

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

ALEŠ ŠINK

MODELIRANJE IN VODENJE SISTEMA ZA
PRIPRAVO ZRAKA V PROCESU ZMANJŠEVANJA
EMISIJ NO_x

Magistrsko delo

Ljubljana, 2016

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

ALEŠ ŠINK

MODELIRANJE IN VODENJE SISTEMA ZA
PRIPRAVO ZRAKA V PROCESU ZMANJŠEVANJA
EMISIJ NO_x

Magistrsko delo

Mentor: prof. dr. Gašper Mušič

Ljubljana, 2016



IZJAVA

Spodaj podpisani, ALEŠ ŠINK, z vpisno številko 64090396 s svojim podpisom izjavljam, da sem avtor zaključnega dela z naslovom:

Modeliranje in vodenje sistema za pripravo zraka v procesu zmanjševanja emisij
 NO_x

S svojim podpisom potrjujem:

- da je predloženo zaključno delo rezultat mojega samostojnega raziskovalnega dela in da so vsa dela in mnenja drugih avtorjev skladno s fakultetnimi navodili citirana in navedena v seznamu virov, ki je sestavni del predloženega zaključnega dela,
- da je elektronska oblika zaključnega dela identična predloženi tiskani obliki istega dela,
- da na Univerzo v Ljubljani neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Repozitorija Univerze v Ljubljani (RUL).

V Ljubljani, 6.2.2016

Podpis avtorja:

Zahvala

Za pomoč in nasvete pri izdelavi diplomskega dela se zahvaljujem prof. dr. Gašperju Mušiču.

Zahvala gre tudi sodelavcem podjetja INEA d.o.o., predvsem Gašperju Dolencu in Aleksandru Pregleju ter ostalim, ki so kakorkoli pomagali pri nastajanju magistrskega dela.

Hvala tudi družini, ki me je bodrila in podpirala čez celotni študij.

Vsebina

1.	Uvod	5
2.	Tehnološki proces.....	7
2.1	Katalitični pretvornik	7
2.1.1	Bencinski motorji.....	8
2.1.2	Dizelski motorji.....	9
2.2	Izdelava katalitičnega pretvornika.....	12
2.2.1	Sušilniki.....	12
2.2.2	Peči	13
2.2.3	Naprava za zmanjševanje emisij NO _x	13
2.2.4	Sistem za pripravo odpadnega zraka iz peči in sušilnikov	17
3.	Obstoječe stanje sistema za pripravo odpadnega zraka	23
3.1	Predhodno stanje.....	23
3.2	Opis obstoječega stanja	23
3.3	Slabosti obstoječega sistema vodenja procesa	26
4.	Identifikacija procesa.....	27
4.1	Identifikacija sistema z mehko logiko	27
4.1.1	Mehka logika	28
4.1.2	Mehki tip modela Takagi–Sugeno	31
4.1.3	O orodju Fuzzy Modeling and Identification Toolbox for Matlab	35
4.2	Izvedba identifikacije procesa.....	38
4.2.1	Določitev procesnih signalov za izgradnjo modela procesa.....	38
4.2.2	Pridobitev procesnih signalov	39
4.2.3	Identifikacija modela tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz peči – PT 02961/1	43
4.2.4	Identifikacija modela tlaka odpadnega zraka pred ventilatorjema – PT 02961/4	44
4.2.5	Identifikacija modela tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz sušilnika – PT 02961/B....	45
4.2.6	Identifikacija modela tlaka odpadnega zraka na delujočem ventilatorju – dP 02962/247	

4.2.7	Identifikacija modela tlaka odpadnega zraka na toplotnem izmenjevalniku - dP 02965/1	48
4.3	Komentar rezultatov identifikacije.....	50
5.	Študija sistema vodenja	53
5.1	Vodenje sistema priprave zraka z regulatorji PID	53
5.1.1	Nastavljanje parametrov regulatorjev.....	54
5.1.2	Slabosti sistema vodenja procesa z regulatorji PI in rešitve.....	57
5.1.3	Rezultati vodenja z dopolnjenimi regulatorji PI	58
5.2	Nadzorna logika sistema vodenja	61
5.2.1	Logika za zagon sistema.....	61
5.2.2	Samodejno ukrepanje sistema vodenja v primeru izjem	61
5.2.3	Samodejno spreminjanje referenc tlakov glede na referenco pretoka	64
5.3	Komentar rezultatov načrtovanja sistema vodenja	67
6.	Sklep.....	69
7.	Priloge	71
7.1	P&I-diagram sistema	71
7.2	Naročnikov predlog avtomatizacije sistema priprave odpadnega zraka	72
7.3	Signali uporabljeni za identifikacijo.....	75
7.4	Prvi niz signalov	75
7.5	Drugi niz signalov	76
7.6	Dodatni rezultati identifikacije.....	77
7.6.1	Model PT 02961/1	77
7.6.2	Model PT 02961/4	79
7.6.3	Model PT 02961/B.....	82
7.6.4	Model dP 02962/2	85
7.6.5	Model dP 02965/1	87
7.7	Primerjava sistema vodenja z regulatorji PI pri uporabi različnih kombinacij mrtvih con in filtriranja.....	90

7.7.1	Vodenje PT 02961/1	90
7.7.2	Vodenje PT 02961/4	91
7.7.3	Vodenje PT 02961/B	91
7.7.4	Vodenje FIA 02965/2	92
8.	Literatura in viri	93

Kazalo slik

Slika 1: Koncentracija emisij v izpušnih plinih glede na razmerje AFR.....	8
Slika 2: Učinkovitost pretvorbe tri-smernih katalitičnih motorjev glede na razmerje AFR.....	9
Slika 3 Delovanje katalitičnega pretvornika tipa CSF	10
Slika 4: Primeri substratov katalitičnih pretvornikov – končni produkt.....	12
Slika 5: P&I-diagram sistema za pripravo odpadnega zraka	18
Slika 6: Primer pripadnostnih funkcij in lingvistične spremenljivke	29
Slika 7: Razdelitev vzorcev v roje z določanjem težišč in po metodi GK	34
Slika 8: Shema prvega poskusa izdelave modela sistema	40
Slika 9: Skica mehkega modela tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz peči.....	43
Slika 10: Primerjava odziva modela in realnega sistema – PT 02961/1	44
Slika 11: Skica mehkega modela tlaka odpadnega zraka pred ventilatorjema	44
Slika 12: Primerjava odziva modela in realnega sistema – PT 02961/4	45
Slika 13: Skica mehkega modela tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz sušilnika	46
Slika 14: Primerjava odziva modela in realnega sistema – PT 02961/B.....	47
Slika 15: Skica mehkega modela tlaka odpadnega zraka na delujočem ventilatorju.....	47
Slika 16: Primerjava odziva modela in realnega sistema – dP 02962/2	48
Slika 17: Skica mehkega modela tlaka odpadnega zraka na toplotnem izmenjevalniku	49
Slika 18: Primerjava odziva modela in realnega sistema – dP 02965/1.....	49
Slika 19: Sistem vodenja priprave odpadnega zraka.....	54
Slika 20: Vodenje PT 02961/1	55
Slika 21: Vodenje PT 02961/4	56
Slika 22: Vodenje PT 02961/B	56
Slika 23: Vodenje FIA 02965/2	57
Slika 24: Vodenje PT 02961/1 z uporabljenimi mrtvimi conami in filtrom	59
Slika 25: Vodenje PT 02961/4 z uporabljenimi mrtvimi conami in filtrom	59
Slika 26: Vodenje PT 02961/B z uporabljenimi mrtvimi conami in filtrom	60
Slika 27: Vodenje FIA 02965/2 z uporabljenimi mrtvimi conami in filtrom	60
Slika 28: Prikaz delovanja samodejnega ukrepanja v primeru izjem v sistemu – vodenje FIA 02965/264	
Slika 29: Prikaz delovanja samodejnega spreminjanja referenc – vodenje PT 02961/1.....	65
Slika 30: Prikaz delovanja samodejnega spreminjanja referenc – vodenje PT 02961/4.....	66
Slika 31: Prikaz delovanja samodejnega spreminjanja referenc – vodenje PT 02961/B.....	66
Slika 32: Signali položaja loput – prvi niz signalov.....	75
Slika 33: Signal hitrosti vrtenja ventilatorja in temperatur v sistemu – prvi niz signalov	75

Slika 34: Signali položaja loput – drugi niz signalov.....	76
Slika 35: Signal hitrosti vrtenja ventilatorja in temperatur v sistemu – drugi niz signalov	76
Slika 36: Pripadnostne funkcije mehkega modela PT 02961/1	78
Slika 37: Območja lokalnih modelov in DOF mehkega modela PT 02961/1	78
Slika 38: Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanim šumom - PT 02961/1	79
Slika 39: Pripadnostne funkcije mehkega modela PT 02961/4	80
Slika 40: Območja lokalnih modelov in DOF mehkega modela PT 02961/4	81
Slika 41: Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanim šumom - PT 02961/4	81
Slika 42: Pripadnostne funkcije mehkega modela PT 02961/B.....	83
Slika 43: Območja lokalnih modelov in DOF mehkega modela PT 02961/B	84
Slika 44: Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanim šumom - PT 02961/B	84
Slika 45: Pripadnostne funkcije mehkega modela dP 02962/2	86
Slika 46: Območja lokalnih modelov in DOF mehkega modela dP 02962/2	86
Slika 47: Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanim šumom - dP 02962/2	87
Slika 48: Pripadnostne funkcije mehkega modela dP 02965/1	88
Slika 49: Območja lokalnih modelov in DOF mehkega modela dP 02965/1	89
Slika 50: Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanim šumom - dP 02965/1	89
Slika 51: Primerjava različnih kombinacij mrtvih con in filtriranja – PT 02961/1.....	90
Slika 52: Primerjava različnih kombinacij mrtvih con in filtriranja – PT 02961/4.....	91
Slika 53: Primerjava različnih kombinacij mrtvih con in filtriranja – PT 02961/B.....	91
Slika 54: Primerjava različnih kombinacij mrtvih con in filtriranja – FIA 02965/2.....	92

Kazalo tabel

Tabela 1: Karakteristike merilnikov NO _x	15
Tabela 2: Karakteristike uporabljenih katalitičnih pretvornikov	16
Tabela 3: Karakteristike sistema za zmanjševanje emisij NO _x	16
Tabela 4: Merilniki v sistemu za zmanjševanje emisij NO _x	17
Tabela 5: Seznam temperaturnih merilnikov	19
Tabela 6: Seznam tlačnih merilnikov	19
Tabela 7: Seznam loput	20
Tabela 8: Seznam ventilatorjev	20
Tabela 9: Seznam posnetih signalov	39
Tabela 10: Parametri regulatorjev	54
Tabela 11: Vrednosti mrtvih con in časovne konstante filtrov	59
Tabela 12: Mejne vrednosti nivojev izjem v sistemu priprave zraka	62
Tabela 13: Parametri iskalnih tabel za samodejno spreminjanje referenc tlakov	65
Tabela 14: Parametri mehkih pravil modela PT 02961/1	77
Tabela 15: Središča rojev in pripadnostnih funkcij mehkega modela PT 02961/1	77
Tabela 16: Parametri mehkih pravil modela PT 02961/4	79
Tabela 17: Središča rojev in pripadnostnih funkcij mehkega modela PT 02961/4	80
Tabela 18: Parametri mehkih pravil modela PT 02961/B	82
Tabela 19: Središča rojev in pripadnostnih funkcij mehkega modela PT 02961/B	82
Tabela 20: Parametri mehkih pravil modela dP 02962/2	85
Tabela 21: Središča rojev in pripadnostnih funkcij mehkega modela dP 02962/2	85
Tabela 22: Parametri mehkih pravil modela dP 02965/1	87
Tabela 23: Središča rojev in pripadnostnih funkcij mehkega modela dP 02965/1	88
Tabela 24: Vrednosti mrtvih con in čas. konstante filtra pri različnih kombinacijah – PT 02961/1	90
Tabela 25: Vrednosti mrtvih con in čas. konstante filtra pri različnih kombinacijah – PT 02961/4	91
Tabela 26: : Vrednosti mrtvih con in čas. konstante filtra pri različnih kombinacijah – PT 02961/B ...	92
Tabela 27: Vrednosti mrtvih con in čas. konstante filtra pri različnih kombinacijah – FIA 02965/2	92

Seznam uporabljenih simbolov

PT	Merilnik tlaka
dP	Merilnik diferencialnega tlaka
TT	Merilnik temperature
QIA	Merilnik koncentracije plinov
FSA	Senzorsko stikalo pretoka
FIA	Izračunan pretok zraka
FCV	Zvezna loputa ali ventil
XV	Diskretni ventil
M	Motor
Regulator PID	Proporcionalno integrirno diferencirni regulator
Kp	Proporcionalno ojačenje regulatorja PID
Ki	Integrirno ojačenje regulatorja PID
Kd	Diferencirno ojačenje regulatorja PID
Ti	Integrirna časovna konstanta
Td	Diferencirna časovna konstanta
PV	Regulirana veličina, ang process value
SP	Referenca, ang. set point
MV	Regulirna veličina, ang. manipulated variable
e	Pogrešek, ang. error
NO _x	Kemijski simbol za dušikove okside
C _α H _β	Kemijski simbol za spojine ogljikovodika
CO	Kemijski simbol za molekulo ogljikovega oksida
CO ₂	Kemijski simbol za molekulo ogljikovega dioksida
PM	Trdni delci, ang. particulate matter
NO	Kemijski simbol za molekulo dušikovega oksida
NO ₂	Kemijski simbol za molekulo dušikovega dioksida
N ₂	Kemijski simbol za molekulo dušika
AFR	razmerje med zrakom in gorivom, ang. air to fuel ratio
H ₂ O	Kemijski simbol za molekulo vode
O ₂	Kemijski simbol za molekulo kisika
DPF	Filter delcev, ang diesel particulate filter
CSF	Katalitični pretvornik s filtrom sajastih delcev, ang catalysed soot filter
SCR	Selektivna katalitična redukcija, ang. selective catalytic reduction
SNCR	Selektivna brez katalitična redukcij, ang. selective non-catalytic reduction
NH ₅ O	Kemijski simbol za molekulo vodna raztopina amonijaka
CO(NH ₂) ₂	Kemijski simbol za molekulo uree
NH ₃	Kemijski simbol za molekulo amonijaka
LNT	Adsorpcijski katalitični pretvornik, ang lean NO _x trap
H ₂	Kemijski simbol za molekulo vodika
N ₂ O	Kemijski simbol za molekulo didušikovega oksida
EGR	Recirkulacija izpušnih plinov, ang. exhaust gas recirculation
O ₃	Kemijski simbol za molekulo ozona
P&I-diagram	Diagram cevovodov in merilnikov, ang. piping and instrumentation diagram

UV sevanje	ultravijolično sevanje
IR sevanje	infrardeče sevanje
ϕ_{zrak}	Pretok zraka [m ³ /h]
v_{zrak}	Hitrost zraka [m/s]
A	Površina [m ²]
p	Tlak [Pa]
R	Specifična gostota suhega zraka [J/kgK]
ρ	Gostota zraka [kg/m ³]
FMID	Fuzzy Modeling and Identification Toolbox
Sistem MIMO	Sistem z več vhodi in izhodi
Sistem MISO	Sistem z več vhodi in enim izhodom
FM	Struktura orodja FMID s podatki o mehkem modelu
FIS	Struktura orodja Matlab s podatki o mehkem modelu
VAF	izračunana varianca med signaloma [%]
TS	Takagi-Sugeno tip mehke logike

Povzetek

Magistrsko delo predstavi rešitve za zmanjševanje škodljivih emisij v industriji in prometu. Prikazan je sistem, ki zmanjšuje emisije dušikovih oksidov (NO_x) v odpadnem zraku iz peči in sušilnikov v tovarni avtomobilskih katalitičnih pretvornikov.

Odpadni zrak iz sušilnikov in peči vsebuje emisije NO_x , ki jih je potrebno zmanjšati pred izpustom v ozračje. Za to skrbi čistilna naprava, ki učinkovito deluje v naprej določenem temperaturnem območju in z vnaprej določenim pretokom odpadnega zraka. Zaradi naštetih pogojev je potrebno odpadni zrak iz peči in sušilnikov predhodno pripraviti z ustreznim vodenjem loput za dovod svežega in odpadnega zraka ter z vodenjem hitrosti vrtenja motorja ventilatorja. Hkrati je potrebno paziti, da so obratovalni pogoji v sušilnikih in pečeh še vedno v zahtevanih mejah, saj delovanje izven zahtevanih meja pomeni slabšo kvaliteto izdelka ali v skrajnem primeru tudi zaustavitev proizvodnje.

Podana je analiza delovanja sistema samodejnega vodenja procesa, ki jo je predlagal naročnik. Ker menimo, da predlagani način, ni optimalen, je v drugem delu magistrskega dela podan predlog izboljšanja sistema samodejnega vodenja sistema priprave odpadnega zraka.

Za namen načrtovanja izboljšane sistema samodejnega vodenja je sistem priprave odpadnega zraka iz peči in sušilnikov podan v obliki matematičnih modelov. Le-te smo določili z uporabo identifikacijske metode, ki za modelno strukturo uporablja mehko logiko tipa Takagi-Sugeno. Podana je tudi razlaga osnovnih pojmov mehke logike.

V zadnjem delu je prikazana uporabnost pridobljenih mehkih modelov na primeru vodenja z proporcionalno integrirnimi regulatorji (PI), ki so jim dodane mrtve cone na pogrešku in regulirni veličini. Dodano je tudi filtriranje procesnih signalov in nadzorna logika sistema vodenja, tako da je sistem vodenja pripravljen za implementacijo na realnem sistemu.

Sistem vodenja in nadzorna logika sta načrtovana konceptualno in preizkušena s simulacijo. Namen je prikazati, da obstajajo poleg naročnikovega predloga tudi druge in boljše rešitve. Pri izvedbi predlagane rešitve na realnem sistemu bi bilo potrebno prilagajanje parametrov regulatorjev in nastavitev nadzorne logike.

Ključne besede:

Katalitični pretvornik, zmanjševanje emisij, NO_x , selektivna katalitična redukcija, mehka logika, identifikacija, mehki model Takagi-Sugeno, regulacija, regulatorji PI, nadzorna logika



Abstract

The thesis introduces possible solutions for reducing harmful emissions produced in the industry and transport sectors. The thesis describes the system for reducing nitrogen oxides (NO_x) emissions in exhaust air, which comes from the dryers and ovens in a factory of automotive catalytic converters.

The exhaust air from the dryers and ovens contains NO_x emissions, which must be reduced before the air can be released in to the atmosphere. The system for NO_x emissions reduction efficiently operates only in predetermined temperature and air flow ranges of the exhaust air. Due to those conditions, exhaust air from the dryers and ovens must be prepared in advance by controlling the fan speed and fresh and exhaust air dampers positions. At the same time must be ensured that operating conditions in the dryers and ovens are within defined ranges. Operation outside of the defined ranges can result in lower product quality or even in the production shutdown.

In the second part of the thesis, a control system analysis of the exhaust air preparation proposed by the costumer is given. We think the proposed control system is not optimal and could be improved. An example of improved control system of the exhaust air preparation is given.

To design the improved control system, mathematical models must have been obtained. The exhaust air preparation process was identified using identification method, with help of Takagi-Sugeno type fuzzy logic. Brief description of the fuzzy logic is also presented.

In the last part of the thesis, obtained fuzzy models are used to demonstrate the improved control system for the exhaust air preparation. The control system uses proportional-integral (PI) controllers with added dead zones on error signals and manipulated values. Process value signals filtering and the supervisory logic of the control system are also added to ensure the correct operation of the control system.

The control system and the supervisory logic are designed as the concept and are tested with simulation. The purpose of the thesis is to show that better and more optimal control systems can be used for the exhaust air preparation control in comparison with the solution proposed by the costumer. With minor changes of the controller parameters and supervisory logic settings, presented control system can be ready for the implementation on the real process.

Key words:

Catalytic converter, emission reduction, NO_x , selective catalytic reduction, fuzzy logic, identification, Takagi-Sugeno fuzzy model, control, PI controllers, supervisory logic



1. Uvod

Industrija in promet igrata pomembno vlogo pri razvoju človeštva, povzročata pa tudi veliko negativnih in nezaželenih dejavnikov, kot je onesnaževanje okolja z izpusti emisij, ki se je v zadnjih desetletjih intenzivno povečevalo. Najbolj kritično je onesnaževanje ozračja, ki je ena izmed dragocenih snovi, brez katere ne bi mogli preživeti. V ozračje se spuščajo številni plini in snovi, ki zmanjšujejo kakovost zraka in povzročajo učinek tople grede, smog, kisel dež, nastanek ozonske luknje, itd. V izogib nadaljnjemu povečevanju onesnaževanja okolja so bili sprejeti ukrepi, ki vodijo v zmanjševanje izpustov škodljivih emisij. V industriji so tako vpeljali vrsto ukrepov, kot so posodobitev tehnologije, uporaba kakovostnejših surovin, povečanje energetske učinkovitosti, vpeljava čistilnih sistemov itd., s katerimi so se izpusti iz tovarn znižali na obvladljivo raven.

V zadnjih desetletjih se je število vozil drastično povečalo, zato je glavni vir onesnaževanja ozračja postal promet. Z razvojem novih tehnologij čistejšega in učinkovitejšega izgorevanja v motorjih na notranje izgorevanje in drugimi tehnološkimi izboljšavami, kot so zmanjševanje teže vozil in uporaba alternativnih goriv, so se začeli zmanjševati tudi izpusti škodljivih emisij v prometu.

Tehnologija, ki občutno zmanjša izpuste škodljivih emisij v industriji in prometu, je uporaba katalitičnega pretvornika. Katalitični pretvornik je pasivna naprava, ki s kemičnimi reakcijami med katalizatorjem in tokom odpadnega zraka pretvarja škodljive pline v manj oziroma neškodljive. Ker deluje optimalno v določenem delovnem območju temperature, pretoka in tlaka odpadnega zraka, je potrebno zrak najprej ustrezno pripraviti.

V delu je opisan primer sistema za zmanjševanje emisij dušikovih oksidov v tovarni avtomobilskih katalitičnih pretvornikov. Za samodejno vodenje sistema priprave odpadnega zraka, smo od naročnika dobili diagrame poteka, ki smo jih tudi realizirali. Ker menimo, da predlagan način ni najbolj optimalen, smo pripravili predlog izboljšanja sistema priprave odpadnega zraka.

V prvem delu magistrskega dela je predstavljena vloga katalitičnega pretvornika pri zmanjševanju nezaželenih emisij. Podane so tudi metode, ki se uporabljajo za zmanjševanje emisij dušikovih oksidov v avtomobilih in industriji ter kratek opis izdelave katalitičnega pretvornika.

Tretje poglavje predstavi obstoječe stanje sistema priprave odpadnega zraka iz sušilnikov in peči na proizvodnji liniji avtomobilskih katalitičnih pretvornikov.

Četrto poglavje opiše izvedbo identifikacije procesa priprave odpadnega zraka z mehko logiko. Podani so tudi osnovni pojmi mehke logike.

V petem poglavju je predstavljen predlog samodejnega vodenja sistema priprave odpadnega zraka z regulatorji PI. Opisana je tudi nadzorna logika sistema vodenja.

Na koncu so podani še sklepne ugotovitve in možnosti za izboljšanje identificiranega modela in predlaganega sistema vodenja.

2. Tehnološki proces

V tem poglavju je opisana vloga avtomobilskega in industrijskega katalitičnega pretvornika pri zmanjševanju nezaželenih emisij. Podane so tudi metode, ki se uporabljajo za zmanjševanje emisij dušikovih oksidov (NO_x) v avtomobilih in industriji ter kratek opis izdelave katalitičnega pretvornika.

2.1 Katalitični pretvornik

Motorji na notranje izgorevanje med delovanjem ne porabijo vsega vbrizganega goriva, zato izpušni plini vsebujejo ostanke neizgorele mešanice goriva in zraka, kot so spojine ogljikovodika ($\text{C}_\alpha\text{H}_\beta$, v nadaljevanju CH), ogljikov oksid (CO) in trdni oz. sajasti delci (ang. particulate matter, PM). Pri kemični reakciji izgorevanja goriva dušik (N_2) iz ozračja oksidira v dušikove okside (t.j. dušikov monoksid - NO in dušikov dioksid - NO_2). Dušikovi oksidi ali NO_x se pojavijo, ko je mešanica dušika in kisika izpostavljena visoki temperaturi.

CO je strupen plin, spojine CH vsebujejo veliko rakotvornih in fotokemičnih snovi, ki prispevajo k nastanku smoga in ozona. NO_x so plini, ki povzročajo smog, kisel dež ter bolezni dihal. Trdni delci oziroma saje so mikroskopsko majhni delci, ki vsebujejo pretežno ogljik. Povzročajo bolezni dihal in ožilja.

Zmanjšanje koncentracije strupenih plinov in sajastih delcev je mogoče doseči z enakomernejšim in kontroliranim vbrizgom goriva. Ker so emisijski standardi v zadnjem času vedno bolj strogi, se za dodatno zmanjševanje emisij uporablja tudi filtre, ki s kemičnimi reakcijami med katalizatorjem in plini spreminjajo strupene pline v manj škodljive, obenem pa lahko služijo tudi kot filter za sajaste delce. Ti filtri so katalitični pretvorniki, ki zmanjšajo emisije za več kot 90 %, tako da pretvorijo škodljive izpušne pline v manj škodljive. To se doseže z reduciranjem ali oksidiranjem plinov v ogljikov dioksid (CO_2), vodo (H_2O) in dušik (N_2). Pri reakciji nastane tudi CO_2 , ki je prav tako nezaželen plin.

Katalitični pretvornik je nameščen v neposredni bližini motorja, saj je delovanje pogojeno tudi z visoko temperaturo (nad 220 °C). Za zagotavljanje dovolj visoke temperature je uporabljena odpadna toplotna energija, ki nastaja pri izgorevanju. Tako lahko katalitični pretvornik začne učinkovito delovati že v nekaj sekundah po zagonu hladnega motorja.

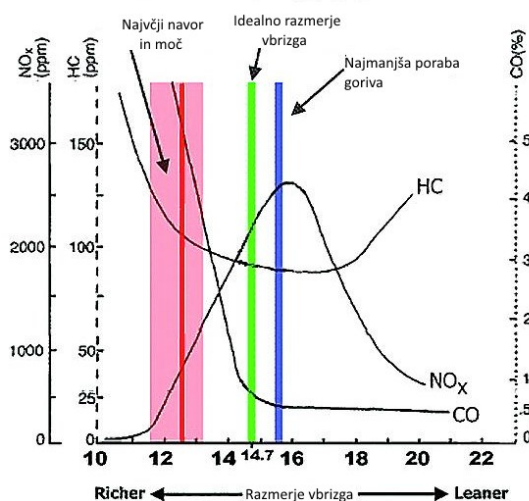
Uspešnost pretvorbe škodljivih izpušnih plinov v katalitičnem pretvorniku je odvisna od sestave izpušnih plinov, le-ta pa od razmerja vbrizganega zraka in goriva (ang. air/fuel ratio - AFR) v proces izgorevanja. Idealno oz. stehiometrijsko razmerje med zrakom in gorivom v bencinskih ali dizelskih

motorjih je približno 14,6 enote zraka na enoto goriva. Razmerje podaja količino zraka, ki je potrebna za popolno izgorevanje goriva.

V primeru, da je v vbrizgani mešanici več zraka, potem so izpušni plini revni (ang. lean exhaust). Tak motor porabi manj goriva, ima višjo obrabo in izloča več emisij NO_x . V tem primeru katalitični pretvornik deluje kot redukcijski katalizator.

V drugem primeru, če je v vbrizgani mešanici več goriva, so izpušni plini bogati (ang. rich exhaust). Tak motor ima večjo moč in navor pa tudi višje emisije CO in spojin CH. V tem primeru katalitični pretvornik deluje kot oksidacijski katalizator.

