čim hladnejši dimni plini vstopajo v dimnik.

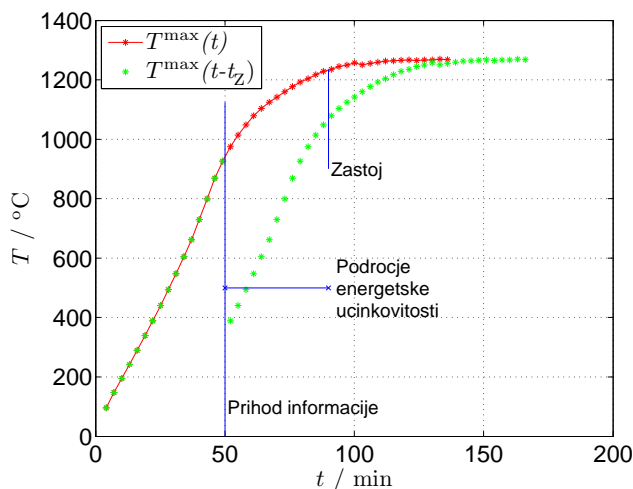
2.7 Zastoji in časovno premikanje referenčnih krivulj ogrevanja

Pri procesih vroče predelave (kovanje, valjanje) pogostoma nastajajo motnje in zastoji, ki neposredno vplivajo na čase ogrevanja jekel v kontinuirni peči. Poleg tega motnje ogrevanja povzročajo tudi menjave materiala, dimenzij, ... ogrevancev. Tako se v kontinuirnih pečeh pogostoma dogaja, da je material nehote predolgo v peči. Najbolj problematična v času zastojev je potisna peč. Tudi če vemo, da se bo neki zastoj zgodil, nimamo energetska učinkovitega vzvoda, da bi material počakal pred pečjo in bi ga vanjo transportirali kasneje. Če pričakujemo večji zastoj, lahko damo v peč poljubno število neuporabnih slabov in z njimi naredimo potreben presledek, ki nam bo omogočil ogrevanje po predpisih za sosednji, različni si, vrsti jekel. Ti slabi se v žargonu imenujejo 'rena'. Če zalagamo 'rena' slabe se bodo ti ravno tako ogrevali in za njihovo ogrevanje porabljammo energijo. Kaj lahko naredimo v primerih, ko pride do nenačrtovanih zastojev, ko vmes ni 'rena' slabov? Iščemo torej neki vzvod, ki nam bo omogočal vpliv na ogrevanje materiala tudi v teh primerih.

V literaturi o tem ni najti niti ene rešitve. Najdlje pri vsem tem je po literaturnih podatkih prišel Pichler [21], ki je razčlenil zastoje, a ni podal načina, kako je to upošteval v zaprtozančni regulaciji. Navedel je le, da za dolge zastoje uporablja posebne krivulje ogrevanja. Vodenje ogrevanja med zastoji je pri njegovem sistemu zaprtozančno.

Ena možnost reakcije na zastoje je časovna premaknitev referenčnih krivulj ogrevanja za vrednost trajanja zastoja (slika 2.3). S tem dosežemo dvoje.

1. Zaprtozančno vodenje med zastoji. To samo po sebi vključuje zmanjševanje temperatur con, dokler je vložek preveč ogret glede na čas do razložitve iz peči, kakor tudi začetek in kontrolirano ogrevanje po RKO do izteka zastoja in sledenje časovno premaknjeni RKO po njegovem izteku.
2. Premaknitev RKO med zastojem pomeni nižje referenčne vrednosti temperatur ogrevancev v primerjavi s potekom brez zastoja. Zato peč v času zastoja deluje v območju boljše energetske učinkovitosti, kot navaja Jeschar [12]. Časovni interval, ko se peč nahaja v območju boljše energetske učinkovitosti, je od prihoda informacije o zastoji do konca zastoja (slika 2.3). Daljši kot je zastoj, globlje v področju boljše energetske učinkovitosti deluje peč. To seveda ne pomeni, da bo specifična poraba energije na tono proizvoda manjša, če bo več zastojev. Peč deluje v področju boljše energetske učinkovitosti samo med trajanjem zastoja. Po končanju pa se zopet vrne v stanje normalnega obratovanja.



Slika 2.3: Zamik RKO ob zastoju pomakne peč v področje večje energetske učinkovitosti.

Za nadzor in upravljanje zastojev uporabimo prav to možnost, ki pa ne izključuje uporabe 'rena' slabov pri predvidenih zastojih in menjavi programov.

2.8 Vsebnost kisika v zgorevni atmosferi v peči in nadtlak v peči

Vsebnost kisika v atmosferi ima vpliv na škajanje površine jekel in na odpadanje škaje po izstopu iz peči. Vzvod za vpliv na vsebnost kisika je referenčna vrednost mešalnega razmerja plin-kisik. Referenčne vrednosti kisika so za posamezne kvalitete gibljejo med 2% in 7%. Te vrednosti je ob normalni tesnosti peči možno doseči v ozkem območju mešalnega razmerja zrak-plin $\approx 10-11$.

Velikost nadtlaka v notranjosti peči glede na okolico vpliva na vdiranje zunanjega zraka v notranjost peči na netesnih ali odprtih mestih (vstopna in izstopna vrata, ...). Pri večjih netesnostih in nizkem nadtlaku v peč vdira zunanji zrak, ki ima večjo vsebnost kisika, in s tem lahko znatno vpliva na delež kisika. Običajen vzvod za vzdrževanje nadtlaka v peči je pri potisnih, krožnih in koračnih pečeh zadrževanje odvajanja dimnih plinov v dimnik. Zadrževanje je izvedeno z loputo v dimniški cevi.

2.9 Postopno uvajanje in modularnost

Pri načrtovanju je bila posebna pozornost namenjena modularnosti sistema. Procesi ogrevanja ne dopuščajo večjih eksperimentiranj, kakor tudi ne 'masovnih' sprememb načinov ogrevanja. Za uvajanje sistema vodenja v proizvodnjo je potrebna postopnost. V prvi fazi se želimo z avtomatskim vodenjem ogrevanja čim bolj približati takemu načinu, kot je pred tem v proizvodnji. V tej fazi morajo biti referenčne krivulje ogrevanja čim bolj podobne tistim, ki se dosegajo z obstoječim (ročnim) načinom vodenja. Ko sistem vodenja v tej fazi stabilno in zanesljivo

deluje, lahko preidemo v fazo optimiranja referenčnih krivulj. To lahko izvedemo kot posnemanje vodenja eksperta, simulacijo predlogov tehnologov ali pa kot numerično optimizacijo.

Optimizacijo zaporedja prihoda vložka v peč, kakor tudi optimizacijo RKO, lahko s predlaganim načinom uvajamo kadarkoli.

3 Referenčna krivulja ogrevanja

Vsak ogrevanec, npr. slab, želimo ogrevati po predpisani referenčni krivulji ogrevanja (RKO). Različne vrste jekel, dimenzij in začetnih temperatur ogrevancev zahtevajo različne poteke ogrevanja, različne RKO. V tem poglavju prikažemo poteke RKO v odvisnosti od zastojev. Glede na vrste in trajanje zastojev izračunamo ustrezno premaknitev RKO.

3.1 Določitev časovnega poteka referenčnih krivulj ogrevanja iz tehnoloških predpisov

V tem podpoglavju bomo predstavili pretvorbo tehnoloških predpisov ogrevanja v referenčne krivulje ogrevanja. Spoznati moramo tehnološke predpise, jih pretvoriti v RKO in zgraditi primerno podatkovno strukturo za shranjevanje RKO.

3.1.1 Tehnološki predpisi o ogrevanju

Tehnološki predpis je sestavljen iz dveh tabel. Prva podaja razdelitev posameznih vrst jekel v režim ogrevanja, druga pa opis nastavitve peči za posamezen režim ogrevanja. Primer režima ogrevanja iz druge tabele je podan v tabeli 3.1.

Tabela 3.1: Vrstica tabele tehnoloških predpisov o ogrevanja slabov v potisni peči

Rež. ogr.	Deb. [mm]	T_{PCZ} [°C]	T_{PCS} [°C]	T_{OCZ} [°C]	T_{OCS} [°C]	T_{ICL} [°C]	T_{ICD} [°C]	w(O ₂) [%]	Ritem [min]	Nadtlak [Pa]
1-H	160	1180	1180	1250	1260	1250	1250	3-5	6,5	7
1-T	160	1150	1150	1250	1260	1250	1250	3-5	6,5	7
1-OT	160	1150	1150	1250	1260	1250	1250	3-5	6,5	7
1-H	200	1180	1180	1250	1260	1250	1250	3-5	7	7
1-T	200	1150	1150	1250	1260	1250	1250	3-5	7	7
1-OT	200	1150	1150	1250	1260	1250	1250	3-5	7	7

Režim 1, podan v tabeli 3.1, podrobneje deli nastavitve ogrevanja glede na začetno temperaturo in debelino slabov. Režim je po začetni temperaturi (stolpec 1) razdeljen na hladno (H) in toplo (T) zalaganje oziroma obvezno toplo (OT) zalaganje. Načina (T) in (OT) imata enake nastavitve temperatur po conah, hladen (H) način zalaganja pa se razlikuje od prejšnjih. Nadalje je za podan režim 1 v tabeli 3.1 razlika v ogrevanju tudi glede na debelino slabov (stolpec 2).

V naslednjih šestih stolpcih tabele so navedene temperature po conah. Nadalje sledi nastavitve deleža kisika O_2 , nato pa ritem pomika peči, ki pa je enak za slabe H,T in OT enakih debelin. Za slabe debeline 160 mm je ritem pomika 6,5 min, za debeline 200 mm pa 7 min. Nadtlak v peči je za režim ogrevanja 1 podan v tabeli 3.1 enak 7 Pa. Režim ogrevanja tako podaja nastavitve peči.

3.1.2 Posplošitev predpisov o ogrevanju

V tem podpoglavju želimo posplošiti nekatere vidike predpisov o ogrevanju. Tehnološki predpisi o ogrevanju določajo, da se slab obravnava kot toplo založen, če je njegova temperatura nad 300 °C. Obvezno topel način ogrevanja pomeni zgolj opozorilo, da je treba dogrevanje nekaterih vrst jekel izvesti, še preden se ohladijo po kontinuirnem litju pod 300 °C. Vse tri načine lahko posplošimo na variabilnost začetne temperature T_0 . V ta namen naredimo naslednjo lestvico začetnih temperatur {20, 100, 150, 200, 250,..., 850, 900} s primernim korakom, ki je 50 °C. Meritev začetne temperature, ki zavzame katerokoli vrednost v območju, zaokrožimo k najbližji vrednosti lestvice začetnih temperatur. Toplo zalaganje, definirano s predpisi o ogrevanju (pogoj $T_0 > 300$ °C), podrobneje razdelimo s podano lestvico začetnih temperatur. V sistemu vodenja kot toplo založene slabe obravnavamo tiste s temperaturo 100 ali več °C.

Za režim ogrevanja sta podana dva ritma pomika vložka; 6,5 min za debelino 160 mm in 7 min za debelino 200 mm. Pri tem moramo povedati, da se sicer uporabljajo tri debeline slabov: 160 mm, 200 mm in 250 mm. V tem režimu ogrevanja ni slabov debeline 250 mm. Pri režimu ogrevanja 1 imamo torej nabor začetnih temperatur in dve debelini slabov, 160 mm in 200 mm, in za vsako kombinacijo ogrevanja je smiselno vpeljati samostojen način ogrevanja in zato ga predpišemo s samostojno referenčno krivuljo ogrevanja (glej poglavje 3.1.3).

Ugotavljamo, da predpis o ogrevanju ne razlikuje načina ogrevanja glede na različno širino slaba, čeprav bodo pri istem ritmu pomikanja ožji slabi dalj časa v peči. Širine slabov variirajo od ≈ 700 mm do 1080 mm, kar pri enakem ritmu pomika peči pomeni več kot preko 25 % različne čase ogrevanja, kar spet pomeni različne RKO. V tem pogledu je tehnološki predpis o ogrevanju nedosleden in pušča vrzel v predpisih o ogrevanju. Pri širokih slabov tako dobimo kratke čase ogrevanja, ki ima za posledico nezadostno ogretost vložka ob izstopu iz peči.

Da bi se izognili takim situacijam, moramo ritem pomika definirati tako, da **ohranjamo hitrost** pomikanja slabov, ne glede na različne širine, kar je podrobneje predstavljeno v poglavju 6.

Vprašanje je tudi, pri kateri širini slabov v tehnološkem predpisu določiti RKO. Izračun RKO izvedemo pri največji širini slabov in ritmu, podanem v tabeli 3.1, ter s tem določimo hitrost njihovega gibanja skozi peč. Upoštevamo torej največjo hitrost gibanja slabov skozi peč.

3.1.3 Tipi založitve in RKO

Pri upoštevanju tehnoloških predpisov moramo za vsako posamezno vrsto jekla, debelino slabov in začetno temperaturo ločeno definirati RKO. Definirajmo *tip založitve* za vsako kombinacijo

- vrste jekla
- debeline slaba in

- začetne temperature slaba.

Začetna temperatura je zaokrožena na najbližjo vrednost v lestvici, (20, 100, 150, 200, 250, ..., 850, 900) °C.

Za določitev RKO posameznih *tipov založitve* avtomatiziramo določanje RKO, kot je predstavljeno v podpoglavju 3.1.9, s čimer dobimo stacionarne temperaturne poteke ogrevanja slabov v peči. Stacionarno stanje dosežemo, ko izbran tip založitve dovolj dolgo zalagamo po predpisanih intervalih pomika in ko so hkrati temperature con v peči konstantne. Po vzpostavitvi stacionarnega stanja so temperature slabov, opazovane na določeni poziciji v peči, ponovljive.

Po vzpostavitvi takšnega stanja na vseh pozicijah v peči ustavimo simulacijo tik pred pomikom. Za vsak slab imamo na voljo tridimenzionalno temperaturno polje \mathbf{T} . Zaporedoma sestavljena temperaturna polja $[\mathbf{T}_{i=1}, \dots, \mathbf{T}_{i=N}]$ od začetne pozicije $i = 1$ do končne pozicije $i = N$ dajejo posnetek KO, kakršno predvideva predpis o ogrevanju.

Sestavimo krivuljo ogrevanja iz niza vrednosti *karakterističnih temperatur*. *Karakteristično vrednost* označimo splošno kot funkcijo f , ki preslika tridimenzionalno temperaturno polje ogrevanca \mathbf{T} v skalarno veličino T^f . Krivulje ogrevanja za različne funkcije f lahko sedaj zapišemo kot:

$$\tilde{T}_R^f(t) = [f(\mathbf{T}_{i=1}), \dots, f(\mathbf{T}_{i=N})] = [T_1^f, \dots, T_N^f] \quad (3.1)$$

pri čemer indeks i teče po pozicijah v peči.

Za različne funkcije f dobimo različne krivulje ogrevanja \tilde{T}^f . Ker želimo zgraditi sistem, ki ga lahko hitro prilagajamo novim zahtevam, materialom ..., pripravimo več različnih funkcij f in za vsako določimo \tilde{T}^f .

Izračunamo naslednje referenčne krivulje ogrevanja na osnovi različnih funkcij f .

3.1.4 Referenčna krivulja $\tilde{T}_R^{\text{mean}}$

Sestavimo krivuljo ogrevanja $\tilde{T}_R^{\text{mean}}$ iz niza skalarnih vrednosti temperaturnih polj na vsaki poziciji po enačbi 3.1 in za funkcijo f vzamemo aritmetično srednjo vrednost (mean) temperaturnega polja vložka \mathbf{T} .

Srednja vrednost temperature slaba je najbolj uporabna med obratovanjem brez večjih zastojev. Prednost te karakteristike je, da se med ogrevanjem posameznega slaba spreminja brez nenadnih skokov.

3.1.5 Referenčna krivulja \tilde{T}_R^{max}

Sestavimo krivuljo ogrevanja \tilde{T}_R^{max} iz niza skalarnih vrednosti temperaturnih polj na vsaki poziciji po enačbi 3.1 in za funkcijo f vzamemo maksimalno vrednost (max) temperaturnega polja vložka \mathbf{T} .

Maksimalna temperatura jekla je uporabna za nadzor nad mejnimi vrednostmi temperatur jekla. Ta karakteristika je uporabna predvsem v končnih conah (ogrevna, izenačevalna), kjer je jeklo blizu končne, želene temperature. Med ogrevanjem brez večjih zastojev je časovni odziv te

karakteristike hitrejši v primerjavi s karakteristiko $\tilde{T}_R^{\text{mean}}$, saj je navadno največja temperatura na zunanosti ogrevanca, med zastoji ob primerni regulaciji pa temperatura površine hitre pade. Takrat je časovni odziv karakteristike \tilde{T}_R^{max} bolj počasen, saj podaja potek vrednosti temperature iz notranosti ogrevanca, kjer je takrat višja temperatura. Časovni odvod obravnavane karakteristike je lahko nezvezen.

3.1.6 Referenčna krivulja \tilde{T}_R^{min}

Sestavimo krivuljo ogrevanja \tilde{T}_R^{min} iz niza skalarnih vrednosti temperaturnih polj na vsaki poziciji po enačbi 3.1 in za funkcijo f vzamemo minimalno vrednost (min) temperaturnega polja vložka T .

Karakteristika, ki podaja minimalno vrednost temperature ogrevanca, je pomembna predvsem v primerih, ko za določeno jeklo zahtevamo, da je določen čas nad neko mejno vrednostjo temperature. Hitrost odziva te karakteristike je med navadnim segrevanjem najmanjša v primerjavi s karakteristikama $\tilde{T}_R^{\text{mean}}$ in \tilde{T}_R^{max} . Ta karakteristika se med zastoji ob primerni regulaciji, ko se površina lahko hitro ohlaja, spreminja precej hitro.

3.1.7 Referenčna krivulja $\Delta\tilde{T}_R^{\text{max}}$

Sestavimo krivuljo ogrevanja $\Delta\tilde{T}_R^{\text{max}}$ iz niza skalarnih vrednosti na vsaki poziciji po enačbi 3.1 in za funkcijo f vzamemo maksimalno vrednost (max) temperaturnih razlik v vložku. To krivuljo ogrevanja tako dobimo kot razliko med krivuljama $\Delta\tilde{T}_R^{\text{max}} = \tilde{T}_R^{\text{max}} - \tilde{T}_R^{\text{min}}$

Ta karakteristika je uporabna predvsem tam, kjer se pojavlja občutljivost jekel za termično nehomogenost. Posledica le-teh so termične napetosti v jeklu, in eno od meril za njihovo ocenjevanje termičnih napetosti so prav temperaturne razlike ΔT . Omenimo še, da je za potrebe vodenja ta karakteristika uporabna le pri intenzivnem ogrevanju ali ohlajanju materiala, ko so vrednosti visoke. Blizu temperaturne homogenosti materiala pada vrednost karakteristike proti nič. Za potrebe vodenja se zato te RKO ne sme uporabljati v času stacionarnega stanja temperature vložka, t.j. med daljšimi zastoji ali pa v izenačevalnih conah peči. Takrat se izrazito poveča nestabilnost regulacijskih zank.

3.1.8 Druge referenčne krivulje

Referenčna krivulja je bila v vseh primerih, razen zadnjega, temperatura materiala. Zanimiva alternativa so termične napetosti jekla, za njihov izračun pa je potreben ustrezen model in precejšnja računsko moč. Privlačnost napetostnih karakteristik je predvsem v tem, ker podajajo temeljno merilo, s katerim se določa hitrost ogrevanja materiala, od te pa je odvisen termični izkoristek peči, količina odgora materiala, globina razogljivenja površine jekla itd.. Gre za ključno karakteristiko ogrevanja, za katero pa je potreben kompleksen model izračunavanja napetosti. Mejne vrednosti termičnih napetosti pa so še težje določljive, saj je meja odvisna od več parametrov: čistost jekla, zgodovina ogrevanja/ohlajanja Ena od poti, s katero se izognemo temu, je krivulja $\Delta\tilde{T}_R^{\text{max}}$, saj ocenjuje velikost vzročne veličine namesto posledice. Pričakujemo, da je možno mejno vrednost $\Delta\tilde{T}_R^{\text{max}}$, ki povzroča pokanje jekel, določiti eksperimentalno na osnovi poskusov in/ali izrednih dogodkov med proizvodnjo.

3.1.9 Avtomatizacija določanja referenčnih krivulj ogrevanja

V tem podglavju je prikazan avtomatiziran način določanja referenčnih krivulj ogrevanja iz tehnoloških predpisov o ogrevanju. S tem določimo začetne RKO za potrebe prehoda iz ročnega načina vodenja na avtomatsko, brez sprememb načina ogrevanja.

Orodje, ki ga pri tem uporabimo, je matematični model ogrevanja slabov v potisni peči. Zanj zgradimo simulator, ki nam omogoča nastavljanje parametrov zalaganja vložka, nastavitve peči in branje rezultatov (temperaturnih polj slabov T). Parametri zalaganja so: dimenzije slabov (dolžina, širina, debelina), vrsta jekla, začetna temperatura slaba. Nastavitve peči so: referenčne temperature za regulatorje temperatur con in interval polnjenja/praznenja peči t_{pp} .

RKO za hladno zalaganje

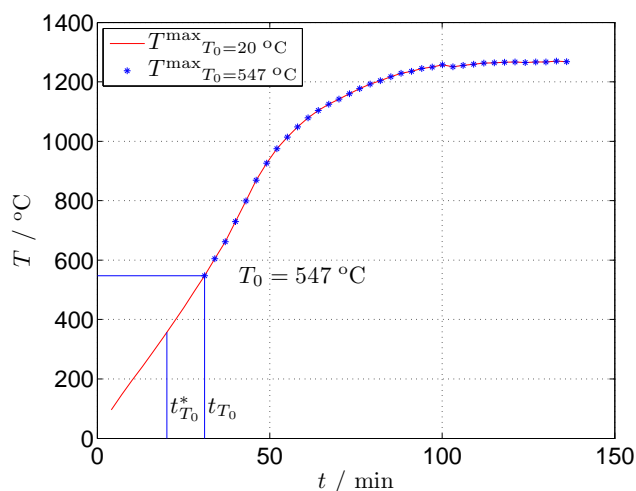
Referenčne krivulje moramo določiti za vsak tip založitve, kot je razloženo v 3.1.3. Za vsako vrsto jekla in debelino slabov (za hladno zalaganje $T_0 = 20$ °C) izračunamo RKO po naslednjem postopku. V simulatorju se programsko nastavijo parametri zalaganja in nastavitve peči, zažene se matematični model ter izvrši simulacija ogrevanja z nastavljenimi parametri.