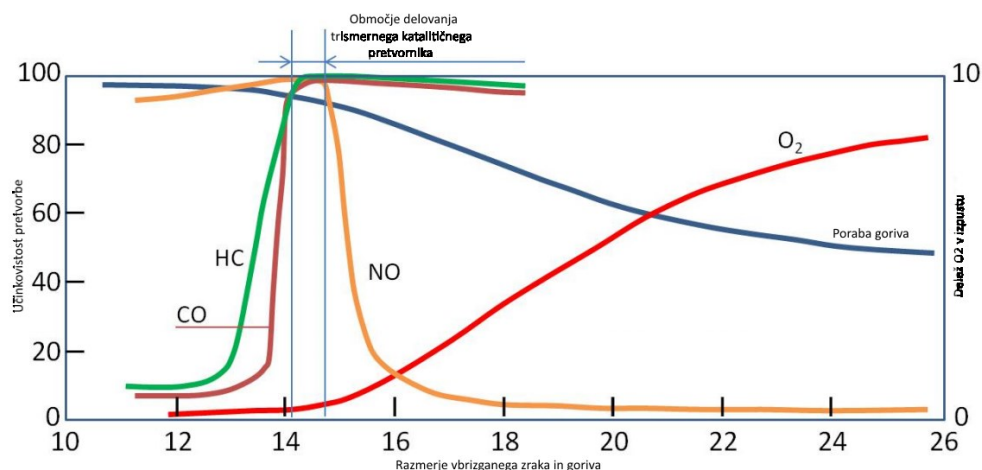
Slika 1 prikazuje koncentracijo emisij v izpušnih plinih glede na razmerje vbrizganega zraka in goriva v proces izgorevanja.



Slika 1: Koncentracija emisij v izpušnih plinih glede na razmerje AFR

2.1.1 Bencinski motorji

Bencinski motorji delujejo skoraj pri idealnem razmerju zraka in goriva. Uporabljajo tri-smerne katalitične pretvornike (ang. three way catalysts), ki oksidirajo spojine CH in CO v H_2O in CO_2 ter reducirajo NO_x v N_2 . Slika 2 prikazuje učinkovitost pretvorbe takih katalitičnih pretvornikov, ki je v omejenem območju razmerja vbrizgane mešanice več kot 95 %.



Slika 2: Učinkovitost pretvorbe tri-smernih katalitičnih motorjev glede na razmerje AFR

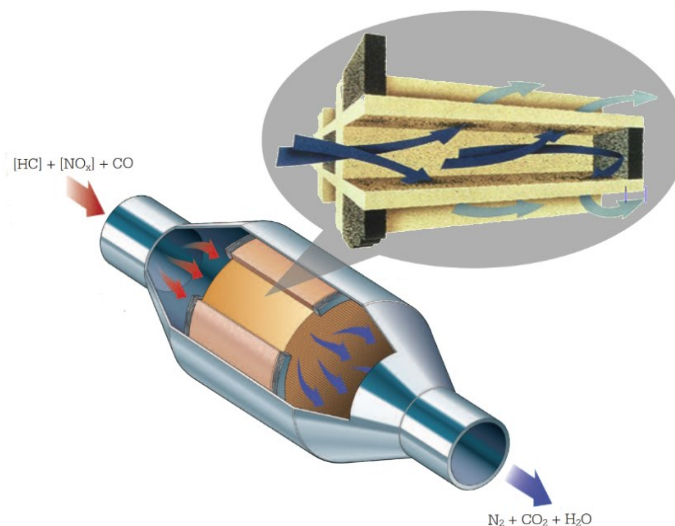
2.1.2 Dizelski motorji

Dizelski motorji delujejo pri veliko višjih razmerjih mešanice zraka in goriva. Razmerje se giblje od 18:1 pa vse do 65:1. To pomeni, da proces izgorevanja poteka pri višji temperaturi, izpušni plini pa vsebujejo sajaste oziroma trdne delce in več emisij NO_x ter kisika (O_2). Tri-smerni katalizatorji delujejo kot oksidacijski katalizatorji, ki emisije CO in spojine CH uspešno zmanjšajo za več kot 90 %. Že ob nizki koncentraciji O_2 v izpušnih plinih je tak katalizator neučinkovit pri zmanjševanju emisij NO_x , zato so za zmanjševanje le-teh uporabljene druge rešitve.

Zmanjševanje količine sajastih delcev

Za zmanjševanje količine sajastih delcev je uporabljen filter delcev (ang. diesel particulate filter - DPF), ki je zgrajen podobno kot katalitični pretvornik s to razliko, da gre tok izpušnih plinov čez fizični filter. Najpogostejše so uporabljeni filtri, sestavljeni iz kovinskega ali pogostejše keramičnega bloka oziroma substrata s tisoči majhnih kanalov v obliki satja. Polovica kanalov je v obliki šahovnice na enem koncu substrata odprta, na drugem pa blokirana in obratno. Tok izpušnih plinov čez substrat ne preide direktno, ampak čez pore v stenah, sajasti delci pa ostanejo v kanalih. Čiščenje ali regeneracija kanalov se izvede periodično z večjim vbrizgom goriva v proces izgorevanja, kar povzroči povečanje temperature v filtru, zaradi česar se delci sežgejo.

V primeru, da se v kanale substrata nanese še katalizator, dobimo katalitični pretvornik s filtrom sajastih delcev (ang. catalysed soot filter - CSF), katerega princip delovanja je prikazan na sliki 3.



Slika 3 Delovanje katalitičnega pretvornika tipa CSF

Zmanjševanje emisij NO_x

Za zmanjševanje emisij NO_x obstajajo naslednje rešitve:

- rešitve, ki temeljijo na uporabi katalitičnega pretvornika:
 - selektivna katalitična redukcija:
 - metoda, ki za reaktant uporablja amonijak,
 - metoda, ki za reaktant uporablja spojine ogljikovodika,
 - adsorpcijski katalitični pretvornik,
- recirkulacija izpušnih plinov.

Selektivna katalitična redukcija

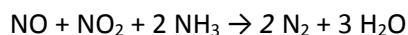
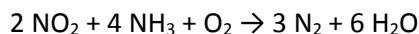
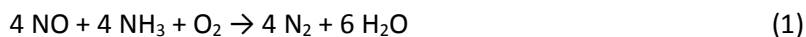
Selektivna katalitična redukcija (ang. selective catalytic reduction - SCR) je rešitev, kjer se reaktant vbrizga v tok izpušnih plinov. V katalitičnem pretvorniku emisije NO_x s kemičnimi reakcijami med katalizatorjem in mešanico reducirajo v N_2 , CO_2 in H_2O . Glede na uporabljen reaktant poznamo dve različni metodi:

- metoda, ki za reaktant uporablja amonijak (ang. amonia SCR) in
- metoda, ki za reaktant uporablja spojine ogljikovodikov (ang. hydrocarbon SCR).

Pogoj za delovanje obeh metod je ustrezna temperatura, ki mora biti v območju med 220°C in 450°C .

Pri prvi metodi je kot reaktant uporabljen amonijak (NH_3), vodna raztopina amonijaka (NH_5O) ali urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$). Najboljšo redukcijo dobimo, če sta odpadni zrak in amonijak v razmerju 1:1 izraženo v molski masi.

V katalitičnem pretvorniku mešanica odpadnega zraka in reaktanta reagira s katalizatorjem in se pretvori v N₂ in H₂O po naslednjih kemijskih enačbah:



Zmanjševanje izhodne koncentracije NO_x je omejeno. Zaradi prevelikega odmerka amonijaka lahko pride do pojava, ki se mu reče zdrs amonijaka (ang. ammonia slip). To je pojav, pri katerem amonijak preide čez katalizator brez reakcije. To se lahko zgodi zaradi degradacije katalitičnega pretvornika, prenizke delovne temperature, neenakomerne razpršitve, itd.

Druga metoda za reaktant uporablja spojine ogljikovodika, ki so že prisotne v toku izpušnih plinov. Prednost sistema je torej ta, da dodaten izvor reaktanta ni potreben (npr. posoda z vodno raztopino amonijaka). V primerjavi z metodo, ki za reaktant uporablja amonijak, je učinkovitost metode precej nižja.

Adsorpcijski katalitični pretvornik

Druga rešitev zmanjševanja emisij NO_x je adsorpcijski katalitični pretvornik (ang. NO_x adsorber catalyst – NAC ali lean NO_x trap - LNT), ki adsorbira emisije NO_x, kadar motor deluje v revnem načinu in jih odda, kadar deluje v bogatem. V kratki sekvenci bogatega načina se izpušnim plinom doda vodik (H₂) ali CO, ki v naslednji fazi reagira z adsorbiranim NO_x in se pretvori v H₂O, N₂, NH₃ in N₂O. Taka rešitev zmanjševanja emisij NO_x potrebuje dva načina delovanja motorja, stranski produkt kemičnih reakcij so tudi strupene žveplove spojine, itd. Je pa metoda preprostejša in potrebuje manj vzdrževanja kot metoda SCR.

Recirkulacija izpušnih plinov

Rešitev zmanjševanja emisij NO_x, ki ne temelji na uporabi katalitičnih pretvornikov, je recirkulacija izpušnih plinov (ang. Exhaust Gas Recirculation - EGR). Deluje tako, da pošlje del izpušnih plinov nazaj v proces izgorevanja. Rešitev je dokaj preprosta, zmanjša pa izkoristek motorja in je pri višjih zahtevah zmanjševanja emisij NO_x neučinkovita.

Sodobni motorji zaradi vse strožjih zahtev uporabljajo kombinacijo vseh zgoraj naštetih tehnologij (SCR + LNT + EGR).

2.2 Izdelava katalitičnega pretvornika

Izdelava katalitičnega pretvornika se začne z mešanjem kovin, kot so baker, cink, aluminijeve zlitine, razni minerali, platina, rodij, iridij in drugih aditivov z vodo. Taka gošča (ang. washcoat) se nato s pomočjo podtlaka nanese v kanale substrata. Substrat, prikazan na sliki 4, je največkrat keramični blok, narejen iz mešanice magnezija, železa in silikatnih mineralov. Po doziranju se katalitične pretvornike odloži v sušilnike. Nazadnje se jih za določen čas odloži v peči, kjer se pri visokih temperaturah sloj kovin zapeče v substrat (proces kalcinacije).



Slika 4: Primeri substratov katalitičnih pretvornikov – končni produkt

2.2.1 Sušilniki

Po doziranju se substrate naloži na pladnje, ki se prepeljejo skozi sušilnike. Namen sušilnikov je, da iz substratov odstranijo vlago, ki je bila potrebna za nanos gošče, in se jih tako pripravi za nadaljnjo obdelavo.

Sušilniki vsebujejo več temperaturnih con. V vsaki coni se temperatura postopoma dviguje, v zadnji pa se keramični bloki ohlajajo. Temperatura v prvih conah se giblje med 100 °C in 150 °C. Dotok svežega in obtok že segretega zraka pod visokim tlakom skrbi, da vlaga v peči ne naraste preveč, ter da se substrati hitreje razvlažijo. Po zaključku sušenja so substrati pripravljeni na novo doziranje, pakiranje ali pa kalcinacijo v pečeh.

2.2.2 Peči

V pečeh poteka proces kalcinacije. To je proces, kjer se material segreje do visokih temperatur (do 750 °C) v zraku ali kisiku. Pri izdelavi katalitičnih pretvornikov se kalcinacija uporablja za odstranjevanje preostale vlage v substratih, obenem pa se nanešen material uleže v pore kanalov substrata tako, da je katalitični pretvornik pripravljen na opravljanje svoje funkcije.

Med segrevanjem gošče, ki je nanešena v substrat, pride do reakcij med goščo in segretim zrakom. Izločajo se plini, kot so dušikov monoksid (NO) in dušikov dioksid (NO₂) in drugi, zato je potrebno odpadni zrak pred izpustom v okolje skladno s predpisi, ki veljajo za industrijske emisije (Direktiva o industrijskih emisijah – IED), očistiti. Za to skrbi čistilna naprava za zmanjševanje emisij NO_x.

2.2.3 Naprava za zmanjševanje emisij NO_x

V industriji sta najpogostejše uporabljena dva različna pristopa zmanjševanja emisij NO_x. Prva je selektivna brez katalitična redukcija (ang. Selective Non-Catalytic Reduction - SNCR). Uporablja se pri procesih, kjer je izgorevanje odprto, t.j. v cementni industriji, pri predelavi odpadkov, v kotlih na trda goriva itd.

Drugi pristop je selektivna katalitična redukcija (ang. Selective Catalytic Reduction - SCR). Izdelava, delovanje in uporaba industrijskega katalitičnega pretvornika so povsem identični kot izdelava, delovanje in uporaba avtomobilskega katalitičnega pretvornika, ki je opisan v poglavju 2.1.

Kot reaktant je v industrijskih okoljih lahko uporabljen amonijak (NH₃), vodna raztopina amonijaka (NH₅O) ali urea (CO(NH₂)₂).

Glede na to, da pri sušenju substratov ne poteka izgorevanje, je pri zmanjševanju emisij NO_x uporabljena metoda SCR, kot reaktant pa vodna raztopina amonijaka. Količina vbrizga vodne raztopine amonijaka je določena z želeno vrednostjo izhodne koncentracije NO_x.

Uporabljeni sistem zmanjševanja emisij NO_x v odpadnem zraku iz peči in sušilnikov vsebuje naslednje gradnike:

- sistem, ki skrbi za pripravo odpadnega zraka,
- sistem ciklonov,
- sistem za merjenje vhodne in izhodne koncentracije plinov NO_x,
- toplotna izmenjevalnika,

-
- gorilnik, ki prilagaja temperaturo odpadnega zraka,
 - sistem za vbrizg vodne raztopine amonijaka in
 - katalitični pretvornik;

Celoten diagram cevovodov in merilnikov (ang. piping and instrumentation diagram - P&I-diagram) je podan v prilogi 7.1.

Sistem ciklonov

Cikloni so pasivne naprave, sestavljene iz več loput in posod. Uporabljeni so za izločanje delcev iz toka odpadnega zraka. Delci morajo biti suhi in večji od 10 μm .

Odstranjevanje delcev iz toka odpadnega zraka poteka tako, da se v ciklonu generirata dva vrtinca; zunanji in notranji, ki se vrtita v nasprotno smer. Notranji je tok odpadnega zraka, zunanji pa skrbi za odstranjevanje delcev. Čeprav imajo delci majhno maso, je ta zadostna, da nastane centrifugalna sila, ki delce iz notranjega vrtinca posrka v zunanjega in jih tako izloči iz toka odpadnega zraka.

Sistem za merjenje vhodne in izhodne koncentracije plinov NO_x

Za ustrezno upravljanje s sistemom za zmanjševanje emisij NO_x je potrebno poznati koncentracijo emisij v odpadnem zraku. Razmerje NO proti NO_2 je odvisno od količine prisotnega kisika in temperature. Pri višji temperaturi je koncentracija NO višja, pri nižjih pa je višja koncentracija NO_2 . Pri meritvah se običajno uporablja tudi pretvornik – katalizator iz NO_2 v NO .

Obstaja več različnih načinov merjenja koncentracije NO_x . Najbolj razširjena je metoda določanja koncentracije NO_x s kemiluminiscenco. To je metoda, pri kateri pride do sevanja svetlobe kot posledice kemične reakcije. V primeru merjenja koncentracije NO_x , NO in NO_2 reagirata z ozonom (O_3).

Alternativa kemiluminiscenci je metoda diferenčnega UV-sevanja, pri kateri se z visoko frekvenčno indukcijo v cevovodu ustvari plazma. Valovna dolžina sevanja NO je 226 nm. Preko različnih filtrov lahko izmerimo spektre izsevane svetlobe z in brez valovne dolžine NO . Koncentracija NO se izračuna iz dobljenih rezultatov.

Obstajajo tudi t.i. in situ analizatorji. To so analizatorji, ki so še v razvoju. Sestavljeni so iz porozne kovinske cevi, ki deluje kot filter in je vstavljena neposredno v tok odpadnega zraka. Koncentracija NO_x , ki prodre v cev, je izmerjena z metodo UV ali IR. Od tu naprej obstaja več različnih statističnih metod za določanje koncentracije.

V prihodnosti lahko pričakujemo še več različnih metod merjenja emisij NO_x, kajti avtomobilska industrija intenzivno razvija merilnike, ki bodo v prihodnosti obvezni v vsakem avtomobilu. Razvijajo se metode, osnovane na elektrokemijskih, površinsko plazemskih resonancah, površinsko akustičnih valovih in drugih tehnologijah.

V obravnavanem sistemu je uporabljena metoda za merjenje koncentracije emisij NO_x z UV-analizo. Ob cevovodu odpadnega zraka je dodan še manjši cevovod za zajem vzorca zraka, v katerem je nameščen UV-analizator plina, ki je nastavljen za merjenje koncentracije plinov NO_x.

Sistem vsebuje dva analizatorja NO_x. Prvi se nahaja za cikloni, drugi pa pred izpustom v ozračje.

Karakteristike merilnikov so podane v tabeli 1.

Tabela 1: Karakteristike merilnikov NO_x

Območje merilnika	0 ppm – 200 ppm
Predvideni pretok vzorčnega zraka	60 l/h
Natančnost	± 2 %
Vzorčni čas	60 s pri pretoku 60 l/h

Pretvorba koncentracije NO_x v odpadnem zraku iz števila delcev na milijon (ppm) v mg/m³ je izračunana po naslednjih enačbah:

$$\text{NO}_{(\text{mg/m}^3)} = 1,34 * \text{NO}_{(\text{ppm})} \quad (2)$$

$$\text{NO}_{2(\text{mg/m}^3)} = 2,053 * \text{NO}_{2(\text{ppm})}$$

Toplotna izmenjevalnika in gorilnik

Temperatura odpadnega zraka pred katalitičnem pretvornikom se poveča z izmenjevalnikoma toplote in gorilnikom. Primerna temperatura odpadnega zraka je pomembna zaradi učinkovitosti redukcije NO_x.

Izmenjevalnika toplote skrbita za regeneracijo toplote iz toka zraka, ki je izstopil iz katalitičnega pretvornika nazaj v tok zraka, ki vstopa v katalitični pretvornik.

Uporabljen je plinski gorilnik, ki je vgrajen v cevovod. Količina vbrizganega goriva se določi glede na temperaturo zraka pred katalitičnem pretvornikom.

Sistem za vbrizg vodne raztopine amonijaka

Sistem skrbi za primeren vbrizg vodne raztopine amonijaka, ki se vbrizga v tok odpadnega zraka pod visokim tlakom prek šobe, nameščene v cevovodu.

Količina vbrizgane tekočine je določena z mešanico vode in vodne raztopine amonijaka.

Katalitični pretvornik

Sistem SCR je sestavljen iz treh stopenj oziroma reaktorjev, kjer sta dva reaktorja zapolnjena s katalitičnim pretvornikom, tretji pa je prost. S tem se doseže visoko pretvorbo NO_x ob zelo majhnem zdrs amonijaka. Večina NO_x in amonijaka se pretvori pri kemičnih reakcijah v prvem reaktorju, preostali amonijak pa se pretvori v drugi stopnji.

Tehnične karakteristike uporabljenih katalitičnih pretvornikov so v tabeli 2. Vsak reaktor je sestavljen iz več manjših katalitičnih pretvornikov.

Tabela 2: Karakteristike uporabljenih katalitičnih pretvornikov

Dimenzije na reaktor	960 x 960 x 4463	mm
Teža na reaktor	1050	kg
Površina	0,73	m ²
Specifična površina	1100	m ² / m ³
Padec tlaka na katal. pretvorniku	24	mBar

Sistem katalitičnih pretvornikov je načrtovan za določeno območje pretoka odpadnega zraka, prav tako temperatura ne sme biti prenizka ali previsoka, saj v tem primeru delovanje katalitičnega pretvornika ni optimalno oziroma sploh ne deluje. Karakteristike sistema so podane v tabeli 3.

Tabela 3: Karakteristike sistema za zmanjševanje emisij NO_x

Delovni pretok	30 000 – 60 000	Nm ³ /h
Delovna temperatura	220 – 450	°C
Delovni tlak	od – 160 do 0	mBar
NO_x - vhod	do 200	ppt
NO_x - izhod	do 50	ppt
Sajasti delci	do 1	mg/Nm ³
Padec tlaka	30	mBar

*Nm³ = m³ pri 0°C in 1013 mBar

Opis pomembnejših procesnih signalov

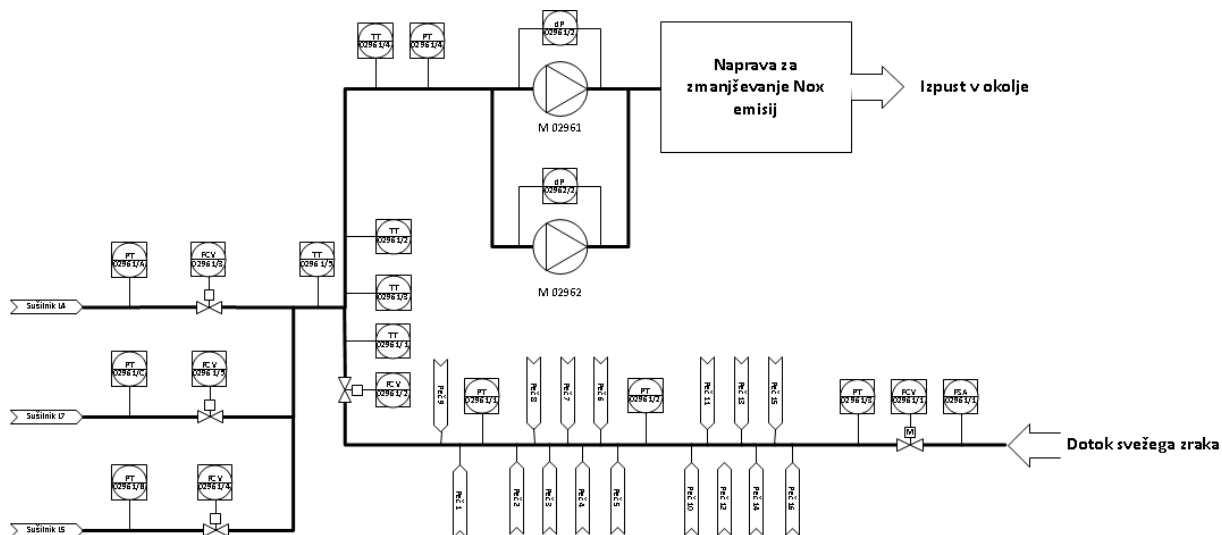
V tabeli 4 so zbrani merilniki in aktuatorji, ki so uporabljeni v sistemu zmanjševanja emisij NO_x, razen merilnikov, ki se uporabljajo v sistemu za pripravo odpadnega zraka in so opisani v poglavju 2.2.4

Tabela 4: Merilniki v sistemu za zmanjševanje emisij NO_x

Oznaka	Opis
XV 02964/1-10	Lopute za dovod in odvod zraka v in iz ciklonov
TT 02961 /1-2	Merilnika temperature vhodnega zraka na toplotnih izmenjevalnikih
TT 02964/1	Merilnik temperature odpadnega zraka za cikloni
TT 02966/1	Merilnik temperature za vbrizgom vodne raztopine amonijaka. Uporablja se za vodenje temperature zraka z gorilnikom
TT 02968/2, TT 02965/3	Merilnika temperature izhodnega zraka na toplotnih izmenjevalnikih
TT 02965/4	Merilnik temperature izhodnega zraka
dP 02965/2	Merilnik diferencialnega tlaka na izmenjevalniku toplote
dP 02967/1	Merilnik diferencialnega tlaka na vbrizgu vodne raztopine amonijaka
dP 02968/1	Merilnik diferencialnega tlaka na katalitičnem pretvorniku
QIA 02965/1	Merilnik vhodne koncentracije NO _x
QIA 02965/2	Merilnik izhodne koncentracije NO _x

2.2.4 Sistem za pripravo odpadnega zraka iz peči in sušilnikov

Glede na karakteristike sistema za zmanjševanje emisij NO_x in karakteristike izhodnega zraka iz sušilnikov in peči je potrebno odpadni zrak najprej pripraviti. Zagotoviti je potrebno predvsem primeren pretok in temperaturo, hkrati pa v cevovodu vzdrževati primeren podtlak odpadnega zraka iz peči in sušilnikov. Paziti je potrebno tudi, da je podtlak na izhodu iz sušilnikov in peči primeren, saj zaradi previsokega ali prenizkega podtlaka lahko pride do izpada proizvodnje. Prav tako je v cevovodu potrebno vzdrževati primerno temperaturo in tlak. V ta namen je sistem za pripravo zraka opremljen z zveznimi loputami, merilniki tlaka, pretoka in temperature ter ventilatorjema, ki sta krmiljena prek frekvenčnih pretvornikov. Razporeditev naprav v sistemu za pripravo odpadnega zraka je prikazana na sliki 5.



Slika 5: P&I-diagram sistema za pripravo odpadnega zraka

Opis procesnih signalov

Veličine, katere merimo, in na katere lahko vplivamo, so razdeljene v naslednje skupine:

- signali merilnikov,
 - merilniki temperature,
 - diferencialni in relativni merilniki tlaka,
- signali pozicij loput,
- signali frekvenčnih pretvornikov za krmiljenje ventilatorjev.

Merilniki temperature

Merilniki temperature so v sistemu za pripravo zraka razporejeni po cevovodu zraka tako, da merijo temperaturo zraka iz peči in sušilnikov. Oznake merilnikov, njihovo delovno območje in pozicija so opisani v tabeli 5.

Merilniki tlaka

Za merjenje tlaka so uporabljeni relativni in diferencialni merilniki, ki so razporejeni po cevovodu odpadnega zraka, tako kot je opisano v tabeli 6.

Tabela 5: Seznam temperaturnih merilnikov

Oznaka merilnika	Delovno območje	Enota	Opis
TT 02961/1	– 20 do 550	°C	Merilnik temperature odpadnega zraka iz peči
TT 02961/2	– 20 do 550	°C	Merilnik temperature združenega odpadnega zraka iz peči in sušilnikov na zunanji strani zgradbe
TT 02961/3	– 20 do 550	°C	Merilnik temperature združenega odpadnega zraka iz peči in sušilnikov
TT 02961/4	– 20 do 250	°C	Merilnik temperature odpadnega zraka pred ventilatorjema
TT 02961/5	– 20 do 550	°C	Merilnik temperature odpadnega zraka iz sušilnikov

Tabela 6: Seznam tlačnih merilnikov

Oznaka merilnika	Delovno območje	Enota	Opis
PT 02961/1	– 300 do 100	Pa	Merilnik tlaka odpadnega zraka iz peči 1
PT 02961/2	– 300 do 100	Pa	Merilnik tlaka odpadnega zraka iz peči 2
PT 02961/3	– 300 do 100	Pa	Merilnik tlaka za loputo za dovod svežega zraka
PT 02961/4	– 2000 do 100	Pa	Merilnik tlaka odpadnega zraka pred ventilatorjema
PT 02961/A	– 300 do 100	Pa	Merilnik tlaka odpadnega zraka iz sušilnika linije 4
PT 02961/B	– 300 do 100	Pa	Merilnik tlaka odpadnega zraka iz sušilnika linije 5
PT 02961/C	– 300 do 100	Pa	Merilnik tlaka odpadnega zraka iz sušilnika linije 7
dP 02961/2	0 do 8000	Pa	Merilnik diferencialnega tlaka na prvem ventilatorju
dP 02962/2	0 do 8000	Pa	Merilnik diferencialnega tlaka na drugem ventilatorju
dP 02965/1	0 do 8000	Pa	Merilnik diferencialnega tlaka na toplotnem izmenjevalniku

Merilnik diferencialnega tlaka na toplotnem izmenjevalniku dP 02965/1 se uporablja za izračun pretoka zraka FIA 02965/2. Izračun se izvede po enačbi (3):

$$\Phi_{\text{zrak}} = v_{\text{zrak}} * A * 3600 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (3)$$

kjer so:

$$v_{zrak} = \sqrt{\frac{p * 2}{\frac{R}{\rho}}} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\rho = 1,293 * \frac{273}{273 + T} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$R = 4,6285$$

$$A = 2,1316 \text{ m}^2$$

$$p = \text{dP } 02965/1 \text{ [Pa]}$$

$$T = \text{TT } 02965/4 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Lopute

Lopute so razporejene tako, da omogočajo regulacijo pretoka in tlaka zraka v cevovodu. Oznake, opisi in lokacije so opisane v tabeli 7. Uporabljajo se zvezne lopute, ki vračajo povratno informacijo o poziciji.