Proces ogrevanja pride v stacionarno stanje po približno 1,5 dolžine peči slabov, torej ko se z nespremenjenimi nastavitvami peči in enakim vložkom ogreje za 1,5 dolžine peči založitve slabov, pri čemer se dolžina založitve slabov računa kot seštevek njihovih širin. Zakaj 1,5 dolžine založitve peči? Ker je prevladujoč način prenosa toplote v peči sevanje, ne zadošča simulacija zgolj ene same dolžine peči, saj je medsebojno sevanje slabov in sten preveliko in potrebujemo več kot eno dolžino peči materiala, da ogrevanje le-tega preide v stacionarno stanje. Ko se ogrevanje za izbran tip založitve stabilizira, simulator prebere celotno zgodovino ogrevanja slaba, ki se nahaja na izstopu iz peči.

Vrednosti tridimenzionalnih temperaturnih polj ogrevancev T za trenutek tik pred pomikom so shranjene v podatkovni strukturi. Simulator nato iz teh temperaturnih polj T izvede izračun T^{mean} , T^{max} , T^{min} in ΔT^{max} na vsaki poziciji/času v peči in vrednosti shrani v podatkovno bazo, v tabelo referenčnih krivulj ogrevanja. Vrednosti referenčne krivulje se zapišejo v odvisnosti od časa prisotnosti in pozicije slaba v peči. S tem dobimo časovni in pozicijski potek krivulje ogrevanja, poleg tega pa shranimo za vsako RKO še naslednje informacije:

- debelino slabov
- vrsto jekla
- začetno temperaturo
- referenčno hitrost pomikanja slabov skozi peč
- vrednosti temperatur posameznih con peči, s katerimi smo izvršili izračun časovnega poteka RKO

Opisana procedura je izvedena za vsak hladen tip založitve. Sedaj moramo določiti še referenčne krivulje ogrevanja za povišane začetne temperature.



Slika 3.1: RKO toplo založenih ogrevancev je del RKO hladno založenih ogrevancev

RKO za toplo zalaganje

V podglavju 3.1.2 smo posplošili tople založene ogrevance v lestvico začetnih vrednosti temperatur (100, 150, 200, 250, ..., 850, 900) °C. Kot hladno založene upoštevamo le slabe, ki padejo v področje $T_0 = 20$ °C. Pri določanju RKO za toplo založene slabe ($T_0 > 20$ °C) izhajamo iz RKO za hladno založitev ($T_0 = 20$ °C) za isto vrsto jekla in debelino slaba. Določiti moramo RKO za preostale začetne temperature: $T_0 = (100, 150, 200, 250, \dots, 850, 900)$ °C. Postopek določitve RKO za izbrano začetno temperaturo je naslednji:

Izhajati moramo iz hladnih založitev, ker tehnološki predpis za toplo založitev izhaja iz hladnih založitev in je splošnejši. Hladno založen material, ki ga ogrevamo s temperature okolice na končno, želeno temperaturo, preide med ogrevanjem vmesne temperature, pri katerih se toplo založeni ogrevanci šele začnejo ogrevati. Ogrevanje toplo založenih ogrevancev se začne v neki točki RKO hladnega zalaganja po preostanku hladne RKO do končne temperature (slika 3.1).

Toplo zalaganje kot posplošitev hladnega zalaganja v sebi skriva dve omejitvi:

- Neenakost začetnega temperaturnega polja toplo založenih slabov s temperaturnim poljem hladno založenih slabov ob prehodu temperature toplega zalaganja
- Groba delitev peči na posamezne cone ne omogoča zagotoviti robnih pogojev ogrevanja, kakršne bi potrebovali za doseg ponovitve zadnje $\approx 2/3$ krivulje ogrevanja toplo založenih slabov.

Zaradi navedenih dveh omejitev v realnih pečeh ni možno izvesti ogrevanja toplo založenih slabov v času, določenem s preostankom hladne RKO. Čas t_{T_0} po sliki 3.1 pomnožimo s k po tabeli 3.2. Z dobljenim časom $t_{T_0}^* = k \cdot t_{T_0}$ izračunamo čas ogrevanja za toplo založen slab. Podatki v tabeli 3.2 so dobljeni eksperimentalno.

Določitev RKO toplo založenih slabov pa je naslednja. Uporabimo sistem vodenja, kot je

Tabela 3.2: Tabela multiplikacijskih faktorjev skrajšanja časa v peči za toplo založene slabe

Območje $T_0 / ^\circ\text{C}$	k
$T_0 \leq 200$	0,74
$200 < T_0 \leq 300$	0,58
$300 < T_0 \leq 400$	0,54
$400 < T_0 \leq 500$	0,48
$500 < T_0 \leq 600$	0,42
$600 < T_0 \leq 700$	0,38
$700 < T_0 \leq 800$	0,35

opisan v poglavjih 4, 5 in 6, za RKO pa vzamemo hladno RKO, ki pa je skrajšana na izračunan čas ogrevanja $t_{T_0}^*$ iz začetne strani. Čas ogrevanja toplo založenih slabov izračunamo kot $t_{N,T_0} = t_N - t_{T_0}^*$. Hitrost pomika določimo tako, da slabi pridejo skozi peč v času t_{N,T_0} , ki je $v_{R,T_0} = l_p / t_{N,T_0}$. Pri regulaciji in določanju napake so uporabljene drugačne funkcije združevanja, interval pomika pa je določen brez dodatka zaradi zakasnitev (enačba 6.1), torej le:

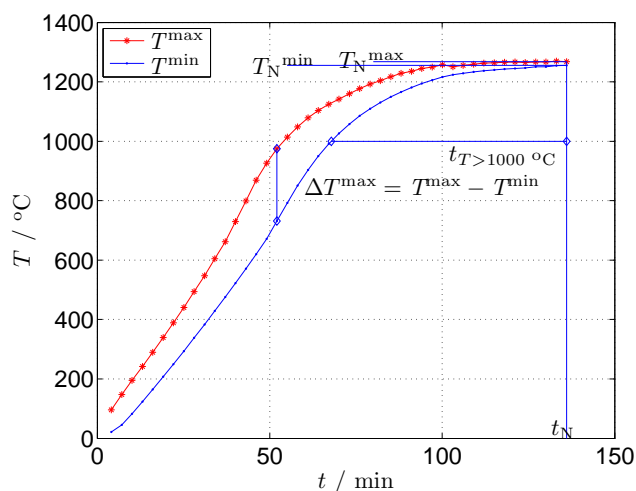
$$t_{R,PP} = \frac{d_N}{v_{R,z}} \quad (3.2)$$

pri čemer je $v_{R,z}$ enaka v_{R,T_0} , ker za potrebe določanja RKO zalagamo slabe enakih dimenzij z enako začetno temperaturo.

Zaženemo torej simulacijo vodenja za dan tip založitve, pomikanje prilagodimo topli založitvi, uporabimo le del hladne RKO in pustimo regulacijo, da stabilizira ogrevanje po modificirani RKO. Sedaj identično kot za hladno založitev preberemo časovni potek ogrevanja nekega slaba in ga shranimo v bazo RKO za ta tip založitve. RKO, dobljena na tak način, je torej prilagojena za izbrano peč.

Ker je RKO dobljena kot rezultat regulacije, to vnese precej težav v avtomatizacijo določanja RKO toplo založenih slabov. Problem je zagotavljanje stabilnosti regulacije in preseganje mejnih vrednosti conskih temperatur peči, ki so zelo tesno povezane s časi ogrevanja. Tabela 3.2 je bila določena na osnovi doseganja RKO s temperaturami con pod mejnimi vrednostmi za dano vrsto jekla. Da je regulacija delovala stabilno, so bili parametri regulatorja nastavljeni tako, da je bil zaprtozančni odziv močno dušen. Temu primerno smo podaljšali čase simulacije, da se je odziv temperature slabov stabiliziral.

Omenimo naj, da je za primer potisne peči v ACRONI, d. o. o., bilo potrebno izračunati RKO za pribl. 500 tipov založitve za toplo valjane trakove in še približno toliko za debelo pločevino. Za izračun RKO za toplo valjane trakove potrebuje zmogljiv osebni računalnik tri tedne časa, če model izračunava temperaturna polja pri diskretizaciji, kakršno uporablja v 'on-line'-delovanju v proizvodnji. Izračun je možno enostavno paralelizirati in s tem pohitriti.



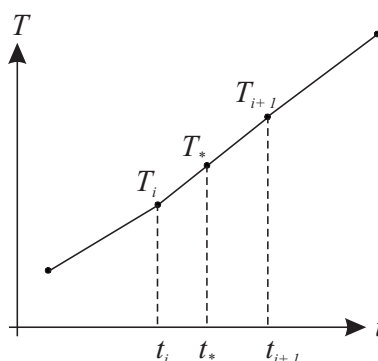
Slika 3.2: Značilni parametri RKO

3.2 Značilni parametri referenčne krivulje ogrevanja

Poglejmo si primer dveh referenčnih krivulj ogrevanja RKO, podanih na sliki 3.2, ki prikazuje časovno odvisnost razvoja temperature jekla. Splošno nas pri RKO zanimajo naslednji parametri:

1. Prvi značilen parameter RKO je čas ogrevanja t_N . Pri obravnani potisni peči so ti časi od 2 h do 4 h. Čas ogrevanja in hitrost pomikanja slaba skozi peč v sta povezana preko dolžine peči l_p z enačbo $t_N = l_p/v$.
2. Naslednji parameter je končna vrednost temperaturne karakteristike - npr. T_N^{\max} , T_N^{mean} ali T_N^{\min} , kot je prikazano na sliki 3.2. S stališča nadaljnje vroče predelave je to najbolj pomemben parameter ogretosti jekla poleg homogenosti temperature na koncu ogrevanja. Končne vrednosti temperatur so med 1150 °C in 1300 °C.
3. Mera homogenosti temperature ogrevanca, ki se zdi najbolj uporabna je vrednost razlike med T_N^{\max} in T_N^{\min} . Sprejemljive vrednosti te karakteristike se gibljejo med 10 °C in 40 °C.
4. Za nekatere vrste jekel je pomembna maksimalna vrednost temperaturne razlike med ogrevanjem ΔT^{\max} .
5. Pri nekaterih vrstah jekla je treba zagotoviti, da je material ogret na določeno temperaturo neki minimalni čas. Ta parameter ogrevne krivulje se najpogosteje uporablja pri žarilnih pečeh. V potisni peči, kjer gre za ogrevno peč, tega parametra pri sedanjih vrstah jekel ni treba upoštevati. Na sliki 3.2 je prikazan primer časa ogretosti nad 1000 °C, $t_{T > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}}$.

Z RKO opišemo vse prej naštet parametre in s sledenjem RKO tako posredno upoštevamo vse naštet parametre.



Slika 3.3: Linearna interpolacija RKO

3.3 Diskretizacija in interpolacija RKO

Vrednosti RKO so zapisane v podatkovni zbirki kot časovne krivulje temperature materiala, pri čemer je ta temperatura vzorčena pred vsakim pomikom. Pri dolžini peči 25 m in širini slabov 1 m je to 25 vzorcev vrednosti temperature, kar je premalo in v regulaciji povzroča motnje. Finejšo diskretizacijo dobimo z gostejšim vzorčenjem¹ ali pa z ožjimi slabi, npr. 0,5m, kakršne smo uporabili pri računanju RKO iz predpisov o ogrevanju in so tudi prikazani na sliki 3.2. Seveda je treba pri tem interval pomika prilagoditi tako, da se slabi gibljejo z nespremenjeno hitrostjo. S tem dobimo večje število vzorcev.

Da bi dosegli bolj gladek potek RKO, linearno interpoliramo vrednosti temperatur na RKO med najbližjima vrednostima. Interpolirano vrednost temperature izračunamo po naslednji enačbi

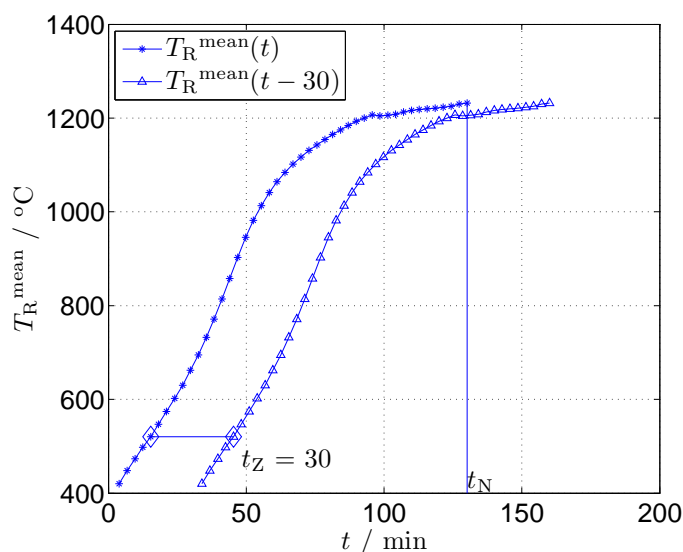
$$T_* = \frac{T_{i+1} - T_i}{t_{i+1} - t_i}(t_* - t_i) + T_i \quad (3.3)$$

pri čemer so T_i, T_{i+1}, t_i in t_{i+1} podatki iz RKO, iščemo pa interpolirano vrednost T_* pri podanem času t_* . Interpolacija se uporabi pri primerjavi RKO s KO. Pri podanem paru $(t_*, T_*)_{KO}$ iz KO poiščemo z interpolacijo za podan t_* iz KO temperaturo T_* na RKO.

3.4 Zastoji ogrevanja v peči in RKO

V tem podpoglavju predstavljamo koncept premikanja RKO med različnimi vrstami zastojev in naredimo sistematično razdelitev zastojev. Z ukrepom premikanja RKO želimo doseči, da se ogrevanje vsakega slaba po predpisani RKO konča ravno takrat, ko pride do izhoda iz peči in so tudi naprave za vročo preoblikovanje pripravljene za začetek predelave. S tem skušamo zagotoviti, da je material kar najkrajši čas na končni temperaturi. S skrajševanjem časov, ko je jeklo na visokih temperaturah, pričakujemo največje prihranke pri škakanju jekla, globini razogljichenja in porabi energentov za ogrevanje.

¹Vzočenje več kot enkrat na pomik vložka



Slika 3.4: Premaknitev RKO za 30 min

3.4.1 Princip premikanja RKO

Način zalaganja slabov v potisno peč ne omogoča izpuščanja praznih mest, kar je mogoče npr. pri koračnih ali krožnih pečeh. RKO opazovanega slaba želimo premakniti v desno (prihodnost) za toliko časa, da bo ogrevanje po RKO končano ravno takrat, ko bodo vsi slabi pred opazovanim že ogreti in že vroče preoblikovani. S tem se bosta trenutek konca ogrevanja slaba in trenutek razložitve slaba iz peči sovpadla. Povedano z drugimi besedami, z začetkom ogrevanja slaba odlašamo tako dolgo, da je po pričetku njegovega ogrevanja ravno še t_N časa do izstopa iz peči. Med ogrevanjem pa referenčne vrednosti regulatorjev conskih temperatur prvega nivoja poskušamo nastavljeni tako, da bodo dejanske vrednosti temperatur opazovanega in preostalih slabov v coni čim bližje RKO.

Za doseganje ustreznih časov pomika slabov v peči je treba izračun premikanja RKO povezati z določanjem periode pomika peči t_{pp} . Kot bo podrobno prikazano v poglavju 6, se referenčni interval polnjenja/praznjenja peči izračuna v dveh delih, pri čemer je v prvem delu zajet prispevek normalnega obratovanja, v drugem pa prispevek različnih vrst zastojev k intervalu polnjenja/praznjenja peči. Ta del je tesno povezan z določanjem premaknitve RKO. Zato bo izračun obeh delov predstavljen skupaj v podpoglavjih 3.4.4 in 3.4.5.

Izračun premaknitve RKO v odvisnosti od različnih vrst zastojev je zapleten. Čas premaknitve RKO za slab i označimo s $t_{Z,i}$. Dolžina premaknitve je odvisna od številnih dejavnikov: od sinhronizacije ogrevanja z vročo predelavo, različnih časov ogrevanja ogrevancev v peči, števila peči, različnih širin slabov, vrste zastojev (predvideni, nepredvideni). Za nekatere vrste zastojev niti ne vemo, kako dolgo bodo trajali. Sistematična določitev časa premaknitve RKO v odvisnosti od različnih dogodkov bo obravnavana v naslednjih dveh podpoglavjih.

Premikanje RKO omogoča zaprtozračno vodenje ogrevanja vložka med različni dogodki, ki povzročajo zastoje pri ogrevanju. Ima pa tudi slabosti. Največja slabost, boljše past, premikanja RKO je v tem, da so robni pogoji ogrevanja slabov poleg nastavitve referenčnih temperatur po

conah lahko precej odvisni tudi od same pozicije v peči.

Na nekaterih pozicijah v peči se vložek hitreje ogreva kot na drugih. Sevanje sosednjih ploskev na opazovano ploskev ogrevanca je različno pri različnih legah vložka v peči. Poleg tega so posamezne cone konstrukcijsko zelo različne med seboj: dvostransko / enostransko ogrevanje, različne višine in oblike stropov.

3.4.2 Tabela zastojev

Zastoje v peči in okoliških procesih razdelimo na način, kjer lahko vpliv vsakega določimo neodvisno od drugih vrst zastojev. Želimo zgraditi ustrezno podatkovno strukturo, kjer bomo lahko vnašali vplive posameznih vrst zastojev na premaknitev RKO (t_Z) in podaljšanja periode pomika (t_{ppp}). Razdelitev zastojev z označbami vplivov je naslednja:

- Zastoji z znanim trajanjem
 - Nepredvideni zastoji - $t_{Z,n}$, $t_{ppp,n}$
 - Predvideni zastoji - $t_{Z,pr}$, $t_{ppp,pr}$
 - Zastoji zaradi omejenih kapacitet naprav vroče predelave in različnih širin slabov - $t_{Z,s}$, $t_{ppp,s}$
 - Zastoji zaradi različnih časov ogrevanja t_N in posledično različnih hitrosti gibanja skozi peč - $t_{Z,dv}$, $t_{ppp,dv}$
- Zastoji z neznanim trajanjem - $t_{Z,nt}$, $t_{Z,ntv}$
 - Krajši odmiki t_{pp} od referenčnega intervala polnjenja/praznjenja $t_{R,pp}$
 - Daljši zastoji z nenapovedljivim trajanjem

Oba zastoja z neznanim trajanjem se obravnavata na enak način, čeprav je njihov vzrok različen. Imenujmo vsakega od zgornjih zastojev *vrsta zastoja*. Gornja delitev zastojev omogoča določitev časa premaknitve RKO in podaljšanja intervala polnjenja/praznjenja peči za vsako *vrsto zastoja* posebej, neodvisno med seboj. S tem pridobimo možnost poljubnega kombiniranja posameznih vrst zastojev med seboj z enako natančnostjo kot vsako vrsto zastoja posebej. V industrijski praksi se zastoji večinoma pojavljajo kot kombinacija več vrst prej naštetih zastojev.

Prispevke posameznih vrst zastojev k celotni vrednosti premaknitve RKO zapišemo posebej v tabelo premikov RKO, kot je prikazano v tabeli 3.3. Na podoben način zapišemo prispevke vseh vrst zastojev k celotni vrednosti zastoja v tabelo 3.4.

Za vsak slab, založen v peči, je predvidena ena vrstica v tabeli zastojev 3.4 in tabeli premaknitev RKO 3.3. Neničelna vrednost v tabeli 3.3 pomeni premaknitev RKO, v tabeli 3.4 pa podaljšanje intervala pomika slaba. Obe tabeli imata zato enako število vrstic, ki se dinamično spreminja s spreminjanjem števila založenih slabov.

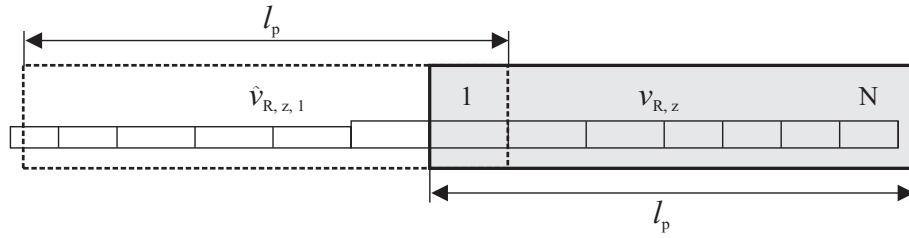
Celoten čas premaknitve RKO slaba i je podan kot vsota prispevkov $t_{Z,i} = t_{Z,n,i} + t_{Z,pr,i} + t_{Z,s,i} + t_{Z,dv,i} + t_{Z,nt,i} + t_{Z,ntv,i}$ posameznih vrst zastojev. Vrednost $t_{Z,i}$ pomeni premaknitev RKO slaba i med ogrevanjem in se v splošnem spremeni ob vsaki regulacijski iteraciji.

i	$t_{Z,n}$	$t_{Z,pr}$	$t_{Z,s}$	$t_{Z,dv}$	$t_{Z,nt}$	$t_{Z,ntv}$	t_Z
N	20	0					
N - 1	20	0					
N - 2	20	0					
N - 3	20	0					
\vdots	\vdots	\vdots					
4	20	0					
3	20	30					
2	20	30					
1	20	30					

Tabela 3.3: Tabela premaknitev RKO

i	$t_{ppp,n}$	$t_{ppp,p}$	$t_{ppp,s}$	$t_{ppp,dv}$	t_{ppp}
N	20	0			
N - 1	0	0			
N - 2	0	0			
N - 3	0	0			
\vdots	\vdots	\vdots			
4	0	0			
3	0	30			
2	0	0			
1	0	0			

Tabela 3.4: Tabela zastojev



Slika 3.5: Za napoved združene referenčne hitrosti pomikanja slabov skozi peč moramo poznati RKO slabov ene dolžine peči l_p vnaprej.

Izračun podaljšanja periode pomika za slab i je $t_{ppp,i} = \max(t_{ppp,n,i}, t_{ppp,pr,i}, t_{ppp,s,i}, t_{ppp,dv,i})$. Podaljšanje za slab $i = N$ pomeni podaljšanje intervala pomika za slab, ki gre prvi ven iz peči. Za slab $i = N - 1$ je $t_{ppp,i=N-1}$ vrednost podaljšanja intervala pomika, ko bo ta slab na zadnji poziciji. Podobno za vse slabe in $t_{ppp,i=1}$ pomeni podaljšanje interval pomika, ko bo slab, ki je komaj prišel v peč in je trenutno na prvi poziciji, prišel na končno pozicijo.