Tabela 7: Seznam loput

Oznaka lopute	Delovno območje	Enota	Opis
FCV 02961/1	0 do 100	%	Položaj lopute za dovod svežega zraka
FCV 02961/2	0 do 100	%	Položaj lopute za zaporo dovoda odpadnega zraka iz peči
FCV 02961/3	0 do 100	%	Položaj lopute za dovod odpadnega zraka iz sušilnika linije 4
FCV 02961/4	0 do 100	%	Položaj lopute za dovod odpadnega zraka iz sušilnika linije 5
FCV 02961/5	0 do 100	%	Položaj lopute za dovod odpadnega zraka iz sušilnika linije 7

Ventilatorja

Ventilatorja sta krmiljena preko frekvenčnih pretvornikov. Vezana sta v redundantni sistem, kar pomeni, da se v primeru izpada prvega vklopi drugi. Naenkrat lahko deluje le en ventilator. Oznaki ventilatorjev sta podani v tabeli 8.

Tabela 8: Seznam ventilatorjev

Oznaka ventilatorja	Delovno območje	Enota	Opis
M 02961	20 do 35	Hz	Hitrost vrtenja ventilatorja 1
M 02962	20 do 35	Hz	Hitrost vrtenja ventilatorja 2

Uporabljeno je tudi senzorsko stikalo pretoka FSA 02961. Uporabljeno je za detekcijo dotoka svežega zraka v cevovod. Aktivira se, ko tlak preseže 50 Pa.



3. Obstoječe stanje sistema za pripravo odpadnega zraka

V poglavju je opisano predhodno stanje sistema za pripravo odpadnega zraka iz peči in sušilnikov ter predlog avtomatizacije sistema, ki ga je pripravil naročnik.

3.1 Predhodno stanje

V prvi fazi je bila priprava odpadnega zraka krmiljena ročno. Glede na število delujočih sušilnikov in peči je operater izkustveno nastavil položaj loput in hitrost vrtenja ventilatorja. Po priključitvi sušilnikov in peči na novi proizvodni liniji obstoječega sistema vodenja ni bilo več mogoče obvladovati ročno.

S strani naročnika smo dobili predlog avtomatizacije priprave zraka, ki smo jo z nekaj prilagoditvami tudi izvedli.

3.2 Opis obstoječega stanja

Program smo pripravili glede na diagrame poteka sistema vodenja priprave odpadnega zraka, ki smo jih dobili od naročnika.

Po prvih preizkusih sistema smo ugotovili, da temperatura odpadnega zraka pred ventilatorjema praktično ni pomembna, ker zaradi oddaljenosti sušilnikov in peči od katalitičnega pretvornika odpadni zrak večino toplotne energije odda v okolje. Primerno temperaturo pred katalitičnim pretvornikom zagotavlja le plinski gorilnik. Po dogovoru z naročnikom smo temperaturne merilnike v sistemu za pripravo zraka uporabili le za alarmiranje in prikazovanje na nadzornem sistemu.

V vmesnem času je naročnik pripravil novo verzijo diagramov, ki temelji na stari. Dodane so rešitve, ki naj bi rešile težave, na katere smo naleteli ob testiranju stare verzije. Nova verzija diagramov poteka je podana v prilogi 7.2.

Glede na zahteve, ki smo jih dobili od naročnika, naj bi bil sistem zmožen samodejno voditi naslednje veličine:

- pretok odpadnega zraka FIA 02965/1,
- tlak odpadnega zraka v cevovodu iz peči PT 02961/1,
- tlak pred ventilatorjema PT 02961/4,
- diferencialni tlak na delujočem ventilatorju dP 02961/2 ali dP 02962/2 in

-
- tlak odpadnega zraka iz sušilnikov PT 02961/A, PT 02961/B in PT 02961/C.

Poleg vseh naštetih veličin je potrebno spremljati tudi temperaturo odpadnega zraka. V primeru, da temperatura v cevovodu iz peči TT02961/1 ali pred ventilatorjema TT 02961/4 preseže nastavljeno vrednost (195 °C oziroma 475 °C) za dlje kot minuto, mora sistem samodejno popolnoma odpreti loputo za dovod svežega zraka FCV 02961/1.

Vodenje pretoka odpadnega zraka FIA 02965/2 poteka z regulacijo položaja lopute za dotok svežega zraka FCV 02961/1. V primeru, da je pretok pol minute višji kot nastavljen maksimalni pretok, sistem vodenja glede na diagram Pretok odpadnega zraka v prilogi 7.2 najprej zapre loputo za 5 % glede na trenutno pozicijo. Zapiranje lopute ni možno, če je temperatura v cevovodu previsoka oziroma je loputa že popolnoma zaprta. V tem primeru sistem poskuša zmanjšati pretok s postopnim zapiranjem loput na sušilnikih in lopute na koncu cevovoda iz peči. Lopute se zapirajo za 5 % v naslednjem vrstnem redu: najprej loputa na sušilniku linije 7 FCV 02961/5, nato loputa na sušilniku linije 5 FCV 02961/4, sledi ji loputa na liniji 4 FCV 02961/3 in nazadnje še loputa na koncu cevovoda iz peči FCV 02961/2.

V primeru, da je pretok manjši kot nastavljen minimalni pretok dlje kot pol minute, se loputa za dotok svežega zraka postopoma odpira za 20 %. Če je loputa popolnoma odprta, pretok pa še vedno prenizek, se začnejo postopno za 5 % odpirati še lopute na sušilnikih.

Po vsaki spremembi pozicije katerekoli od loput je potrebno počakati pol minute, da se pretok v sistemu umiri.

Vodenje tlaka pred ventilatorjema PT 02961/4 poteka z reguliranjem hitrosti vrtenja motorja delujočega ventilatorja. Če je tlak dlje kot pol minute nižji kot minimalna nastavljena vrednost, se hitrost motorja ventilatorja zmanjša za 1 Hz. V nasprotnem primeru, če je tlak višji od maksimalne nastavljene vrednosti dlje kot pol minute, se hitrost motorja ventilatorja poveča za 1 Hz. Območje spreminjanja hitrosti motorja ventilatorja je omejeno na interval od 20 do 35 Hz. Po vsaki spremembi hitrosti vrtenja motorja ventilatorja je potrebno počakati minuto, da minejo prehodni pojavi in se tlak umiri.

Vodenje diferencialnega tlaka na delujočem ventilatorju je izvedeno s spreminjanjem položaja lopute na koncu cevovoda iz peči (FCV 02961/2). Če je tlak na delujočem ventilatorju dlje kot minuto višji od maksimalne nastavljene vrednosti, se loputa odpre za dodatnih 10 % glede na trenutno pozicijo.

Vodenje tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz sušilnikov je izvedeno s spreminjanjem položaja pripadajoče lopute na sušilniku. V prvi verziji, ki jo je pripravil naročnik, je bilo spreminjanje pozicije

pripadajoče lopute na sušilniku izvedeno na podoben način, kot so izvedene druge regulacijske zanke. Torej s stopenjskim spreminjanjem položaja za $\pm 5\%$, če je bil tlak dlje kot minuto izven nastavljenega območja. Ker smo želeli preizkusiti delovanje zveznega spreminjanja položaja loput, smo za določanje pozicije loput uporabili regulatorje PID. Parametre regulatorjev smo določili s poskušanjem. Želena vrednost tlaka smo nastavili na -150 Pa .

Pri vodenju tlaka odpadnega zraka iz sušilnikov je dodan tudi pogoj, da razlika med tlakom na sušilniku in tlakom pred ventilatorjem ne sme biti dlje kot minuto manjša od 100 Pa , kar preprečuje pretok zraka nazaj iz sistema priprave odpadnega zraka v sušilnik. V tem primeru se loputa na pripadajočem sušilniku popolnoma zapre.

Vodenje tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz peči je izvedeno s spreminjanjem položaja lopute FCV 02961/2. Določanje položaja lopute je izvedeno podobno kot pri vodenju tlaka v cevovodu iz sušilnikov s to razliko, da je spreminjanje položaja lopute mogoče le v nastavljenem območju (npr. med 25% in 100%). Območje je navzdol omejeno, ker je loputa nameščena v cevovodu, ki skrbi tudi za dotok svežega zraka v sistem. Popolna zapora lopute torej lahko onemogoči nekatere druge regulacijske zanke.

V primeru, da je tlak PT 02961/1 manjši od minimalne nastavljene vrednosti dlje kot 10 sekund in je loputa FCV 02961/2 že na spodnji meji nastavljenega delovnega območja, se za 20% odpre loputa za dotok svežega zraka FCV 02961/1.

3.3 Slabosti obstoječega sistema vodenja procesa

Iz zgoraj opisanega sledi, da je samodejno delovanje sistema vodenja, ki ga je posredoval naročnik, zelo podobno ročnemu delovanju, saj se hitrost ventilatorja in položaj loput spreminja stopenjsko, po vsaki spremembi pa je potrebno počakati določen čas, da minejo prehodni pojavi. Težave pri delovanju povzroča tudi prepletenost regulacijskih zank, saj ena zanka vpliva na veličino, ki jo želimo regulirati z drugo zanko. Na primer vodenje lopute za dotok svežega zraka zaradi prenizkega tlaka na cevovodu iz peči povzroči tudi spreminjanje pretoka.

Ugotovili smo tudi, da povečanje pretoka povzroči znižanje tlaka na cevovodih iz peči in sušilnikov, zaradi česar pride do nasičenja regulatorjev PID. Menimo, da bi bilo potrebno ob spremembi želene vrednosti pretoka samodejno spremeniti tudi želeno vrednost tlaka na sušilnikih.

Podobno se dogaja tudi pri spreminjanju hitrosti vrtenja delujočega ventilatorja zaradi regulacije tlaka pred ventilatorjem. Sprememba hitrosti ventilatorja vpliva na spremembo pretoka zraka in s tem tudi na tlak v cevovodih iz sušilnikov in peči.

Ker izvedeni predlog vodenja sistema priprave odpadnega zraka ne deluje po pričakovanjih in kljub popravkom in prilagoditvam v avtomatskem načinu še vedno povzroča nemalo težav, in ker menimo, da je mogoče avtomatizacijo priprave izvesti na drugačen / bolj optimalen način, smo v nadaljevanju pripravili študijo izboljšanega sistema vodenja.

4. Identifikacija procesa

Prilagajanje in testiranje sistema vodenja na realnem sistemu priprave odpadnega zraka iz peči in sušilnikov je praktično nemogoče, ker morajo za določitev ustrezne strukture in nastavitve parametrov uporabljenih regulatorjev sušilniki in peči delovati. Tako eksperimentiranje na sistemu, ko so proizvodne linije ustavljene, nima smisla. V primeru, da proizvodnje linije delujejo in so s tem tudi sušilniki in peči v uporabi, pa nam naročnik ne bi dovolil izvajati eksperimentov na sistemu, ker bi to v primeru napačnega delovanja regulatorjev lahko privedlo do neustreznih obratovalnih pogojev v sušilnikih ali pečeh in s tem do zaustavitve celotne proizvodne linije. Zaustavitev pa pomeni slabšo kvaliteto izdelka ali celo izmet celotne serije izdelka.

Zaradi zgoraj naštetih razlogov smo se odločili, da poskusimo zgraditi matematični model sistema in eksperimente izvajati na modelu.

Zaradi kompleksnosti in nepoznavanja določenih parametrov sistema smo se odločili, da model sistema poskusimo zgraditi z eno od identifikacijskih metod.

4.1 Identifikacija sistema z mehko logiko

Obravnavani sistem priprave odpadnega zraka je tako kot velika večina realnih procesov nelinearen. Ker predstavitev sistemov, ki kažejo nelinearen značaj, negotovost in nenatančnost ter časovno spremenljivost in so na splošno kompleksni, s konvencionalnimi metodami identifikacije oziroma modeliranja ni dovolj zadovoljiva, so se razvile metode, s katerimi se take sisteme lahko uspešno identificira. Med največkrat uporabljene metode identifikacije nelinearnih modelov spada tudi metoda, ki za modelno strukturo uporablja mehko logiko.

Že vse od postavitve teoretičnih temeljev v šestdesetih letih prejšnjega stoletja se je mehka logika izkazala za uporabno na mnogih področjih. Prav modeliranje oziroma identifikacija in vodenje kompleksnih dinamičnih sistemov spadata med področji, kjer se je mehka logika izkazala za najbolj uporabno.

Mehka identifikacija oziroma mehko modeliranje se je tako kot druge podobne tehnike (npr. nevronske mreže) uveljavila kot tehnika identifikacije, ki olajša učinkovit razvoj modelov kompleksnih sistemov.

Prednosti mehke logike proti klasični logiki so:

- koncept mehke logike je enostavno razumljiv. Matematično ozadje je relativno enostavno,
- je prilagodljiva. Lahko jo vgradimo v že obstoječe sisteme, ne da bi bilo potrebno začeti vzpostavljati sistem znova,
- omogoča delo z netočnimi podatki,
- z mehko logiko se lahko modelira nelinearne funkcije s poljubno kompleksnostjo in natančnostjo, kar pomeni, da se lahko modelira kakršnokoli množico vhodno-izhodnih podatkov,
- lahko se kombinira s konvencionalnimi tehnikami vodenja. Mehki sistemi v mnogih primerih ne zamenjujejo konvencionalnih tehnik vodenja, temveč jih dopolnjujejo in poenostavljajo njihovo uporabo,
- temelji na naravnem jeziku in je zato njena uporaba enostavna in razumljiva.

Uporaba mehke logike je smiselna v primeru nelinearnih kompleksnih sistemov in sistemov, kjer so podatki pridobljeni iz merilnikov nezanesljivi. Na nivoju računanja se mehke modele lahko obravnava kot prilagodljive matematične strukture, podobne nevronske mreže, ki so približek kompleksnim nelinearnim sistemom z želeno stopnjo natančnosti.

4.1.1 Mehka logika

Mehke množice

Mehka logika temelji na mehkih množicah (ang. fuzzy sets). Mehka množica je množica, ki je brez ostre meje. Za razliko od klasične množice, ki popolnoma vključuje element ali pa ga popolnoma izključuje, lahko mehka množica vsebuje elemente, ki imajo le delno pripadnost množici.

Obstaja več načinov, kako so lahko mehke množice vključene v sistem:

- V opisu sistema. Sistem je lahko izražen kot zbirka pravil »če – potem« (npr.: če je grelnik vklopljen, potem bo temperatura v sobi naraščala).
- V specifikacijah sistemskih parametrov. Sistem je definiran z algebrasko ali diferencialno enačbo, parametri v enačbi pa so namesto realnih mehke vrednosti ($y = \tilde{a} * 1 + \tilde{b} * 2$, kjer sta $\tilde{a}$ in $\tilde{b}$ mehki vrednosti). Mehka števila v tem primeru določajo negotovost vrednosti parametrov.
- Vhodi, izhodni ali spremenljivke stanja sistema so mehke množice. Mehki vhodi so lahko vrednosti iz nezanesljivih merilnikov (šum) ali pa vrednosti, povezane s človeškim doživetjem (toplota, lepota, starost, itd.). Mehki sistemi lahko uporabljajo take signale, kar pri konvencionalnih sistemih ni mogoče.

Pripadnostne funkcije

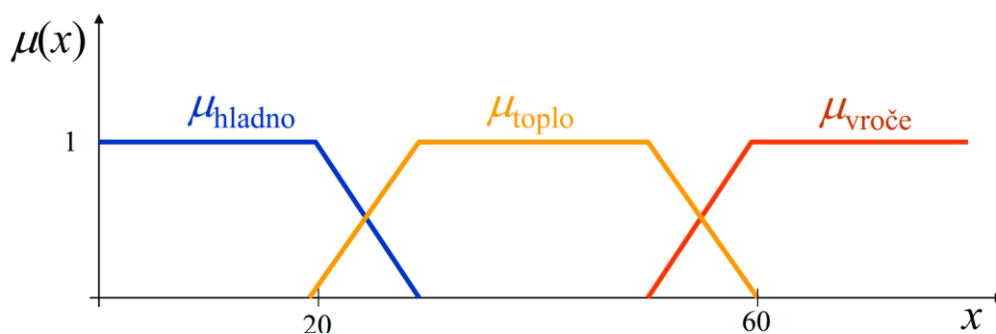
Mehka logika pomeni razširitev klasične logike in je bila razvita zaradi kvalitativnega opredeljevanja informacije in ne definira samo popolne veljavnosti ali pa popolne neveljavnosti neke izjave, kot je to v primeru klasične logike, temveč tudi vmesne stopnje veljavnosti. Torej stopnje med popolno veljavnostjo in popolno neveljavnostjo. Na ta način se uvede mehkost v dojemanje informacij. Funkcija, ki definira vsaki točki vhodnega prostora pripadajočo pripadnost v obliki realnega števila med nič in ena, se imenuje pripadnostna funkcija (ang. membership function). Vhodni prostor se imenuje tudi domena vhodne spremenljivke.

Pripadnostne funkcije so lahko najrazličnejših oblik od trapezoidne, trikotne, gaussove, uporabniško definirane itd. in morajo izpolnjevati pogoj, da ležijo pripadnosti na intervalu med nič in ena. Pripadnostna funkcija je preprosta, učinkovita glede na problem in računsko nezahtevna.

Lingvistična spremenljivka

Mehka logika definira tudi pojem mehka ali lingvistična spremenljivka. Vsaki lingvistični spremenljivki je prirejena ena ali več lingvističnih vrednosti, ki so povezane z numeričnimi vrednostmi preko pripadnostnih funkcij.

Slika 6 prikazuje povezavo med lingvistično spremenljivko X (temperatura) in pripadnostnimi funkcijami $\mu(x)$, ki tvorijo mehko množico z vsebino {hladno, toplo, vroče}.



Slika 6: Primer pripadnostnih funkcij in lingvistične spremenljivke

Logični operatorji

Tako vlogo, kot jo ima v klasični logiki logični operator IN (ang. AND), ima v mehki logiki iskanje minimuma (operator min). V primeru operatorja ALI (ang. OR) pa iskanje maksimuma (operator max). Iz napisanega zgoraj lahko sklepamo, da v mehki logiki izjavo $A \text{ IN } B$ zapišemo s funkcijo $\min(A, B)$. Na

enak način lahko izjavo $A \text{ ALI } B$ zapišemo s funkcijo $\max(A, B)$. Logično operacijo negiranja (ang. NOT) pa zapišemo kot $1-A$.

Mehka pravila

Z vidika sistemske teorije je bistvo mehke logike v zapisu preslikave med vhodnim in izhodnim prostorom. Zapis te preslikave se izvede z množico pravil »če - potem« (ang. »if – then« rules). Pravila definirajo relacijo med vhodnimi spremenljivkami na vzročnem delu pravila in izhodnimi spremenljivkami na posledičnem delu pravila z naslednjo trditvijo:

če je vzročni del pravila izpolnjen, potem priredi izhodu določeno vrednost
(ang. if *antecedent proposition*, then *consequent proposition*)

ali zapisano v drugačni v obliki:

če je x enako A , potem je y enako B
vzročni del *posledični del*
(ang. if x is A , then y is B)
antecedent, *consequence,*
premise *conclusion*

Vzročni del (ang. antecedent, premise) je vedno lingvistična spremenljivka, ki ima vrednost med nič in ena, odvisno od ujemanja/podobnosti vhodne spremenljivke in konstante, s katero primerjamo vhod. Glede na obliko posledičnega dela stavka, ki se imenuje tudi konsekvence (ang. consequence) pa se mehki sistemi ločijo na dva različna tipa. To sta:

- lingvistični ali mehki sistem Mamdani in
- mehki sistem Takagi-Sugeno (TS).

Lingvistični ali mehki sistem Mamdani je sistem, pri katerem so tako vhodne kot izhodne spremenljivke lingvističnega tipa.

Drugi tip mehkega sistema je tip Takagi-Sugeno, kjer je vhodna spremenljivka lingvistična, izhodna pa ima ostro vrednost.

Mehka pravila se lahko interpretirajo na naslednji način: najprej se izvede vzročni del ali premisa, kjer se realizira mehčanje ali fuzifikacija vhodne spremenljivke. Ob upoštevanju mehkih operatorjev se v drugem koraku tvori posledica pravila, ki se ji reče implikacija. Premisa je lahko sestavljena iz več delov (npr.: če je nebo sivo in veter močan, potem ...). V tem primeru se premise izračunavajo istočasno in rezultirajo v eni sami vrednosti z uporabo mehkih logičnih operatorjev, ki so elementi premise.

Tudi posledični del je lahko sestavljen iz več delov (npr.: če je temperatura nizka, potem ventil za vročo vodo odpri in ventil za mrzlo vodo zapri), kjer premisa enako vpliva na vsakega od delov v posledičnem delu.

Na splošno eno samo pravilo nima posebnega vpliva. Smiselno je sestavljanje več pravil med seboj. Izhod pravila je mehka množica, toda ker na splošno zahtevamo, da je izhod celotnega nabora pravil eno samo število, najprej izvedemo postopek agregacije in iz posameznih mehkih množic tvorimo eno samo mehko izhodno množico. Tako dobljeno izhodno mehko množico ostrimo (defuzificiramo) in dobimo realno število.

Metode mehkega modeliranja in identifikacije so bile uspešno uporabljene na velikem številu realnih procesov. Največkrat je za identifikacijo uporabljen tip mehkih sistemov Takagi-Sugeno. Mehki modeli so lahko uporabljeni za različne namene: za analizo, načrtovanje, vodenje, spremljanje in nadzor procesov.

4.1.2 Mehki tip modela Takagi-Sugeno

Mehki model Takagi-Sugeno (TS) je model, pri katerem je izhod modela eksplicitno določen kot funkcija vhoda modela, najpogosteje kot linearna funkcija. Ideja mehkega modela Takagi-Sugeno je, da nelinearni sistem lahko opišemo z več linearnimi modeli, ki proces opišejo v neki delovni točki. Ostro izhodno vrednost dobimo kot uteženo povprečje prispevkov posameznih linearnih modelov. Nelinearno obnašanje mehkega modela torej dobimo z mehko združitvijo linearnih lokalnih modelov. Za identifikacijo takega modela je potrebno vhodno-izhodni prostor procesa razdeliti na mehka območja, na katerih lahko definiramo linearni model, ki velja za to območje. Za razdelitev vhodno-izhodnega prostora obstaja več različnih metod, ki so opisane v nadaljevanju.

Načrtovanje mehkega modela Takagi-Sugeno

Načrtovanje mehkega modela se začne z izbiro strukture in parametrov modela. Struktura in parametri določajo prilagodljivost/prožnost modela pri aproksimaciji matematičnih funkcij na podane podatke. Izbiira prave strukture modela igra pri identifikaciji pomembno vlogo. Model z obsežnejšo strukturo v splošnem ne vrne boljših rezultatov identifikacije, sploh v primeru, če podatki, uporabljeni za učenje, vsebujejo šum. Tako lahko model z obsežnejšo strukturo bolje opiše sistem na (verifikacijskih) podatkih za učenje, na drugih (validacijskih) podatkih iz istega procesa pa vrne mnogo slabše rezultate. Na

splošno velja, da je prvi identifikacijski model kar najenostavnejši. Šele ko se izkaže, da takšen model ne zadosti zahtevam, se preide na bolj zahtevne identifikacijske strukture.

Pri izdelavi mehkih modelov izbira strukture vsebuje naslednje korake:

- določitev vhodnih in izhodnih spremenljivk sistema. Pri kompleksnejših sistemih ni vedno jasno, katere spremenljivke vplivajo na izbrane izhodne spremenljivke. Obstaja več metod za določitev medsebojnega vpliva spremenljivk. Od preprostega grafičnega določanja do zapletenejših računalniških analiz podatkov.
- Določitev reda sistema oziroma določitev števila zakasnenih vzorcev na vhodnih in izhodnih spremenljivkah. Število zakasnitev se lahko določi iz predznanja, ki ga imamo o procesu, obnašanja procesa na različna vzbujanja in tudi glede na namen modeliranja.
- Izbira tipa pravil. S to izbiro vplivamo na uporabljeni tip modela, ki je lahko lingvistični ali Takagi-Sugeno. Izbira strukture pravil je odvisna od namena modeliranja in tipa podatkov o sistemu, ki so na voljo.
- Izbira metode mehčanja vhodnih spremenljivk. Izbira je odvisna od tipa vhodnih spremenljivk.
- Izbira metode ostrenja izhodnih spremenljivk. Večinoma se uporabljajo metode, pri katerih se izhod izračuna na podlagi vseh aktivnih pravil. Ker je prav ostrenje računsko najzahtevnejši del mehkega procesiranja, je pomembna tudi razpoložljiva procesorska moč.

Ko je struktura modela določena, se določi še parametre modela. Le-to zajema določitev števila, položaja in oblike izhodnih in vhodnih mehkih funkcij. Glede na njihovo obliko in položaj je potrebno definirati dovolj mehkih funkcij, da pokrivajo vso možno območje vrednosti, ki ga lahko zavzamejo vhodne in izhodne spremenljivke. Število pravil je običajno neposredno določeno z razpoložljivim znanjem. Pri sistemih mehke logike, ki so zgrajeni na numeričnih podatkih, pa je število mehkih pravil določeno s številom mehkih množic, saj mora biti pravil zadosti, da zajamejo vse možne vhodne kombinacije. Gostota mehkih množic določa, kako hitro se lahko spreminja izhod na določenem področju. Tako je v območju, kjer so potrebne hitrejše spremembe izhodne vrednosti, potrebno uporabiti več mehkih funkcij.

Ločimo dve vrsti izdelave mehkih modelov:

- izdelava modela z znanjem o delovanju sistema in
- izdelava modela iz numeričnih podatkov, pridobljenih z eksperimentalnim preizkušanjem na sistemu.

Pri izdelavi modela sistema z znanjem o delovanju sistema se znanje v lingvistični obliki zapiše v obliki baze mehkih pravil. S tem so določeni vhodi in izhodi in red mehkega sistema. Ekspert oziroma poznavalec sistema določi tudi vhodne in izhodne mehke pripadnostne funkcije, postopke sklepanja, mehčanja in ostrenja. Slabost tega pristopa je subjektivnost, nepopolnost in morebitne napake v znanju, ki ga dobimo od eksperta. Delno jih je možno odpraviti z adaptacijo parametrov zgrajenega mehkega sistema na podlagi numeričnih podatkov. Zaradi podobnosti strukture nekaterih tipov mehkih sistemov in umetnih nevronske mreže se za učenje pogosto uporabljajo učne metode nevronske mreže.

Kadar ni razpoložljivega lingvističnega znanja, se mehki model zgradi z uporabo klasičnih identifikacijskih tehnik na podlagi numeričnih podatkov. Na ta način zgrajena baza pravil predstavlja interpretabilen zapis znanja, sicer vsebovanega v numeričnih podatkih. Končna rešitev je torej uporabniku razumljiva. Zato je takšen identifikacijski model lažje preveriti, enostavnejše pa so tudi morebitne modifikacije. Parametri modela so izračunani na več načinov z:

- oceno parametrov modela z uporabo metode najmanjših kvadratov (ang. Least-squares estimation of consequents),
- metodo, ki razdeli vhodni prostor v vnaprej določene enako oddaljene pripadnostne funkcije enakih oblik (ang. Template-based modeling). Pravila so nato dodana tako, da pokrijejo vse kombinacije v vhodnem prostoru, parametri izhodnega prostora pa so določeni z metodo najmanjših kvadratov,
- metodami, ki temeljijo na povezovanju nevronske mreže in mehke logike ter
- metodami, ki temeljijo na mehkem rojenju.

Linearno metodo najmanjših kvadratov je možno uporabiti le za določitev parametrov, od katerih je izhod mehkega sistema linearno odvisen, na primer pri mehkih identifikacijskih modelih Takagi-Sugeno le za koeficiente polinoma za izračun izhoda.

Pri metodah, ki povezujejo nevronske mreže in mehke sisteme, se lahko uporabi za določanje vrednosti parametrov, ki so povezani z izhodom mehkega sistema, eno izmed metod za učenje nevronske mreže, ali pa se mehki sistem zgradi tako, da se uporabijo nevronske mreže za določitev delitve vhodnega prostora.

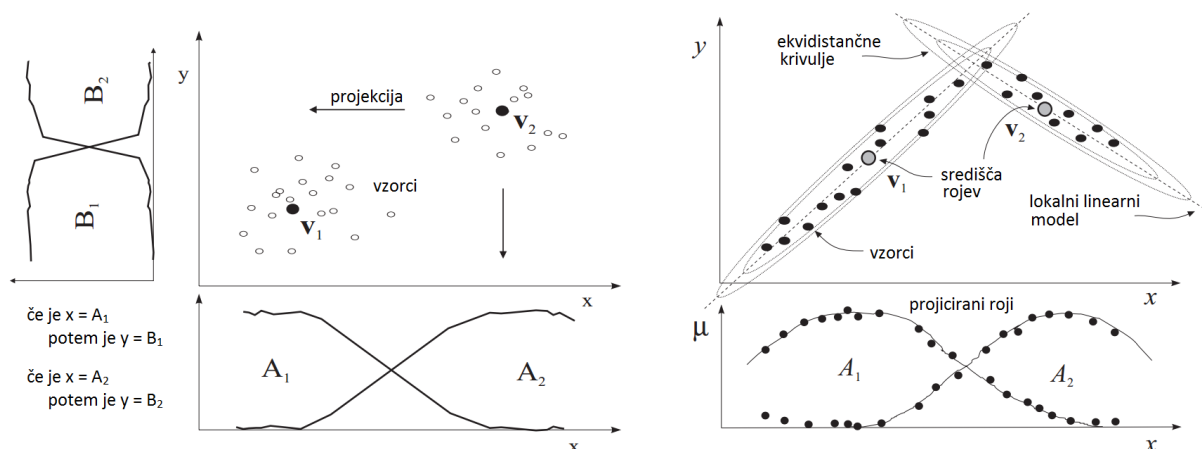
Mehko rojenje (ang. fuzzy clustering)

Identifikacijske metode, ki temeljijo na mehkem rojenju, izvirajo iz področja analize podatkov in razpoznavanja vzorcev. Uporabljen je koncept zbiranja množice podatkov z uporabo spremenljivk, ki opredeljujejo vsak posamezni vzorec. Spremenljivke vsakega vzorca se določijo kot mere podobnosti proti drugim vzorcem. Roj vsebuje vzorce, ki imajo veliko medsebojno podobnost – so si blizu.

Mehko rojenje uporablja particijsko rojenje, ki vzorce v prostoru razdeli v podmnožice. Vsak vzorec lahko pripada več rojem, vendar z določeno pripadnostjo, ki je med nič in ena. Vsota vseh pripadnosti za določen vzorec pa je enaka ena.

Podatki (vzorci) pridobljeni z meritvami, se razdelijo v podmnožice na različne načine. Levi spodnji del slike 7 opisuje mehko rojenje, kjer so vzorci razdeljeni v dva roja s težiščem v vzorcih v_1 in v_2 . Roji so lahko definirani tudi kot linearni podprostor ali tako kot na sliki 7 desno, elipsoide s prilagodljivo obliko, ki zaobjamejo vzorce (metoda Gustafson - Kessel).

Pripadnost vzorcev roju je določena z mero podobnosti (npr.: evklidska razdalja od centra roja). Mehka pravila »če – potem« so pridobljena s projekcijo pripadnosti posameznega vzorca na osi grafa.



Slika 7: Razdelitev vzorcev v roje z določanjem težišč in po metodi GK

V primeru na zgornjem desnem delu slike 7 se iz projiciranih pripadnosti lahko določi pripadnostne funkcije in parametre mehkega modela Takagi-Sugeno. Vsak tako pridobljen roj je v mehkem modelu predstavljen z enim pravilom. Pripadnostne funkcije za mehke množice A_1 in A_2 so generirane kot približki parametričnih funkcij. Parametri mehkega modela za vsako pravilo so izraženi kot približki funkcije najmanjših kvadratov.

4.1.3 O orodju Fuzzy Modeling and Identification Toolbox for Matlab

Zgoraj opisane principe izdelave mehkih modelov iz numeričnih podatkov povzema programsko orodje Fuzzy Modeling and Identification Toolbox (FMID), ki je dodatek k programskemu paketu Matlab. Orodje je bilo razvito na nizozemski Univerzi za tehnologijo v Delftu, na Fakulteti za informacijsko tehnologijo in sisteme, in je prosto dostopno na spletnem naslovu [10].

V orodju so implementirani algoritmi za identifikacijo dinamičnih mehkih modelov tipa Takagi-Sugeno. Algoritmi določijo optimalne vrednosti parametrov modela na podlagi numeričnih vhodno-izhodnih podatkov, ki so bili pridobljeni z eksperimentiranjem na sistemu. Za določanje parametrov modela je uporabljeno mehko rojenje. Približek nelinearnega modela se določi z več linearnimi lokalnimi modeli. Sistemi z več vhodi in izhodi (sistemi MIMO) so identificirani in simulirani kot sklopljeni sistemi z več vhodi in enim izhodom (sistemi MISO).

Vsi izračunani parametri modela so shranjeni v podatkovni strukturi v okolju Matlab. To omogoča uporabniku enostavno delo z modeli in njihovo shranjevanje in dokumentacijo. Vgrajeni so tudi algoritmi za poenostavitev modela z izločanjem odvečnih pripadnostnih funkcij in pravil ter ponovni izračun parametrov. Orodje omogoča tudi simulacijo modela in izračun variance med odzivom modela in odzivom realnega sistema.

Parametri mehkega modela

Izdelava mehkega modela z orodjem je dokaj preprosta. V podatkovne strukture v okolju Matlab je potrebno le vpisati vrednosti vhodnih parametrov algoritma, pripraviti pridobljene vhodno-izhodne podatke in zagnati izdelavo, ki traja v primeru preprostejših modelov samo nekaj sekund.

Na voljo sta dve podatkovni strukturi, ki ju je treba nastaviti. To sta strukturi *Par* in *Dyn*. Struktura *Par* vsebuje naslednje parametre:

- *Par.c* - število rojev,
- *Par.m* - fuzikacijski eksponent,
- *Par.tol* – toleranca za prenehanje izvajanja algoritma rojenja numeričnih podatkov,
- *Par.seed* – seme za naključni generator začetnih središč rojev,
- *Par.ante* – tip vzročnega dela pravil in
- *Par.cons* – tip posledičnega dela pravil.

Število rojev vhodnih podatkov (*Par.c*) in s tem tudi pravil za posamezen izhod modela je skalar za sisteme MISO in vektor za sisteme MIMO (vsak sistem MISO ima lahko različno število rojev).

Vsi ostali parametri v strukturi *Par* so opcijski – z njimi lahko izboljšamo rezultate identifikacije. *Par.m* je fuzikacijski eksponent, privzeta vrednost je dva. Večja kot je vrednost tega parametra, bolj se roji prekrivajo med seboj. Prav tako kot število rojev je tudi ta parameter skalar za sisteme MISO in vektor za sisteme MIMO.

Kriterij za prenehanje izvajanja algoritma rojenja je podan s parametrom *Per.tol*. Privzeta vrednost je 0,01.

Parameter *Par.seed* je seme za naključni generator določanja začetnih središč rojev. Parameter je pomemben zaradi zmožnosti reprodukcije rezultatov.

Parameter *Par.ante* določi tip pripadnostnih funkcij v mehkem modelu. Podprta sta dva tipa; pripadnostne funkcije v produktnem prostoru (ang. product-space membership functions) in projicirane pripadnostne funkcije (ang. projected membership functions). Pripadnostne funkcije v produktnem prostoru dajo hitrejše, a tudi manj natančne rezultate.

Algoritem išče optimalne vrednosti parametrov pripadnostnih funkcij modela z metodo najmanjših kvadratov. Lahko izbiramo med globalnim načinom, uteženim lokalnim načinom in metodo totalnih najmanjših kvadratov. Območje, kjer se išče najmanjša napaka, se določi s parametrom *Par.cons*.

Druga podatkovna struktura, ki mora biti določena pred izvedbo identifikacije, je struktura *Dyn*. Struktura definira dinamične parametre vhodno–izhodnih signalov. Vsebuje naslednje parametre:

- *Dyn.Ny* – zakasnitev izhodnih signalov,
- *Dyn.Nu* – zakasnitev vhodnih signalov in
- *Dyn.Nd* – število transportnih zakasnitev;

Parameter *Dyn.Ny* določa število zakasnitev na izhodnem signalu (podobno kot red imenovalca v polinomu prenosne funkcije oziroma red sistema). Ker je v sistemih MISO samo en izhodni signal, je tudi *Dyn.Ny* skalar. Za sisteme MIMO je ta parameter matrika, v kateri vsaka vrstica predstavlja en model MISO.

Parameter *Dyn.Nu* določa število zakasnitev vhodnih signalov (podobno kot red števca v polinomu prenosne funkcije). Za sisteme MISO je *Dyn.Nu* eno vrstični vektor, za MIMO pa matrika. Vsaka vrstica matrike ustreza enemu modelu MISO.

Parameter *Dyn.Nd* definira število transportnih zakasnitev sistema in predstavlja čisto zakasnitev sistema. Za sisteme MISO je *Dyn.Nd* vektor, za MIMO pa matrika. Za izdelavo klasičnega modela procesa $y(k+1) = f(y(k), \dots, u(k), \dots)$ mora biti *Dyn.Nd* nastavljen na ena.

Po uspešni identifikaciji so vsi parametri mehkega modela, ki so bili določeni v fazi identifikacije, shranjeni v strukturi *FM*. Particije mehkega modela so dostopne v matriki *Mu*, matrika *Z* pa vsebuje podatke o rojih in pripadajočih vzorcih. Matrike *r/s* vsebuje podatke o mehkih pravilih, *mfs* podatke o pripadnostnih funkcijah, izračunani parametri lokalnih linearnih modelov so dostopni v matriki *th*, itd. Orodje ima implementirane tudi funkcije za izris pripadnostnih funkcij, odstranjevanje mehkih pravil in pripadnostnih funkcij, ki se podvajajo, funkcijo za simulacijo zgrajenega modela, ki omogoča hitro preverjanje točnosti identificiranega modela, itd.

Za preverjanje podobnosti odzivov modela in validacijskih ali verifikacijskih signalov se kot mera podobnosti lahko uporabi vgrajena funkcija *vaf()*, ki vrne varianco med signaloma. Izračuna se po enačbi (4):

$$VAF = 100 \% * \left[1 - \frac{var(y1-y2)}{var(y1)} \right] \quad (4)$$

VAF dveh identičnih signalov je 100 %. Bolj kot sta signala različna, manjša je vrednost.

Orodje FMID ne podpira simulacije v okolju Matlab/Simulink, kjer je simulacija dinamičnih sistemov najenostavnejša. Podprta pa je pretvorba dobljenega mehkega modela v strukturo *FIS*, ki je uporabljena v Matlabovem orodju Fuzzy Logic Toolbox, ki je podprt v orodju Simulink. Pretvorba se izvede hitro in enostavno s funkcijo *fm2fis()*. Rezultat pretvorbe je struktura *FIS*, ki se jo enostavno vnese v pripravljen blok v okolju Simulink.

4.2 Izvedba identifikacije procesa

4.2.1 Določitev procesnih signalov za izgradnjo modela procesa

Glede na to, da smo želeli zgraditi model sistema, s katerim bo mogoče simulirati vplive regulirnih signalov na sistem priprave zraka, ki so opisani v poglavju 3.2, smo potrebovali model, ki lahko napove naslednje veličine:

- pretok odpadnega zraka v sistemu, izračunan po enačbi (3) iz tlaka na toplotnem izmenjevalniku dP 02965/1 - FIA 02965/2,
- tlak odpadnega zraka v cevovodu iz peči - PT 02961/1,
- diferencialni tlak na delujočem ventilatorju - dP 02961/2 ali dP 02962/2,
- tlak odpadnega zraka iz sušilnika linije 4 - PT 02961/A,
- tlak odpadnega zraka iz sušilnika linije 5 - PT 02961/B,
- tlak odpadnega zraka iz sušilnika linije 7 - PT 02961/C in
- tlak odpadnega zraka pred ventilatorjem - PT 02961/4;

Na voljo smo imeli naslednje vhodne – regulirne signale:

- loputa za dotok svežega zraka - FCV 02961/1,
- loputa za omejitev dotoka odpadnega zraka iz peči - FCV 02961/2,
- loputa za omejitev dotoka odpadnega zraka iz sušilnika na liniji 4 - FCV 02961/3,
- loputa za omejitev dotoka odpadnega zraka iz sušilnika na liniji 5 - FCV 02961/4,
- loputa za omejitev dotoka odpadnega zraka iz sušilnika na liniji 7 - FCV 02961/5 in
- hitrost vrtenja delujočega ventilatorja - M 02961 ali M 02962;

Zaradi poenostavitve smo v modelu upoštevali samo en sušilnik. S tem je model postal manjši, pri načrtovanju vodenja pa nam to ni povzročalo težav, saj je sistem vodenja za vse tri sušilnike identičen. Ker je pretok odpadnega zraka izračunan po enačbi (3), smo za izhodu modela določili kar diferencialni tlak, iz katerega je pretok izračunan (t.j. dP 02965/1).

4.2.2 Pridobitev procesnih signalov

Za identifikacijo mehkega modela sistema z orodjem Fuzzy Modeling and Identification toolbox smo najprej potrebovali primerne numerične podatke iz sistema.

Najprej smo poskušali identifikacijo izvesti s podatki, ki smo jih zajeli med testiranjem in opazovanjem delovanja sistema v okolju za programiranje krmilnikov Allen Bradley RS Studio, ki omogoča zajem trendov. Periodo vzorčenja smo nastavili na eno sekundo. Signali, ki smo jih posneli, so podani v tabeli 9.

Tabela 9: Seznam posnetih signalov

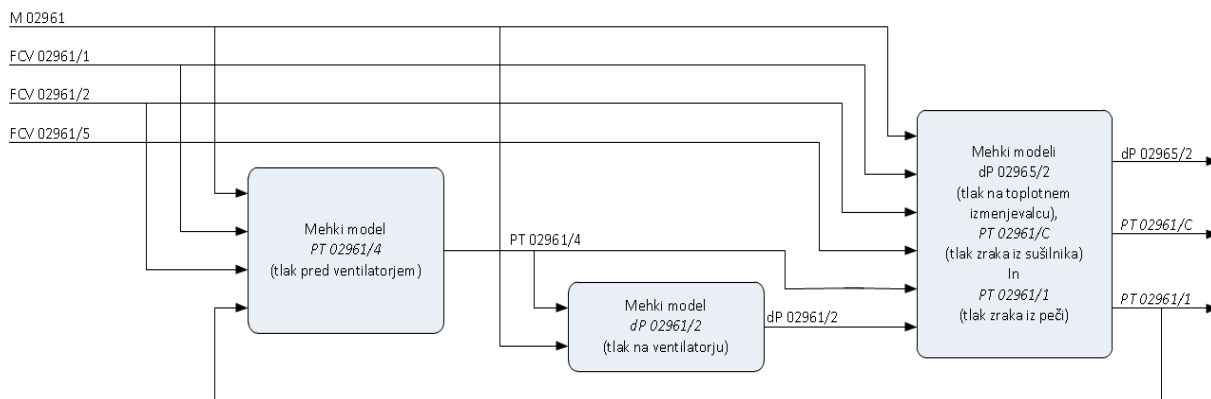
Oznaka	Enota	Opis
FCV 02961/1	%	Položaj lopute za dovod svežega zraka
FCV 02961/2	%	Položaj lopute za zaporo dovoda odpadnega zraka iz peči
FCV 02961/3	%	Položaj lopute za dovod odpadnega zraka iz sušilnika linije 4
FCV 02961/4	%	Položaj lopute za dovod odpadnega zraka iz sušilnika linije 5
FCV 02961/5	%	Položaj lopute za dovod odpadnega zraka iz sušilnika linije 7
PT 02961/1	Pa	Tlak odpadnega zraka iz peči
PT 02961/4	Pa	Tlak odpadnega zraka pred ventilatorjema
PT 02961/A	Pa	Tlak odpadnega zraka iz sušilnika linije 4
PT 02961/B	Pa	Tlak odpadnega zraka iz sušilnika linije 5
PT 02961/C	Pa	Tlak odpadnega zraka iz sušilnika linije 7
dP 02961/2	Pa	Diferencialni tlak na prvem ventilatorju
dP 02962/2	Pa	Diferencialni tlak na drugem ventilatorju
dP 02965/1	Pa	Diferencialni tlak na toplotnem izmenjevalniku
TT 02961/1	°C	Temperatura odpadnega zraka iz peči
TT 02961/4	°C	Temperatura odpadnega zraka pred ventilatorjem
TT 02961/5	°C	Temperatura odpadnega zraka iz sušilnikov
TT 02965/4	°C	Temperatura odpadnega zraka za drugim toplotnim izmenjevalnikom
FIA 02965/2	Nm ³ /h	Izračunan pretok odpadnega zraka

Odločili smo se, da bomo posneli dva niza signalov. Prvi niz je bilo avtomatsko delovanje sistema, kot ga je predlagal naročnik. Za ta niz smo se odločili, da bi lažje primerjali in dokazali izboljšano delovanje našega sistema vodenja.

Drugi niz je bil klasični identifikacijski, torej stopničasto spreminjanje položaja loput in hitrosti vrtenja ventilatorja. Pri tem smo morali paziti, da so parametri sistema ostali v okviru nastavljenih meja. Zaradi te omejitve tudi nismo mogli izkoristiti celotnega delovnega območja loput in hitrosti vrtenja ventilatorja.

Prvi niz signalov, to je avtomatsko delovanje sistema, je bil dolg približno 4500 vzorcev. Drugi, identifikacijski, pa nekaj manj, okoli 3500 vzorcev. Niz, ki smo ga uporabili za učnega, smo izbirali različno za različne modele in izbrali tisti niz, ki je vrnil boljši rezultat.

Pri identifikaciji s tako pridobljenimi numeričnimi podatki smo naleteli na več težav. Prva večja težava je bila, da nismo pokrili celotnega območja položajev loput in hitrosti vrtenja ventilatorja. Druga težava je bila, da v primeru avtomatskega delovanja sistema v posnetih signalih ni bilo dovolj dinamike za uspešno identifikacijo. Tretja in tudi najpomembnejša težava pa je bila ta, da posneti signali niso bili dovolj informativni. V dobri uri spremljanja in testiranja na sistemu nismo zajeli dovolj različnih situacij v sistemu, da bi lahko samo s signali, na katere lahko vplivamo (t.j. položaj loput in hitrost vrtenja ventilatorja), izdelali zadovoljiv model. Zadovoljive modele nam je uspelo izdelati z dodatnimi signali, kot so tlaki v sistemu. Model celotnega sistema, prikazan na sliki 8, smo tako sestavili iz več zaporednih modelov s povratnimi zankami.



Slika 8: Shema prvega poskusa izdelave modela sistema

Vsak model posebej je deloval precej solidno. Ko pa smo modele združili, tako kot je prikazano na sliki 8, je bila končna napaka zaradi akumuliranja napak na modelih PT 02961/1, PT 02961/4 in dP 02961/2 prevelika in posledično je bila taka modelna struktura celotnega sistema neuporabna.

Rešitev, s katero smo dobili boljše modele, je torej temeljila na tem, da smo se pri izdelavi modelov poskušali izogniti uporabi simuliranih signalov iz drugih modelov, saj je to povečalo možnost za končno odstopanje.

Ker nam z obstoječimi signali ni uspelo izdelati ustreznih dobrih modelov, smo potrebovali nove oz. boljše signale. Na izbiro smo imeli nekaj možnosti:

- ponovno posneti identifikacijske signale,
- združiti verifikacijske in validacijske signale v en niz, ki bi ga uporabili za identifikacijo ali
- signale za identifikacijo dobiti iz podatkovne zbirke sistema.

Odločili smo se, da signale pridobimo iz podatkovne zbirke sistema, ker za ponovno eksperimentiranje na sistemu čez celotno območje delovanja loput in ventilatorja ne bi dobili dovoljenja naročnika, kajti že pri prvem eksperimentiranju smo nekajkrat prišli precej blizu omejitvam na sistemu (t.j. podtlaki v sušilnikih so preveč narasli, pretok je bil prenizek, itd.). V drugem primeru, kjer bi verifikacijske in validacijske signale združili v en niz, pa bi izgubili signale za validacijo. Prišlo pa bi tudi do odstopanj med vrednostmi signalov na mestu, kjer bi bili signali združeni, kar bi povzročalo težave pri identifikaciji.

Brez težav tudi pri izvozu signalov iz podatkovne zbirke sistema ni šlo, kajti podatkovna zbirka je optimizirana tako, da so signali zapisani samo ob dovolj veliki spremembi vrednosti signala in tako niso shranjeni v enakomernih časovnih razmikih. Tako se je zgodilo, da podatka o vrednosti signalov ni bilo tudi dlje kot nekaj minut. Problem smo rešili tako, da smo signale tlakov, temperatur in pretoka linearno interpolirali, vhodnim signalom pa smo priredili zadnjo znano vrednost. S tem smo izgubili delno informacijo o dinamiki sistema.

Iz pridobljenih signalov smo izbrali signale iz dni, ko smo testirali obnašanje sistema priprave odpadnega zraka. Dva niza signalov, ki sta vsebovala največ sprememb položajev loput in hitrosti vrtenja ventilatorja po celotnem delovnem območju, smo prevzorčili na eno sekundo. Oba niza signalov sta podana na slikah od 32 do 35 v prilogi 7.3.

Odločili smo se, da izdelamo popolnoma neodvisne paralelne modele z enimi izhodom, ki skupaj tvorijo model celotnega sistema. Osnovni vplivi med položaji loput in hitrostjo vrtenja ventilatorja ter tlaki v sistemu so nam bili poznani, zato smo vhodne signale za posamezne modele zlahka določili.

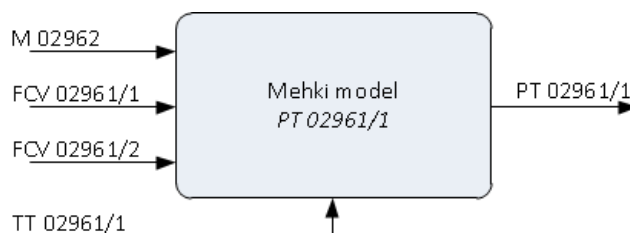
Ugotovili smo, da dovolj zadovoljivih rezultatov ne moremo dobiti samo z uporabo signalov položaja loput in hitrosti vrtenja ventilatorja, ampak potrebujemo vsaj še informacijo o temperaturi, ter da boljše rezultate identifikacije dobimo v primeru, če so signali vzorčeni na tri sekunde.

Merilo kakovosti izdelanih modelov je bilo boljše grafično ujemanje in višja vrednost VAF med odzivom modela in realnega sistema na validacijskih podatkih. Parametri identifikacijskega algoritma in rezultati posameznih modelov so predstavljeni v nadaljevanju.

4.2.3 Identifikacija modela tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz peči – PT 02961/1

Model tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz peči, prikazan na sliki 9, smo zgradili iz naslednjih signalov:

- hitrost vrtenja delujočega ventilatorja - M 02962,
- položaj lopute za dotok svežega zraka - FCV 02961/1,
- položaj lopute za omejitev dotoka odpadnega zraka iz peči - FCV 02961/2 in
- temperatura odpadnega zraka iz peči - TT 02961/1.

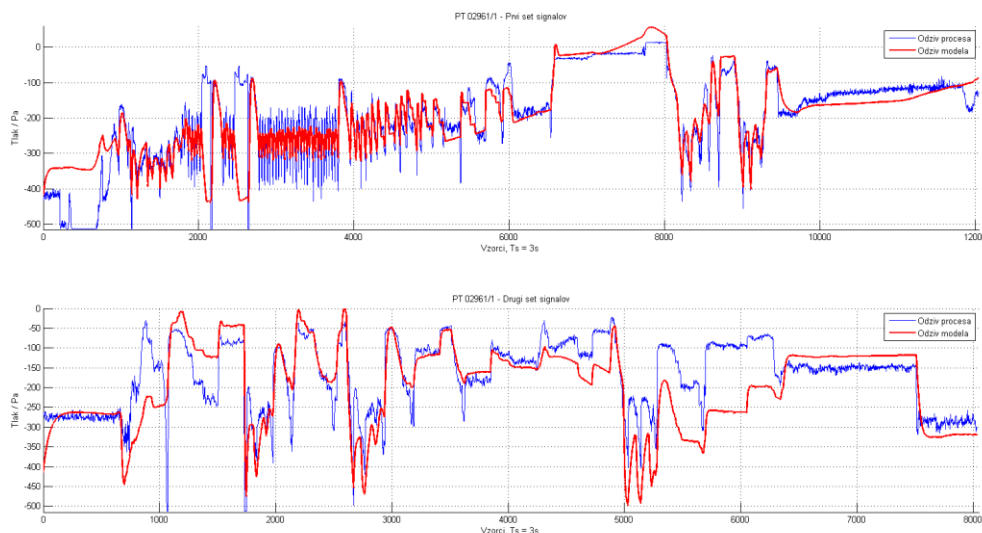


Slika 9: Skica mehkega modela tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz peči

S preizkušanjem smo ugotovili, da najboljši odziv vrne model, izdelan z naslednjimi parametri:

- $Par.c = 6$,
- $Par.m = 1,6$,
- $Par.tol = 0,01$,
- $Par.seed = 5$,
- $Par.ante = 2$,
- $Par.cons = 2$,
- $Dyn.Ny = 2$,
- $Dyn.Nu = [1, 1, 1, 2]$ in
- $Dyn.Nd = [1, 1, 1, 1]$.

Zgornji graf na sliki 10 prikazuje primerjavo simuliranega in realnega odziva na učnem nizu signalov, spodnji pa primerjavo simuliranega in realnega odziva na validacijskem nizu signalov.



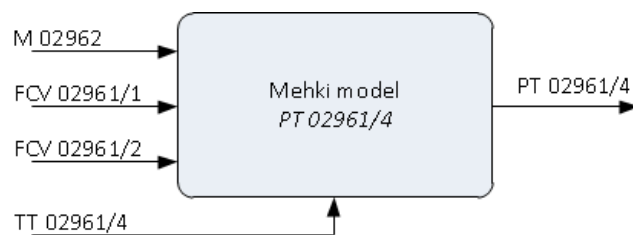
Slika 10: Primerjava odziva modela in realnega sistema – PT 02961/1

Vrednost VAF je bila na učnem nizu signalov 67,4 %, na validacijskem pa 28,9 %.

4.2.4 Identifikacija modela tlaka odpadnega zraka pred ventilatorjema – PT 02961/4

Model tlaka odpadnega zraka pred ventilatorjema, prikazan na sliki 11, smo zgradili iz naslednjih signalov:

- hitrost vrtenja delujočega ventilatorja - M 02962,
- položaj lopute za dotok svežega zraka - FCV 02961/1,
- položaj lopute za omejitev dotoka odpadnega zraka iz peči - FCV 02961/2 in
- temperatura odpadnega zraka pred ventilatorjem - TT 02961/4.



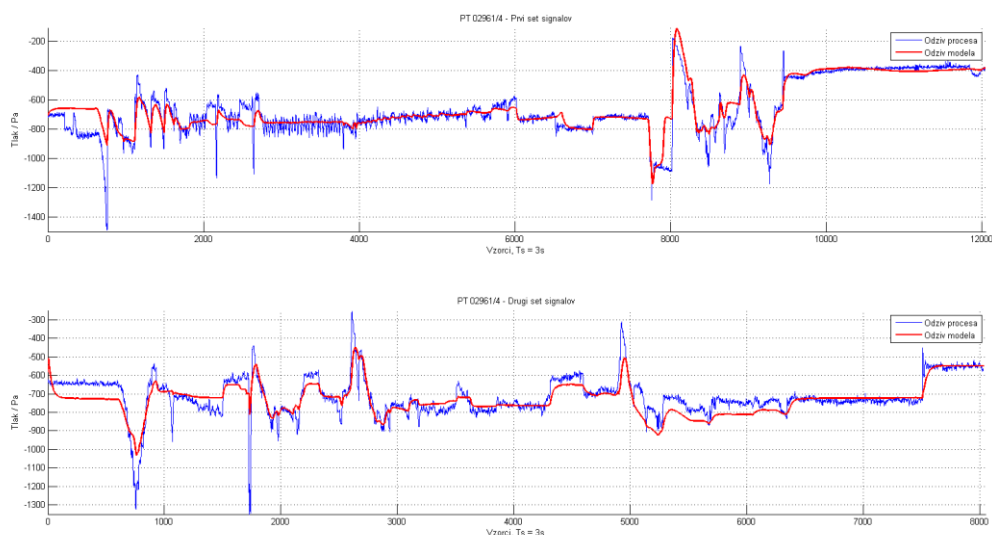
Slika 11: Skica mehkega modela tlaka odpadnega zraka pred ventilatorjema

S preizkušanjem smo ugotovili, da najboljši odziv vrne model, izdelan z naslednjimi parametri:

- $Par.c = 8$,
- $Par.m = 2$,

- $Par.tol = 0,01$,
- $Par.seed = 5$,
- $Par.ante = 2$,
- $Par.cons = 2$,
- $Dyn.Ny = 2$,
- $Dyn.Nu = [1, 1, 1, 2]$ in
- $Dyn.Nd = [1, 1, 1, 1]$.