Tabela 3.4 in 3.3 sta izvedeni v podatkovni zbirki. V naslednjih podpoglavjih bo podroben opis načina določanja vrednosti v tabelah 3.3 in 3.4.

3.4.3 Referenčne hitrosti gibanja slabov skozi peč

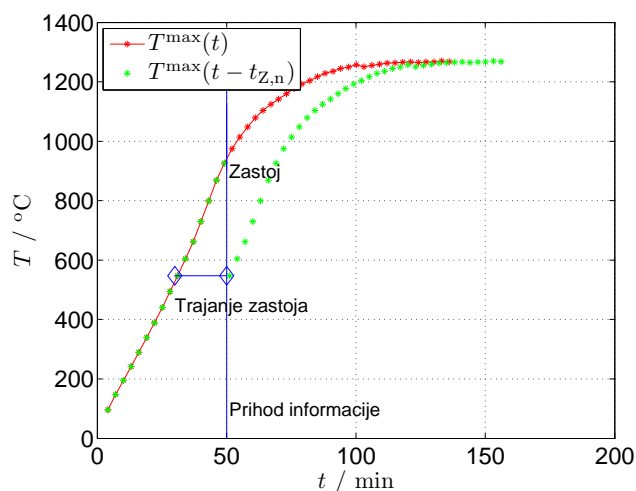
Splošno ima vsaka RKO različen čas ogrevanja t_N . Pri podani dolžini peči l_p in želenem času ogrevanja t_N lahko izračunamo hitrost pomikanja slaba skozi peč $v_R = l_p/t_N$, ki jo imenujmo referenčna hitrost. Če ima neka RKO daljši čas ogrevanja, moramo slab s takšno RKO potiskati z manjšo hitrostjo, za krajše čase ogrevanja pa z večjo.

Ko potiskamo slabe skozi peč, imajo vsi **enako hitrost pomikanja**. Čas ogrevanja $t_{N,i}$ in z njim referenčna hitrost pomikanja $v_{R,i} = l_p/t_{N,i}$ pa je v splošnem za vsak slab različna. To vodi v konflikt z različnimi zahtevami. Imamo množico slabov, od katerih vsak na splošno lahko zahteva različno hitrost pomikanja skozi peč. Vendar skozi peč gredo lahko vsi slabi le z eno, enako hitrostjo. Vprašanje je, katero hitrost izbrati!

Jekla želimo ogrevati dosledno po krivuljah ogrevanja in zato moramo vsakemu slabu v peči zagotoviti dovolj časa za ogrevanje, skladno z RKO. Dovolj dolg čas zadrževanja v peči za vsak slab dobimo, če jih skozi peč potiskamo vedno s hitrostjo, enako najmanjši referenčni hitrosti vseh slabov, založenih v peč. Imenujmo hitrost pomikanja slabov skozi peč, ki je **minimalna** vrednost referenčnih hitrosti posameznih slabov trenutno v peči, *združena referenčna hitrost* $v_{R,z} = \min_i \{v_{R,i}\}; i \in [1, N]$. Identičen način združevanja navaja tudi Hollander [5].

V nadaljevanju nas bo zanimala napoved *združene referenčne hitrosti* peči v prihodnosti za čas, ko bo slab, ki je sedaj na poziciji i , došel na zadnje mesto $i = N$. Označimo takšno napoved z $\hat{v}_{R,z,i}$. Za napoved vrednosti združene referenčne hitrosti moramo vedeti, kakšne referenčne hitrosti bodo imeli slabi v peči, ko bo i -ti slab prišel na zadnje mesto.

Poznati moramo RKO slabov, ki bodo prihajali v peč. Za napoved *združene referenčne hitrosti* trenutno prvega slaba v peči $\hat{v}_{R,z,1}$ moramo poznati RKO celotne dolžine peči slabov za tistim, ki je trenutno na prvi poziciji $i = 1$ (slika 3.5). Pri nekaterih pečeh je ta podatek znan, včasih



Slika 3.6: Premaknitev RKO za 20 min ob nepredvidenem zastoju. Informacija o tem pride sočasno z zastojem.

poznamo samo del založitve peči vnaprej.

3.4.4 Zastoji z znanim trajanjem

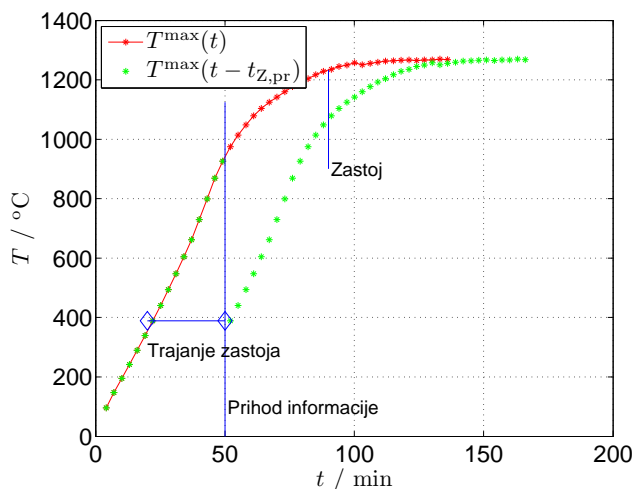
V tem podpoglavju obravnavamo zastoj, katerih trajanje poznamo. Za nekatere od teh vemo vnaprej, da se bodo zgodili, kdaj se bodo zgodili in kako dolgo bodo trajali. Te informacije o dogajanju v prihodnosti s pridom izkoristimo. Za zastoj, ki pa se zgodijo, a niso bili predvideni, odreagiramo v trenutku zastoja. Sledi prikaz izračuna časovne premaknitve RKO za posamezne vrste zastojev z znanim trajanjem.

Nepredvideni zastoji

Pri zastojih z znanim trajanjem, v trenutku, ko pride do zastoja, že poznamo njegovo trajanje. Takoj ko pride informacija o nepredvidenem zastoju, za dolžino zastoja zamaknemo RKO vsem slabom, kot prikazuje slika 3.6. Pri zastoju so udeleženi vsi slabi, ki so založeni v peči. V tabelo premaknitev RKO 3.3 vpišemo pri vseh slabih enak prispevek, ki je enak trajanju zastoja in sicer v stolpec nepredvidenih zastojev, npr. $t_{Z,n} = 20$ min. Enako vrednost vpišemo tudi v tabelo 3.4 za podaljšanje intervala pomika slabu, ki gre ob pomiku iz peči $t_{ppp,n,N} = 20$.

Med ogrevanjem posameznega slaba v splošnem nastane več kot en nepredvideni zastoj. Način vpisovanja v tabeli 3.3 in 3.4 omogoča sočasno obravnavo večih² nepredvidenih zastojev. Trajanje zastoja je zunanji podatek, ki ga je potrebno vnesti v sistem.

²Način vpisa v tabeli omogoča sočasno obravnavo poljubnega števila nepredvidenih zastojev



Slika 3.7: Premaknitev RKO za 30m in ob predvidenem zastoju

Predvideni zastoji

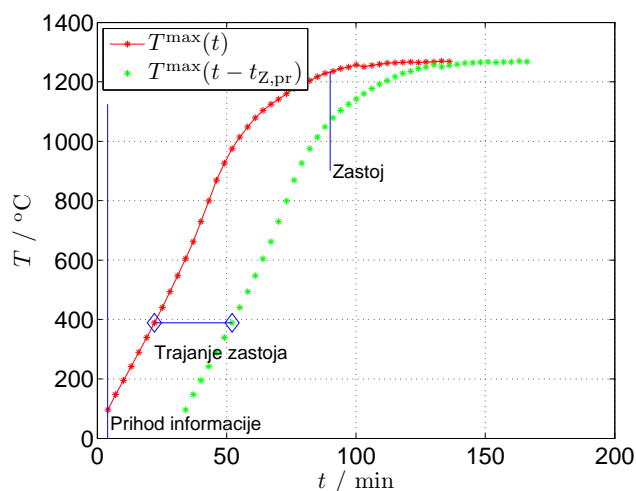
O predvidenih zastojih govorimo, kadar so napovedani vnaprej. Informacijo o zastoju in njegovem trajanju dobimo pred samim zastojem, kot je prikazano na sliki 3.7.

Napovedane zastoje povzročajo predvidljivi dogodke v proizvodnji: menjava orodij (valjev), proizvodnega programa, vzdrževalna dela itd., in zato napoved³ zastoja vežemo na dogodek, ko neki slab pride do konca peči, tik pred razložitvijo. Imenujmo ga slab *slab zastoja*. Po dolžini časa napovedi pred zastojem lahko ločimo tiste, o katerih dobimo informacijo o zastoju, ko je slab zastoja že v peči (slika 3.7) ali pa še ni (slika 3.8). Obravnava obeh vrst zastojev je enaka. Prednost zadnjega je v tem, da imamo informacijo o zastoju na voljo pred začetkom ogrevanja in ogrevanje začnemo kasneje, medtem ko pri prvem informacijo o zastoju zvezmo kasneje, ko se je *slab zastoja* že začel ogrevati, a še vedno pred samim zastojem.

V tabelo predvidene zastoje vpišemo na naslednji način: Premaknitev RKO naredimo za vse slabe, založene v peči, ki so za *slabom zastoja*, vključno z njim (tabela 3.3). Denimo da je slab $i = 3$ *slab zastoja* in da je zanj napovedan zastoj 30 min. Slabi $i = 3, 2, 1$ dobijo vrednosti $t_{Z,pr,i} = 30$. Podaljšanje intervala pomika je eno samo, in sicer ob *slabu zastoja*, zato v to vrstico tabele 3.4 vpišemo $t_{ppp,pr,3} = 30$.

Tudi pri tej vrsti zastoja na splošno nastane več kot en zastoj med ogrevanjem slaba, zato je vpis v tabelah 3.3 in 3.4 izveden tako, da omogoča obravnavo poljubnega števila nepredvidenih zastojev. Trajanje zastoja je zunanji podatek, ki ga je treba vnesti v sistem.

³Napoved trenutka nastopa zastoja



Slika 3.8: RKO za predvideni zastoj 30 min, za katerega je informacija na voljo pred vstopom slaba v peč

Zastoji zaradi omejitve kapacitet ogrodivj za vročo predelavo in različnih širin vložka

V tem podpoglavju obravnavamo dva na videz povsem nepovezana vzroka za zastoje. Zapišimo pričakovano periodo pomika slaba i

$$t_{pp,i} = d_i / \hat{v}_{R,z,i}. \quad (3.4)$$

Zapisana je kot kvocient širine slaba d_i in napovedi združene referenčne hitrosti $\hat{v}_{R,z,i}$.

Predpostavimo, da poznamo čas vroče predelave vsakega posameznega slaba po izstopu iz peči in ga označimo s $t_{VP,i}$. Ocene časov vroče predelave so navadno znane iz statistike proizvodnih podatkov za pretekla obdobja. Proizvodni podatki časov vroče predelave imajo neki raztros. Vprašanje je, kakšno oceno časa vroče predelave je ugodneje podajati: npr. srednjo vrednost, maksimalno, minimalno. V primerih, ko upoštevamo maksimalno oceno časa vroče predelave, mora le-ta čakati na konec ogrevanja, četudi konča prej. Za vodenje je tako ugodneje podajati minimalno oceno, razlika od minimalne pa se upošteva kot zastoj z neznanim trajanjem, kar je opisano v 3.4.5.

Zapišimo razliko:

$$t_{s,i} = t_{VP,i+1} - t_{pp,i} \quad (3.5)$$

Prvi člen $t_{VP,i+1}$ je ocena časa vroče predelave za slab $i + 1$, drugi člen $t_{pp,i}$ pa je pričakovana perioda pomika slaba i . Kjer je $t_{s,i}$ negativen, je ozko grlo ogrevanje v peči, nasprotno pa so ozko grlo naprave za vročo predelavo. V zadnjem primeru je treba izvesti premaknitev RKO, s čimer kompenziramo presežek kapacitet potisne peči.

Čas premaknitve RKO izračunamo kot vsoto pretečenega in preostalega časa: $t_{Z,s,i} = t_{Z,s,PT,i} + t_{Z,s,PO,i}$.

Pretečen čas premaknitve RKO se izračuna enkrat na cikel polnjenja/praznjenja peči, ob pomiku.

Ob vsakem ciklu se nova vrednost pretečenega časa iterativno izračuna na naslednji način:

$$t_{Z,s,PT,i}^{(j+1)} = t_{Z,s,PT,i}^{(j)} + t_{s,N} \quad (3.6)$$

Pri tem je $t_{s,N}$ zakasnitev, ki jo v vsakem ciklu prispeva zadnji slab. V enačbi 3.6 upoštevajo se upoštevajo samo pozitivne vrednosti $t_{s,N} > 0$.

Preostal čas zakasnitve zaradi omejenih kapacitet naprav za vročo predelavo in zaradi različnih širin založenih slabov za poljuben slab k v peči zapišemo kot:

$$t_{Z,s,PO,k} = \sum_{i=k}^N t_{s,i} \quad (3.7)$$

Členi $t_{s,i}$ vsote v gornji enačbi so določeni z enačbama 3.4 in 3.5, pri čemer v vsoti upoštevamo samo pozitivne $t_{s,i} > 0$ člene. Vrednosti izračunamo za vse $1 \leq k \leq N$, in jih vpišemo v stolpec $t_{Z,s}$ tabele premaknitev RKO 3.3.

Poglejmo še vpliv te vrste zastojev na podaljšanje periode pomika. Če je ozko grlo peč, potem le-ta obratuje pri hitrostih, kakršne določajo RKO in je $t_{ppp,s,i} = 0$. Če pa so ozko grlo stroji vroče predelave, potem se za izračunano razliko časov (3.5), ki je v tem primeru pozitivna, podaljša tudi perioda pomika peči

$$t_{ppp,s,i} = t_{s,i}. \quad (3.8)$$

Podaljšanje pomika se vpiše v tabelo zastojev 3.4.

Ta *tip zastojev* v odvisnosti od dolžine napovedi *združene referenčne hitrosti* $\hat{v}_{R,z,i}$ spada med nenapovedane oziroma napovedane zastoje z različnim časom napovedi. Če poznamo RKO in s tem referenčne hitrosti samo za slabe, ki so že v peči, potem se ta *tip zastojev* obravnava kot nenapovedani zastoj. Če poznamo RKO enega slaba pred pečjo, je napoved zastoja podana vnaprej za periodo pomika enega slaba, če poznamo RKO dveh slabov pred pečjo, potem je napoved zastoja podana vnaprej za čas dveh period pomika slabov, itd. Teoretično je najugodnejše poznati RKO ene dolžine peči slabov pred vstopom v peč, ker se te zakasnitve obravnavajo kot napovedani zastoji, pri čemer je informacija o njegovi zakasnitvi slaba na voljo pred njegovim vstopom v peč (primer RKO na sliki 3.8). Izračun trajanja zastoja pri posameznih slabih je **notranji podatek** sistema, zato se vrednosti zastojev v sistemu **samodejno** generirajo.

Zastoji zaradi različnih referenčnih hitrosti pomikanja materiala skozi peč

Dosledno zagotavljanje ustreznega časa ogrevanja vsem slabom v peči daje v vseh situacijah samo minimalna⁴ funkcija združevanja referenčnih hitrosti $v_{R,z} = \min\{v_{R,i}\}; i \in [1, N]$. V tem podpoglavju bomo določili premaknitve RKO za slabe, ki bodo zaradi gibanja skozi peč z minimalno hitrostjo vseh slabov (združeno referenčno hitrostjo) predolgo v peči. Čas premaknitve RKO izračunamo **kot vsoto pretečenega in preostalega časa** $t_{Z,dv,i} = t_{Z,PT,i} + t_{Z,PO,i}$. Prvi del je trajanje vseh zastojev, ki jih je določen slab doživel med ogrevanjem v peči zaradi različnih referenčnih hitrosti gibanja slabov skozi peč. Preostali čas pa je ocena trajanja zastojev, ki jih bo določen slab še doživel zaradi različnih referenčnih hitrosti.

⁴Vse druge funkcije združevanja v določenih situacijah skrajšujejo čas ogrevanja

Pretečen čas premaknitve RKO se izračuna enkrat na cikel polnjenja/praznjenja peči, ob pomiku. Ob vsakem ciklu se nova vrednost pretečenega časa iterativno izračuna na naslednji način:

$$t_{Z,PT,i}^{(j+1)} = t_{Z,PT,i}^{(j)} + (t_{pp,i} - t_{pp,i}^*) \quad (3.9)$$

pri čemer je $t_{pp,i}^*$ interval pomika slaba i , kakršnega bi imel, če bi se gibal skozi peč v skladu s svojo referenčno hitrostjo $t_{pp,i}^* = d_i/v_{R,i}$. Izračun $t_{pp,i}$ se izvede po enačbi 3.4. Enačbo 3.9 tako lahko zapišemo kot:

$$t_{Z,PT,i}^{(j+1)} = t_{Z,PT,i}^{(j)} + \left(\frac{d_i}{\hat{v}_{R,z,i}} - \frac{d_i}{v_{R,i}} \right) \quad (3.10)$$

Preostali čas premaknitve zaradi različnih referenčnih hitrosti izračunamo kot vsoto razlik po vseh slabih pred opazovanim med pričakovano periodo pomika in tisto, ki bi jo imel slab, če bi se lahko gibal z lastno referenčno hitrostjo:

$$t_{Z,PO,k} = \sum_{i=k}^N (t_{pp,i} - t_{pp,i}^*) \quad (3.11)$$

Če v enačbo 3.11 vnesemo enačbo za pričakovano periodo pomika 3.4 in upoštevamo $t_{pp,i}^* = d_i/v_{R,i}$, dobimo:

$$t_{Z,PO,k} = \sum_{i=k}^N \left(\frac{d_i}{\hat{v}_{R,z,i}} - \frac{d_i}{v_{R,i}} \right). \quad (3.12)$$

Vsota obeh $t_{Z,dv,i} = t_{Z,PT,i} + t_{Z,PO,i}$ pa se vpiše v vrstico i stolpca $t_{Z,dv}$ tabele premaknitev RKO 3.3.

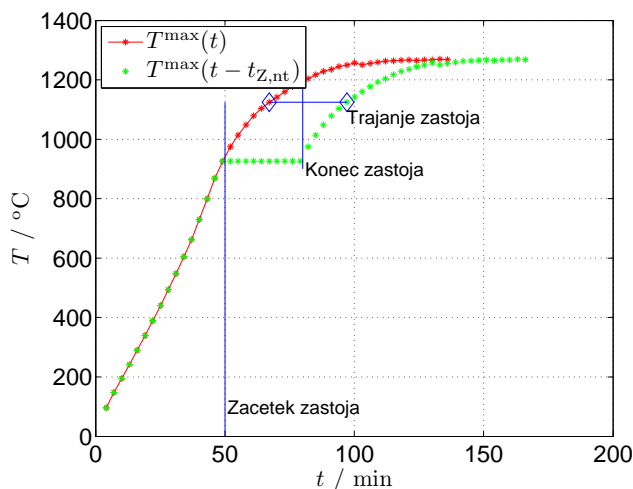
Ta *tip zastojev* v odvisnosti od dolžine napovedi *združene referenčne hitrosti* $\hat{v}_{R,z,i}$ spada v nenapovedan oziroma napovedan zastoj z različnim časom napovedi, enako kot zastoji, obravnavani v prejšnjem podpoglavju.

Podaljšanje periode pomika je za ta *tip zakasnitve* vseskozi⁵ enako 0, zato v tabelo zastojev 3.4 ne vpisujemo nobene vrednosti. Izračun trajanja zastoja pri posameznih slabih je **notranji** podatek, zato se vrednosti zastojev v sistemu **samodejno** generirajo.

3.4.5 Zastoji z neznanim trajanjem

S tem *tipom zastojev* obravnavamo vse zastoje, za katere ne vemo, kako dolgo bodo trajali. V proizvodnji se med odpravljanjem napak pogosto ne ve, kaj je vzrok izpada, in posledično, kako dolgo bo trajalo odpravljanje napake. Drug vir zastojev z neznanim trajanjem pa so krajši odmiki od predvidenega intervala pomika, ko je ocena časa vroče predelave netočna ali pa tudi samo trajanje predvidenih in nepredvidenih zastojev. Ta vrsta zastoja se izračunava kot zadnja, ker tako lahko s to vrsto zastoja upoštevamo odmike od trajanj preostalih vrst zastojev.

Pri tej *vrsti zastojev* uporabimo strategijo 'zamrznitve' RKO, kot je prikazano na sliki 3.9. Ker ne vemo, kdaj se bo zastoj končal, nam ne preostane drugega, kot da stanje (temperatura) slaba v peči ostane nespremenjeno, v kakršnem je bil slab v trenutku, ko se je zastoj začel. Želimo, da slab v tem stanju ostaja, dokler ni konca zastoja. Od tu naprej slab ogrevamo po preostanku



Slika 3.9: Potek RKO ob zastoju z neznanim trajanjem, ki je na koncu trajal skupaj 30 minut.

RKO, ki pa je sedaj premaknjena za čas trajanja zastoja. Poglejmo kako izvedemo vpisovanja premaknitve RKO za ta *tip zastojev* v tabelo premikov RKO. Pri vsaki regulacijski iteraciji preverjamo odmike intervala pomika od referenčna intervala pomika (definiran v poglavju 6):

$$\Delta t_{R,pp} = t_{pp} - t_{R,pp}. \quad (3.13)$$

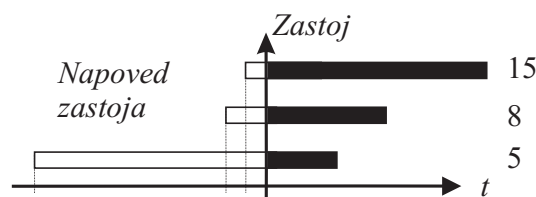
Dokler je $\Delta t_{R,pp} \leq 0$ ne naredimo ničesar, saj sistem deluje v okviru navadnega delovanja. Ko pa $\Delta t_{R,pp} > 0$ naraste preko 0, je interval pomika narasel preko referenčnega in s tem se začne zastoj z neznanim trajanjem. Da bi ustavili ogrevanje in ostali na isti točki RKO, krivuljo premaknemo za vrednost $\Delta t_{R,pp}$ in to vrednost zapišemo v vsaki regulacijski iteraciji (vsakih T_v) vsem slabom v peči v stolpec $t_{Z,ntv}$ tabele premaknitev RKO 3.3. Ta vpis naredimo pri vsaki regulacijski iteraciji z novimi vrednostmi $\Delta t_{R,pp}$, dokler traja zastoj. S tem dosežemo sprotno premikanje RKO vseh slabov v peči. Da omogočimo obravnavo poljubnega števila zastojev z neznanim trajanjem, izvedemo po koncu zastoja naslednje: vrednosti iz stolpca $t_{Z,ntv}$ dodamo starim vrednostim v stolpcu $t_{Z,nt} = t_{Z,nt} + t_{Z,ntv}$ in nato postavimo vrednosti vmesnega stolpca na $t_{Z,ntv,i} = 0$. V stolpcu $t_{Z,ntv}$ tako hranimo vmesne vrednosti trenutnega zastoja z neznanim trajanjem, medtem ko v stolpcu $t_{Z,nt}$ hranimo vsoto premaknitev RKO zaradi teh zastojev na preteklih pozicijah. Trajanje tega zastoja je **notranji** podatek in njegovo vrednost sistem **samodejno** izračunava.

3.4.6 Preprečevanje podvajanja zastojev

V tem pododseku se bomo posvetili problemu ki nastane, ko je za nek trenutek pomika materiala napovedanih več zastojev.

Primer. Imamo napovedan zastoj 20 min za čas, ko bo slab h prišel na zadnje mesto v peči. Pri istem slabu h pa mora biti zastoj zaradi sinhronizacije z valjarskimi ogrodji s trajanjem 2 min. Ker je predviden zastoj daljši od tistega zaradi sinhronizacije, ni treba vpisovati obeh, ampak le daljšega, v tem primeru 20-minutnega.

⁵Podaljšanje periode pomika je nič le pri uporabi min funkcije združevanja referenčnih hitrosti



Slika 3.10: Primer sočasnega nastopa treh zastojev

Takšna podvajanja se lahko zgodijo v kombinacijah naslednjih zastojev: nepredvideni zastoji, predvideni zastoji in zastoji zaradi sinhronizacije z valjarskimi ogrodji.

Pri preostalih dveh vrstah zastojev do podvajanja ne more priti. Zakaj? Pri zastojih zaradi različnih referenčnih hitrosti je podaljševanje intervala pomika vseskozi enako 0 (glej (3.4.4)) in zato do podvajanja zastojev ne more priti. Pri tem tipu zastojev pride do zastojev, če se uporablja drugačne funkcije združevanja hitrosti gibanja slabov skozi peč: *mean*, *max*, Pri zastojih z neznanim trajanjem ravno tako ne more priti do podvajanja, saj ti obravnavajo situacijo, ko kljub vsem vpisanim ali samodejno generiranim zastojem ne pride do pomika v predvidenem času, torej po izteku vseh zastojev (glej 3.4.5). Zastoji z neznanim trajanjem se torej ne morejo podvajati z drugimi zastoji.

Preprečevanje podvajanja zastojev lahko izvedemo na zelo preprost način. Poglejmo primer na sliki 3.10. Pri istem slabu so napovedani trije zastoji (dolgi 5, 8 in 15 min) in zastoji se tudi izračunajo/vnesejo v tem zaporedju. Prvi zastoj 5 min vpišemo, ker za preostala dva še ne vemo, da se bosta zgodila. Ko pride informacija za zastoj dolžine 8 min, imamo že vpisan 5-minutni zastoj in moramo vpisati le razliko 3 min, ker je drugi daljši. Če bi bil hipotetično drugi zastoj bil 4-minutni, potem ga ne bi bilo treba vpisovati, saj je prvi (5-minutni) daljši. Nazadnje pa pride še do napovedi tretjega zastoja, ki traja 15 minut. Ker je daljši od sedaj najdaljšega, zopet vpišemo le razliko $15 - 8 = 7$ min. S takšnim načinom je skupna dolžina zastoja enaka najdaljšemu zastoju.

Pravilo pri vpisovanju vsakega od treh zastojev, ki se lahko podvajajo je naslednje. Pri vsakem zastoju se vpisuje razlika med izračunano vrednostjo zastoja in do tedaj najdaljšim, vpisanim zastojem in sicer, ko je izračunana vrednost obravnavanega zastoja daljša od do tedaj najdaljšega zastoja, predvidenega za obravnavani trenutek.

3.4.7 Zastoji pri drugih vrstah kontinuirnih peči

V jeklarski industriji se poleg potisne peči za ogrevanje uporabljajo še druge vrste peči (glej podpoglavje 1.2). Poglejmo te peči še s stališča zastojev in menjav *tipov založitve*.

Vse vrste peči, razen potisnih, omogočajo puščanje prostih mest ali presledkov med vložkom v pečnem prostoru. Prednost puščanja prostih mest lahko izkoristimo pri predvidenih zastojih. Do teh pride ob napovedanih ustavitvah, ob menjavah *vrste založitve* (različni časi ogrevanja in posledično različne referenčne hitrosti). V takšnih primerih pustimo v peči namesto časovne premaknitve RKO za t_Z velik presledek oziroma prazna mesta. Dolžine presledkov l_Z izračunamo preprosto iz referenčnih hitrosti in časa trajanja zastoja po enačbi $l_Z = v_R \cdot t_Z$.

Ne glede na vrsto kontinuirne peči pa pri nepredvidenih zastojih nastane problem predolgega zadrževanja vložka v peči. Pri njih je smiselno uporabiti tehniko premikanja RKO, kot je bila obširno predstavljena v prejšnjih podpoglavjih. S to tehniko kljub daljšemu zadrževanju ogrevancev v peči poskušamo izvesti ogrevanje vložka po RKO, kolikor pač dopušča konstrukcija peči.

4 Določanje napake cone

V tem poglavju bomo določili napake slabov in jih združili v napake con peči. Preslikava napak slabov v napako cone je nujna, ker v posamezni coni peči lahko spreminjamo temperaturo le celotnega ogrewnega prostora cone. S tem izgubimo informacijo o posameznih slabih, ta pa je odvisna od uporabljene funkcije združevanja napak slabov v napako cone. Predstavimo nekaj uporabnih funkcij združevanja.

4.1 Izračun referenčne vrednosti RKO

Vzemimo, da za RKO izberemo krivuljo na osnovi aritmetične srednje temperature slaba, $\tilde{T}_{R,i}^{\text{mean}}(t)$. Zapišimo RKO za poljuben slab i v peči in upoštevajmo časovno premaknitev RKO $t_{Z,i}$

$$\tilde{T}_{R,i}^{\text{mean}}(t - t_{Z,i}); 0 \leq t \leq t_N \quad (4.1)$$

Model nam v vsakem trenutku poleg temperaturnih polj slabov podaja čas ogrevanja slaba v peči, ki ga potrebujemo za določitev točke na RKO. Označimo trenutni čas ogrevanja slaba i v peči s $t_{t,i}$. Za trenutni čas v peči zapišemo točko na izbrani RKO z upoštevanjem 4.1 in uporabo interpolacijske formule 3.3 kot:

$$T_{R,t,i}^{\text{mean}} = \tilde{T}_{R,i}^{\text{mean}}(t_{t,i} - t_{Z,i}) \quad (4.2)$$

4.2 Točka na trenutni krivulji ogrevanja

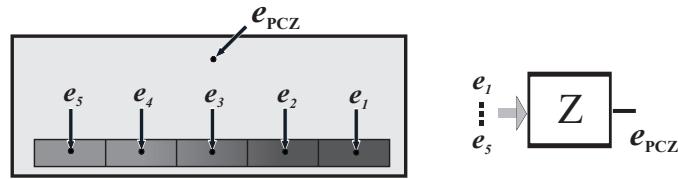
Za izračun trenutnih vrednosti KO uporabimo identične karakteristične funkcije kot za izračun RKO, da lahko primerjamo referenčne vrednosti s trenutno vrednostjo KO. Označimo vrednost KO slaba i v času $t_{t,i}$ kot:

$$T_{t,i}^{\text{mean}} \quad (4.3)$$

4.3 Odmik KO od RKO

Za čas $t_{t,i}$ sedaj lahko zapišemo razliko med referenčno vrednostjo in merjeno vrednostjo (simulirano z matematičnim modelom) za slab i :

$$e_i = e_{t,i}^{\text{mean}} = T_{R,t,i}^{\text{mean}} - T_{t,i}^{\text{mean}} \quad (4.4)$$



Slika 4.1: Združevanje napak slabov v napako cone. Desno je bločna oznaka funkcije združevanja.

Dobimo odmik ali napako slaba i , zanjo v nadaljevanju izpustimo notacijo za trenutni čas ter vrsto RKO oz. KO. Na identičen način določimo napake vseh slabov v peči.

4.4 Združevanje napak ogrevancev v napako cone

Označimo število slabov v coni z M , indeks j naj teče po slabih v coni. Zapišimo vektor napak v PCZ:

$$E_{PCZ} = [e_1, \dots, e_j, \dots, e_M]. \quad (4.5)$$

Napake posameznih ogrevancev v coni združimo v eno samo napako cone e_{PCZ} , ki predstavlja napake vseh slabov v coni, kot je prikazano na sliki 4.1. V bločnih diagramih funkcije združevanja označimo z 'Z' (slika 4.1 desno).

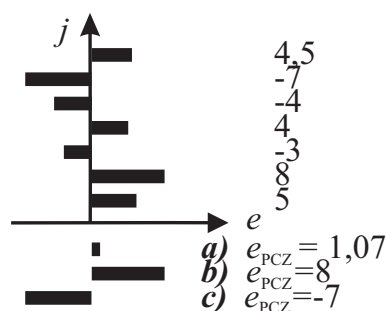
V združevanje napak smo prisiljeni, ker konstrukcija in oprema peči ne omogočata, da bi lahko za vsak slab posebej nastavljali robne pogoje – temperaturo okolice. Pri tem bomo naredili napako, ki bo za nekatere slabe večja, za druge manjša. Velikost napake je odvisna tudi od tega, s kakšno funkcijo združujemo vektor napak E v napako cone e . Poglejmo nekatere funkcije združevanja napak v napako cone.

4.4.1 'Mean'–funkcija združevanja

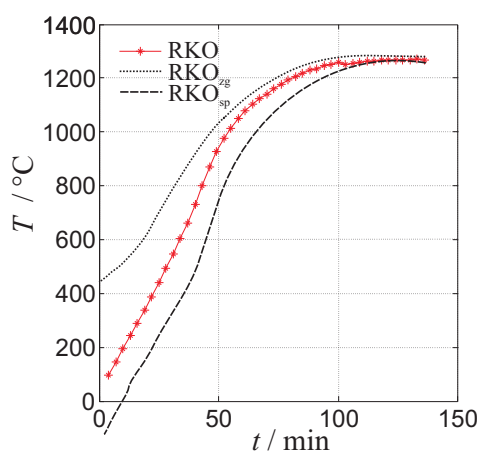
Vektor napak E_{PCZ} združimo v napako cone kot aritmetično srednjo vrednost napak posameznih slabov $e_{PCZ} = \text{mean}_j(E_{PCZ}) = \sum_{j=1}^M e_j / M$. Zgled je podan na sliki 4.2 a. Prednost te funkcije združevanja je, da upošteva vse slabe in da časovni poteki napake e_{PCZ} nimajo večjih skokov.

4.4.2 'Max'–funkcija združevanja

Vektor napak E_{PCZ} združimo v napako cone tako da vzamemo največjo napako izmed slabov $e_{PCZ} = \max_j(E_{PCZ})$. Primer je prikazan na sliki 4.2 b. Časovni potek napake e pri tej funkciji združevanja je nezvezen.



Slika 4.2: Združevanje napak slabov z različnimi funkcijami združevanja v napako cone



Slika 4.3: Lijakasta oblika mejnih vrednosti RKO

4.4.3 'Min'-funkcija združevanja

Ta funkcija vzame najmanjšo vrednost v vektorju napake, ki potem predstavlja celotno cono $e_{PCZ} = \min_j(E_{PCZ})$. Primer je prikazan na sliki 4.2 c). Potek odvoda napake ima podobne skoke kot pri 'Max'-funkciji združevanja. 'Min'- in 'Max'-funkciji sta uporabni predvsem, kadar je treba paziti na mejne vrednosti napak e .

4.4.4 Lijakasta funkcija združevanja – 'funnel'

Poseben način združevanja napak v napako cone je predložil Staalman v več svoji delih [24], [25]. Predlagal je lijakasto (ang. funnel) obliko mejnih vrednosti krivulj ogrevanja, ki je širša na začetku ogrevanja in ožja proti koncu ogrevanja (slika 4.3). Pri načinu združevanja nato loči primere, ko vrednosti KO padejo iz lijaka, in sicer posebej zgoraj in posebej spodaj.

Izračunal je napako slaba in mejni vrednosti lijaka napake kot L_{zg} in L_{sp} . Algoritem je najprej preveril, ali je katerakoli napaka večja od L_{zg} . Če je bila, potem je za vrednost napake vzel največjo vrednost vseh napak e_i in jo prištel povprečni vrednosti napake vseh slabov cone. Če ni bila nobena napaka večja od L_{zg} , potem je pogledal, ali je bila katera manjša od L_{sp} . In

če je bila manjša, potem je upošteval najmanjšo vrednost napake e_i ter jo odštel od povprečne vrednosti napake vseh. Če ni našel nobene napake pod L_{sp} , potem je izračunal povprečno vrednost vseh. Programsko ta pravila zapišemo v sledeči obliki.

```
E=[e_1,e_2,..., e_M];
e_mean=mean(E);
e_max=max(E);
e_min=min(E);
e=0;

if (e_max > L_zg)
    e=e_mean+e_max;
else if (e < L_zg)
    e=e_mean-e_min;
else
    e=e_mean;
```

Ta način izračuna napake cone torej daje prioriteto napakam glede na njihovo vrednost. Prioriteta je naslednja:

1. Napake nad zgornjo mejo lijaka L_{zg} - slab prehladen
2. Napake pod spodnjo mejo lijaka L_{sp} - slab prevroč
3. Napake v lijaku - temperatura slaba v lijaku

Meji L_{zg} in L_{sp} sta značilno širši na začetku ogrevanja in ožji ob koncu. Avtor ni podal izračuna mejnih vrednosti lijaka. Za preskus predloženega načina združevanja mejni vrednosti izračunavamo v odvisnosti od preostalega časa do izstopa slaba i iz peči $t_{PO,i}$ v minutah kot:

$$\begin{aligned} L_{zg,i} &= a \cdot t_{PO,i} + b \\ L_{sp,i} &= a \cdot t_{PO,i} + b \end{aligned} \quad (4.6)$$

z naslednjimi parametri:

- Način združevanja A: $a = 0,75$; $b = 2$
- Način združevanja B: $a = 0,45$; $b = 2$

Meji L_{zg} in L_{sp} sta odvisni od preostalega časa nahajanja slaba v peči in sta torej drugačni za vsak slab. Primerjava rezultatov vodenja z različnimi načini združevanja bo podana v poglavju 7.

4.4.5 Uteženo povprečje kot funkcija združevanja

Poleg Staalmanovega [24] predloga načina združevanja obravnavamo še združevanje z uteženimi povprečji. Splošen izračun uteženega povprečja \bar{e} meritev e_i je:

$$\bar{e} = \frac{\sum w_i e_i}{\sum w_i} \quad (4.7)$$

pri čemer so w_i obtežbe posamezne meritve e_i . Za združevanje napak v napako cone uporabimo več različnih načinov izračuna uteži:

1. Vrednosti uteži izračunamo različno za pozitivne in negativne vrednosti napake slaba. Pri pozitivnih vrednostih napake je utež w_i enaka vrednosti napake, pri negativnih pa so uteži enake 0 (način združevanja C).

```
if (e_i>0)
  w_i=e_i;
else
  w_i=0;
```

2. Naslednji izračun uteži se razlikuje od prejšnjega pri izračunu za negativno vrednost napake, kjer je utež enaka napaki, pomnoženi z izkustvenim faktorjem $q = 0,33$ (način združevanja D).

```
if (e_i>0)
  w_i=e_i;
else
  w_i=q e_i;
```

Parameter $0 \leq q < 1$ manj uteži negativne napake, $q > 1$ pa bolj uteži negativne napake.

4.4.6 Kombinacija uteženega povprečja in lijaka

Kot bomo ugotovili v nadaljevanju pri primerjavi rezultatov vodenja za različne funkcije združevanja, imajo histogrami napak značilne poteke. Obliki histograma uteženega povprečja in 'funnel'-funkciji združevanja imata vsaka svojo prednost, ki jo drugi nimajo, in nasprotno; v nekem smislu sta si histograma komplementarna. Zato poskusimo križanca obeh načinov, imenujmo ga *utežen lijak*. Pri uteženem povprečju načina združevanja D utežimo negativne napake s faktorjem $q = 0,33$ glede na pozitivne napake, ne glede na velikost in odmike.

Splošno se glede na pojavljanje posameznih vrednosti napak slabov pod lijakom, nad lijakom in v njem lahko zgodi osem dogodkov ($2^3 = 8$), pri čemer nekatere od njih utežimo različno. Različno upoštevamo naslednje dogodke: vse napake posameznih slabov v lijaku (1*), samo nekatere napake so nad lijakom in druge pa znotraj (2*), da so nekatere pod lijakom in druge znotraj (3*) in da so napake tako pod kot tudi nad lijakom (4*). Ločeno obravnavamo te štiri kombinacije nahajanja napak pod/nad/v lijaku in za vsako posebej določimo napako cone po formuli uteženega povprečja z izračunom uteži po varianti (D), pri čemer je pri vsaki varianti parameter izračuna q drugačen. Lijak izračunamo s parametroma načina združevanja B; $a = 0,45$, $b = 2$. Vrednosti parametra q so glede na prisotnost napak zunaj/znotraj lijaka izkustveno podane kot sledi. Za način združevanja označimo z E.

```
if (1*)
  (D); q=0.33;
if (2*)
  (D); q=0;
```

```
if (3*)  
  (D);  $\alpha=10$ ;  
if (4*)  
  (D);  $\alpha=0.33$ ;
```

Glede na vse možne kombinacije v/pod/nad lijakom je mogoča še podrobnejša delitev in različno uteževanje napake v posameznih kombinacijah, za kar pa je smiselno in potrebno vpeljati optimizacijo vrednosti uteži.

5 Regulacija temperature v conah peči

V poglavju 4 smo določili napako cone e , ki poskuša kar najbolj premišljeno upoštevati napake vseh slabov v coni. V tem poglavju bomo uporabili napako cone za določanje referenčnih temperatur regulatorjem prvega nivoja, to je referenčnih temperatur con. Spreminjanje teh je vzvod vpliva na ogrevanje vložka. Referenčne vrednosti regulatorjem prvega nivoja določa PID-regulator v kombinaciji s krmiljenjem. Regulacija mora upoštevati omejitve regulirne veličine. Regulacija je enaka za vse cone, izvajanje bo prikazano na primeru PCZ.

5.1 Omejitve procesa

Proces ogrevanja v kontinuirnih pečeh je omejen tako s stališča peči kot tudi s stališča ogrevanega materiala.

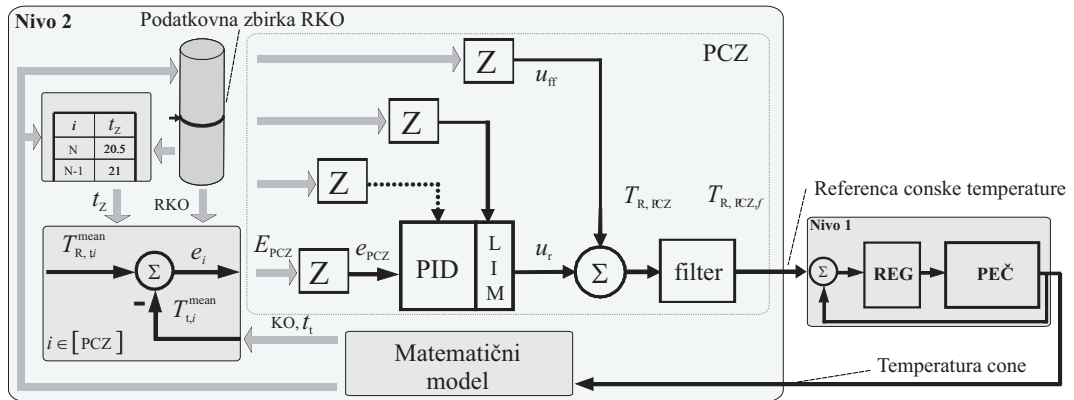
Spreminjanje temperature v peči povzroča termično raztezanje obzidave in njene nosilne konstrukcije. Če so spremembe temperatur dovolj počasne, se dovolj enakomerno segrevajo in s tem preprečujemo termične napetosti v obzidavi, ki bi povzročale poškodbe. Po remontih traja zagon hladne peči približno 2 dni, kar je ≈ 25 °C/h.

Po drugi strani je treba upoštevati temperaturne omejitve ogrevancev, najbolj kritična je maksimalna vrednost temperature ogrevanca in njegove temperaturne diference.

5.1.1 Omejena hitrost spreminjanja (ang. slew-rate) temperature cone

Med normalnim obratovanjem so hitrosti spreminjanja lahko precej večje kot med zagoni in ustavitvami, tehnološki predpis dovoljuje maksimalno hitrost dviganja/spuščanja temperatur con 60 °C/min, vendar maksimalna vrednost temperaturnih razlik med obratovanjem znaša v primeru obravnavane peči 200 °C. Takšna hitrost spreminjanja velja samo med obratovanjem v okolici običajnih obratovnih razmer.

V kontinuirnih pečeh se pojavlja tudi problem, da je temperaturna razlika med sosednjimi conami omejena, ker so cone fizično delno razmejene ali nerazmejene. Razmejenost je odvisna od konstrukcije peči. Regulacija mora tako upoštevati tudi to omejitev. To je treba upoštevati med fazo optimizacije peči RKO, med vodenjem pa lahko naletimo na to omejitev ob zastojih in med prehodnimi pojavi.