Zgornji graf na sliki 12 prikazuje primerjavo simuliranega in realnega odziva na učnem nizu signalov, spodnji pa primerjavo simuliranega in realnega odziva na validacijskem nizu signalov.



Slika 12: Primerjava odziva modela in realnega sistema – PT 02961/4

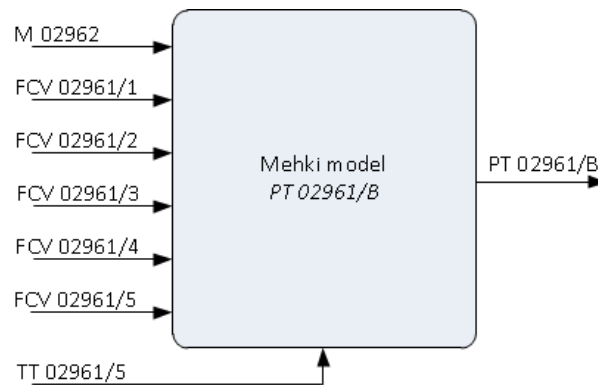
Vrednost VAF je bila na učnem nizu signalov 82,1 %, na validacijskem pa 65,8 %.

4.2.5 Identifikacija modela tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz sušilnika – PT 02961/B

Ker so sušilniki skorajda identični, je pri načrtovanju vodenja tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz sušilnikov zadoščal samo en model. S preizkušanjem smo ugotovili, da najboljši model dobimo za sušilnik na liniji 5 (PT 02961/B in FCV 02961/4). Ugotovili smo tudi, da boljši model dobimo, če za učenje uporabimo signale iz drugega niza. Model, prikazan na sliki 13, smo zgradili iz naslednjih signalov:

- hitrost vrtenja delujočega ventilatorja - M 02962,

- položaj lopute za dotok svežega zraka - FCV 02961/1,
- položaj lopute za omejitev dotoka odpadnega zraka iz peči - FCV 02961/2,
- položaj lopute za dovod odpadnega zraka iz sušilnika linije 4 - FCV 02961/3,
- položaj lopute za dovod odpadnega zraka iz sušilnika linije 5 - FCV 02961/4,
- položaj lopute za dovod odpadnega zraka iz sušilnika linije 7 - FCV 02961/5 in
- temperatura odpadnega zraka iz sušilnikov - TT 02961/5.

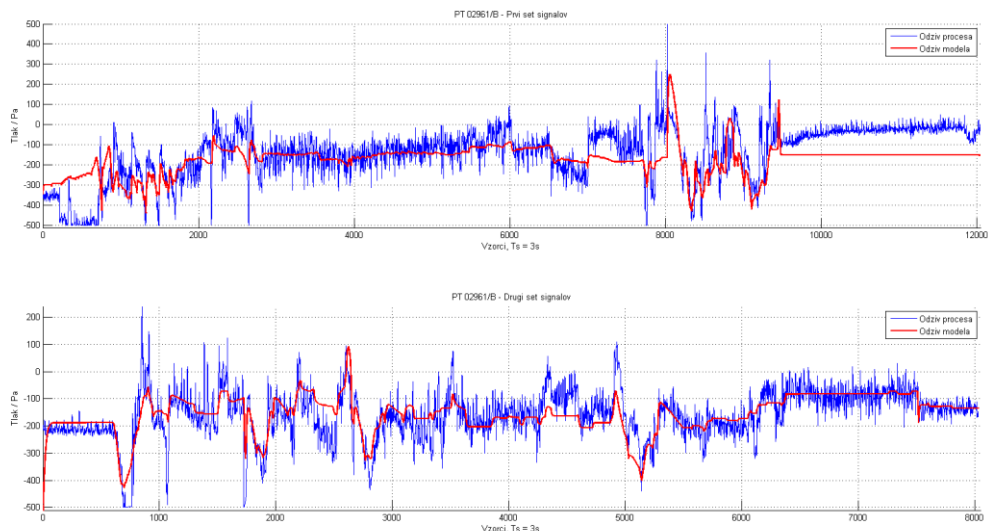


Slika 13: Skica mehkega modela tlaka odpadnega zraka v cevovodu iz sušilnika

S preizkušanjem smo ugotovili, da najboljši odziv vrne model, izdelan z naslednjimi parametri:

- *Par.c* = 6,
- *Par.m* = 2,
- *Par.tol* = 0,01,
- *Par.seed* = 5,
- *Par.ante* = 2,
- *Par.cons* = 2,
- *Dyn.Ny* = 3,
- *Dyn.Nu* = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 2] in
- *Dyn.Nd* = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1].

Zgornji graf na sliki 14 prikazuje primerjavo simuliranega in realnega odziva na validacijskem nizu signalov, spodnji pa primerjavo simuliranega in realnega odziva na učnem nizu signalov.



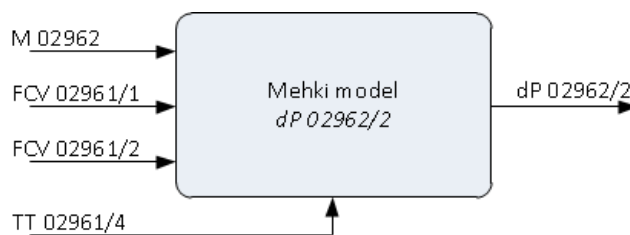
Slika 14: Primerjava odziva modela in realnega sistema – PT 02961/B

Vrednost VAF je bila na učnem nizu signalov 52,3 %, na validacijskem pa 35,5 %.

4.2.6 Identifikacija modela tlaka odpadnega zraka na delujočem ventilatorju – dP 02962/2

Model tlaka odpadnega zraka na delujočem ventilatorju, prikazan na sliki 15, smo zgradili iz naslednjih signalov:

- hitrost vrtenja delujočega ventilatorja - M 02962,
- položaj lopute za dotok svežega zraka - FCV 02961/1,
- položaj lopute za omejitev dotoka odpadnega zraka iz peči - FCV 02961/2 in
- temperatura odpadnega zraka pred ventilatorjem - TT 02961/4.



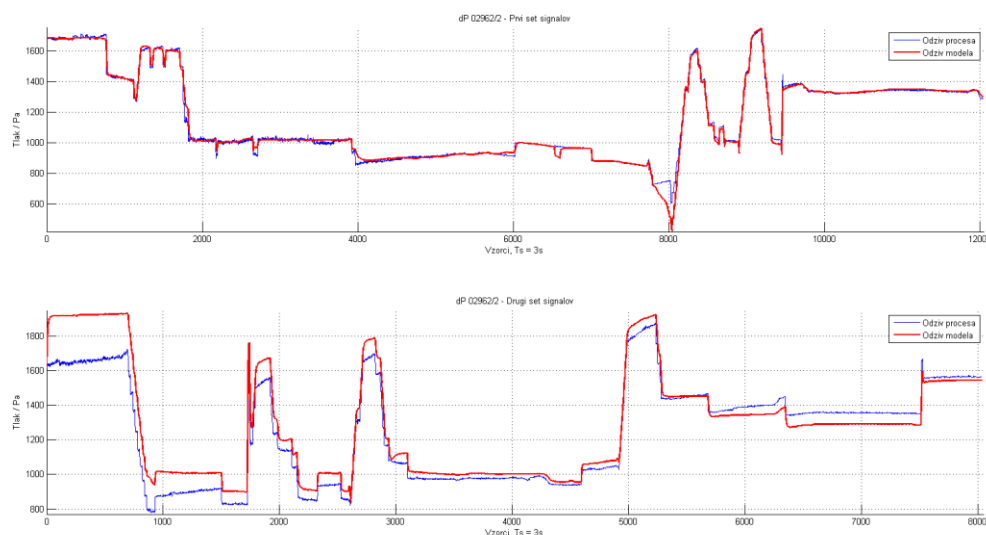
Slika 15: Skica mehkega modela tlaka odpadnega zraka na delujočem ventilatorju

S preizkušanjem smo ugotovili, da najboljši odziv vrne model izdelan z naslednjimi parametri:

- $Par.c = 10$,
- $Par.m = 2,1$,

- $Par.tol = 0,01$,
- $Par.seed = 5$,
- $Par.ante = 2$,
- $Par.cons = 2$,
- $Dyn.Ny = 3$,
- $Dyn.Nu = [1, 1, 1, 2]$ in
- $Dyn.Nd = [1, 1, 1, 1]$.

Zgornji graf na sliki 16 prikazuje primerjavo simuliranega in realnega odziva na učnem nizu signalov, spodnji pa primerjavo simuliranega in realnega odziva na validacijskem nizu signalov.



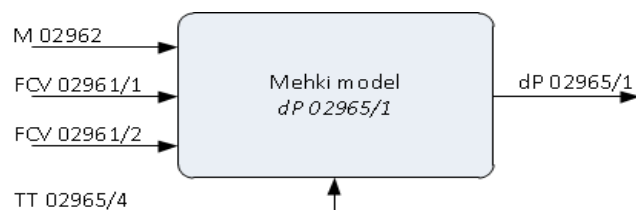
Slika 16: Primerjava odziva modela in realnega sistema – dP 02962/2

Vrednost VAF je bila na učnem nizu signalov 98,8 %, na validacijskem pa 89,7 %.

4.2.7 Identifikacija modela tlaka odpadnega zraka na toplotnem izmenjevalniku - dP 02965/1

Model tlaka odpadnega zraka na toplotnem izmenjevalniku, prikazan na sliki 17, smo zgradili iz naslednjih signalov:

- hitrost vrtenja delujočega ventilatorja - M 02962,
- položaj lopute za dotok svežega zraka - FCV 02961/1,
- položaj lopute za omejitev dotoka odpadnega zraka iz peči - FCV 02961/2 in
- temperatura odpadnega zraka za drugim toplotnim izmenjevalnikom - TT 02961/4.

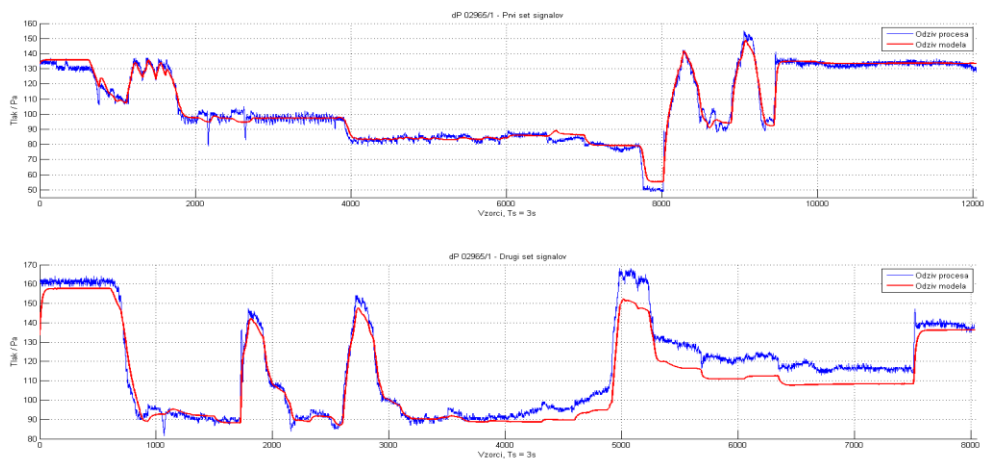


Slika 17: Skica mehkega modela tlaka odpadnega zraka na toplotnem izmenjevalniku

S preizkušanjem smo ugotovili, da najboljši odziv vrne model, izdelan z naslednjimi parametri:

- $Par.c = 6$,
- $Par.m = 2$,
- $Par.tol = 0,01$,
- $Par.seed = 5$,
- $Par.ante = 2$,
- $Par.cons = 2$,
- $Dyn.Ny = 2$,
- $Dyn.Nu = [1, 1, 1, 2]$ in
- $Dyn.Nd = [1, 1, 1, 1]$.

Zgornji graf na sliki 18 prikazuje primerjavo simuliranega in realnega odziva na učnem nizu signalov, spodnji pa primerjavo simuliranega in realnega odziva na validacijskem nizu signalov.



Slika 18: Primerjava odziva modela in realnega sistema – dP 02965/1

Vrednost VAF je bila na učnem nizu signalov 97,8 %, na validacijskem pa 95,0 %.

4.3 Komentar rezultatov identifikacije

Menimo, da so mehki modeli dovolj dobri za preizkušanje sistema vodenja. Še vedno je sicer nekaj odstopanj med odzivi modelov in realnega sistema. Razlika v odzivih je najbrž posledica števila delujočih sušilnikov in peči ob zajemu učnih in validacijskih signalov. Te informacije v času shranjevanja signalov v podatkovno bazo ni bilo mogoče pridobiti, bi pa ta informacija vsekakor izboljšala kakovost modelov.

S stopničastimi spremembami vhodnih signalov smo ugotovili, da modeli pravilno napovedo smer odziva sistema (npr. ob zmanjšanju hitrosti ventilatorja se tlaki ustrezno zmanjšajo).

Opazili smo tudi nekoliko slabše nelinearno obnašanje odzivov modelov, na primer sprememba položaja lopute v območju od 90 % do 100 % ima v realnem sistemu veliko manjši vpliv na odziv kot v območju od 50 do 60 %, v modelu pa nelinearnost ni tako izrazita.

Ker signali v realnem sistemu vsebujejo šum in motnje, smo se odločili, da tudi ta dva dejavnika vključimo v modele. Motnje smo v programskem okolju Simulink generirali s kombinacijo filtriranja s prenosnimi funkcijami prvega reda in ojačenja belega šuma. Amplitude in frekvence motenj in šuma smo določili tako, da so izhodi modelov čim bolj podobni posnetim signalom iz realnega sistema, ko je bil sistem v ročnem načinu in se položaj aktuatorjev ni spreminjal.

Odzivi modelov z dodanim šumom in primerjava z odzivi realnega sistema so predstavljeni v prilogi 7.6.

Kot dodatni vhodni signal v modele smo pri izdelavi modelov uporabili tudi signale temperatur TT 02961/1, TT 02961/4, TT 02961/5 in TT 02965/4. Najprej smo vrednosti temperatur nastavili na konstantne vrednosti. Vrednosti smo izbrali kot približne srednje vrednosti temperatur v učnem nizu signalov.

Kasneje smo ugotovili, da je temperature primerneje obravnavati kot del sistema. Temperature v pečeh in sušilnikih so namreč konstantne z manjšimi nihanji, kar pomeni, da so temperature v sistemu odvisne od razmerja svežega in odpadnega zraka, le-to pa od položaja loput, hitrosti ventilatorja in števila delujočih peči in sušilnikov. Konstantne vrednosti temperatur TT 02961/1, TT 02961/4 in TT 02965/4 smo zamenjali z mehki modeli, ki sicer niso točni, se pa temperature gibljejo v podobnem območju kot v realnem sistemu. Vhodi v sistem so pri vseh treh modelih enaki; in sicer:

- M 02962,
- FCV 02961/1 in
- FCV 02961/2.

Zgornjo obravnavo temperatur potrjuje tudi temperatura odpadnega zraka iz sušilnikov TT 02961/5. Iz posnetega signala se namreč vidi, da je temperatura konstantna z odstopanjem nekaj stopinj, ker ne pride do mešanja med svežim in odpadnim zrakom. V modelu smo tako uporabili kar konstantno vrednost, ki smo ji dodali motnjo v obliki počasnega spreminjanja vrednosti po rampi.

Dodatni rezultati identifikacije, kot so izračunani parametri mehkih pravil, središča rojev, pripadnostne funkcije, območja lokalnih modelov in stopnje izpolnitve pripadnostnih funkcij so zaradi preglednosti podani v prilogi 7.6.



5. Študija sistema vodenja

Namen poglavja je predstaviti uporabnost pridobljenih mehkih modelov za načrtovanje sistema vodenja. Odločili smo se, da načrtamo alternativo sistemu vodenja procesa priprave odpadnega zraka, ki ga je predlagal naročnik, in poskušamo najti najboljšo alternativo, predvsem z vidika izbire najbolj primernih regulacijskih zank. V primeru realizacije na realnem sistemu bi bilo potrebno ob zagonu prirediti le vrednosti parametrov regulatorjev.

Način delovanja sistema vodenja tlakov in pretoka v sistemu je regulacijski, regulacijske zanke pa morajo zadovoljivo delovati tudi v sledilnem načinu delovanja.

5.1 Vodenje sistema priprave zraka z regulatorji PID

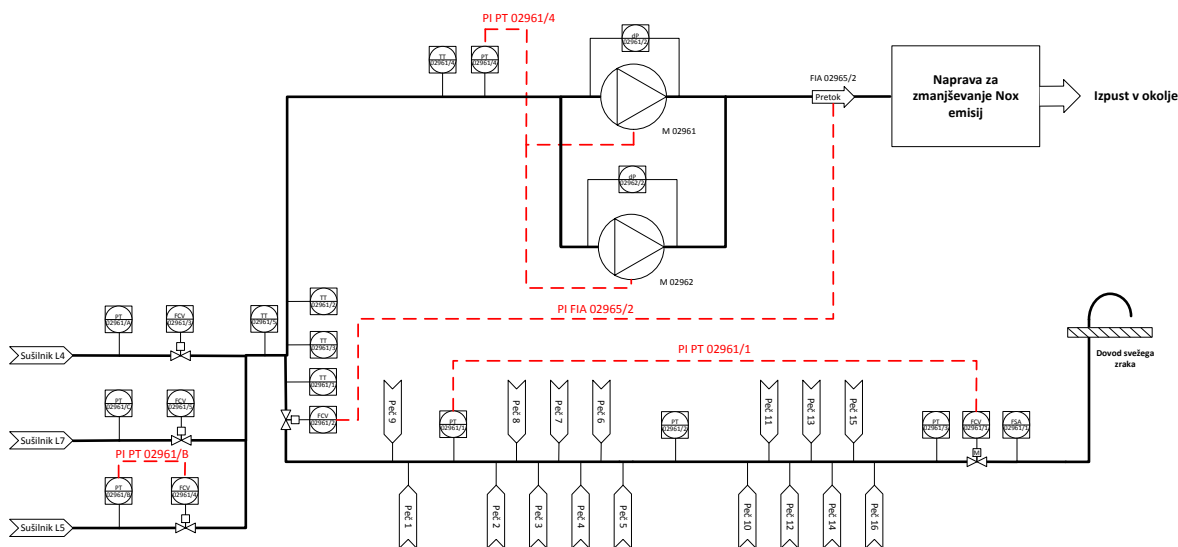
Prva rešitev, ki smo jo želeli preizkusiti, je bilo vodenje sistema priprave zraka s klasičnimi regulatorji PID, ki so v industriji najbolj razširjeni. Načrtali smo enostaven primer vodenja z regulatorji PI. Zaradi šuma in motenj, ki so prisotne v procesu, smo člen D namerno izpustili.

Sistem vodenja smo načrtali po diagramih poteka, ki jih je podal naročnik. Že po prvih preizkusih smo ugotovili, da sistem vodenja deluje precej bolje, če zamenjamo aktuatorja v regulacijskih zankah za vodenje pretoka in tlaka v cevovodu iz peči. Nove regulacijske zanke v sistemu vodenja so naslednje:

- vodenje tlaka pred ventilatorjem PT 02961/4 z ventilatorjem M 02962,
- vodenje pretoka odpadnega zraka FIA 02965/2 z loputo FCV 02961/1,
- vodenje tlaka v cevovodu iz peči PT 02961/1 z loputo FCV 02961/2 in
- vodenje tlaka v cevovodu iz sušilnika na liniji 5 PT 02961/B z loputo FCV 02961/4.

Sistem vodenja je prikazan na P&I-diagramu na sliki 19.

Vodenje diferencialnega tlaka na delujočem ventilatorju dP 02962/2 je v naročnikovem predlogu izvedeno s spreminjanjem položaja lopute na koncu cevovoda iz peči FCV 02961/2. Kot je opisano v poglavju 3.2, vodenje ni klasično regulacijsko ali sledilno, ampak se v primeru previsokega diferencialnega tlaka loputa odpre za dodatnih 10 %. Tega v našem sistemu vodenja nismo upoštevali na takšen način, ampak je previsok diferencialni tlak na delujočem ventilatorju obravnavan kot ena izmed izjem v delovanju sistema, ki so opisane v poglavju 5.2.2



Slika 19: Sistem vodenja priprave odpadnega zraka

5.1.1 Nastavljanje parametrov regulatorjev

Parametre regulatorjev PI smo nastavili z orodjem Simulink PID Tuner, ki samodejno in hitro določi parametre regulatorjev PID. Dobljene parametre smo s preizkušanjem še malo prilagodili, da smo dobili kar najboljše odzive. Parametri regulatorjev, reference in vrednost izhodov regulatorjev v ročnem načinu so podane v tabeli 10. Regulatorji so poimenovani po regulirani veličini.

Tabela 10: Parametri regulatorjev

Regulator	PI PT 02961/1	PI PT 02961/4	PI PT 02961/B	PI FIA 02965/2
Kp	0,3	– 0,05	– 0,15	0,001
Ti	40	120	25	15
Minimalna izhodna vrednost	100 %	35 Hz	100 %	100 %
Maksimalna izhodna vrednost	0 %	20 Hz	0 %	25 %
Osnovna referenca	– 200 Pa	– 700 Pa	– 150 Pa	42500 m ³ /h
Vrednost izhoda v ročnem načinu	70 %	30 Hz	70 %	70 %

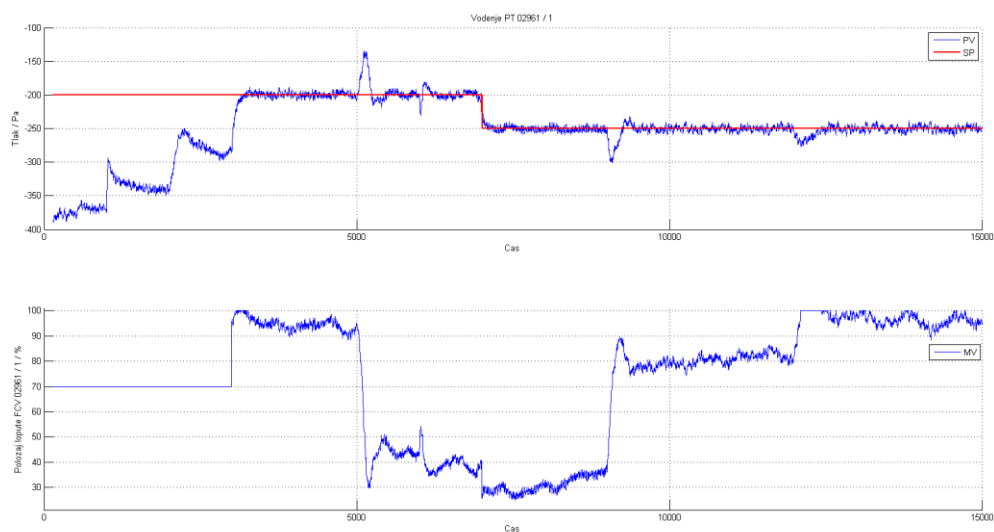
Delovanje sistema vodenja smo preizkusili z naslednjo testno sekvenco:

- Prvih 1000 sekund poskusa so bili vsi PI-regulatorji v ročnem načinu z naslednjimi nastavitvami:
 - hitrost vrtenja ventilatorja: 30 Hz,
 - položaj loput: 70 %.
- Nato smo vsakih 1000 sekund poskusa prekllopili en regulator v avtomatsko delovanje po naslednjem vrstnem redu:
 - regulator PI PT 02961/4,

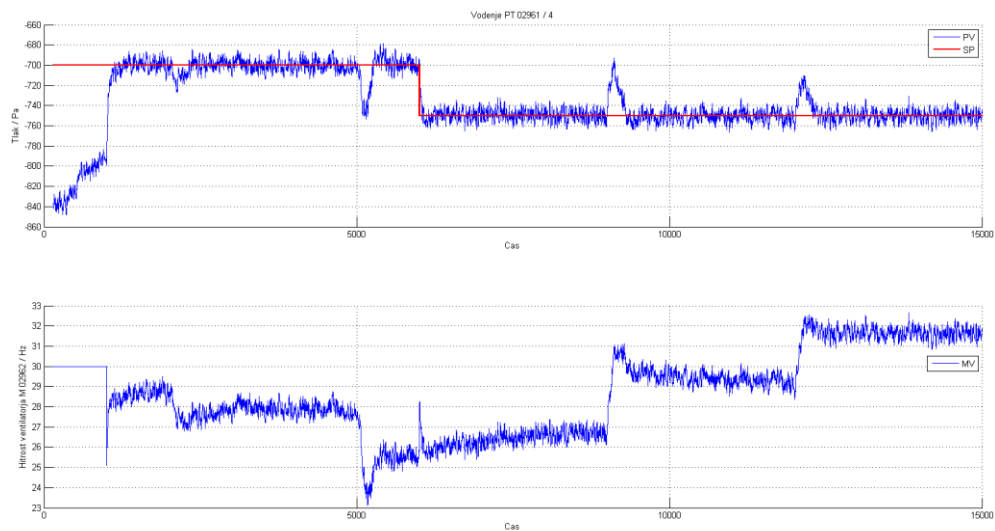
- regulator PI FIA 02965/2,
 - regulator PI PT 02961/1 in nazadnje
 - regulator PI PT 02961/B.
- Po 5000 sekundah poskusa smo začeli v zaporedju 1000 sekund spreminjati še reference v naslednjem vrstnem redu:
 - PI FIA 02965/2 na 38000 m³/h,
 - PI PT 02961/4 na – 750 Pa,
 - PI PT 02961/1 na – 250 Pa,
 - PI PT 02961/B na – 200 Pa,
 - PI FIA 02965/2 na 44000 m³/h in po 3000 sekundah
 - PI FIA 02965/2 na 48000 m³/h.

Motenj neposredno nismo simulirali, so se pa pojavile posredno zaradi spreminjanja referenc in preklopa regulatorjev iz ročnega načina.

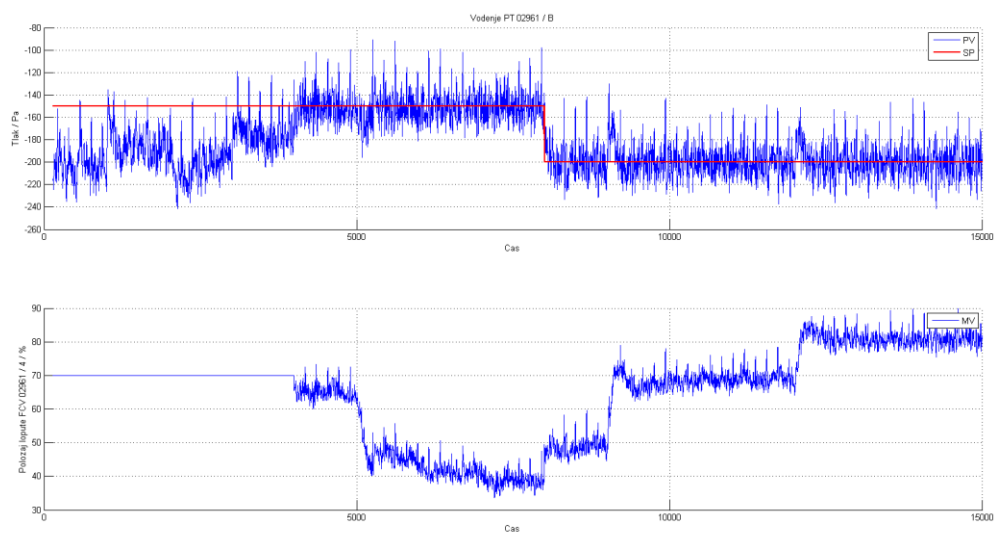
Slike od 20 do 23 prikazujejo delovanje sistema vodenja. Zgornji deli slik prikazujejo regulirane veličine in reference, spodnji pa regulirno veličino.