Slika 5.1: Shema regulacije temperature materiala v coni

5.1.2 Omejen interval vrednosti temperature cone

Naslednji sklop so omejitve materiala. V poglavju 3.1.7 smo omenjali termične napetosti, ki so implicitno določene že z RKO. Preostanejo še maksimalne temperature materiala. Najvišja temperatura se med običajnim ogrevanjem dosega na površini ogrevancev, vrednost temperature pa je dostopna preko matematičnega modela. Poenostavljeno upoštevanje maksimalne temperature materiala je upoštevanje temperature stene, za vrednost katere skrbi regulator temperature cone nivoja 1. Temperatura stene je med obratovnimi pogoji stalno višja od temperature vložka [11], zato lahko to omejitev upoštevamo na tak takšen način. Z omejevanjem temperature cone material gotovo ostane pod mejno temperaturo.

5.2 PID-regulacija ogrevanja vložka

Regulacijska shema vodenja ogrevanja slabov je podana na sliki 5.1. Struktura regulacije je identične za vse cone, spreminjajo se samo parametri. Regulacije referenčne vrednosti temperature stene je podana za PCZ. Prvi del vsote, ki določa referenčno vrednost temperature cone $T_{R,PCZ}$, je izhod iz PID-regulatorja u_t (slika 5.1).

5.2.1 PID-regulator

Uporabimo diskretno iterativno oblika zapisa regulirne veličine PID-regulatorja [29]:

$$u(k) = u(k-1) + q_0 \cdot e(k) + q_1 \cdot e(k-1) + q_2 \cdot e(k-2) \quad (5.1)$$

Trenutno vrednost regulirne veličine $u(k)$ izračunamo iz prejšnje vrednosti regulirne veličine $u(k-1)$ in linearne kombinacije trenutne napake $e(k)$, napake prejšnje iteracije $e(k-1)$ in napake predprejšnje iteracije $e(k-2)$. Koeficiente izračunamo takole

$$q_0 = K \left(1 + \frac{T_D}{T_V} \right)$$

$$q_1 = -K \left(1 + 2 \frac{T_D}{T_v} - \frac{T_v}{T_I} \right)$$

$$q_2 = K \frac{T_D}{T_v},$$

pri čemer so:

T_v - perioda vzorčenja, regulacijska perioda

K - ojačanje regulatorja

T_I - integrirni čas

T_D - diferencirni čas

Označimo za naše potrebe izhod iz PID-regulatorja z u_r .

Prilagajanje omejitev in parametrov regulatorja tipu založitve

Omejitve temperature con so na splošno za vsak *tip založitve* različne. Ker imamo v izbrani coni večje število slabov M , omejimo pa lahko le temperaturo celotne cone, naletimo na podoben problem združevanja, na kakršnega smo naleteli pri združevanju napak slabov v napako cone, poglavje 4.4. Uporabimo iste funkcije kot tam in pogledjmo, katere so primerne.

Če želimo za vsak ogrevanec dosledno upoštevati temperaturne omejitve, potem za funkcije združevanja mejnih vrednosti uporabimo:

- za maksimalno vrednost - stroga omejitev

$$\bar{T}_{PCZ,max} = [T_{1,max}, \dots, T_{j,max}, \dots, T_{M,max}]$$

$$T_{PCZ,max} = \min(\bar{T}_{PCZ,max})$$

- za minimalno vrednost pa

$$\bar{T}_{PCZ,min} = [T_{1,min}, \dots, T_{j,min}, \dots, T_{M,min}]$$

$$T_{PCZ,min} = \max(\bar{T}_{PCZ,min})$$

Minimalna temperatura ni stroga omejena, v praksi je običajno podana kot varovanje obzidave peči pred previsokim nihanjem temperature.

Parametri PID regulatorja

Parametrov regulatorja za zdaj ne spreminjamo ob vsakem *tipu založitve*, ker so vrednosti razlik med različnimi modeli za isti tip RKO premajhne.

Vrednosti parametrov regulacije, ki jih uporabimo pri primerjavi simulacijskih rezultatov s podatki ročnega vodenja v industriji, so podani v tabeli 5.1. Vrednosti parametrov v tabeli so bile določene s poskušanjem.

Preprečevanje integralskega pobega in omejenost regulirne veličine

Pri računalniški izvedbi je preprečevanje integralskega pobega zelo enostavno, če poznamo spodnjo in zgornjo mejo regulirne veličine. V našem primeru sta spodnja in zgornja meja

odvisni od maksimalne in minimalne dovoljene temperature materiala. Ta podatek je za vsak *tip založitve* poznan. Po shemi 5.1 je celotna vrednost regulirne veličine $T_{R,PCZ}$ vsota regulirnega dela u_r in krmilnega dela u_{ff} . Vrednost krmilnega dela poznamo, zato ob poznanju spodnje $T_{R,PCZ,min}$ in zgornje meje $T_{R,PCZ,max}$ za podan *tip založitve* lahko izračunamo spodnjo in zgornjo mejo regulatorskega dela regulirne veličine.

$$\begin{aligned} u_{r,PCZ,max} &= T_{R,PCZ,max} - u_{ff} \\ u_{r,PCZ,min} &= T_{R,PCZ,min} - u_{ff} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Integralski pobeg preprečimo in omejenost regulirne veličine dosežemo, če izračunano vrednost regulirne veličine (5.1) omejimo v interval, ki ga določa (5.2).

5.3 Krmiljenje ogrevanja vložka

Regulirna veličina $T_{R,PCZ}$ je po shemi 5.1 vsota $u_r + u_{ff}$. S krmilnim delom u_{ff} želimo izboljšati delovanje ob prehodih med različnimi tipi založitev. Poglejmo, kako ga določimo.

Vrednosti temperatur con , ki v stacionarnem delovanju peči za izbran *tip založitve* material ogrejejo po RKO, so shranjene v tabeli RKO in so na voljo za vsak slab. Ker imamo v izbrani coni zopet večje število slabov M , krmilimo pa lahko samo eno vrednost, naletimo na podoben problem združevanja, na kakršnega smo naleteli pri združevanju napak slabov v napako cone, poglavje 4.4. Tako lahko uporabimo enake funkcije združevanja, kot so predstavljene v omejenem poglavju. Za združevanje krmilnih vrednosti temperatur con izberemo 'mean'-funkcijo združevanja, ki ob prehodu dveh materialov z različnima vrednostima krmilne veličine daje linearen prehod med vrednostima. Podrobneje nismo preučevali vpliva funkcije združevanja na učinke vodenja.

Z dodatnim krmiljenjem prehodov med *tipi založitev* razbremenimo zaprtozančno regulacijo.

5.4 Filtriranje conske temperature in omejevanje hitrosti spreminjanja conske temperature

Regulirna veličina $T_{R,PCZ} = u_r + u_k$ je referenčna vrednost regulatorjev prvega nivoja. Ugodneje za stabilnost regulatorjev prvega nivoja je, da je spreminjanje referenčne vrednosti čimbolj zvezno, nenihajoče. Zato signal $T_{R,PCZ}$ filtriramo. Uporabimo filter prvega reda, diskretno realiziran v naslednji obliki:

$$T_{R,PCZ,f}(k) = (1 - b) \cdot T_{R,PCZ}(k) + b \cdot T_{R,PCZ,f}(k - 1) \quad (5.3)$$

Tabela 5.1: Parametri PID regulatorjev temperatur con peči

Parameter	PCZ	PCS	OCZ	OCS	ICL	ICD
K	10,5	10,5	7,8	7,8	1,5	1,5
T_I	600	600	400	400	240	240
T_D	150	150	100	100	60	60

Lastnost filtra prvega reda je, da prepušča nizkofrekvenčni del do mejne frekvence, nad njo pa slabi 20 dB na dekada. S spreminjanjem konstante b spreminjamo mejno frekvenco.

Filtriranje conske temperature je možno nadomestiti z ustreznim načrtovanjem regulatorja. Dodatno filtriranje regulirne veličine za regulatorjem je uvedeno zaradi možnosti omejenega spreminjanja dinamike zaprte zanke s strani operaterjev na peči.

Omejevanje hitrosti spreminjanja (ang. slew rate) regulirne veličine $SR = \Delta T / \Delta t$ izvedemo z omejevanjem diferenc v iteracijah ($\Delta t = T_v$) na mejno vrednost, če diferenca preseže predpisano mejno vrednost $SR = \Delta T / T_v|_{\max} = 60 \text{ }^\circ\text{C/min}$.

5.5 Medsebojna odvisnost temperatur con

Razlike med temperaturami con so omejene. Regulator cone glede na združeno vrednost napake cone spreminja vrednost temperature cone, ne glede na omejitve razlik med conami. Morebiten problem, ki se pri tem lahko pojavi, je v tem, da bi morda integralski del PID regulatorja 2. nivoja „pobegnil“, če bi regulator prvega nivoja ne zmožgel dosežati referenčne vrednosti, ki mu jo predpisuje regulator 2. nivoja. Ker pa ima regulator 2. nivoja vgrajeno zaščito pred integralskim pobegom, ki postane aktivna pri mejnih vrednostih, obstane pri mejnih vrednostih.

Ko pri izvajanju regulacijskih akcij regulatorja sosednjih con 2. nivoja presežeta mejno vrednost razlike temperatur med conama, bosta sicer še povečevala razliko med conama in poskušala ujeti ničelno vrednost napake con, a ju bo omejena razlika med conama onemogočila. Zaščita 2. nivoja pred integralskim pobegom omeji referenčno vrednost 1. nivoja pri mejni vrednosti. Regulacija prvega nivoja tako v teh primerih ne zmora zagotoviti ničelne vrednosti napake in mora zaradi tega imeti vgrajeno zaščito pred integralskim pobegom. Pri takšnem načinu morata torej imeti regulatorja na obeh nivojih zaščito pred integralskim pobegom, temperature pa se samodejno ustalijo na mejnih vrednostih. Prednost takšnega načina je, da ni potrebno poznati mejnih vrednosti razlik med conami.

Obstaja še ena možnost omejevanja in upoštevanja medsebojne odvisnosti temperatur con, pri kateri maksimalne razlike med conami upoštevamo že pri določitvi mejnih vrednosti regulatorja - poglavje 5.2.1. Težko rešljiv problem pri takšnem načinu upoštevanja medsebojne odvisnosti je določitev mejne vrednosti razlike med conami. Ta je odvisna od trenutne porabe goriva vseh predhodnih con, vključno z obema conama, kjer razliko poskušamo upoštevati in od konstrukcije peči. Za določitev mejnih vrednosti je potrebno izvajati poskuse, in sicer pri različnih porabah posameznih con, kar pa je dolgotrajno in drago.

5.6 Sklep

Predstavljen način regulacije temperature vložka upošteva vse vrste zastojev in sinhronizacijo z valjarskimi ogrodji. Za vse napovedane zastoje se RKO premaknejo za čas trajanja zastoja že ob njegovi napovedi. To omogoče zaprtizančno vodenje ogrevanja temperature vložka med zastoji.

6 Krmiljenje periode pomikanja vložka skozi pečni prostor

V poglavju 3 smo predstavili določanje časovne premaknitve RKO t_Z in podaljšanje periode pomika t_{ppp} . Referenčno periodo pomikanja izračunamo kot

$$t_{R,pp} = \frac{d_N}{v_{R,z}} + t_{ppp,N} \quad (6.1)$$

pri čemer je d_N širina zadnjega slaba v peči in $v_{R,z}$ združena referenčna hitrost vseh slabov, ki so trenutno v peči, $t_{ppp,N}$ pa je podaljšanje periode pomika zadnjega slaba N v peči. Določanje *združene referenčne hitrosti* $v_{R,z}$ je podrobneje opisano v poglavju 3.4.3. Prvi del enačbe 6.1 je čas, ki je potreben, da bi se slab skladno z združeno referenčno hitrostjo $v_{R,z}$ premaknil za lastno širino, drugi del pa je dodatek k periodi pomika zaradi vseh *tipov zastojev*.

6.1 Vpliv zastojev z neznanim trajanjem na periodo pomika

V poglavju 3.4.5 je opisan način upoštevanja odmikov intervala pomika t_{pp} od referenčnega intervala pomika $t_{R,pp}$. Z enačbo 6.1 definiran interval pomika upošteva vse znane vplive, s tehniko, opisano v poglavju 3.4.5, pa upoštevamo vse dodatne zastoje in netočnosti trajanj vseh zastojev.

6.2 Potreben pogoj za sinhronizacijo z napravami za vročo predelavo

V tem podpoglavju bomo predstavili potreben pogoj za sinhronizacijo z valjarskimi ogrodji, ki pa ni zadosten. Pogoj nam služi za preverjanje pravilnosti izračuna zakasnitev zaradi sinhronizacije.

V enačbi za izračun referenčne periode pomikanja 6.1 so zajete zmogljivosti valjarskih prog in peči ter vplivi zastojev. Če želimo, da bodo valjarska ogrodja prosta, ko bo ogrevanje zadnjega slaba končano, mora veljati pogoj, da je interval pomika za obravnavan slab enak ali daljši od časa vroče predelave predhodnega slaba na valjarskih ogroddjih $t_{VP,i+1}$. Splošnejši pogoj za sinhronizacijo z napravami za vročo predelavo tudi za preostale slabe pa je neenačba 6.2:

$$\sum_{i=k}^N \left(\frac{d_i}{\hat{v}_{R,z,i}} + t_{ppp,i} \right) \geq \sum_{i=k}^N t_{VP,i+1}. \quad (6.2)$$

Za $k = N$ je izpolnjenost neenačbe potreben pogoj za sinhronizacijo z valjarskimi ogrodji v opazovanem trenutku peči, za $k < N$ pa izpolnjenost enačbe kaže na sinhroniziranost z valjarskimi ogrodji v prihodnosti za čas, ko bo posamezen slab na zadnjem mestu v peči.

V neenačbi 6.2 nastopi enakost, ko sta kapaciteti peči in valjarskih ogrodij izenačeni. Če je ozko grlo proizvodne verige ogrevna peč, velja $(\dots) > (\dots)$. Če pa je ozko grlo valjarska proga, potem zopet velja enakost $(\dots) = (\dots)$ neenačbe 6.2. V tem, zadnjem primeru enakost povzročijo podaljšanja periode pomika t_{ppp} , ki se izračunavajo zaradi kompenzacije presežka kapacitet ogrevne peči.

Ker pogoj ni zadosten, izpolnjenost neenačbe 6.2 še ne pomeni, da je izračun zakasnitev pravi-
len. Če pa neenačba ni izpolnjena, potem je v izračunih zakasnitev zagotovo nekaj narobe.

7 Primerjava rezultatov ročnega vodenja z rezultati avtomatskega vodenja

V tem poglavju bomo naredili primerjavo vodenja med obstoječim ročnim načinom in razvitim sistemom vodenja. Matematični model z ustrezno dodanimi podatkovnimi strukturami hrani podatke o ogrevanja slabov v potisni peči in podatke o založitvah, nastavitvah peči, doseženih vrednostih regulirnih veličin (temperature con, nadtlaka v peči, kisika) ter tudi celotnega poteka ogrevanja. Na voljo imamo vse potrebne podatke, s katerimi lahko izvedemo kasnejšo simulacijo ogrevanja za celotna časovna obdobja, v katerih je model deloval.

Te podatke izkoristimo za izvedbo primerjave med obstoječim načinom vodenja ogrevanja slabov v peči ter razvitim sistemom vodenja za potisno peč.

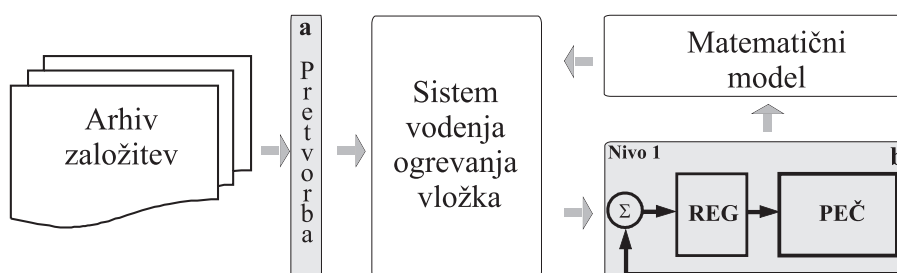
7.1 Simulator potisne peči

Da bi vse potrebne podatke za rekonstrukcijo ogrevanja iz arhivske oblike spravili v obliko, v kakršni matematični model dobiva podatke med 'on-line'-delovanjem, zgradimo za to nalogo prirejen program - simulator, ki je shematsko prikazan na sliki 7.1 .

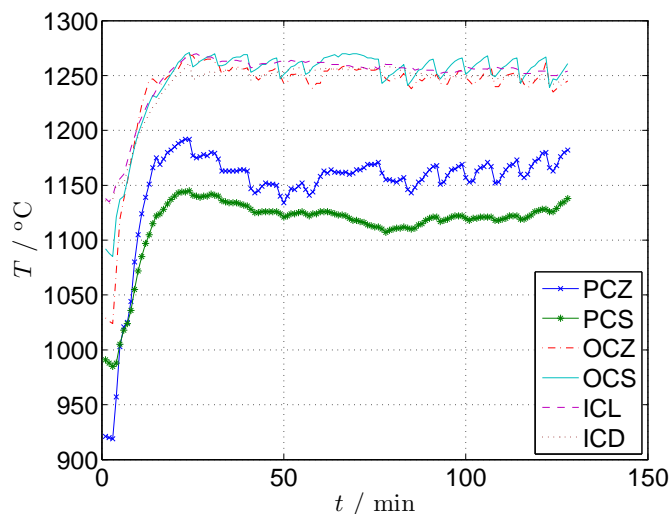
Naloga simulatorja je dvojna:

1. Branje arhiviranih podatkov o založitvah in pomikih vložka ter njihova pretvorba v obliko, kakršno model dobiva med 'on-line'-delovanjem (slika 7.1 a).
2. Simulacija zaprtozančnega obnašanja prvega regulacijskega nivoja (slika 7.1 b).

Prva naloga je enostavna in jo lahko brez vsakršne napake ponovimo, medtem ko drugo nalogo simulatorja, tj. simulacijo zaprtozančnega obnašanja prvega regulacijskega nivoja, ni možno



Slika 7.1: Shema simulatorja potisne peči



Slika 7.2: Zaprtozančni odziv regulacije 1. nivoja na stopničasto motnjo po izpadu vseh gorilnikov v celotni peči za 23 min (merjeno)

ponoviti brez napake. Lahko pa ga dovolj dobro ocenimo z upoštevanjem nekaterih predpostavk.

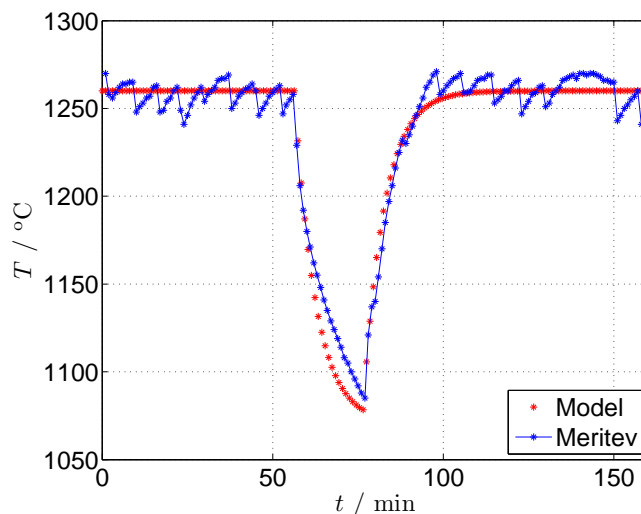
7.1.1 Simulacija zaprtozančnega obnašanja prvega regulacijskega nivoja

Če predpostavimo, da regulator prvega nivoja v stacionarnem stanju uspe spraviti odstopanje blizu nič, tj. da je dejanska vrednost temperature enaka referenčni vrednosti, potem je enosmerno ojačanje takšnega sistema 1. Naslednje vprašanje je, koliko časa regulacija prvega nivoja potrebuje za stabilizacijo. Za to bi bilo najboljšo izvesti stopničasto spremembo referenčne vrednosti $T_{R,PCZ,f}$. Časa vzpostavitve odstopanja blizu nič smo lahko ocenili na primeru neke napake, ko so za 23 min izpadli vsi gorilniki na peči, po ponovnem prižigu pa smo lahko opazovali potek odziva regulacije na stopničasto motnjo (slika 7.2).

Za ogrevno cono spodaj poiščemo parameter (časovno konstanto) sistema prvega reda po metodi najmanjših kvadratov. Za to cono se odločimo, ker ima približno srednje hiter odziv v primerjavi z drugimi conami. Predgrevni coni imata počasnejši odziv, izenačevalni pa hitrejši od ogrevnih con, kar je vidno s slike 7.2. Za dobljen model je prikazan odziv na sliki 7.3. Parameter b modela po enačbi (5.3) je $b = 0,844$; pri vzorčenju 1 min je časovna konstanta sistema $\approx 6,6$ min. Sklepamo, da so časovne konstante zaprtozančnega odziva vseh con gibljejo med ≈ 6 min in ≈ 8 min.

Med tem izpadom se je peč znatno ohladila in velikost motnje v tem primeru je za posamezne cone med 120 °C in 190 °C. Tako velike motnje se med normalnim obratovanjem **ne pojavljajo**. Zaradi velikosti motnje, kar je povzročilo nasičenje izvršnih členov (gorilnikov), so tudi stabilizacijski časi regulacijskih zank podaljšani, zato tudi časovna konstanta identificiranega modela na sliki 7.3 ne ustreza dejanski časovni konstanti v okolici obratovalnih razmer.

Meritev zaprtozančnega odziva za manjšo motnjo nam ni uspeli dobiti, zato ga ocenimo. Ker



Slika 7.3: Zaprtizančni odziv 1. nivoja OCS modeliramo s sistemom prvega reda.

gre v tem primeru za neobičajno veliko spremembo, dinamiko zaprtizančnega obnašanja (časovno konstanto) ocenimo na 5 min in pri tem pa menimo, da se regulacijske zanke dejansko še vedno odzivajo hitreje.

Regulacijske zanke prvega nivoja simuliramo z enačbo (5.3) s parametrom $b = 0,8$, kar ustreza časovni konstanti ≈ 5 min pri času vzorčenja $T_v = 1$ min. Menimo, da so dejanski odzivni časi regulacijskih zank krajši od simuliranih. S takšnimi parametri morajo biti simulirani rezultati slabši od pričakovanih dejanskih. Ta primerjava bo možna šele po aplikaciji sistema.

7.2 Pogoji izvedbe primerjave

Primerjati želimo KO, dobljene z ročnim načinom vodenja s KO dobljenimi z avtomatskim načinom. Avtomatski sistem vodenja poleg določanja referenčnih vrednosti regulatorjem nivoja 1 določa tudi interval pomika materiala v peči. Pri ročnem načinu vodenja je interval pomika na splošno lahko različen od tistega, ki ga določi avtomatski sistem. Pri ročnem načinu vodenja je tako v precejšnjem deležu slabov čas njihovega ogrevanja krajši od predpisanega t_N , ki je implicitno določen z RKO. Za takšne primere z zgrajenim sistemom vodenja ni možno izvesti ogrevanja po RKO, saj so slabi prekratek čas v peči. Primerjave ogrevanja slabov naredimo pri tistih, ki so bili v peči enako ali dalj časa, kot ga za posamezne slabe predpisuje RKO.

Iz založitvenih podatkov tudi ni mogoče razbrati vzroka za odmik intervala pomika od referenčnega. Tako se med ponovno rekonstrukcijo ogrevanja upoštevajo:

1. zastoji zaradi spremenljive širine in omejenih kapacitet vroče predelave;
2. zastoji zaradi različnih referenčnih hitrosti slabov;
3. vsi preostali odmiki od intervala pomika pa se upoštevajo kot zastoji z neznanim trajanjem.

Prva dva tipa zastojev sta upoštevana enako, kot bi bila med 'on-line'-obratovanjem. Ker pa za predvidene in nepredvidene zastoje ni ločenih podatkov, jih upoštevamo kot skrajni primer, kot zastoje z neznanim trajanjem.

7.3 Merila primerjave odzivov

Primerjati želimo ujemanje RKO in KO. To primerjavo naredimo v toliko točkah RKO in KO, kolikorkrat se je posamezen slab ustavil v peči; primerjavo torej naredimo na vsaki poziciji slaba v peči. V literaturi se zaradi načina vodenja, kjer se nadzor vodenja osredinja na končno temperaturo materiala, uveljavlja primerjava temperatur materiala ob koncu ogrevanja. Ker razvit sistem vodenja nadzoruje ogrevanje po celotni krivulji, primerjavo naredimo na celotni krivulji, in tudi samo na končni vrednosti krivulje. Kriterijski funkciji za oceno uspešnosti vodenja pa vzamemo naslednji:

1. Odmik končne temperature materiala. Za merilo ujemanja končne temperature na poziciji N z referenčno temperaturo vzamemo vrednost napake e_N na končni poziciji $J_N = e_N$.
2. Odmik temperature materiala po celotni KO. Merilo za oceno uspešnosti je $J_C = \sqrt{\sum_{i=1}^N e_i^2}$.

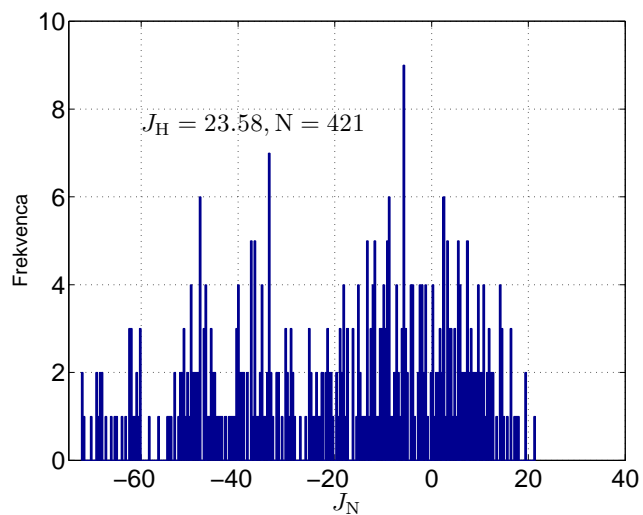
7.4 Histogrami vrednosti kriterijskih funkcij

Poglejmo najprej primerjavo histogramov vrednosti kriterijskih funkcij ročnega in avtomatskega vodenja pri različnih funkcijah združevanja in identičnih založitvah. Za zalaganje smo vzeli približno 2 dni proizvodnih podatkov o zalaganju in rezultatih ročnega vodenja v industrijskih razmerah. Z istimi podatki zalaganja je bila izvedena simulacija vodenja ogrevanja z razvitim sistemom, pri čemer smo preizkušali različne funkcije združevanja. S tem ko je bila primerjava izvedena na istih založitvah, z enakimi prehodi med *založitvenimi tipi*, smo zagotovili verodostojnost primerjav.

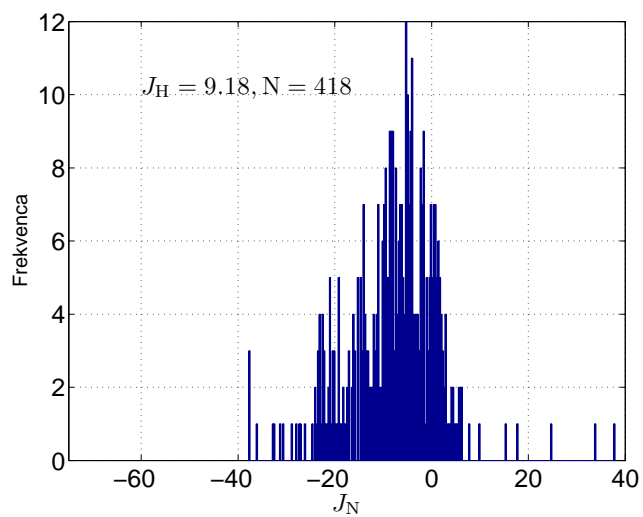
V poglavju 4.4.4 smo definirali lijakasto funkcijo združevanja, kot jo je predlagal Staalman [24] z dvema različnima lijakoma, označenima z način združevanja A in B. V podpoglavju 4.4.5 smo definirali dve funkciji združevanja na osnovi uteženega povprečja, označeni z način združevanja C in D. V istem podpoglavju smo definirali tudi kombinacijo uteženega povprečja in lijaka, ki je označena z načinom združevanja E.

Histogram vrednosti kriterijske funkcije J_N za ročno vodenje (R) je podan na sliki 7.4. Histogram vrednosti kriterijske funkcije J_N za primer združevanja A je podan na sliki 7.5, za B na sliki 7.6, za primer združevanja C na sliki 7.7, za D na sliki 7.8 in za primer združevanja E na sliki 7.9.

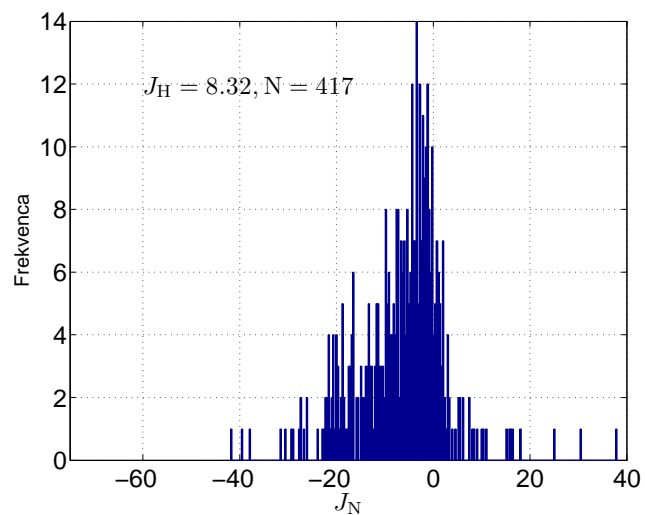
Histogram vrednosti kriterijske funkcije J_C za ročno vodenje (R) je podan na sliki 7.10. Histogram vrednosti kriterijske funkcije J_C za funkcijo združevanja A je podan na sliki 7.11, za B na sliki 7.12, za C na sliki 7.13, za D na sliki 7.14 in za E na sliki 7.15.



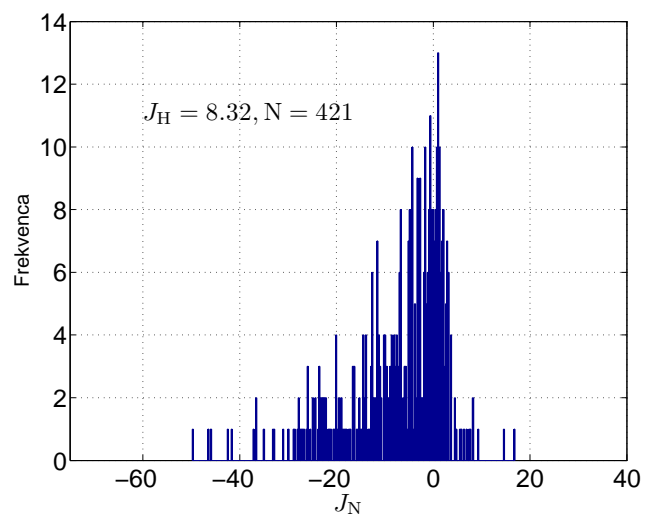
Slika 7.4: Histogram odmikov končnih temperatur za ročno vodenje (industrijski podatki)



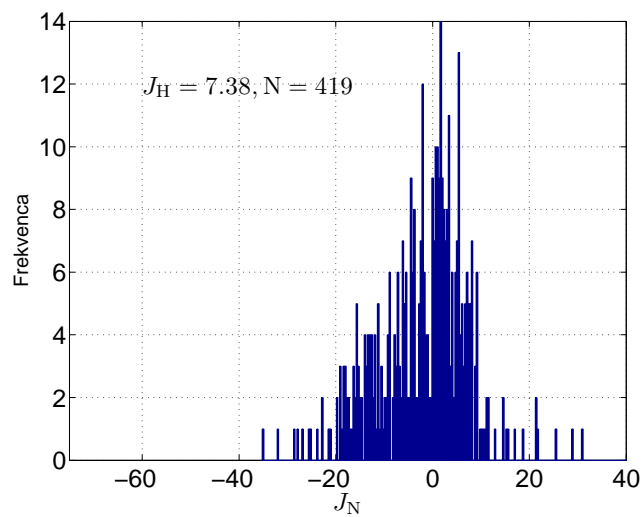
Slika 7.5: Histogram odmikov končnih temperatur za funkcijo združevanja A



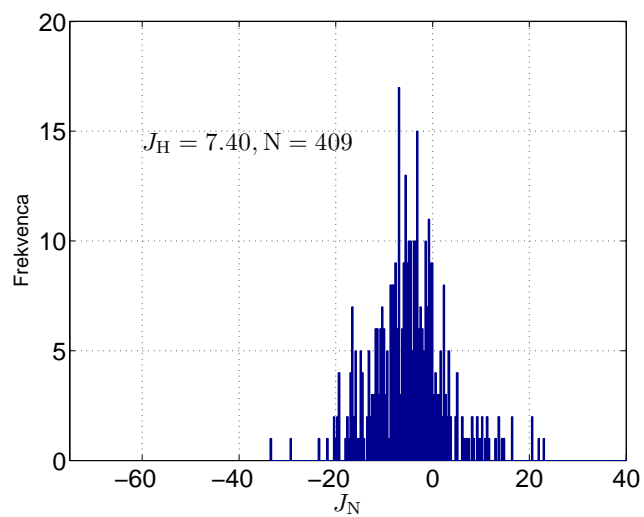
Slika 7.6: Histogram odmikov končnih temperatur za funkcijo združevanja B



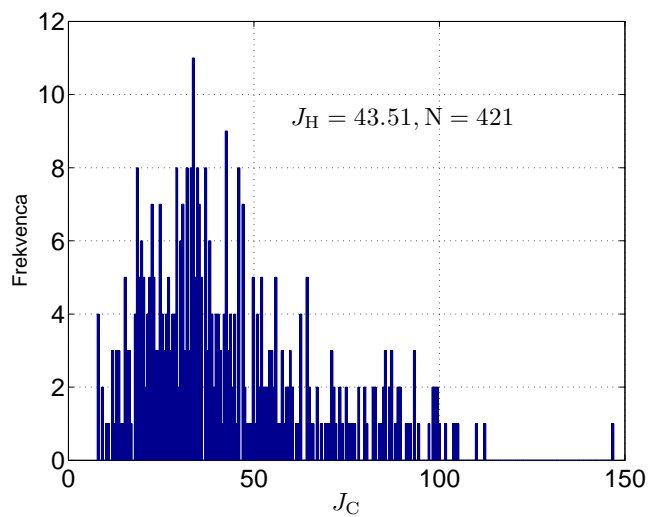
Slika 7.7: Histogram odmikov končnih temperatur za funkcijo združevanja C



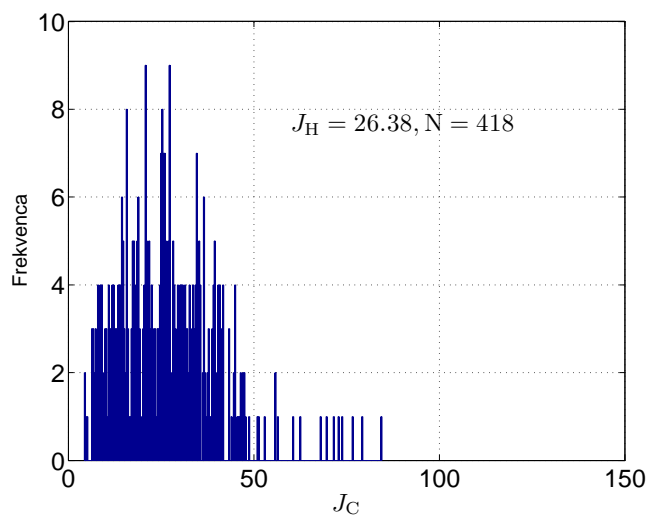
Slika 7.8: Histogram odmikov končnih temperatur za funkcijo združevanja D



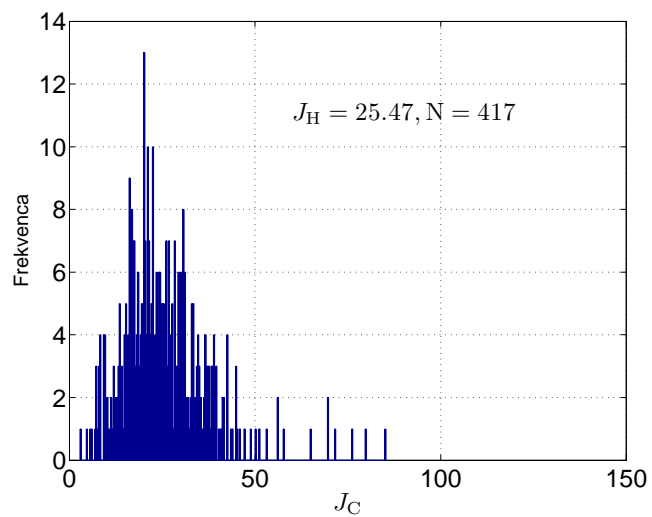
Slika 7.9: Histogram odmikov končnih temperatur za funkcijo združevanja E



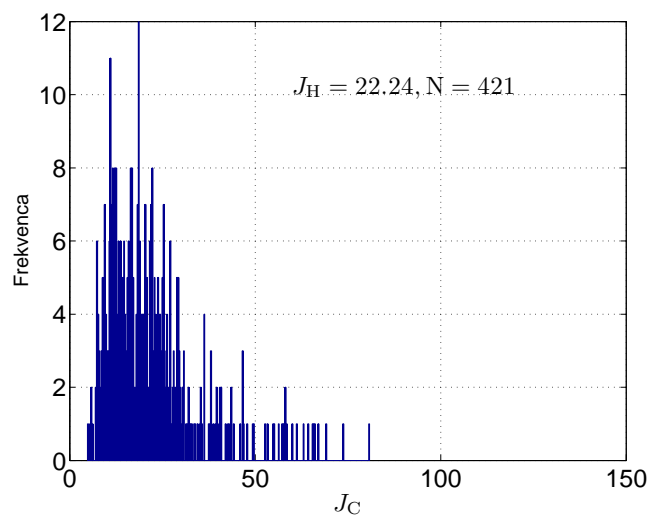
Slika 7.10: Histogram odmikov RKO od KO za ročno vodenje (industrijski podatki)



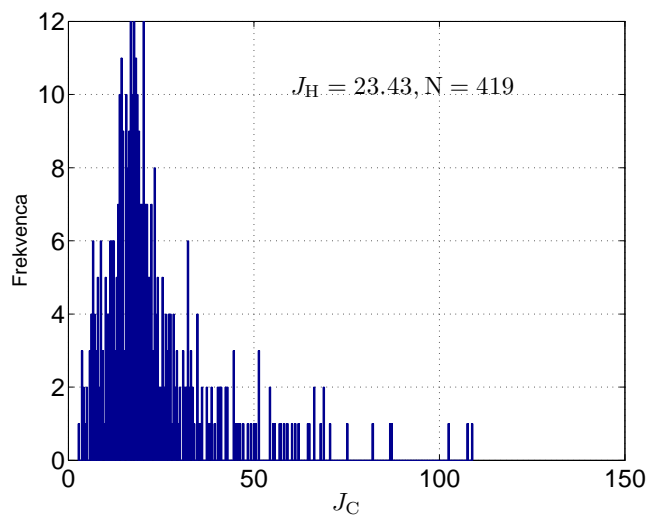
Slika 7.11: Histogram odmikov RKO od KO za funkcijo združevanja A



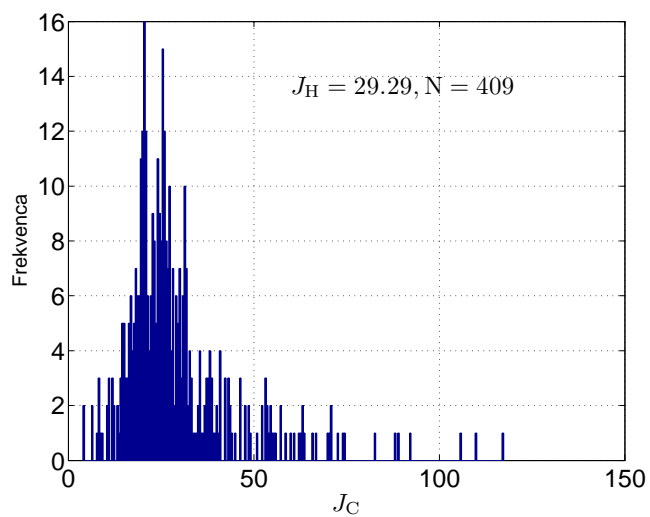
Slika 7.12: Histogram odmikov RKO od KO za funkcijo združevanja B



Slika 7.13: Histogram odmikov RKO od KO za funkcijo združevanja C



Slika 7.14: Histogram odmikov RKO od KO za funkcijo združevanja D



Slika 7.15: Histogram odmikov RKO od KO za funkcijo združevanja E

Tabela 7.1: Številčno ovrednotenje histogramov odstopanj od RKO

NACIN ZDRUŽEVANJA NAPAK	KONČNA	CELOTNA KO	N _H
ROČNO	23,61	43,51	421
AVTO (A)	9,18	26,38	418
AVTO (B)	8,32	25,47	417
AVTO (C)	8,32	22,24	421
AVTO (D)	7,38	23,43	419
AVTO (E)	7,40	29,29	409

7.5 Številčno ovrednotenje histogramov

V tem odstavku bomo številčno ovrednotiti histograme prejšnjega odstavka. Merilo vrednotenja histogramov je:

$$J_H = \frac{\sum_{k=1}^{N_H} |e_k|}{N_H} \quad (7.1)$$

pri čemer je N_H število meritev histograma. Pri ocenjevanju histogramov končnih odmikov je $e_k = J_N$, rezultati so prikazani v tabeli 7.1, stolpec 'KONČNA'.

Pri ocenjevanju histogramov odmikov vzdolž celotne KO je $e_k = J_C$, rezultati so prikazani v tabeli 7.1, stolpec 'CELOTNA KO'.

7.6 Komentar rezultatov

Tabela 7.1 podajo tesnost sledenja temperatur jekla končni temperaturi in celotni RKO. Najtesnejše sledenje končni temperaturi dobimo s parametri in strukturo primera združevanja D, kar je več kot 3-krat tesneje od primera ročnega vodenja. Drugi primeri načina združevanja napake in parametrov A, B, C in E sledijo z rahlo ohlapnejšim sledenjem. To kaže, da način združevanja ni tako zelo vpliven na tesnost sledenja RKO, ni pa brez vpliva.

Stolpec 'CELOTNA KO' v tabeli 7.1 podaja ujemanje celotne KO z RKO. Najtesnejše sledenje dobimo z načinom združevanja po primeru C, ki je približno za faktor 2 tesnejše od ročnega. Rezultati drugih primerov združevanja A, B, D in E so malenkostno slabši od primera C.

Iz primerjave rezultatov v tabeli lahko sklenemo, da je združevanje (D) boljše za združevanje napak v končnih conah peči. Združevanja (C) izkazuje med izbranimi načini najboljše sledenje po celotni RKO. Sklepamo, da ta način združevanja daje boljše rezultate v začetnih conah peči. Zato je smiselno za različne cone uporabljati različne funkcije združevanja.

8 Sklep

V okviru doktorske disertacije je bil razvit fleksibilni sistem vodenja kontinuirnih peči za ogrevanje vložka po predpisanih krivuljah. Delovanje sistema je simulacijsko preizkušeno pri vodenju potisne peči podjetja ACRONI, d. o. o. Primerjava rezultatov vodenja z zgrajenim sistemom in obstoječim ročnim načinom kažejo 2–3-krat tesnejše sledenje RKO z zgrajenim sistemom.

Vodenje ogrevanja je osnovano na podagi izračunanih vrednosti temperaturnih polj ogrevanega materiala. Sistem vodenja za svoje delovanje potrebuje matematični model ogrevanja vložka v obravnavani peči. Omogoča tudi kontrolirano ogrevanje po različnih temperaturnih karakteristikah ogrevanja vložka: srednja vrednost, minimalna vrednost, maksimalna vrednost, maksimalna vrednost temperaturne diference v materialu. Karakteristike ogrevanja je možno poljubno spremeniti/razširiti na druge temperaturne in netemperaturne karakteristike, za kar moramo imeti na voljo ustrezne modele, delujoče v realnem času. Za vsako temperaturno karakteristiko mora imeti sistem na voljo potek referenčnih krivulj ogrevanja (RKO).

Poteki RKO se lahko definirajo na več načinov: s simulacijo tehnoloških navodil, z vodenjem ekspertov ali pa kot rezultat optimizacije RKO. Potek te je zapisan v podatkovno zbirki, kjer jo je možno enostavno prebrati, pregledati ali spremeniti. Zgrajen je sistem za določitev RKO s simulacijo tehnoloških predpisov.

Jedro tega sistema je zaprtozančno vodenje ogrevanja materiala med zastoji in vključuje, kot svojo poenostavitev, tudi vodenje ogrevanja materiala v stacionarnem stanju peči. Vsak zastoj pomeni podaljšanje ogrevanja za ogrevance v peči, zato se kot odziv na zastoj časovno premakne RKO za čas trajanja zastoja. RKO mora biti definirana časovno.