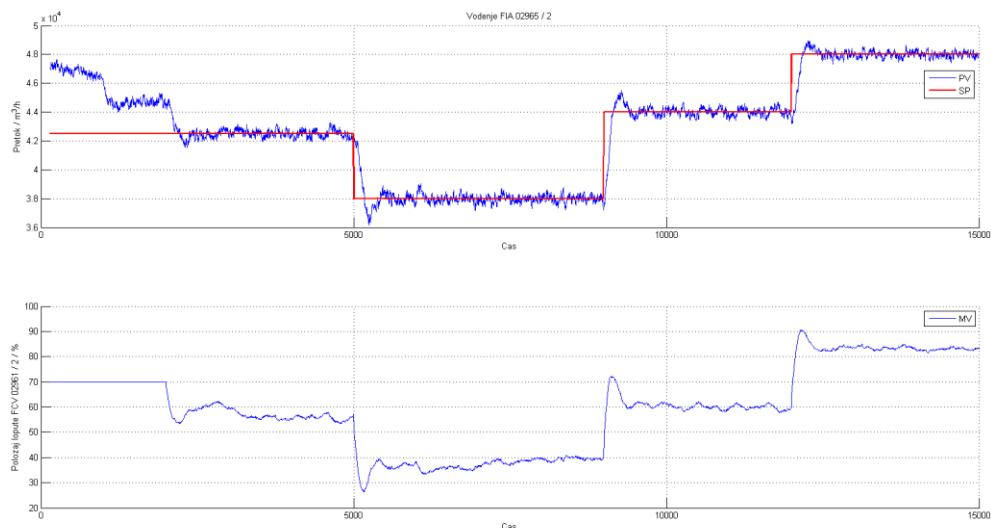
Slika 20: Vodenje PT 02961/1



Slika 21: Vodenje PT 02961/4



Slika 22: Vodenje PT 02961/B



Slika 23: Vodenje FIA 02965/2

5.1.2 Slabosti sistema vodenja procesa z regulatorji PI in rešitve

Sistem vodenja procesa, prikazan na slikah od 20 do 23, deluje precej dobro, opazno pa je močno osciliranje regulirne veličine. Tako osciliranje v praksi pomeni krajšo življenjsko dobo aktuatorjev. Osciliranje regulirnega signala se pojavi, ker signali vsebujejo motnje in šum. K odpravi osciliranja regulirnega signala smo pristopili na naslednji način:

- uvedba mrtve cone na pogrešku,
- uvedba mrtve cone na regulirnem signalu in
- filtracija procesnih signalov.

Uvedba mrtve cone na pogrešku

Ker signali tlakov vsebujejo šum (šum merilnikov) in motnje (npr. na signalu PT 02961/B se konkretno lahko opazijo cikli sušilnika), smo se odločili, da namesto točne vrednosti reference uporabimo referenčno območje, v katerem mora biti regulirana veličina oz. uvedemo mrtvo cono na pogrešku. Tlaki in pretok odpadnega zraka se tako lahko gibljejo v nastavljenem območju okrog reference brez spremembe regulirne veličine.

Z uvedbo take mrtve cone smo dosegli manjše osciliranje regulirnega signala, poslabšala pa se kvaliteta vodenja.

Uvedba mrtve cone na regulirnem signalu

Z uporabo mrtve cone na pogrešku se bistveno zmanjša kvaliteta vodenja, zato smo dodali še mrtvo cono na regulirnem signalu, ki preprečuje preveč majhno spreminjanje položaja loput in hitrosti motorja ventilatorja, ki vpliva na življenjsko dobo aktuatorjev. S tem smo omogočili zmanjšanje območja mrtve cone na pogrešku in s tem boljšo kvaliteto vodenja z manj osciliranja regulirnega signala.

Filtriranje procesnih signalov

Tretji pristop, ki smo ga uporabili za zmanjšanje osciliranja regulirnega signala, je filtriranje signalov s filtrom prvega ali drugega reda. Tak pristop zakrije dejansko dinamiko sistema, je pa najučinkovitejši pri izločanju šuma.

V prvih poskusih smo uporabili kar regulatorje PID, ki so del programskega okolja Simulink. Ker ti regulatorji ne omogočajo uvedbe mrtvih con na pogrešku in regulirni veličini, smo regulatorje realizirali v obliki Matlab funkcij. Regulatorji vsebujejo zaščito pred integralnim pobegom, zaščito pri prehodu iz ročnega v avtomatski način in mrtvo cono na pogrešku ter regulirni veličini.

S preizkušanjem smo določili primerne vrednosti mrtvih con na pogrešku in regulirnem signalu. Vodilo pri nastavljanju vrednosti nam je bilo čim manjše osciliranje regulirnega signala in čim boljša kvaliteta vodenja. Pri regulacijski zanki za vodenje tlaka v cevovodu iz sušilnika z uporabo mrtvih con še vedno nismo uspešno zmanjšali osciliranja regulirnega signala pri ustrezni kvaliteti vodenja, zato smo uporabili še filtriranje reguliranega signala. Procesni signal smo filtrirali z diskretnim filtrom prvega reda, katerega časovno konstanto smo določili s hitro Fourierjevo transformacijo signalov iz učnega niza. Za izdelavo frekvenčnega spektra šuma, ki smo ga hoteli odstraniti iz signala, smo uporabili signal iz učnega niza signalov za identifikacijo, ko so bili aktuatorji v ročnem načinu na konstantnih vrednostih. S tem smo zagotovili, da je v procesnih signalih ostal le šum.

Ker se je filtriranje signalov izkazalo za uspešno, smo po podobnem postopku izdelali še filtre za ostale regulirane signale.

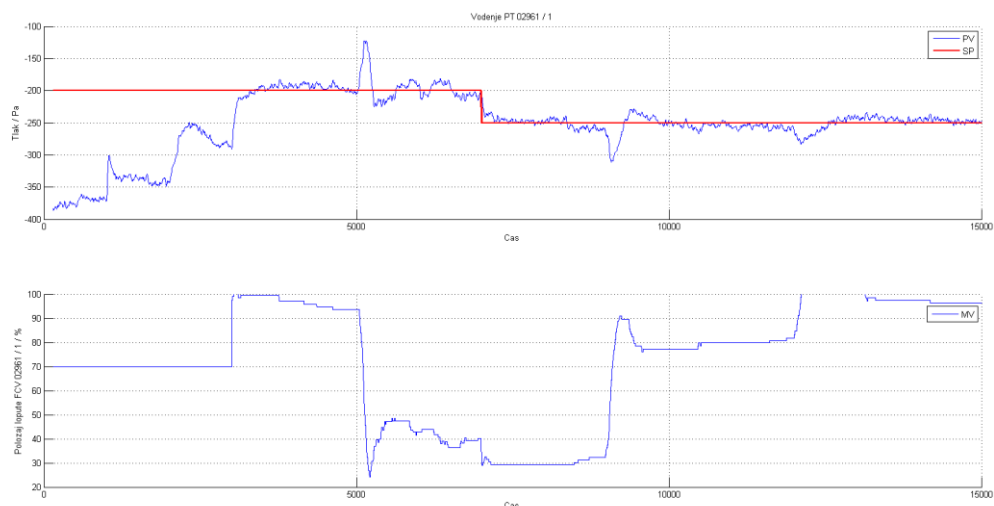
5.1.3 Rezultati vodenja z dopolnjenimi regulatorji PI

Najboljše rezultate smo tako dobili s kombinacijo vseh treh pristopov zmanjševanja oscilacij regulirnega signala. Vrednosti mrtvih con in časovnih konstant za posamezne regulatorje so podane v tabeli 11. Delovanje sistema vodenja procesa priprave odpadnega zraka s takimi vrednostmi pa je

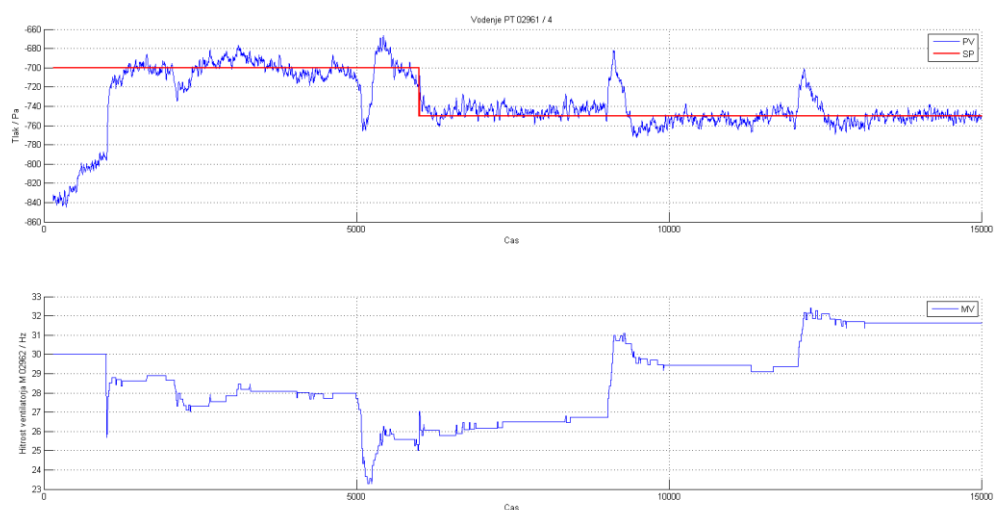
prikazano na slikah od 24 do 27. Primerjave ostalih kombinacij uporabe mrtvih con in filtriranja so podane v prilogi 7.7.

Tabela 11: Vrednosti mrtvih con in časovne konstante filtrov

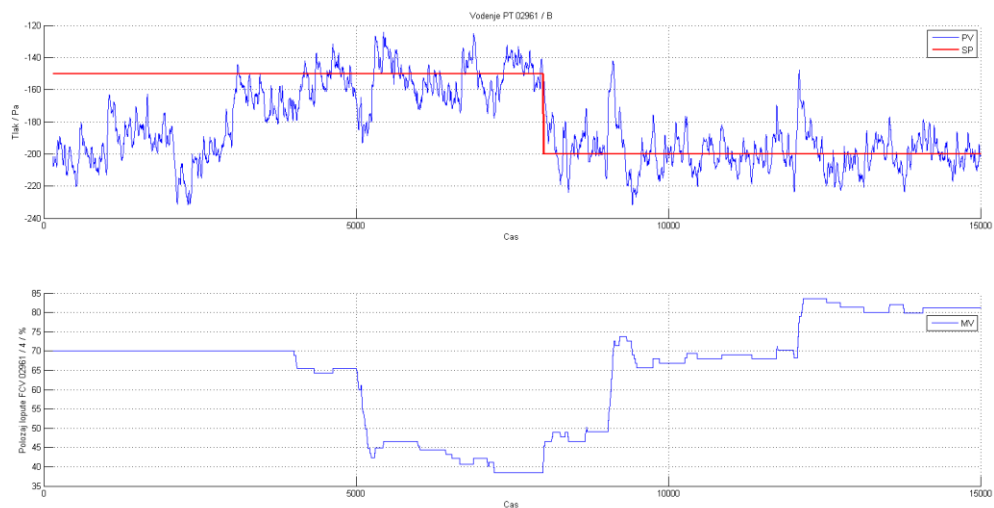
Regulator	PI PT 02961/1	PI PT 02961/4	PI PT 02961/B	PI FIA 02965/2
Mrtva cona na pogrešku	10 Pa	10 Pa	15 Pa	200 m ³ /h
Mrtva cona na regulirnem signalu	1 %	0,25 %	1 %	1 %
Čas. konst. filtra reguliranega sig.	10 s	6 s	25 s	6 s



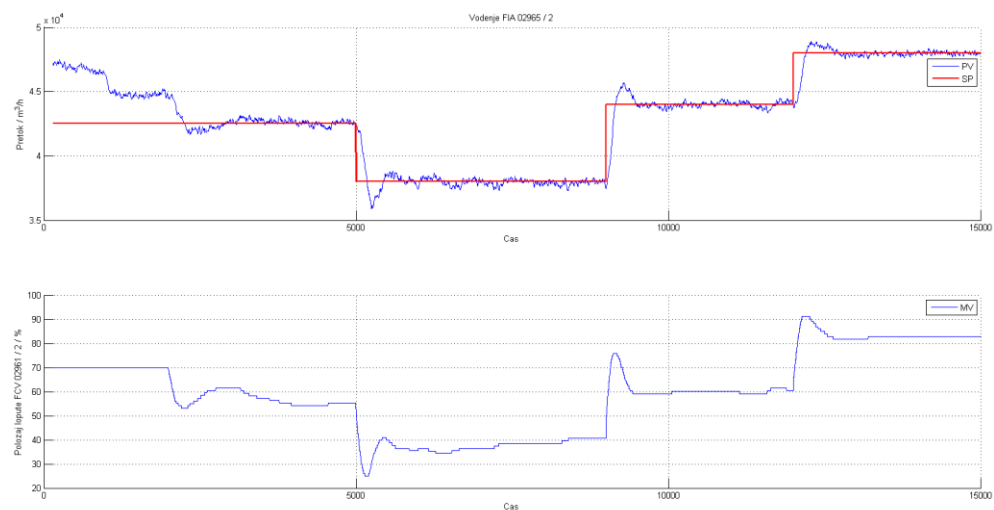
Slika 24: Vodenje PT 02961/1 z uporabljenimi mrtvimi conami in filtrom



Slika 25: Vodenje PT 02961/4 z uporabljenimi mrtvimi conami in filtrom



Slika 26: Vodenje PT 02961/B z uporabljenimi mrtvimi conami in filtrom



Slika 27: Vodenje FIA 02965/2 z uporabljenimi mrtvimi conami in filtrom

5.2 Nadzorna logika sistema vodenja

Nadzorna logika sistema vodenja skrbi za pravilno delovanje sistema vodenja. Načrtali smo logiko, ki

- zagotovi primeren zagon sistema priprave odpadnega zraka,
- ukrepa v primeru izjemnih obratovalnih pogojev v sistemu priprave zraka in
- preprečuje napačno nastavljanje referenc tlakov v sistemu.

5.2.1 Logika za zagon sistema

Ob zagonu sistema priprave odpadnega zraka iz peči in sušilnikov sistema vodenja ni priporočljivo zagnati v avtomatskem načinu, ampak najprej v ročnem načinu in z vkapljanjem regulacijskih zank v avtomatskem načinu počakati toliko časa, da je sistem priprave zraka v ustaljenem stanju.

Zgoraj opisana logika je implementirana kot del nadzorne logike sistema vodenja. Ob zagonu je sistem prvih 500 sekund v ročnem načinu z naslednjimi nastavitvami:

- hitrost vrtenja ventilatorja: 30 Hz,
- položaj vseh loput: 70 %.

Nato pa se postopoma, v razmiku 500 sekund, začnejo vkapljati regulacijske zanke v naslednjem vrstnem redu:

- regulator PI PT 02961/4,
- regulator PI FIA 02965/2,
- regulator PI PT 02961/1 in
- regulator PI PT 02961/B.

5.2.2 Samodejno ukrepanje sistema vodenja v primeru izjem

V naročnikovih predlogih avtomatizacije sistema vodenja procesa priprave odpadnega zraka iz peči in sušilnikov je tudi diagram, ki preverja temperaturo v sistemu priprave zraka. V primeru, da temperatura naraste nad nastavljeno vrednost, sistem ustrezno odpre pripadajočo loputo za nekaj odstotkov. Ker je tako izvedbo pri vodenju z regulatorji PI nekoliko težje izvesti, smo sistemu vodenja dodali nadzorno logiko, ki preverja izjemne obratovalne pogoje v sistemu in samodejno ukrepa, tako da se izjemnim dogodkom poskuša izogniti.

Izjemni dogodki v sistemu priprave odpadnega zraka so:

- previsoka temperatura zraka v cevovodu iz peči TT 02961/1,
- previsoka temperatura zraka pred ventilatorjema TT 02961/4,

- previsoka vhodna koncentracija emisij NO_x QIA 02965/1 ali
- previsok diferencialni tlak na delujočem ventilatorju dP 02962/1.

Vse izjeme se nanašajo na previsoke vrednosti procesnih veličin, ki jih je mogoče zmanjšati s povečanim pretokom odpadnega zraka skozi sistem. Zamislili smo si, da bi v primeru, ko se v sistemu pojavi katera od naštetih izjem in sistem vodenja deluje v avtomatskem načinu, povečali referenco pretoka odpadnega zraka. V ta namen so dodane štiri stopnje opozoril:

- signal je dosegel opozorilni nivo (ang. Warning Level),
- signal je dosegel visok opozorilni nivo (ang. High Warning Level),
- signal je dosegel alarmni nivo (ang. Alarm Level) in
- signal je dosegel visok alarmni nivo (ang. High Alarm Level).

Pri opozorilnih ravneh izjem nadzorna logika samodejno poveča referenco pretoka odpadnega zraka za naslednji vrednosti:

- 2000 m³/h pri opozorilnem nivoju in nadaljnjih
- 5000 m³/h pri visokem opozorilnem nivoju.

V primeru, da signal doseže alarmni nivo, celoten sistem vodenja preklopi v ročni način. Položaj loput v ročnem načinu je 100 %, hitrost vrtenja motorja ventilatorja pa 35 Hz.

V primeru, da signal doseže visok alarmni nivo, je s sistemom priprave zraka in zmanjševanja emisij NO_x najbrž nekaj narobe, zato se ventilator zaustavi, lopute pa na zahtevo naročnika iz varnostnih razlogov ostanejo odprte.

V tabeli 12 so zbrane vrednosti nivojev, ki prožijo izjemne dogodke v sistemu. Nekatere vrednosti so pridobljene iz naročnikovih diagramov, ostale pa so določene na podlagi izkušenj z eksperimentiranjem na sistemu.

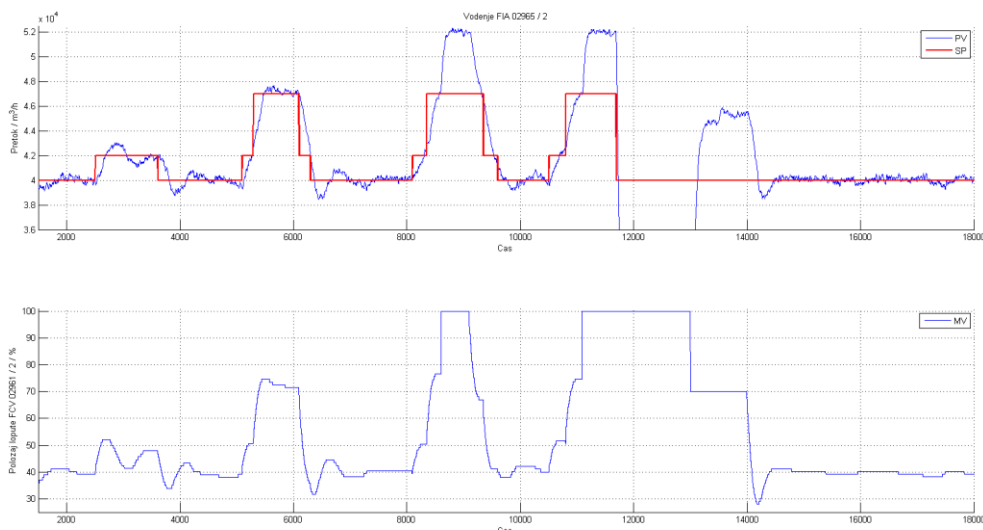
Tabela 12: Mejne vrednosti nivojev izjem v sistemu priprave zraka

Regulator	Opozorilni nivo	Visok opozorilni nivo	Alarmni nivo	Visok alarmni nivo
TT 02961/1	400 °C	425 °C	450 °C	475 °C
TT 02961/4	165 °C	175 °C	185 °C	195 °C
QIA 02965/1	10 mg/m ³	12,5 mg/m ³	15 mg/m ³	20 mg/m ³
dP 02962/1	4000 Pa	4250 Pa	4500 Pa	5000 Pa

Delovanje zgoraj opisanega samodejnega ukrepanja v primeru izjem v sistemu je prikazano na sliki 28. Testna sekvenca poskusa je bila naslednja:

-
- Sistem vodenja regulira pretok odpadnega zraka na 40000 m³/h.
 - Ob času $t = 2500$ sekund temperatura TT 02961/1 naraste nad opozorilni nivo (400 °C), zato se referenca pretoka odpadnega zraka poveča na 42000 m³/h.
 - Temperatura TT 02961/1 ob času $t = 3600$ sekund pade pod opozorilni nivo, zato tudi referenca pretoka pade nazaj na 40000 m³/h.
 - Ob času $t = 5100$ sekund temperatura TT 02961/4 naraste nad opozorilni nivo (165 °C), referenca pretoka se dvigne za 2000 m³/h. Ker temperatura narašča še naprej in doseže visok opozorilni nivo (175 °C) pretok naraste še za dodatnih 5000 m³/h na 47000 m³/h. Postopek se nato ponovi v obratnem vrsten redu.
 - Ob času $t = 8100$ s naraste izhodna koncentracija emisij NO_x najprej čez opozorilni in nato še čez visok opozorilni nivo. Referenca pretoka se najprej dvigne za 2000, nato pa še za nadaljnjih 5000 m³/h. Ker koncentracija še vedno narašča in doseže alarmni nivo (15 mg/m³), sistem vodenja preklopi v ročni način. Položaj loput je 100 %, hitrost vrtenja ventilatorja pa 35 Hz. Postopek se nato ponovi v obratnem vrstnem redu.
 - Ob času $t = 10500$ sekund začne naraščati diferencialni tlak na delujočem ventilatorju dP 02962/1 do visokega alarmnega nivoja. Referenca pretoka se najprej zviša za 2000 in nato še 5000 m³/h. Ob času $t = 11100$ sekund diferencialni tlak doseže alarmni nivo, zato sistem vodenja preklopi v ročni način. Ker diferencialni tlak še vedno narašča in doseže visok alarmni nivo, se sistem priprave zraka ob času $t = 11700$ sekund zaustavi. Da je sistem zaustavljen, prikazuje slika 30, kjer se vidi, da je hitrost vrtenja ventilatorja nič Hz. Ob zaustavitvi sistema se tudi referenca pretoka spremeni nazaj na osnovno vrednost.
 - Ob času $t = 13000$ sekund operater ponovno zažene sistem priprave zraka. Sistem se zažene po logiki za zagon sistema, ki je opisana v poglavju 5.2.1
 - Ob času $t = 14500$ sekund vse regulacijske zanke preklopijo v avtomatsko delovanje in sistem vodenja ponovno regulira pretok odpadnega zraka na 40000 m³/h.

Naraščanje in padanje vrednosti signalov izjem je simulirano s trikotnimi funkcijami.



Slika 28: Prikaz delovanja samodejnega ukrepanja v primeru izjem v sistemu – vodenje FIA 02965/2

5.2.3 Samodejno spreminjanje referenc tlakov glede na referenco pretoka

Pri preizkušanju sistema priprave odpadnega zraka smo ugotovili, da med tlaki in pretokom odpadnega zraka obstajajo povezave. Tako na primer ne moremo doseči visokih tlakov v sistemu pri majhnem pretoku. V naročnikovem predlogu avtomatizacije sistema priprave odpadnega zraka je nastavljanje referenc tlakov in pretoka popolnoma v domeni operaterja, ki lahko z neprimerno izbranimi referencami sistem pripelje v stanje, kjer pri trenutni strukturi vodenja z neodvisnim nastavljanjem referenc ni mogoče doseči vseh zelenih razmer.

Rešitev bi bila multi-variabilna struktura vodenja, kjer bi upoštevali križne povezave v sistemu priprave zraka in tako izračunali primeren položaj loput in hitrosti ventilatorja.

Druga rešitev je samodejno spreminjanje referenc pretoka glede na referenco pretoka odpadnega zraka. S tem pristopom se zmanjša možnost za človeško napako pri nastavljanju referenc.

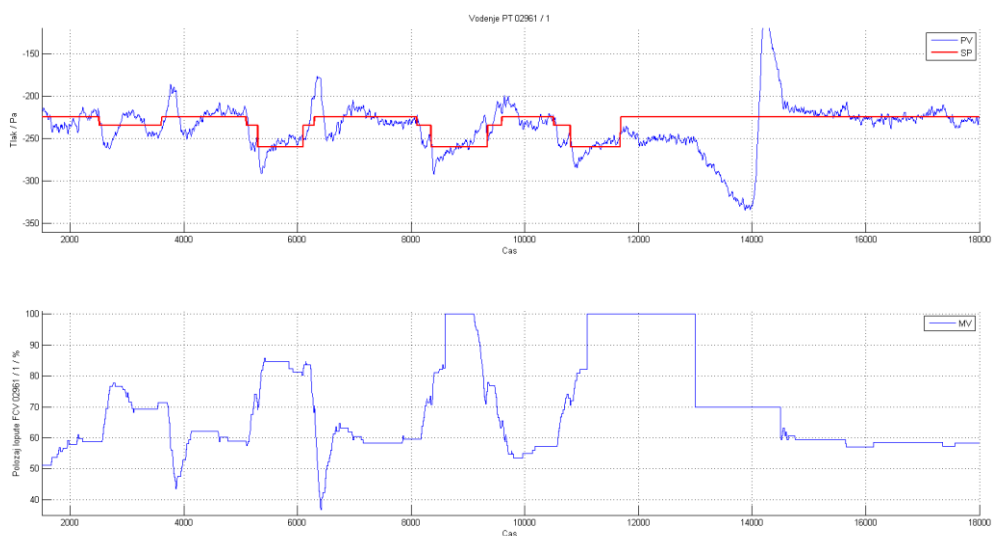
Samodejno spreminjanje referenc tlakov smo si zamislili tako, da smo iz reference pretoka določili vrednosti referenc tlakov. Osnovne vrednosti smo povzeli iz naročnikovih diagramih, ostale vrednosti pa smo določili tako, da smo pri želenem pretoku preverili, kakšne so vrednosti tlakov, ko lopute niso v skrajnem položaju delovnega območja.

Povezave smo realizirali preko t.i. iskalnih tabel (ang. lookup tables). Določili smo jih kar kot linearne funkcije, katerih parametri so podani v tabeli 13. Linearno funkcijo sicer opišeta že dve točki, vendar smo želeli le prikazati koncept delovanja. V primeru, da bi se ob realizaciji na realnem sistemu izkazalo, da povezave niso linearne, bi se spremenile le vrednosti parametrov, funkcionalnost pa bi ostala enaka.

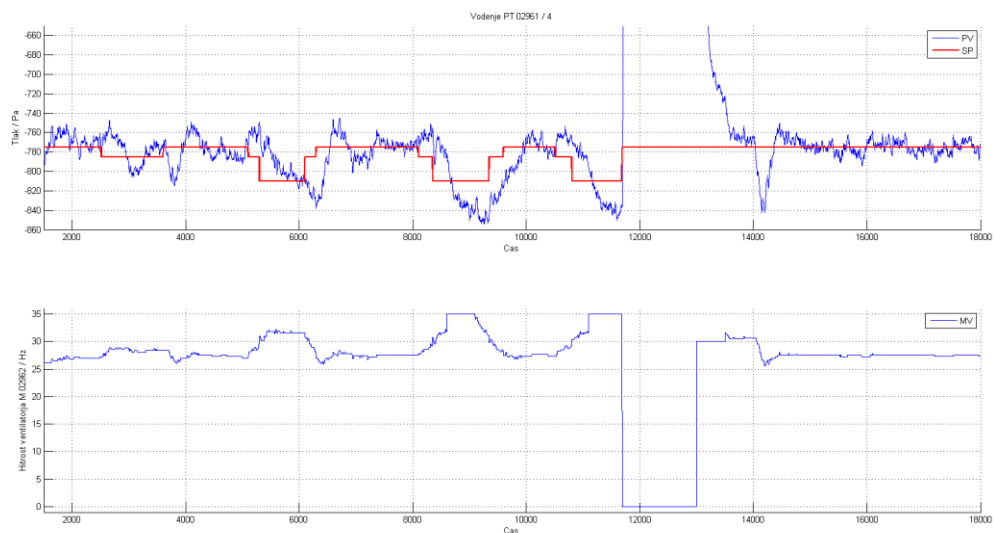
Tabela 13: Parametri iskalnih tabel za samodejno spreminjanje referenc tlakov

Referenca	1	2	3	5	4
Referenca FIA 02965/2	35000 m ³ /h	40000 m ³ /h	45000 m ³ /h	50000 m ³ /h	55000 m ³ /h
Referenca PT 02961/1	– 200 Pa	– 225 Pa	– 250 Pa	– 275 Pa	– 300 Pa
Referenca PT 02961/4	– 750 Pa	– 775 Pa	– 800 Pa	– 825 Pa	– 850 Pa
Referenca PT 02961/B	– 200 Pa	– 175 Pa	– 150 Pa	– 135 Pa	– 125 Pa

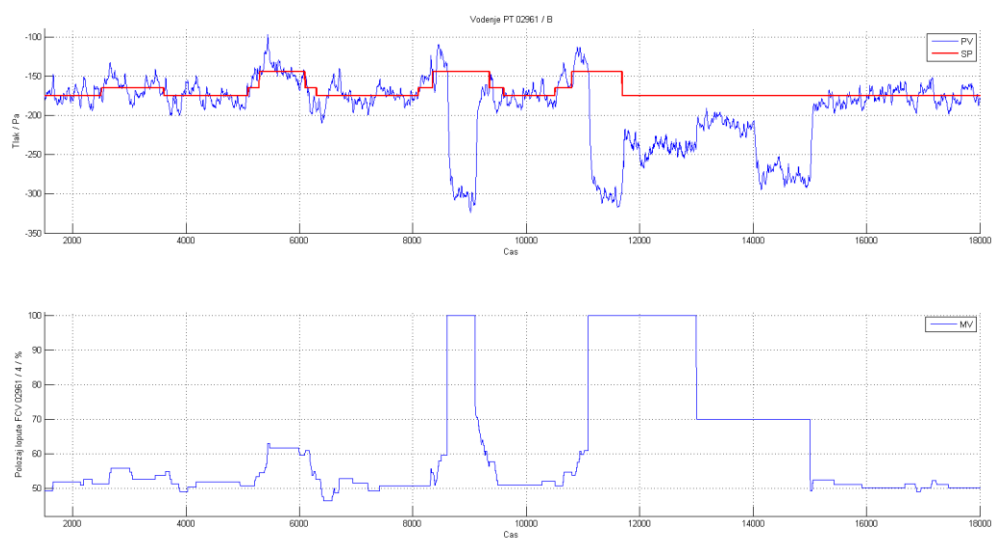
Prikaz delovanja zgoraj opisane logike samodejnega spreminjanja referenc glede na referenco pretoka vidimo na slikah od 29 do 31. Spreminjanje referenc tlakov se nanaša na spreminjanje reference pretoka na sliki 28.



Slika 29: Prikaz delovanja samodejnega spreminjanja referenc – vodenje PT 02961/1



Slika 30: Prikaz delovanja samodejnega spreminjanja referenc – vodenje PT 02961/4



Slika 31: Prikaz delovanja samodejnega spreminjanja referenc – vodenje PT 02961/B

5.3 Komentar rezultatov načrtovanja sistema vodenja

S simulacijsko shemo smo želeli preveriti, ali obstajajo alternative obstoječemu sistemu vodenja. Zadovoljive rezultate vrne že vodenje z regulatorji PI, ki smo jim za boljšo kakovost vodenja in podaljšanje življenjske dobe aktuatorjev dodali mrtvi coni na pogrešku in regulirni veličini ter filtriranje reguliranih signalov.

Dodali smo tudi nadzorno logiko sistema, ki skrbi za pravilno delovanje sistema vodenja in se poskuša samodejno izogniti nevarnim situacijam, kot so npr. previsoke temperature v sistemu ali previsoka izhodna koncentracija emisij NO_x.

Nadzorna logika skrbi tudi za samodejno nastavljanje referenc tlakov glede na referenco pretoka odpadnega zraka.

V primeru realizacije sistema vodenja na realnem sistemu bi lahko v rešitev samodejnega spreminjanja referenc implementirali tudi samodejno spreminjanje reference pretoka, ki bi jo spreminjali glede na število delujočih peči in sušilnikov.

Iz simulacijskih poskusov, ki smo jih izvedli, smo ugotovili, da je sistem res kompleksen. Kompleksnost se pokaže s prepletenostjo regulacijskih zank. Za take sisteme so bolj kot klasični regulatorji PID primerne katere od multi-variabilnih regulacijskih struktur.

Ker sistem izkazuje tudi nelinearen značaj, bi bilo primerno razmisliti tudi o uporabi mehkih regulatorjev PID, ki bi bili uglašeni v več delovnih točkah. Z mehko logiko bi zvezno spreminjali parametre regulatorja po vnaprej določenih pripadnostnih funkcijah. Slabost klasičnih regulatorjev PI se lepo izrazi na sliki 28, kjer se vidi, da pri spremembi reference iz 47000 na 40000 m³/h dobimo nihaj in pol, pri obratni situaciji pa tega ni mogoče zaznati.

Sistem vodenja, ki smo ga predstavili v delu, je pripravljen za realizacijo na realnem sistemu. Zaradi razlik pri odzivu realnega sistema in modela bi bilo potrebno ob zagonu sistema vodenja prirediti nekaj parametrov, kot so parametri regulatorjev PI in tabel za samodejno nastavljanje referenc tlakov.

Z nadzorno logiko in sistemom vodenja smo zadostili pogojem, ki smo si jih zadali. Realizirali smo sistem vodenja, ki vodi sistem priprave odpadnega zraka dovolj kakovostno in je še vedno dovolj enostaven za realizacijo na programirljivih logičnih krmilnikih.

Z uporabo naprednih metod vodenja, kot so multi-variabilni regulatorji PID in regulatorji PID z mehkim nastavljanjem parametrov (ang. Fuzzy Gain Scheduling Controllers - FGSC), bi najbrž lahko dosegli

boljšo kakovost vodenja v celotnem delovnem območju, vendar taka rešitev pogosto ni odobrena s strani naročnika, saj se v industriji še vedno izogibajo manj poznanim in nepreizkušnim algoritmom vodenja in prisegajo na klasično strukturo PID.

6. Sklep

Onesnaževanje okolja z emisijami NO_x postaja vse večji problem v današnjem svetu. Velika onesnaževalca z emisijami NO_x sta promet in industrija. V zadnjem času se je razvilo več metod, ki bolj ali manj uspešno zmanjšujejo izpuste emisij NO_x v okolje. Ena izmed uspešnejših metod, ki se je uveljavila v industriji, v zadnjih letih pa tudi v prometu, je selektivna katalitična redukcija. Metoda uporablja katalitični pretvornik, v katerem potekajo kemične reakcije med katalizatorjem in tokom odpadnega zraka, ki mu je dodan reaktant. Emisije NO_x se tako reducirajo v druge, manj škodljive pline.

Ker katalitični pretvornik deluje optimalno v določenem delovnem območju temperature, pretoka in tlaka odpadnega zraka, je potrebno zrak najprej ustrezno pripraviti. Magistrsko delo opiše primer takega sistema za pripravo odpadnega zraka v industriji. Sistem smo preizkušali s simulacijo, zato smo najprej zgradili ustrezen matematični model. Ker je tak sistem kompleksen in nelinearen, smo matematični model zgradili z uporabo identifikacijskih metod, ki za modelno strukturo uporabljajo mehki model tipa Takagi-Sugeno.

Sistem vodenja smo zasnovali kot simulacijsko študijo, s katero smo želeli preveriti, ali obstajajo alternative obstoječemu sistemu vodenja. Zadovoljive rezultate smo dobili z regulatorji PI, ki smo jim dodali mrtvi coni na pogrešku in regulirni veličini. Uvedli smo še filtriranje reguliranih signalov in nadzorno logiko sistema, ki skrbi za pravilno delovanje sistema vodenja.

Načrtan koncept sistema vodenja bi bil z nekaj popravki parametrov primeren za realizacijo na realnem sistemu priprave odpadnega zraka iz peči in sušilnikov.

Podali smo tudi možnosti za izboljšavo modela sistema priprave zraka in sistema vodenja.

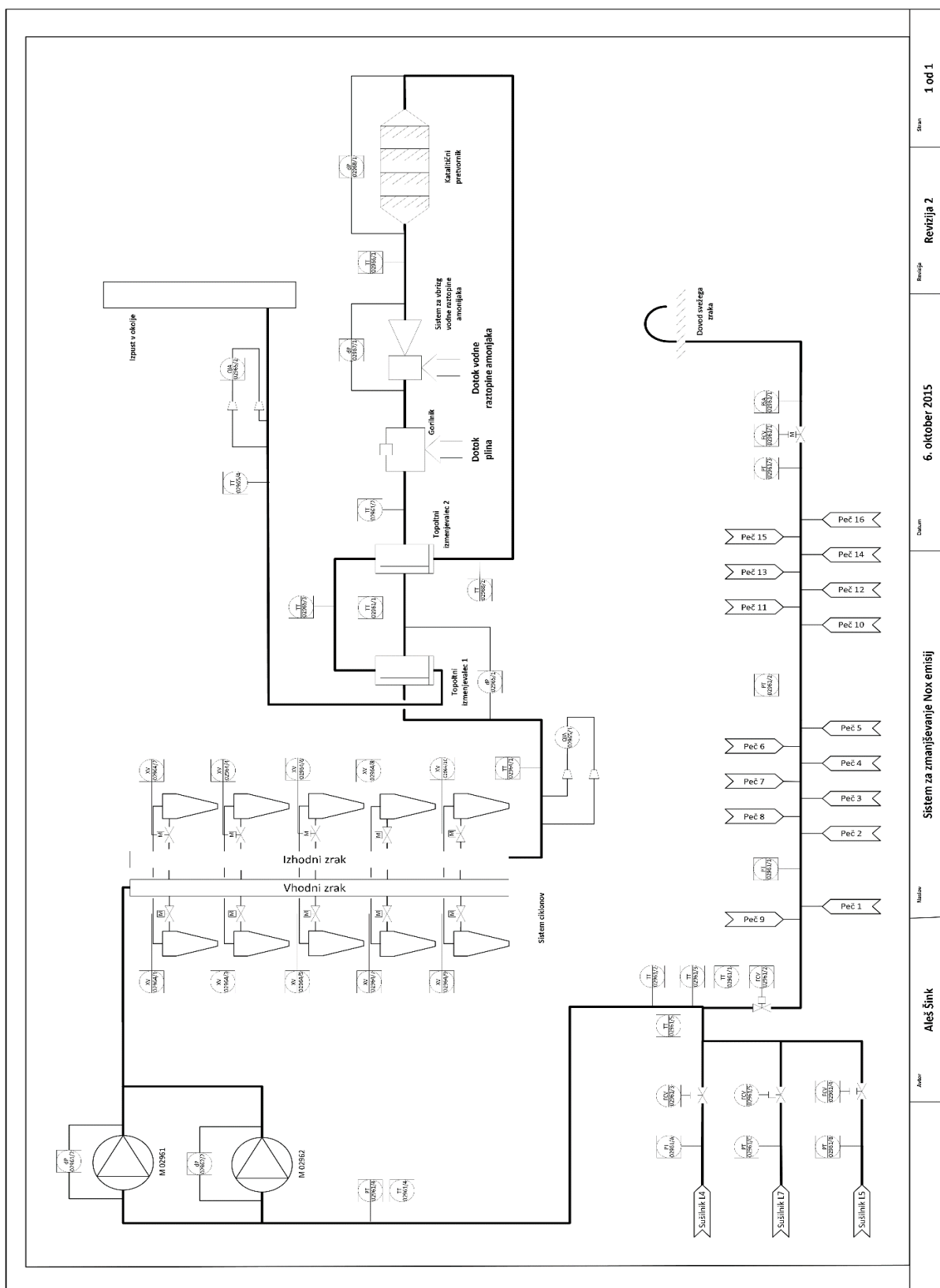
Mehke modele sistema pri zagotovo lahko izboljšali z informacijo o številu delujočih peči in sušilnikov. To tudi štejemo med največje pomanjkljivosti modela sistema. Prav tako bi morda procesne signale pred postopkom identifikacije filtrirali, vendar bi s tem še dodatno izgubili informacijo o dinamiki sistema.

Sistem vodenja priprave odpadnega zraka bi bilo mogoče izboljšati z uporabo naprednih metod vodenja, ki pa pri naročniku najbrž ne bi bile odobrene.

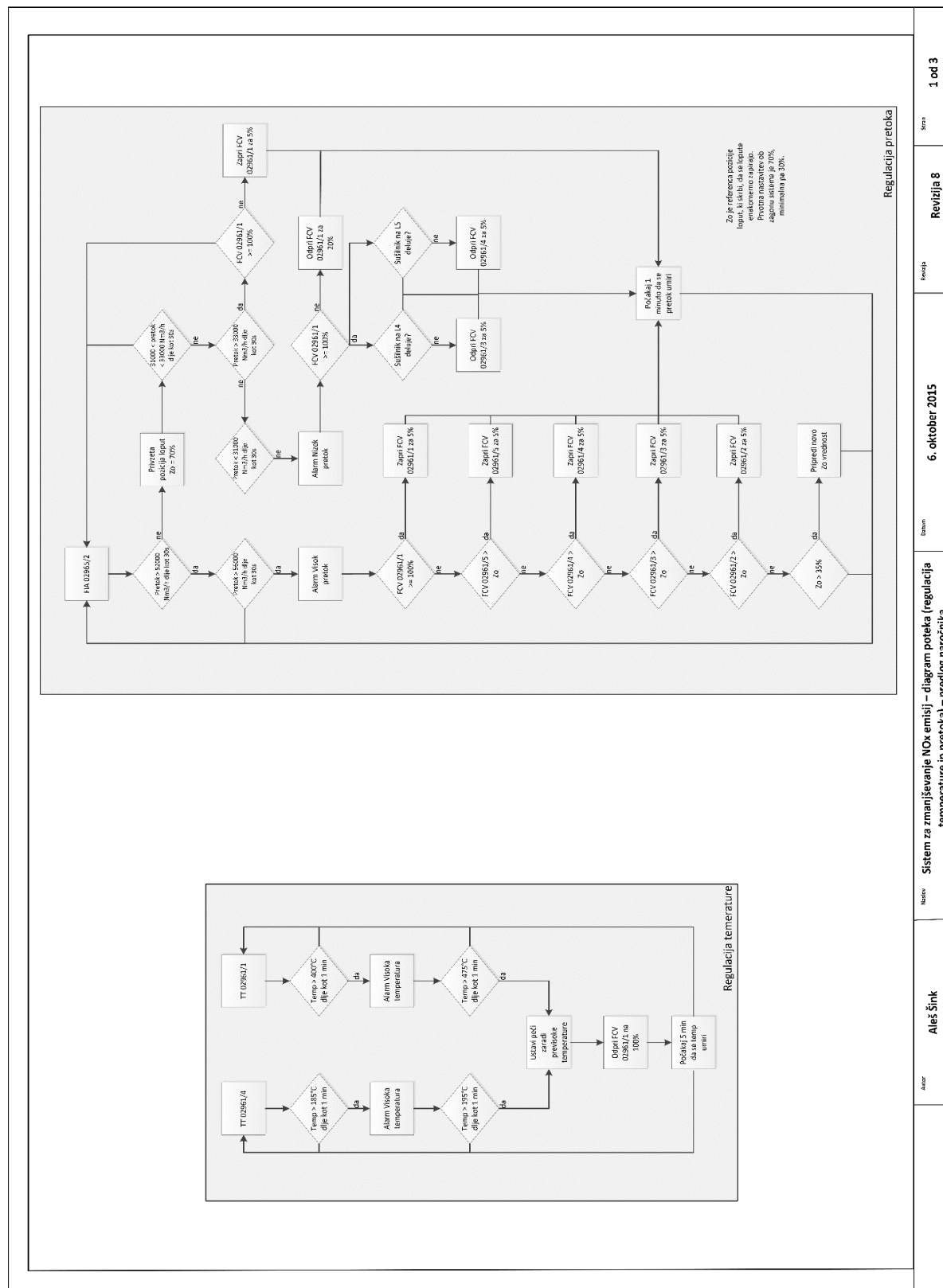


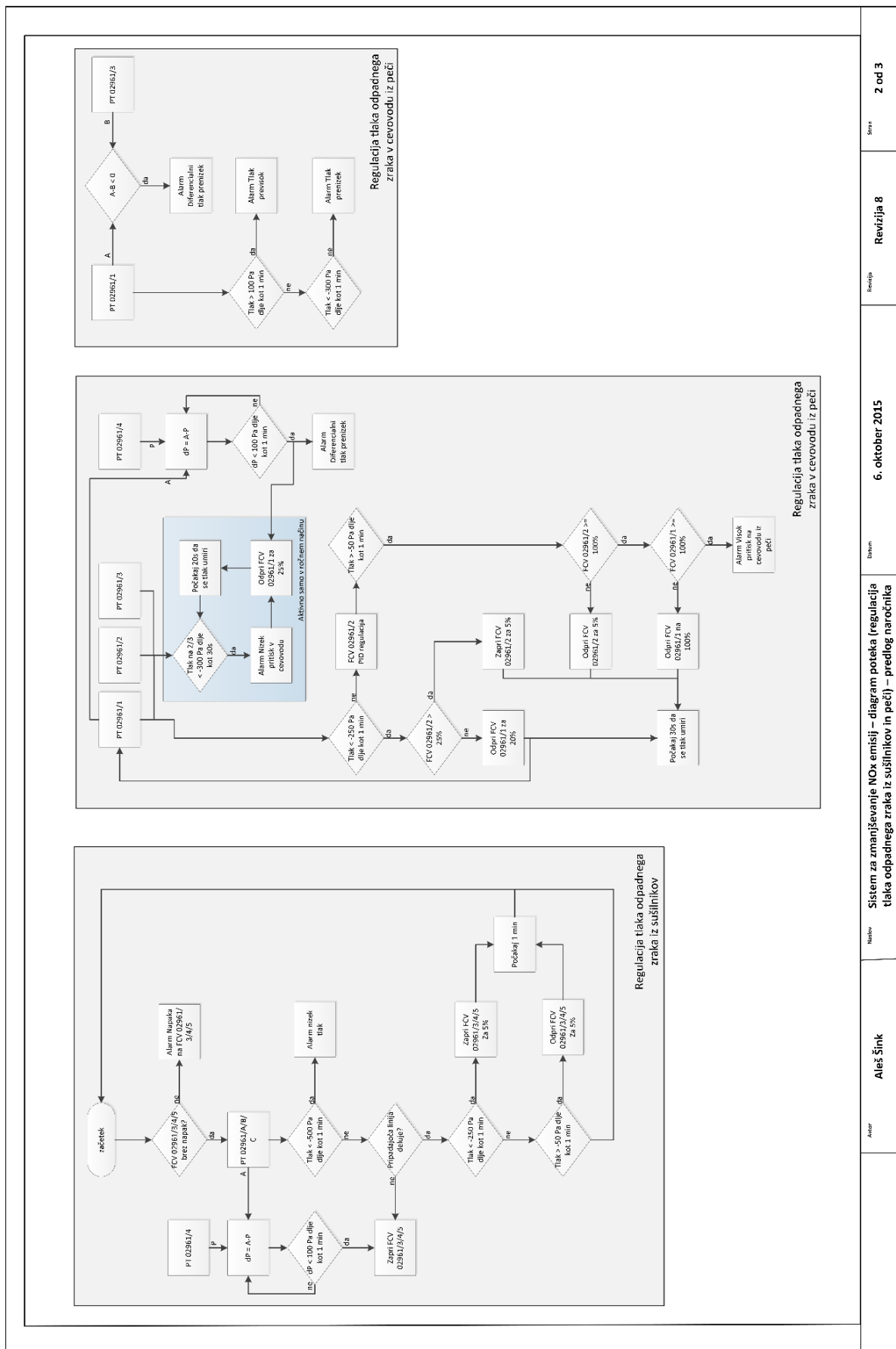
7. Priloge

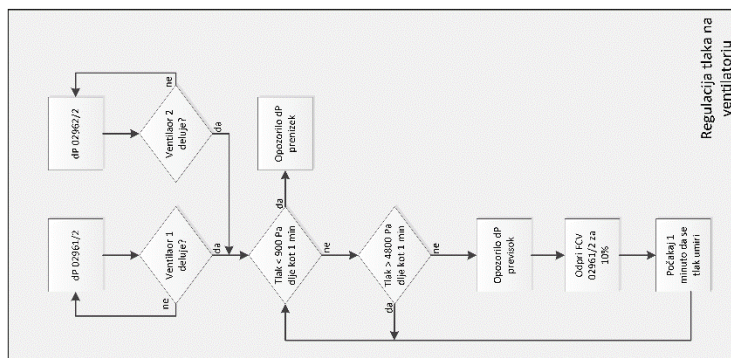
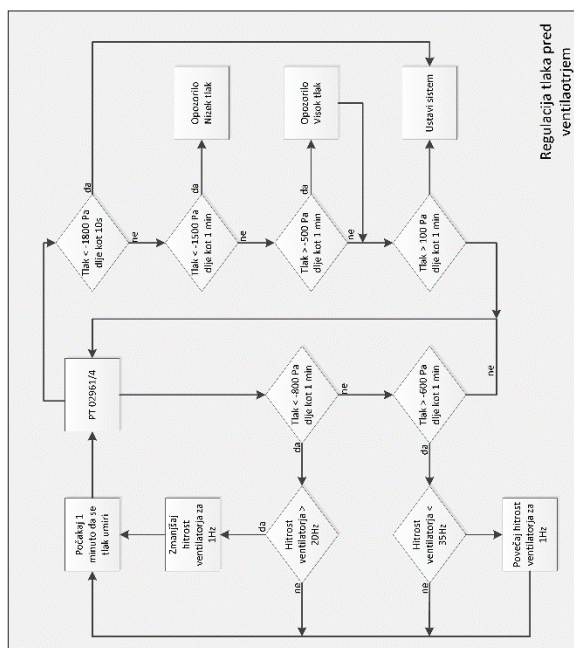
7.1 P&I-diagram sistema



7.2 Naročnikov predlog avtomatizacije sistema priprave odpadnega zraka

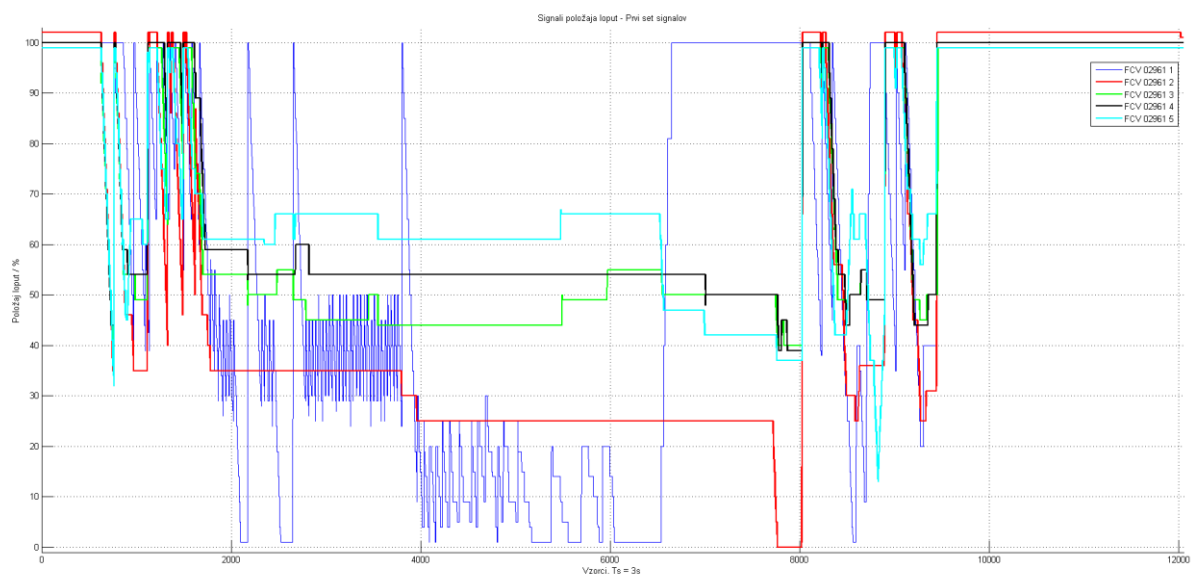




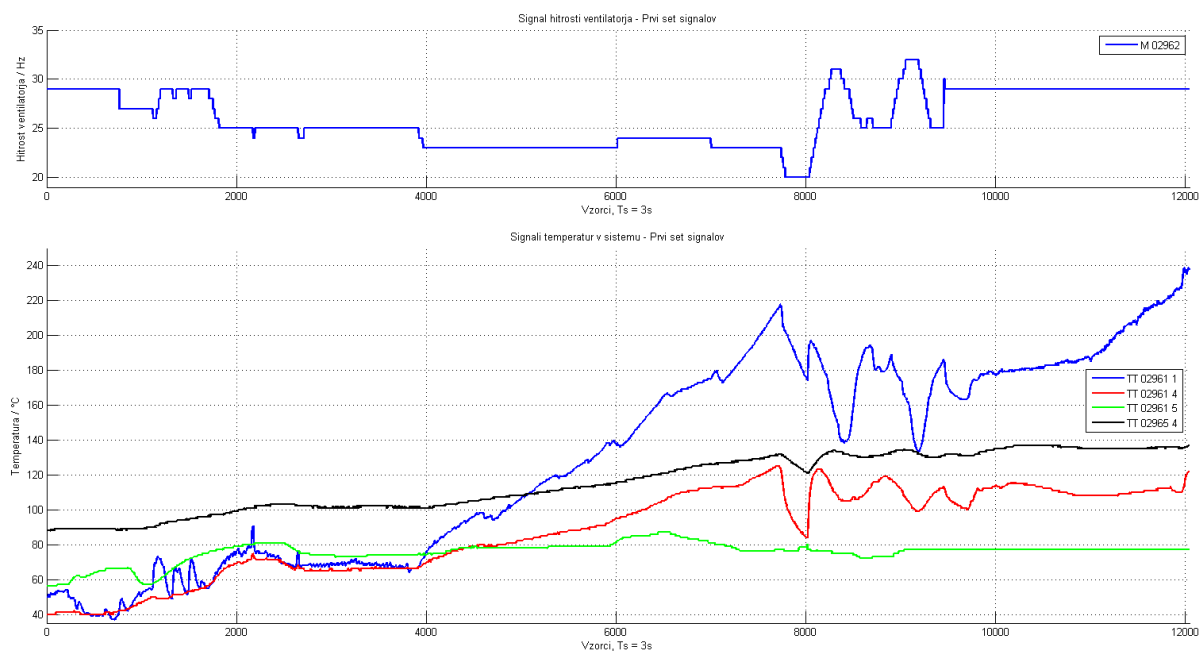


7.3 Signali uporabljeni za identifikacijo

7.4 Prvi niz signalov

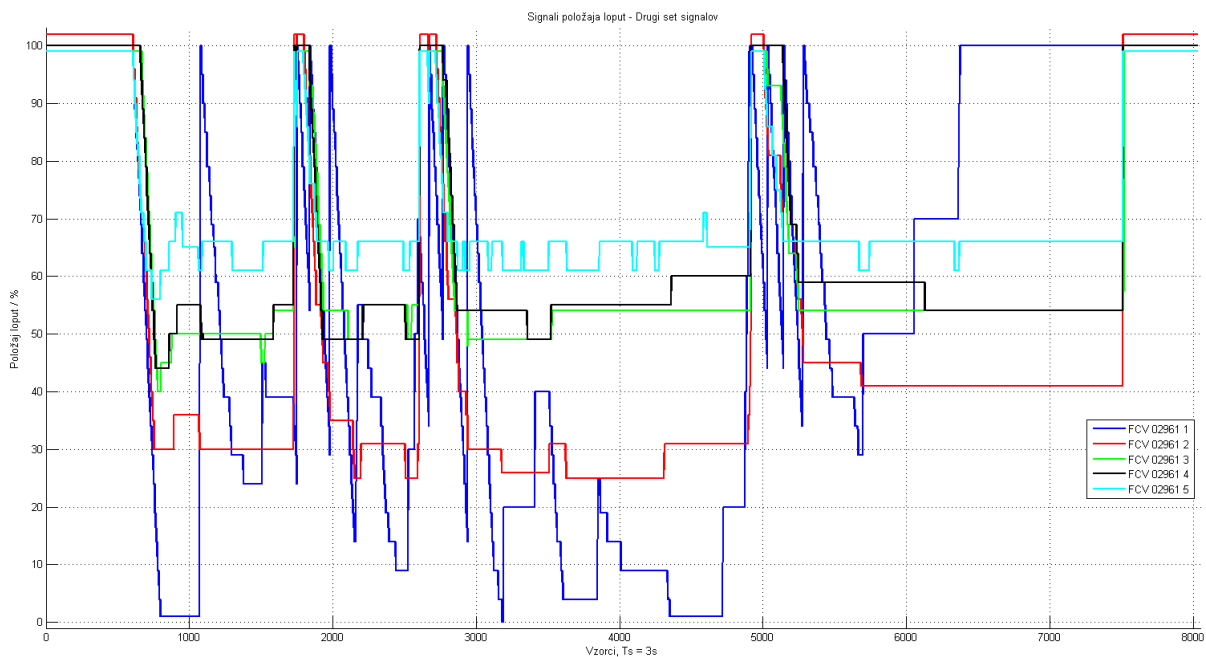


Slika 32: Signali položaja loput – prvi niz signalov

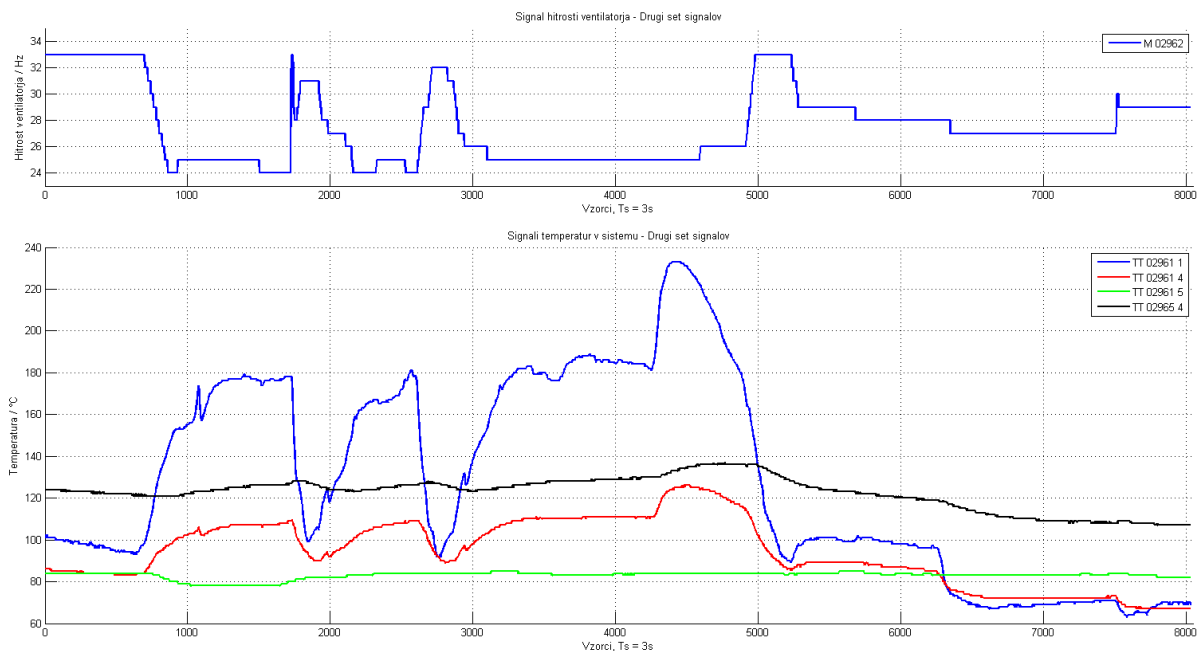


Slika 33: Signal hitrosti vrtenja ventilatorja in temperatur v sistemu – prvi niz signalov

7.5 Drugi niz signalov



Slika 34: Signali položaja loput – drugi niz signalov



Slika 35: Signal hitrosti vrtenja ventilatorja in temperatur v sistemu – drugi niz signalov

7.6 Dodatni rezultati identifikacije

7.6.1 Model PT 02961/1

Parametri mehkih pravil

Pravila imajo naslednjo obliko:

Pravilo 1: if $y(k-1)$ is A11 and $y(k-2)$ is A12 and ... and $u_4(k-2)$ is A17 (5)
then $y(k) = 1,28 * y(k-1) - 0,37 * y(k-1) + \dots + 1,02 * u_4(k-2) + 0,0$

...