Sistem loči med seboj zastoje z neznanim in znanim trajanjem. Zadnji se nadalje delijo na predvidene zastoje, nepredvidene zastoje, zastoje zaradi različnih referenčnih hitrosti in zastoje zaradi sinhronizacije z napravami za vroče preoblikovanje ter zaradi različnih širin slabov. Za vsako vrsto zastoja se neodvisno od drugih vrst določi premaknitev referenčne krivulje ogrevanja (RKO) in podaljšanje intervala pomika materiala. Izračuni se izvršijo samodejno. Neodvisnost določitve vpliva zastojev na premik RKO omogoča poljubno kombiniranje osnovnih tipov zastojev v kompleksnejše. Zastoji v industrijskih razmerah so skoraj izključno kombinirani in zato je takšna obravnava le-teh primerna za vsakdanjo uporabo v industriji.

Sledenje premaknjenim RKO je lahko izvedeno z različnimi regulatorji; uporabljen je PID-regulator v kombinaciji s krmiljenjem motnje. Prednost PID-regulatorja je poleg enostavne regulacijske strukture tudi nezahtevnost nastavitve parametrov regulacije. Problem funkcionalne nevodljivosti sistema se rešuje z več različnimi funkcijami združevanja.

Zgrajeni sistem vodenja je možno uporabiti za različne vrste kontinuirnih peči, za katere so na voljo modeli izračuna temperatur ogrevancev. Poleg tega ni nujno, da se v peči ogreva jeklo, pač pa katerikoli material. Potisna peč ima v primerjavi z drugimi kontinuirnimi pečmi najbolj neugoden sistem pomikanja materiala skozi pečni prostor, druge kontinuirne peči s stališča vodenja ponujajo večjo možnost nadzorovanega ogrevanja. Razrešitev vodenja ogrevanja v potisni peči je tako tudi rešitev vodenja drugih tipov kontinuirnih peči.

Prispevki k znanosti

Prispevki k znanosti v tem delu so:

- definicija referenčne krivulje ogrevanja na podlagi modela ogrevanja;
- obravnava zastojev v proizvodnji in njihovo upoštevanje v sistemu vodenja;
- prilagoditev časovne premaknitve referenčne krivulje ogrevanja glede na zastoje in s tem povezana energetska optimizacija.

Referenčne krivulje ogrevanja, ki so definirane časovno, se ob zastoju premaknejo za čas njegovega trajanja. Ob zastojih je hkrati s premaknitvijo RKO treba zaustaviti oziroma podaljšati čase pomikov materiala skozi pečni prostor. Zastoje razdelimo na poseben način, ki omogoča določitev premaknitve RKO neodvisno od drugih zastojev. Tako ločimo zastoje z znanim in neznanim trajanjem. Prve nadalje delimo na nepredvidene, predvidene, zastoje zaradi sinhronizacije z valjarskimi ogrodji in zaradi različnih referenčnih hitrosti.

Podaljšano ogrevanje v peči zaradi omejenih kapacitet ogrodi za vročo predelavo, ki so manjše od kapacitete peči, je vključeno v izračun zastojev. Za njihov izračun moramo vnaprej poznati čase predelave v posamezen izdelek in vložek (dimenzije, RKO), iz katerega bo izdelek narejen.

Premaknitev RKO povzroči, da se material, gledano pozicijsko, ogreva globlje v peči v smeri proti izhodu oziroma da so med trajanjem zastojev referenčne vrednosti temperatur materiala relativno nižje, kot so sicer v nemotenem obratovanju peči. V tem času peč deluje v območju boljše energetske učinkovitosti, kot to navaja Jeschar [12].

Prednost predstavljenega načina vodenja ogrevanja je nadzorovanje celotne RKO, ki polno vključuje zaprtizančno vodenje tudi med zastoji. Za sledenje celotne RKO ni potrebno računanje predikcije temperature, saj je ta implicitno in zelo natančno izračunana že v časovnih potekih RKO, ki so poznani in določeni pred 'on-line'-vodenjem.

Viri

- [1] Böhnish, S., Klima, R., Kuck, A., Sucker, D.: Verbesserte Führung von Durchlauf-Wärmeöfen durch Off-line-Simulation und Autoadaption, *Stahl u. Eisen* (1993) 10, 63–68
- [2] Dahm, B., Klima, R.: Feedback Control of Stock Temperature and Oxygen Content in reheating Furnaces, *Conference Papers, London, October 2002*, 287–296
- [3] Dewar, W.A.G.: Nichols, R.M. and Laws, W.R.: Developments in energy conservation methods in modern strip mill, *Berg- und Hüttermännische Monatshefte*, 125(1980), 474–481
- [4] Fontana P., Boggiano A., Furinghetti A., Cabras G., Simoncini C. A.: An advanced computer control system for reheat furnaces, *Iron and Steel Engineer*, August 1983, 55–62
- [5] Hollander F: Design, development and performance of on-line computer control in a 3-zone reheating furnace, *Iron and Steel engineer*, 1982, 44–52
- [6] Hyun S. K., Jung-Su K., Tae-Woong Y., Mokeum L., Dae R. Y., Ik S. J.: Modeling and Predictive Control of a Reheating Furnace, *Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois, June 2000*
- [7] Jaklič, A., Kolenko, T., Glogovac, B.: Supervision of slab reheating process using mathematical model, *3rd IMACS Symposium on Mathematical Modelling MATHMOD, February 2-4, Vienna. Proceedings, (ARGESIM Report No. 15), Dunaj (2000)*, 755–759
- [8] Jaklič, A., Kolenko, T., Zupancic, B.: A graphical user interface of a 3D simulation model for a steel-billet reheating process in a walking-beam furnace. *The IEEE Region 8 EUROCON 2003: computer as a tool: 22-24. September 2003, Faculty of Electrical Engineering. University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia, proceedings, Piscataway: IEEE, cop. 2003*, 469–473
- [9] Jaklič, A., Kolenko, T., Glogovac, B.: A real-time simulation model of billet reheating in the Allino walking-beam furnace. *Proceedings of the International conference on Refractories, Furnaces and Thermal Insulations. High Tatras, Slovakia, 2004*, 237–242
- [10] Jaklič, A., Vode, F., Kolenko, T.: Online simulation model of the slab reheating process in a pusher-type furnace, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007), 1105–1114
- [11] Jaklič, A., Vode, F., Kolenko, T., Zupančič, B.: Industrial application of real-time simulation model of walking-beam reheating furnace. *Proceedings of the EUROSIM 2007, Ljubljana, Slovenija, 2007*, 4

- [12] Jeschar, R., Wang, P., Bittner, H.G., Alt, R.: Optimierung der Brennstoffverteilung in Durchlauföfen, *Gaswärme International* 39 (1990) 11, 476–486
- [13] Kolenko, T., Glogovac, B., Jaklic, A.: An analyses of heat transfer model for situations involving gas and surface radiative heat transfer. *Commun. numer. methods eng.*, 15 (1999), 349–365
- [14] Leden, B.: A control system for fuel optimization of reheating furnaces, *Scan. J. Metallurgy*, 15 (1986), 16–24
- [15] Leden, B.: STEELTEMP - A program for temperature analyses in steel plants, *Scand. J. Metallurgy*, 15 (1986), 215–223
- [16] Leden, B. Lindholm, D. and Nitteberg, E.: The use of STEELTEMP software in heating control, *La Revue de Metalurgie-CIT*, 96 (1999) 3, 367–380
- [17] Leden, B.: STEELTEMP for temperature and heat transfer analyses of heating furnaces with on-line applications, *IoM Conference Challenges in Reheating furnaces*, Conference papers, London October 2002, 297–307
- [18] Marino, P., Pignotti, A., Solis D.: Control of pusher furnaces for steel slab reheating using a numerical model, *Latin American Applied Research* 34 (2004), 249–255
- [19] Norberg, P.-O.: Challenges in the control of the reheating and annealing process. *Scandinavian Journal of Metallurgy* 26 (1997), 206–214
- [20] Pedersen L. M., Wittenmark B.: On the reheat furnace control system, *Proceedings of 1998 American Control Conference IEEE*, 1998
- [21] Pichler, R., Langer, R.: Automation concept for the control of reheating furnaces in rolling mills, *Metalurgical Plant and Technology*, (1989) 1, 68–75
- [22] Pike H. E., Citron S. J.: Optimization studies of a slab reheating furnace. *Automatica*, (1970) 6, 41–50
- [23] Schurko, J., R., Weinstein, C., Hanne, K., M., Pellicchia, D., J.: Computer control of reheat furnaces: A comparison of strategies and applications, *Iron and steel Engineer*, 1987, 37–42
- [24] Staalman, D. F. J.: Process Control in Reheating Furnaces, *IoM conference Challenges in Reheating Furnaces*, Conference Papers, London October 2002, 267–285
- [25] Staalman, D.: The funnel model for accurate slab temperature in reheating furnaces, *La Revue de Metalurgie-CIT*, (2004) 6, 453–459
- [26] Yoshitani N., Naganuma Y., Yanai T.: Optimal slab heating control for reheating furnaces, *Proceeding of the American Control Conference* 1991, 3030–3035
- [27] Vode F., Jaklič A., Kokalj T., Matko D.: A furnace control system for tracing reference reheating curves, *Steel Research int.* 79 (2008) No. 5, 364–370
- [28] Zhigang, C., Chao, X., Bin, Z., Huihe, S., Jianmin Z.: Advanced control of walking beam reheating furnace, *Journal of University of Science and Technology Beijing*, (2003) 4, 69–74

- [29] Zupančič, B.: Zvezni regulacijski sistemi, I. del, založba FER, 1996, 258–259

A Članek

Sledi članek iz revije *Steel Research International*, 79 (2008), No. 5, 364–370, kjer je prvi avtor članka hkrati tudi avtor te doktorske disertacije.

A furnace control system for tracing reference reheating curves

Franci Vode¹, Anton Jaklič¹, Tadej Kokalj¹, Drago Matko²

¹Institute of Metals and Technology, Lepi pot 11, 1001 Ljubljana, Slovenia

²University of Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana, Slovenia

A control system for tracing the reference reheating curves of individual steel slabs in continuous furnaces is presented. The system enables the predefined, controllable reheating of slabs in a furnace. The slab temperatures are obtained by the simulation of a mathematical model of the slab-reheating process. The interior of the continuous furnace is divided into six control zones. The individual zone temperatures are adjusted by the control system in such a way that the temperatures of the slabs in the zone are as close as possible to the desired slab temperatures. To take into account delays in the production line and to synchronize the furnace with the rolling mill's capacities, a time shift of the reference reheating curves and a prolonged drop-out interval are introduced.

Key words: reheating curves, furnace control system, delays, mathematical model

Introduction

The reheating of steel to temperatures between 1150 and 1300°C prior to hot rolling is normally carried out in gas-fired continuous furnaces. The slabs' discharging temperature from the furnace should be within the desired tolerance range to supply suitable and repeatable reheated slabs for the rolling process. The combination of the steel grade, the stock dimensions and the initial stock temperature is called the charging type. A steady-state situation for the reheating process in a furnace is achieved when slabs of the same charging type are charged at constant time intervals and zone temperatures are constant. The temperature of an observed slab describes a certain time curve, known as the reheating curve (RC), and different charging types have, in general, different RCs. Every event causing the unsteady-state operation of a furnace modifies the RCs of currently charged slabs. The most common events causing an unsteady state in the furnace are: changes of the charging type, and discontinuous stock charging to the furnace due to scheduled and unscheduled delays in the production line.

The optimization of the furnace settings during the steady state for the selected charging type results in an improved reference reheating curve (RRC). The optimization process for the furnace settings should consider the different phenomena that are present in the material and the surroundings during reheating, i.e., scale formation and decarburization on the steel's surface, thermal stress in the steel during reheating, energy consumption, metallurgically required soaking time, etc. Optimization is usually treated as being separate from the online control of the furnace [1].

In recent articles on model-based furnace-control systems, two different approaches to control are reported: first, to reach the desired stock temperature at discharging without controlling the stock temperature during the entire reheating process [2,3]; second, to control the stock temperature during the entire reheating process [1,4,5,6]. In the second approach, the RRCs are predefined and the task of the control system is to trace the RRCs. The second approach includes the first approach of tracing the stock temperature at discharging.

In most papers presenting furnace-control systems the authors mention that it is significantly harder to trace the RRC during furnace delays [1,4,5,6]. The key to the additional improvement of furnace-control systems is, therefore, improving the furnace control during delays. The introduction of delays to the control system is, however, not mentioned and the RRC describes the stock-temperature evolution as a function of stock position in the furnace [1,4,6]. In [5], standard proportional integral differential (PID) regulators are used to control the zone temperatures, while in [1,6] a model predictive control (MPC) of the zone temperatures is used. In the last two publications, the individual slab temperature at the end of the zone is predicted and this represents the target temperature for the zone regulator. The RRC is in these two cases [1,6] created per zone and the RCs are traced in a few points of the RRC: one point per reheating zone.

In the reheating process many disturbances are known in advance and their influence on the reheating process can be estimated. These disturbances include scheduled delays, delays caused by synchronization with the rolling mills, and changes in the charging types. These disturbances should be feed-forwarded, which means the disburdening of closed-loop control and therefore tighter tracing of the RRCs.

In this paper we present a model-based control system for tracing the RRCs, where the RRC describes the steel's temperature evolution as a function of the time spent in the furnace. Time-based RRCs enable continuous tracing of the RRCs and an exact consideration of delays. The control system is built for a pusher-type furnace in the ACRONI d.o.o. steelworks. The control is based on the current deviations of an individual slab's RC from the RRC. The deviations of all the slabs in a single zone are merged into an overall zone error. The zone errors are the inputs to standard PID controllers, and for better performance during transient furnace operation, the zone temperatures are feed-forwarded. To influence the reheating process during delays and to consider synchronization with the rolling mill, two parameters are adjusted: the prolongation of the drop-out interval and the time shift of the initial RRC. Both these parameters are changed in accordance with the expected process changes and unexpected delays. An example of simulated process control, which represents the tracing the RRC of a slab in a furnace during a complex combination of delays, demonstrates the abilities of this control system.

Description and limitations of the furnace and the limitations of the steel

A pusher-type furnace is used for the reheating of slabs. In such a furnace the slabs are pushed forward into the furnace by a pusher (**A.Figure 1**). Every time a hot slab has to be discharged, a new slab is introduced into the furnace and the intermediate slabs are pushed towards the furnace exit. The furnace's interior width is 6m and the effective length is 22.6m. The furnace is gas fired and the burners are divided into six control zones: the upper preheating zone (UPZ), the lower preheating zone (LPZ), the upper heating zone (UHZ), the lower heating zone (LHZ), the left soaking zone (LSZ) and the right soaking zone (RSZ).

Each zone temperature is controlled by thermocouple measurements of the wall temperature in the zone. The regulator drives the burners in such a way as to move the measured wall temperature towards the set point. These regulators are implemented on control-level 1 with Programmable Logic Controllers (PLCs). The problem of furnace-temperature control on level 2 is specifying such set points for the level-1 regulator in each zone, such that the reheating curves (RCs) of the slabs are as close as possible to the RRCs. Connection between level 2 and level 1 control is identical to that mentioned in the literature [1,4,5,6]. The RCs of the slabs are observed by using an online mathematical model of the slab-reheating process [7]. The furnace

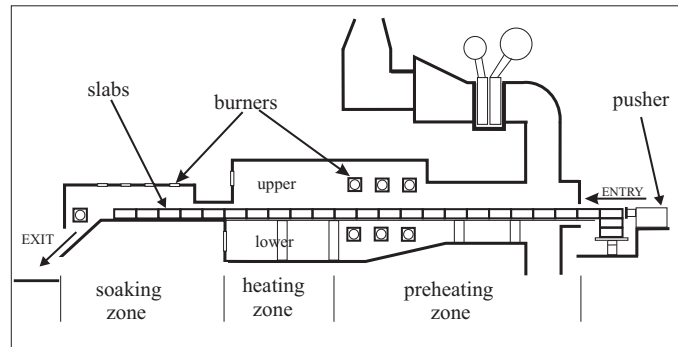


Figure A.1: Pusher type furnace in ACRONI d.o.o..

and steel have limitations, which need to be considered by the control system.

The pusher-type furnaces must be fully loaded to be able to push the slabs forward, which sometimes leads to the slabs spending too much time in the furnace when the bottleneck in the line is the rolling mills. A similar situation occurs with increasing the initial temperature of the slabs and when slabs of different reference velocities are charged in the furnace. Tracing the RRCs in these cases requires a delayed start of reheating and leads to lower set points in the preheating zones. The furnace is divided into three control zones in terms of its length (the preheating, the heating and the soaking-zone temperatures), which limits the possibility of reacting to individual slab requirements.

There are also steel-grade-related limitations, such as the maximum temperature of the steel grade, which is considered to be the maximum temperature of the furnace zone. Neglecting this limitation can lead to insufficient quality of the final product and must therefore be fully considered.

Furnace control system

Determination of the reference reheating curves (RRCs). The aim of our furnace-control system is to trace the RRC of the individual stock in the furnace. For the initiation of the control system the RRCs are obtained from existing reheating rules, which are used in the production. A typical reheating rule for a given charging type consists of settings for all six zone temperatures and the velocity of the slab transition through the furnace, v_R . An online mathematical model of the slab-reheating process [7] is used for the simulation of the existing reheating rules. To obtain the RRC of a selected charging type, the zone temperatures and v_R are set, as specified by the given reheating rule and the simulation starts running. The simulation is stopped when the steady state is achieved and the RC of last discharged slab is used as the RRC for this charging type. As a result of the online mathematical model we get a three-dimensional slab-temperature field [7] at constant time intervals for the time during the slab reheating. At each observed time instance a characteristic scalar value is calculated, representing the slab temperature. The characteristic scalar value can incorporate numerous different variables and functions of these variables. We calculate it with the “mean(T)”, “max(T)”, “min(T)” and “max(∇T)” functions. For a selected set of variables and functions a set of RRCs is calculated

$$\{T_{ref}^{mean}(t), T_{ref}^{max}(t), T_{ref}^{min}(t), \nabla T_{ref}^{max}(t)\}; 0 \leq t \leq t_N \quad (\text{A.1})$$

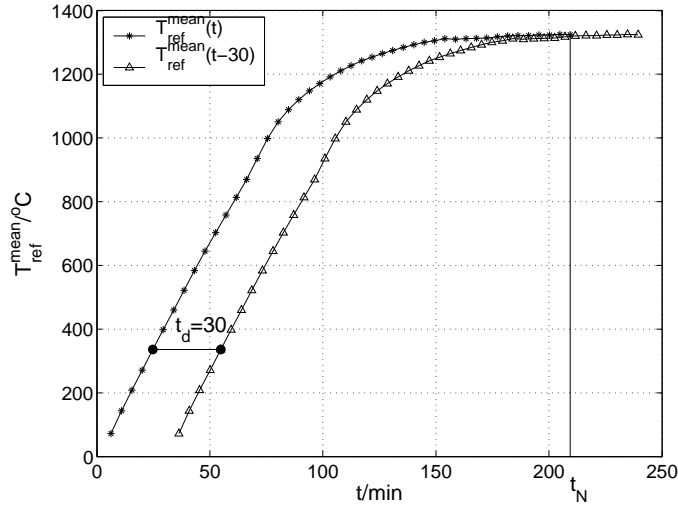


Figure A.2: RRC and time-shifted RRC for the delay $t_d=30\text{min}$, the selected RRC is T_{ref}^{mean} .

where t denotes the time the slab is present in the furnace, and t_N denotes the desired duration of the reheating for the selected charging type. The determination of the RRCs is carried out before the real-time operation and stored in a database. The RRCs (A.1) describe a desired time development of the variables during reheating. Depending on the requirements of the steel grade, a suitable RRC is selected.

Merging slab errors to zone errors.

The control system considers delays in the production line. The influence of the delay is considered as a time shift of the RRCs. When the delay occurs, the RRCs of the currently charged slabs are shifted by the duration of delay. However, the individual slabs in the furnace might have a different time shift of the RRC. A detailed explanation of the determination of the time shift of the RRC, denoted as t_d , is given later. An example of the RRC and the time-shifted RRC for $t_d=30\text{min}$ is presented in **A.Figure 2**.

The time shift, t_d , is calculated for each slab in the furnace and stored in a table (**A.Table 1**). Note that the t_d of a slab might change during reheating. Let us suppose we choose an RRC based on the “mean(T)” function. Considering the time shift of the i th slab, $t_{d,i}$, due to the delays of the production line, the RRC of the slab i can be written as

$$T_{ref,i}^{mean}(t - t_{d,i}); 0 \leq t \leq t_N. \quad (\text{A.2})$$

The RRC defined by (A.2) considers the sum of all the delays, $t_{d,i}$, for a slab i . The model provides the actual values of the slab temperature and the time of the presence in the furnace for each slab. The slab temperatures are obtained with the same online mathematical model used for the determination of the RRC (A.1). The same functions used for the determination of the RRC are used for the RC calculation from the simulated temperature field. The value of RC for the i th slab at the current time of presence in the furnace, $t_{c,i}$, is written as

$$T_i^{mean}(t = t_{c,i}). \quad (\text{A.3})$$

The difference between (A.2) and (A.3) is calculated for the slab i at the time $t_{c,i}$

$$e_i = e_i(t_{c,i}) = T_{ref,i}^{mean}(t_{c,i} - t_{d,i}) - T_i^{mean}(t_{c,i}). \quad (\text{A.4})$$

This is the current deviation of the i th slab temperature from the reference temperature. The e_i is calculated for every slab in the furnace.

The next step in the control of the zone temperatures is the merging of the individual slab errors (A.4) into six groups, corresponding to the six control zones

$$E_F = \{E_{UPZ}, E_{LPZ}, E_{UHZ}, E_{LHZ}, E_{LSZ}, E_{RSZ}\}. \quad (\text{A.5})$$

Each element of EF is a vector of the errors, e_i , of the slabs present in the particular zone, e.g., for UPZ

$$E_{UPZ} = [e_1, \dots, e_M]. \quad (\text{A.6})$$

M denotes the number of slabs in the UPZ. For each zone a vector of slab errors is available (A.6), but only one zone temperature can be adjusted in accordance with it. To obtain a scalar value of the zone error, the vector E_{UPZ} is merged into a single value $e_{UPZ} = f(E_{UPZ})$ by the merging function, f . Useful merging functions, f , are the "mean(E)", "max(E)", "min(E)", "last(E)", and "first(E)", some other nonlinear functions [4] or a combination of these. By merging, we generalize the error [5]. In the same way the zone errors for the other furnace zones are calculated, which can be written in vector form as

$$e = [e_{UPZ}, e_{LPZ}, e_{UHZ}, e_{LHZ}, e_{LSZ}, e_{RSZ}]. \quad (\text{A.7})$$

The calculation of the zone errors (A.7) is performed during every regulating period of the furnace-control system.

Controlling the zone temperatures. For each furnace zone a set point for the level-1 temperature regulator is needed. All six zone-temperature controllers have an identical structure.

The scheme of the zone-temperature controller for the UPZ is shown in **A.Figure 3**. The zone error e_{UPZ} is led to the PID regulator. The regulator output, u_r , together with the feed-forward part, u_{ff} , determines the set point, $T_{R,UPZ}$, which is additionally filtered with a low-pass first-order filter that guarantees smoother changes of the set point. The output from the filter is denoted as $T_{Rf,UPZ}$.

Three additional merging functions (M block) in **A.Figure 3** provide the limitations of the $T_{Rf,UPZ}$ signal, the feed-forward value, u_{ff} , and the parameters for the PID regulator.

The additional feed-forward signal, u_{ff} , which is added to the u_r , provides supporting feed-forward control of the zone temperature. We get the u_{ff} signal from the required zone temperatures for a stationary process. During the stationary operation of the furnace, the u_{ff} signals alone ($u_r=0$) in all the furnace zones, lead to matching of the RC and the RRC. The benefit of additional feed-forward control is finer control of the zone temperatures during transient operation and, as a result, the RCs are closer to the RRCs during transient operation.

The limit values (minimum and maximum) for the zone temperatures of each individual slab in the zone are obtained from the database. According to the selected merging function, the scalar value of the limits (upper and lower) of the zone temperatures are led to the PID regulator.

For better performance of the PID regulator, the system provides sets of parameters for the PID regulator that might be different for every charging type. In the case of the pusher-type

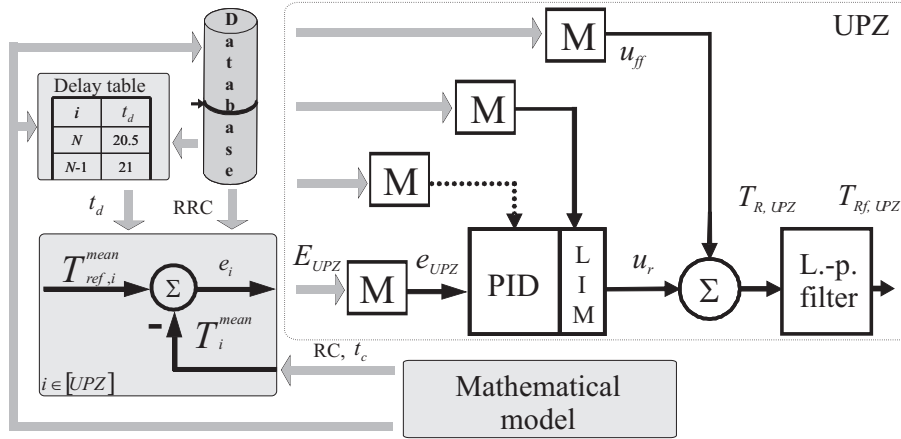


Figure A.3: Example of a zone-temperature controller.

furnace, it is not necessary to change the PID parameters for every charging type, a satisfactory regulator response can be obtained by merging two to three sets of parameters.

Determination of the drop-out interval. The slabs are pushed through the furnace in discrete steps by the width of the last slab, and the last slab is discharged. The discharging of the slab from the furnace is carried out when the rolling mill finishes processing the previous slab and when the last slab finishes reheating. The limitations of the rolling-mill capacities are considered as well as other types of delays, since they directly influence the velocity of slabs' transition through the furnace.

The drop-out interval, t_{DO} , is calculated as:

$$t_{DO} = \frac{d_{w,N}}{v_{R,m}} + P_{DO,N}. \quad (\text{A.8})$$

The first part in Equation (A.8) is the time needed for the last slab to pass over the length of its own width, $d_{w,N}$, according to the merged reference velocity, $v_{R,m}$. The second part is the addition due to the delays, $P_{DO,N}$. If $P_{DO,N}$ is zero, the slabs are pushed by the width of the last slab, otherwise the drop-out interval is extended by $P_{DO,N}$. The merged reference velocity of the slab's transition through the furnace, $v_{R,m}$, in Equation (A.8) is calculated from the reference velocities of all the currently charged slabs, $v_{R,i}$, in the furnace with the selected merging function. The merging function for the velocities, which provides a greater or equal residence time for all the slabs, regardless of the different reference velocities $v_{R,i}$, is " $v_{R,m} = \min(v_{R,i})$ ". This definition of the drop-out interval (A.8) considers the slab width and focuses on the slab-velocity control. In the charging type, the slab width is dropped and the velocity is used instead.

Handling delays. Suitable control of the slab-reheating process during delays can be achieved by an appropriate shift of the RRCs and a prolongation of the drop-out interval. Each slab in the furnace might have a different shift of the RRC (t_d) and a prolongation of the drop-out interval (P_{DO}).

For a more convenient and easier determination of the time-shifted RRCs, delays in the production line are separated into three groups, according to the reason for the delay (scheduled delay

Table A.1: Delay table for the RRCs (S, U, W) and the prolongation of the drop-out interval (P_{DO}).

i	S	U	W	t_d	P_{DO}
N	0	20	0	20	20
$N-1$	0	20	0	20	0
$N-2$	0	20	0.5	20.5	0
$N-3$	0	20	1.0	21.0	0
...					
4	0	20	7.5	27.5	0
3	30	20	8	58	30
2	30	20	8.5	58.5	0
1	30	20	9	59	0

- S , unscheduled delays - U , slab-width-related delays - W). Each vector element of (S_i, U_i, W_i) prolongs the residence time of the i th slab compared to the reference residence time in the furnace, which is implicitly given by the RRC. A total delay value for the newly charged slab, $t_{d,1}$, depends on the delay values of all the slabs in the furnace. Some more details about the determination and the meaning of each delay type and its influence on $t_{d,i}$ and P_{DO} follow:

1. Prolongation of the drop-out interval P_{DO} : The value $P_{DO,i}$ means the prolongation of the drop-out interval, when the i th slab arrives at the last position, N , according to Equation (A.8). In **Table 1**, an unscheduled delay of 20 minutes is triggered, and the $P_{DO,N}$ delay of the drop-out interval is set to 20. The next prolongation of the drop-out interval for $P_{DO}=30$ will appear when the slab $i=3$ in the furnace arrives at the last position, N .
2. Scheduled delays (S) with known duration: Every delay forecasted in advance is treated as scheduled. The longer the forecasted delay, the closer can be the tracing of the RRCs. In **Table 1**, a 30-minute delay will occur when slab $i=3$ arrives at the last position, N , in the furnace. The delay of the drop-out interval for the slab $i=3$ $P_{DO,3}$ is set to 30 and in the S column the delay S_i is set to 30 for the slab $i=3$ and all the following slabs until this slab comes to the last position, when the delay actually occurs.
3. Unscheduled delays (U) with a known duration time: These delays occur unexpectedly during operation. The duration of the delay is added to the previous values of the unscheduled delay, U_i , for all the slabs in the furnace. The prolongation of the drop-out interval, $P_{DO,N}$, is added for the slab in the last position. In **Table 1**, a 20-minute unscheduled delay occurs for the slab N . All the slabs in the furnace have equal values in the U column and the prolongation of the drop-out interval of the last slab, $P_{DO,N}$, is set to 20.
4. Delays related to the slab width and the synchronization with the rolling mills (W): In this column the delays in the production line due to the limitations of the rolling mills are considered, but these delays are also strongly related to the slab widths and the slab reference velocities. For every slab in the furnace the slab width, $d_{w,i}$, is known. The

expected drop-out interval of the i th slab, $t_{DO,i}$, without the influence of delays is calculated as

$$t_{DO,i} = \frac{d_{w,i}}{v_{R,m,i}}, \quad (\text{A.9})$$

where $v_{R,m,i}$ is the merged reference velocity of a slab in the furnace at a time when the slab i arrives at the last position, N . The calculation of $v_{R,m,i}$ for $i < N$ is a prediction of the merged reference velocities, $v_{R,m,i}$. The prediction is possible if the reference velocities of one-furnace-length of slabs in front of the furnace are known. This is not always possible, sometimes the charging types and the $v_{R,i}$ are known for a half-furnace-length of slabs in advance or even less. In these cases, for a prediction of $v_{R,m,i}$ we assume that the following slabs have the same velocity as the last known slab. This assumption during a single charging type yields the correct prediction, but when slabs with different $v_{R,i}$ are charged, the prediction of $v_{R,m,i}$ is incorrect. If the calculated $t_{DO,i}$ is less than the minimum time of the rolling-mill processing time $t_{RM,i}^{MIN}$, the $t_{DO,i}$ is prolonged to $t_{RM,i}^{MIN}$ and the time difference

$$t_{W,i} = t_{RM,i}^{MIN} - t_{DO,i} \quad (\text{A.10})$$

is calculated. Using (A.9) and (A.10) a $t_{w,i}$ for all slabs in the furnace is calculated. The slab-width-related delay for the slab k in the furnace is calculated using

$$W_k = \sum_{i=k}^N t_{W,i} \quad (\text{A.11})$$

and set to W column to the k th row. Using (A.11) the contributions of the width-related delays of all the slabs in front of the k th are used to calculate W_k . The values W_k are calculated for all the slabs $I=k=N$ in the furnace. In the case of an incorrect prediction of $v_{R,m,i}$, the W_i change during reheating. If the velocity-merging function “ $\min(v_{R,i})$ ” is used, the value of the W_i delay stays the same or increases. This is very important, because a decreasing W_i during the reheating would mean a jump up of the RRC, while an increasing W_i would cause a drop down of the RRC. In the worst case when the slab reference velocities are not known before entering the furnace, these delays are unscheduled delays. Otherwise, when the slab reference velocities are known before entering the furnace, these delays are scheduled. The triggering of delays is internal, using the control system. In **Table 1**, the slab $i=N-2$ is the first in the furnace, with the $t_{W,i} = 0.5$, and the following slabs have equal $t_{W,i} = 0.5$, and the previous slabs have $t_{W,i} = 0$. The calculation of W_i for the slab $i = N - 2$, which was calculated when this slab entered the furnace, yields $W_1 = 0.5$. For the slab $i = N - 3$ the width-related delay W_1 increases to 1, according to (A.11) etc.

5. A total delay value t_d : The values in the t_d column are calculated as $t_{d,i} = S_i + U_i + W_i$. This represents a total time shift of the RRC for the i th slab, due to delays.

The delays might change over time, and therefore the delay table is recalculated during every regulating period. The presented delay handling system can control all three delay types simultaneously, and independently of each other. The operator needs to trigger the scheduled

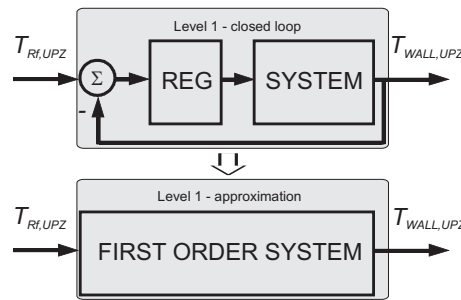


Figure A.4: Approximation of a level-1 closed-loop response with a first-order system.

and unscheduled delays with a known duration, while the slab-width-related delays (W) are triggered automatically by the control system.

Results and discussion

The slab-reheating process is influenced by various disturbances, like different types of delays, and charging types, which can occur simultaneously in all possible combinations. In this paper we present the simulation results for a single combination of delays.

Simulations of furnace operation with the developed furnace-control system. The furnace is equipped with an online mathematical model of the slab-reheating process [7]. For the purposes of testing the developed control system a furnace simulator was built. The furnace simulator, together with the mathematical model of the slab-reheating process and the developed control system, make possible the simulations of events and situations similar to those during real-time operation. The furnace simulator has two main tasks. The first task is to translate the loading parameters, like charging type and delays, into a suitable form for the mathematical model and the control system. This task can be performed exactly. The second task of the furnace simulator is to simulate the operation of the closed loops of the level-1 regulating loops.

The input to the level-1 zone-temperature regulator is the set-point temperature, $T_{Rf,UPZ}$, for the zone. The output from the system is the measured value of the wall temperature, $T_{WALL,UPZ}$, in this zone – **A.Figure 4**. Tracing the set points in a steady state with zero error (static gain=1) is a trivial task for level-1 regulators. Depending on the level-1 regulator's parameters, the transient response of the wall temperature in a closed loop exponentially approaches the set-point temperature. The closed-loop response of such a system can be approximated by a first-order system with an appropriate time constant and a static gain of 1 (**A.Figure 4**). In our case the time constant of the first-order system is 6 min.

Identical first-order systems are built for the other furnace zones. The furnace simulator, the mathematical model of the slab-reheating process and the control system together give a realistic simulation environment for the simulation of the whole system.

Tracing the RRC during the simultaneous occurrence of delays. Tracing the RRCs during steady state is easy, while tracing them during transient operation is much more difficult. The advantage of the presented control system, which traces time-dependent RRCs, is the convenient handling of multiple delays. In this section we present a combination of a scheduled delay, an unscheduled delay and delays related to the synchronization with the rolling mill, all

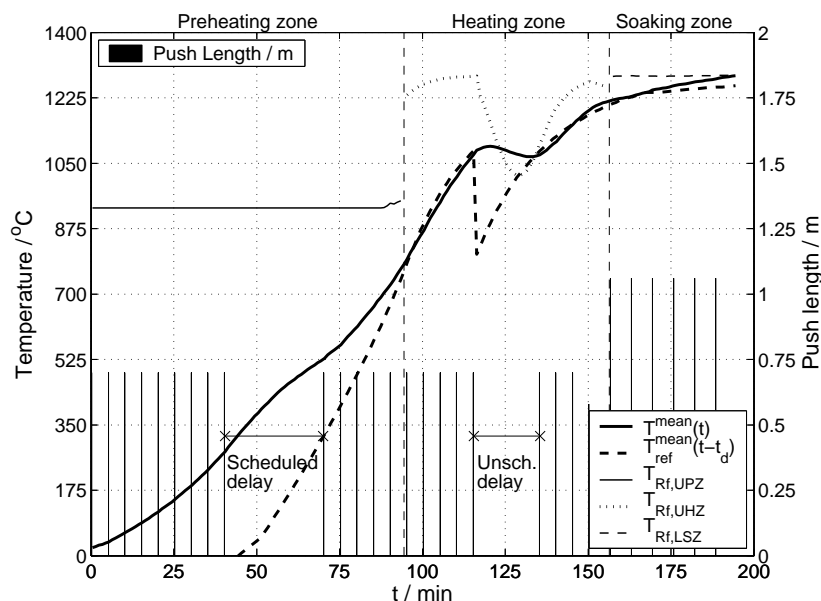


Figure A.5: Obtained RC and RRC of the observed slab in a furnace and the time courses of the furnace-zone temperatures. The selected RC and RRC are the mean temperature, T_{mean} , of a slab.

occurring simultaneously.

In **A.Figure 5** are the simulation results of tracing a RRC for a 0.16-m-thick and a 1.06-m-wide slab during such a combination of delays. The reference velocity for this charging type is $v_R=2.77$ mm/s. The observed slab is the seventh, with a width of 1.06 m, the previous slabs are 0.7 m wide. The selected reference reheating curve and, therefore, also the RC is the mean value of the temperature $T_{mean}(t)$. A slab width of 0.70 m requires $t_{DO}=4.2$ min, which is lower than the limit value of the rolling mill's processing time, $t_{RM}^{MIN}=5$ min, for this charging type. Therefore, the width-related delay is set to the 0.70-m-wide slabs, while for the 1.06-m-wide slabs the slab-width-related delays are not needed, since the t_{DO} for them is 6.37 min. At time 39 min of the observed slabs presence in the furnace, a scheduled delay of 30 min starts. After the end of this delay the furnace operates normally and drops out 10 slabs, when an unscheduled delay of 20 min occurs. The RRC changes over time according to the total time delay, t_d , of the observed slab. The RC traces the RRC within the furnace limitations. The zone temperatures ($T_{Rf,UPZ}$, $T_{Rf,UHZ}$, $T_{Rf,LSZ}$) are adjusted by the zone regulators so that the RCs are as close as possible to the RRCs. The zone temperatures for this steel are limited to the interval $[930^{\circ}\text{C}, 1285^{\circ}\text{C}]$. Both limits are reached for some time in the different zones and are considered by the zone regulators. The time courses of the other zone temperatures are left out, since they are similar to the presented ones.

While waiting for the scheduled delay ($t < 39$ min) the preheating zone temperature is decreased to the limit value of 930°C , but the RC of the observed slab stays above the RRC. The observed slab was in the position 6.21 m in the furnace during the scheduled delay, which is approximately in the middle of the preheating zone. The RC decreases to the RRC at about 750°C , which is still below the zone temperature. The disagreement between the RC and the RRC is typical for a delayed start to the reheating and cannot be avoided since it is a consequence of

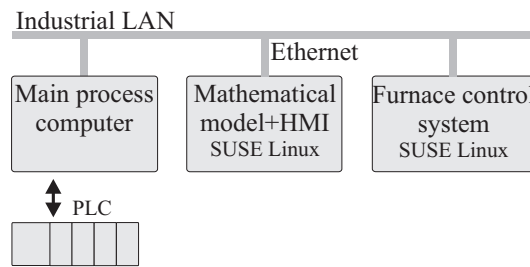


Figure A.6: Connection of furnace control system with other systems.

the furnace-zone division. The time needed for the RC to reach the RRC after the triggering of the unscheduled delay in this case is less than 25 minutes. This is much faster than the case of the scheduled delay. This effect is partly the consequence of the relatively small reductions in the zone temperatures needed to fall below the material temperature. This effect was also observed by Staalman [4], and might have a significant influence on the success of handling delays, since all reheating side effects, decarburization, scale formation, etc., intensify with both time and temperature.

Application of furnace-control system. Application of presented furnace control system in ACRONI d.o.o. is under way with the following details. Furnace measurements and other data are collected in the main process computer of the hot processing plant, which obtains data from PLCs, regulators, etc.. The data exchange among main process computer, online mathematical model and additional furnace control system is performed over ethernet (**A.Figure 6**). Main process computer sends furnace charging and measurement data to the mathematical model, which calculates slab temperature fields. After that, the furnace control system reads the current slab temperature and charging data and calculates control actions according to the newest data. Furnace control system sends control actions, set points for level-1 regulators and reference drop out interval back to the main process computer, which further takes care of control action execution. The furnace control system uses MySQL database to store RRCs, RCs, delay table (**A.Table1**) and records; RRC and RC of each slab and zone variables ($e, u_r, u_{ff}, T_R, T_{Rf}$).

Conclusions

A furnace-control system that is based on a mathematical model of the slab-reheating process can be successfully applied for the control of the furnace.

The control system is based on a comparison of the reheating curve (RC) of each slab in the furnace with a predefined reference reheating curve (RRC), where both curves are a function of time. The deviations from the RRC are calculated during every regulating interval. The slab deviations are merged into six groups that correspond to the six furnace zones. For each zone a PID regulator is used; this controls the zone temperatures in such a way that the RCs follow the RRCs as closely as possible.

To successfully handle delays, the delays are divided to three groups. Some delays are known in advance and this information can be successfully used by the control system. If delays are unscheduled the control system can react as well, in accordance with the furnace limitations. When delays occur, the reference reheating curves are shifted by the duration of the delay. This approach makes it possible for the finishing time of the stock reheating, according to the RRC,

and the time of the stock discharging to coincide. The division of delays is performed in such a way that the delays are independent of each other. The independence of the delays makes it possible to treat all the possible combinations of delays in the same way as each individual delay.

The concept of furnace control where time-based RRCs of the stock are traced, makes possible an exact consideration of the delays. This is reflected in closer tracing of the RRC during unsteady-state furnace operation. The concept implicitly by the given RRC includes the demand for the required soaking time of the stock, the final stock temperature, with the stock temperature distribution, and the stock temperature gradient during heating. The last demand, which is crucial in the initial furnace zones, is achieved by selecting the temperature gradient of the stock as the RRC with the developed control system. The presented set of RRCs could be easily replaced by new, numerically optimized RRCs and broadened to include additional process variables, e.g., the thermal stress of the stock. The concept of the presented control system enables the separate introduction of the following: online furnace control for tracing the RRC, optimization of the RRC, and optimization of the stock-arrival sequence into the furnace.

For the implementation of the control system in the steelworks, slight modifications to the PID parameters are needed to obtain the best response from the PID regulators. The presented furnace-control system uses the general principles of control. It can be used for different types of continuous furnaces by re-configuring the control system and calculating the RRC for that furnace. However, the online reheating model for that furnace is essential.

*Contact: Franci Vode
Institute of metals and technology
Lepi pot 11
1001 Ljubljana / Slovenia
franci.vode@imt.si*

References

- [1] B. Dahm, R.Klima, Feedback control of stock temperature and oxygen content in reheating furnaces, IoM Conference Challenges in Reheating Furnaces, Conference Papers, London, October, 2002, pp. 287-296
- [2] M. Honner, Z.Vesely, M. Svantner, Exodus stochastic method application in the continuous reheating furnace control system, Scandinavian Journal of Metallurgy, 2004, 33, pp. 328 -337
- [3] Z. Chen, C. Xu, B. Zhang, H. Shao, J. Zhang, Advanced control of walking-beam reheating furnace, Journal of University of Science and Technology Beijing, August, 2003, pp. 69-74
- [4] D.F.J. Staalman, The funnel model for accurate slab temperature in reheating furnaces, La Revue de Metalurgie, July, 2004, pp. 453-459
- [5] P. Marino, A. Pignotti, D. Solis, Control of pusher furnaces for steel slab reheating using a numerical model, Latin American Applied Research, 34, 2004, pp. 249-255
- [6] D.F.J. Staalman, Process control in reheating furnaces, IoM Conference Challenges in Reheating Furnaces, Conference Papers, London, October, 2002, pp. 267-285
- [7] A. Jaklič, F. Vode, T. Kolenko, Online simulation model of the slab-reheating process in the pusher type furnace, Applied Thermal Engineering 27, 2007, pp. 1105-1114