Pravilo 6: if $y(k-1)$ is A61 and $y(k-2)$ is A62 and ... and $u_4(k-2)$ is A67
then $y(k) = 1,48 * y(k-1) - 0,56 * y(k-1) + \dots - 0,36 * u_4(k-2) - 107,83$

Tabela 14: Parametri mehkih pravil modela PT 02961/1

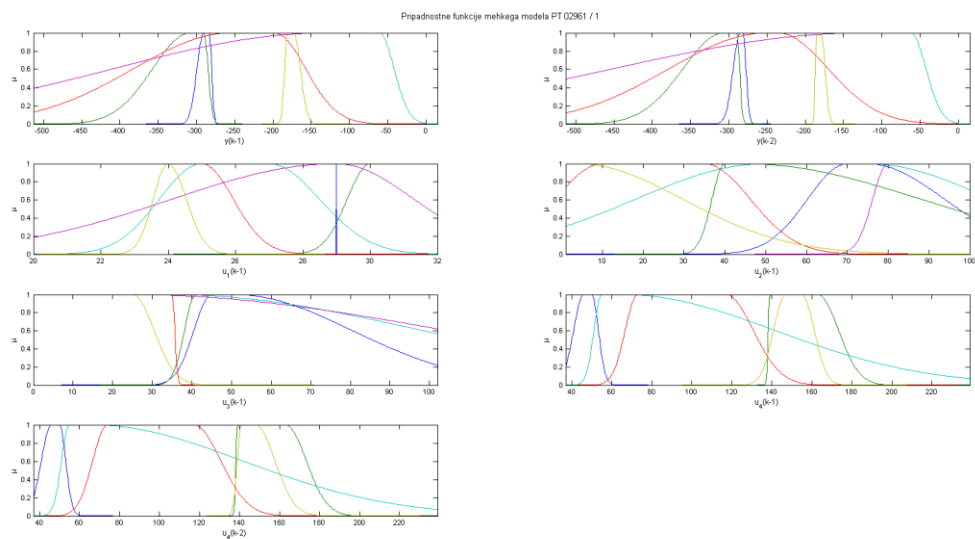
Pravilo	$y(k-1)$	$y(k-2)$	$u_1(k-1)$	$u_2(k-1)$	$u_3(k-1)$	$u_4(k-1)$	$u_4(k-2)$	Odmik
1	1,28	-0,37	-1,00	1,37	-1,57	-1,55	1,02	0,00
2	1,22	-0,28	-2,72	0,29	-0,02	0,67	-0,67	47,03
3	1,15	-0,32	0,96	1,35	-3,74	0,34	0,05	-20,40
4	1,34	-0,41	-2,11	0,25	-0,19	1,75	-1,65	24,79
5	1,33	-0,34	0,02	0,02	-0,02	0,13	-0,12	-4,42
6	1,48	-0,56	5,44	0,05	-1,59	0,37	-0,36	-107,83

Središča rojev

Tabela 15: Središča rojev in pripadnostnih funkcij mehkega modela PT 02961/1

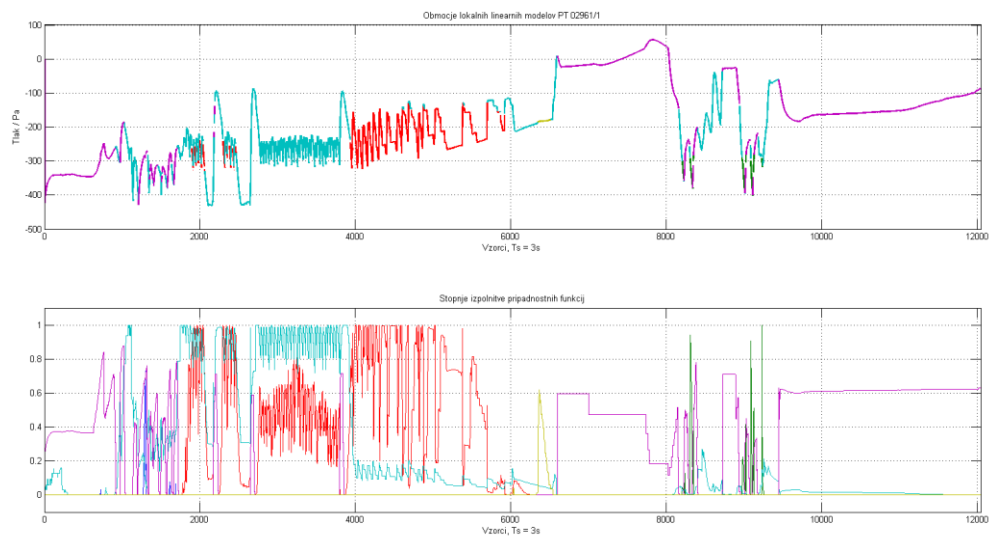
Pravilo	$y(k-1)$	$y(k-2)$	$u_1(k-1)$	$u_2(k-1)$	$u_3(k-1)$	$u_4(k-1)$	$u_4(k-2)$
1	-322,43	-320,30	27,97	73,79	78,22	59,44	59,23
2	-254,88	-253,71	29,46	66,96	79,36	159,66	160,04
3	-228,92	-228,73	24,02	21,89	30,08	87,27	87,25
4	-200,30	-199,85	26,33	47,45	47,09	121,76	121,76
5	-156,51	-156,97	27,03	100,00	75,98	163,10	163,10
6	-141,81	-142,75	25,23	33,19	29,73	147,93	147,53

Pripadnostne funkcije



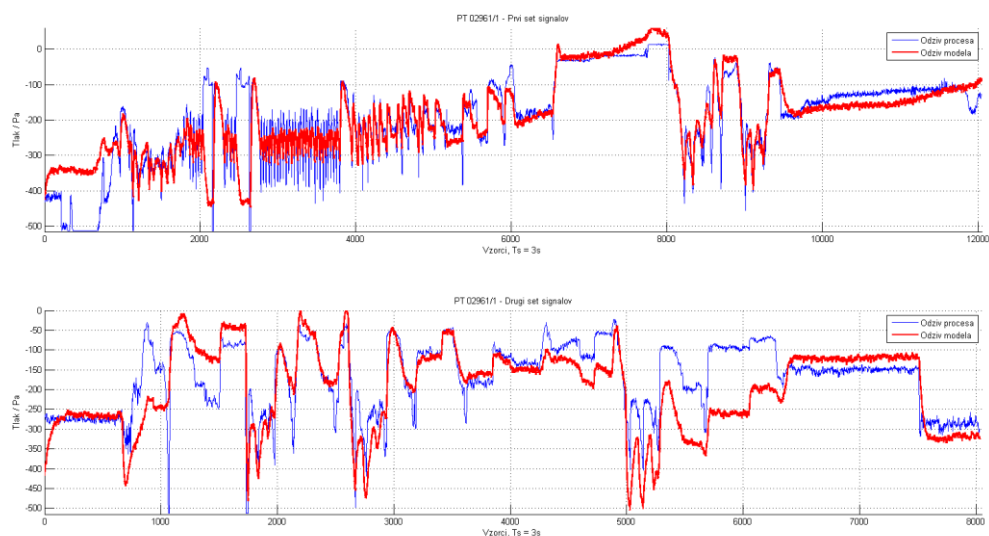
Slika 36: Pripadnostne funkcije mehkega modela PT 02961/1

Območja lokalnih modelov in stopnje izpolnitve pripadnostnih funkcij



Slika 37: Območja lokalnih modelov in DOF mehkega modela PT 02961/1

Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanimi motnjami in šumom



Slika 38: Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanim šumom - PT 02961/1

7.6.2 Model PT 02961/4

Parametri mehkih pravil

Pravila imajo naslednjo obliko:

Pravilo 1: if $y(k-1)$ is A11 and $y(k-2)$ is A12 and ... and $u_4(k-2)$ is A17 (6)

then $y(k) = 1,41 * y(k-1) - 0,45 * y(k-1) + \dots - 2,67 * u_4(k-2) + 35,91$

...

Pravilo 8: if $y(k-1)$ is A81 and $y(k-2)$ is A82 and ... and $u_4(k-2)$ is A87

then $y(k) = 1,21 * y(k-1) - 0,23 * y(k-1) + \dots + 0,41 * u_4(k-2) - 19,79$

Tabela 16: Parametri mehkih pravil modela PT 02961/4

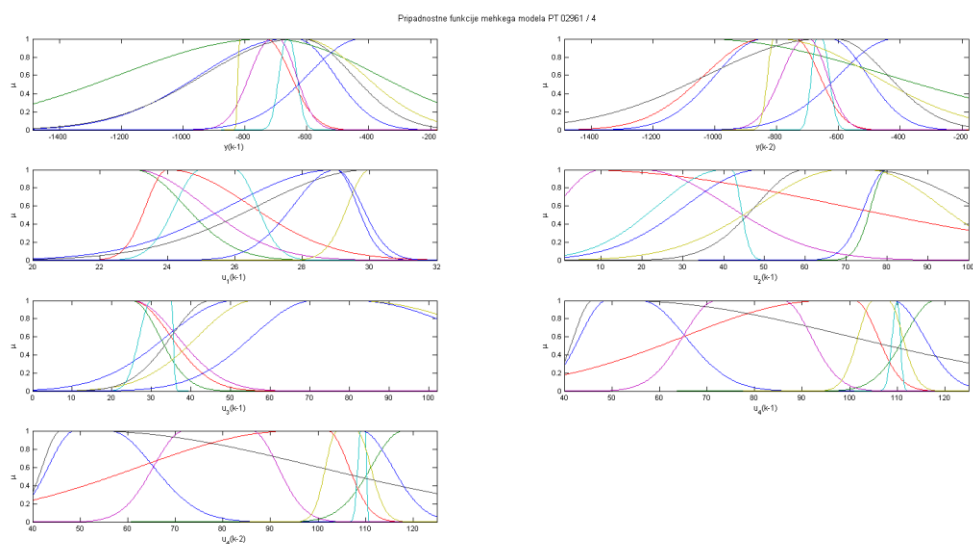
Pravilo	$y(k-1)$	$y(k-2)$	$u_1(k-1)$	$u_2(k-1)$	$u_3(k-1)$	$u_4(k-1)$	$u_4(k-2)$	Odmik
1	1,41	-0,45	-0,64	0,03	0,15	2,93	-2,67	-35,91
2	1,37	-0,43	-4,82	-0,04	1,34	3,98	-4,06	48,43
3	1,44	-0,48	-2,71	0,02	0,39	-0,68	0,78	14,23
4	1,27	-0,33	2,61	1,29	3,35	-6,12	4,41	-74,59
5	1,37	-0,42	-3,58	0,06	0,74	0,58	-0,32	5,16
6	1,36	-0,41	-2,88	0,09	0,36	3,08	-3,29	38,56
7	1,41	-0,43	-0,94	0,03	0,08	2,77	-2,72	1,74
8	1,21	-0,23	-0,26	0,06	0,07	-0,35	0,41	-19,79

Središča rojev

Tabela 17: Središča rojev in pripadnostnih funkcij mehkega modela PT 02961/4

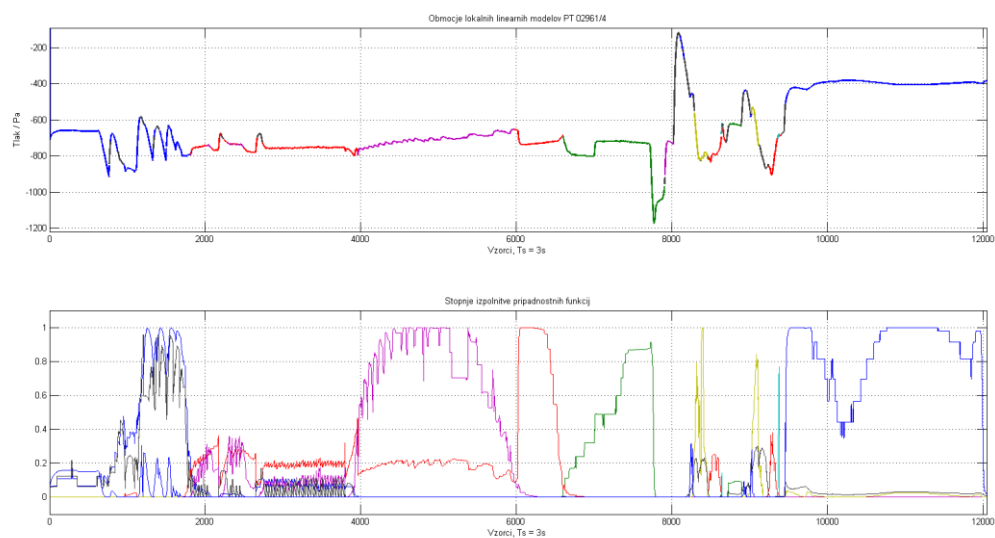
Pravilo	$y(k-1)$	$y(k-2)$	$u_1(k-1)$	$u_2(k-1)$	$u_3(k-1)$	$u_4(k-1)$	$u_4(k-2)$
1	-775,86	-777,03	26,81	60,32	48,65	61,40	61,06
2	-775,67	-775,90	23,34	100,00	29,42	107,76	107,75
3	-746,04	-748,42	24,91	24,19	30,90	91,08	91,08
4	-728,12	-728,44	24,49	17,31	27,67	98,56	98,33
5	-721,93	-721,20	23,90	21,26	29,48	75,22	75,20
6	-691,83	-691,42	29,84	70,05	73,38	107,75	108,01
7	-644,39	-642,68	28,00	72,56	74,93	82,97	82,97
8	-467,78	-467,77	29,00	99,74	101,34	97,50	97,49

Pripadnostne funkcije



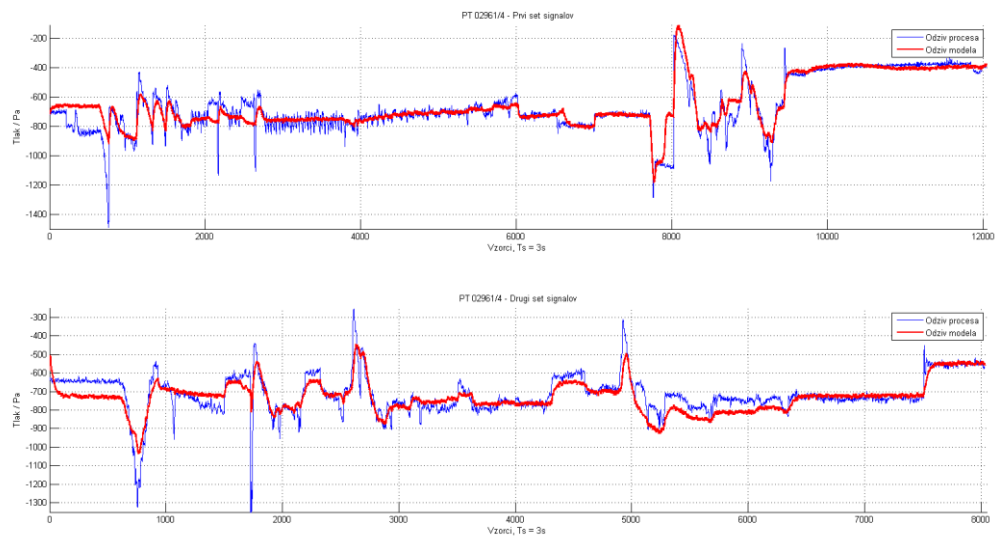
Slika 39: Pripadnostne funkcije mehkega modela PT 02961/4

Območja lokalnih modelov in stopnje izpolnitve pripadnostnih funkcij



Slika 40: Območja lokalnih modelov in DOF mehkega modela PT 02961/4

Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanimi motnjami in šumom



Slika 41: Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanim šumom - PT 02961/4

7.6.3 Model PT 02961/B

Parametri mehkih pravil

Pravila imajo naslednjo obliko:

Pravilo 1: if $y(k-1)$ is A11 and $y(k-2)$ is A12 and ... and $u_7(k-2)$ is A111 (7)
then $y(k) = 1,61 * y(k-1) - 0,93 * y(k-1) + \dots - 0,5 * u_7(k-2) + 10,81$

...

Pravilo 6: if $y(k-1)$ is A61 and $y(k-2)$ is A62 and ... and $u_7(k-2)$ is A611
then $y(k) = 1,55 * y(k-1) - 0,86 * y(k-1) + \dots + 2,13 * u_7(k-2) - 4117,21$

Tabela 18: Parametri mehkih pravil modela PT 02961/B

Pravilo	$y(k-1)$	$y(k-2)$	$y(k-3)$	$u_1(k-1)$	$u_2(k-1)$	$u_3(k-1)$	$u_4(k-1)$
1	1,61	- 0,93	0,28	- 1,82	0,04	0,26	- 0,24
2	1,57	- 0,86	0,24	- 2,33	0,09	0,31	- 0,24
3	1,58	- 0,91	0,18	0,39	0,17	- 0,57	- 0,18
4	1,79	- 1,14	0,29	- 2,69	0,04	0,41	0,03
5	1,59	- 0,88	0,19	- 1,49	0,16	0,33	0,21
6	1,55	- 0,86	0,10	13,43	0,45	0,02	- 1,49

Pravilo	$u_5(k-1)$	$u_6(k-1)$	$u_7(k-1)$	$u_7(k-2)$	Odmik
1	0,00	0,00	0,94	- 0,50	10,81
2	- 0,08	0,01	- 1,46	2,23	- 6,29
3	0,39	0,38	- 8,19	9,56	- 177,93
4	- 0,40	0,36	- 0,23	0,61	11,01
5	- 0,55	- 0,22	- 5,03	5,61	- 10,92
6	56,95	6,47	1,10	2,13	- 4117,21

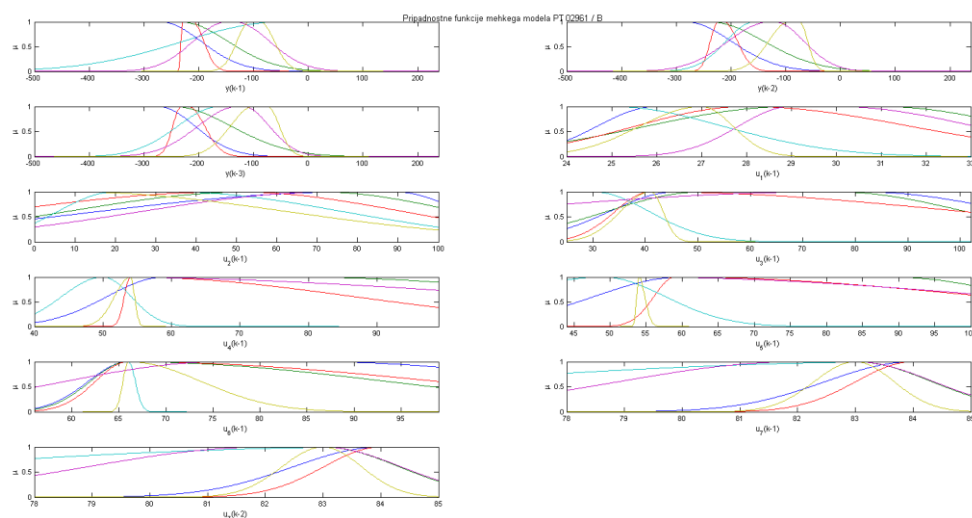
Središča rojev

Tabela 19: Središča rojev in pripadnostnih funkcij mehkega modela PT 02961/B

Pravilo	$y(k-1)$	$y(k-2)$	$y(k-3)$	$u_1(k-1)$	$u_2(k-1)$	$u_3(k-1)$
1	- 231,98	- 231,78	- 231,73	29,16	51,91	51,79
2	- 201,25	- 200,74	- 201,48	28,92	47,40	59,00
3	- 194,43	- 194,41	- 194,36	29,61	65,68	67,54
4	- 142,67	- 142,96	- 143,21	25,83	34,98	32,88
5	- 139,44	- 139,24	- 139,01	28,61	80,79	88,26
6	- 100,95	- 100,56	- 100,25	26,48	75,14	37,50

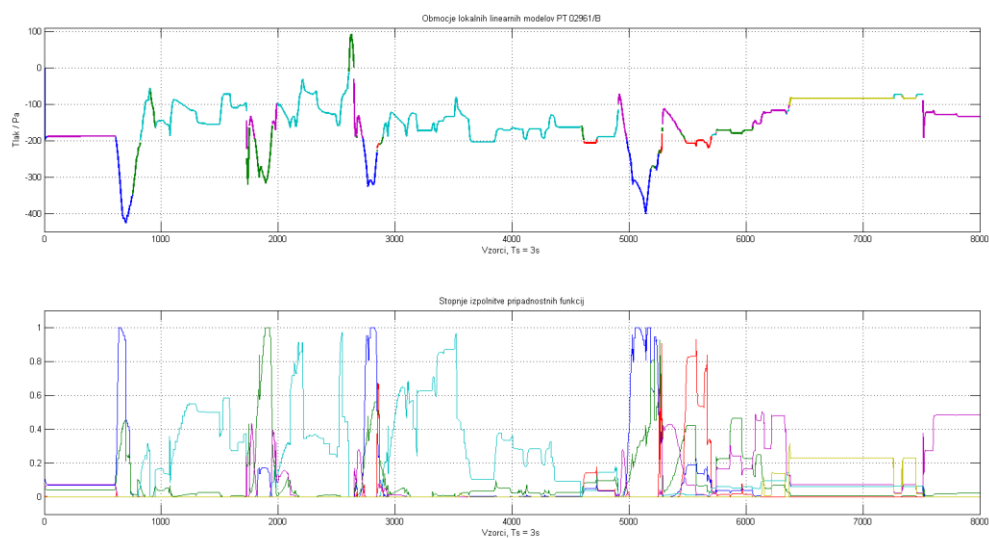
Pravilo	$u_4(k-1)$	$u_5(k-1)$	$u_6(k-1)$	$u_7(k-1)$	$u_7(k-2)$
1	67,60	70,46	68,76	83,69	83,69
2	65,52	68,76	72,91	82,81	82,87
3	76,58	78,41	81,48	83,69	83,69
4	51,76	53,58	64,45	81,79	81,79
5	90,07	91,28	91,61	82,81	82,81
6	53,82	54,27	65,96	82,81	82,81

Pripadnostne funkcije



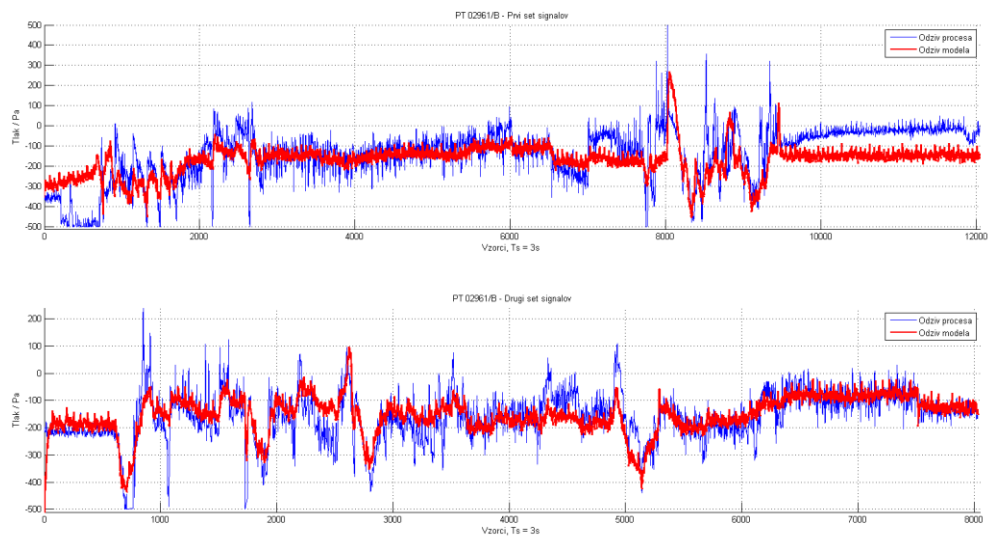
Slika 42: Pripadnostne funkcije mehkega modela PT 02961/B

Območja lokalnih modelov in stopnje izpolnitve pripadnostnih funkccij



Slika 43: Območja lokalnih modelov in DOF mehkega modela PT 02961/B

Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanimi motnjami in šumom



Slika 44: Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanim šumom - PT 02961/B

7.6.4 Model dP 02962/2

Parametri mehkih pravil

Pravila imajo naslednjo obliko:

Pravilo 1: if $y(k-1)$ is A11 and $y(k-2)$ is A12 and ... and $u_4(k-2)$ is A18 (8)
then $y(k) = 0,7 * y(k-1) + 0,1 * y(k-1) + ... + 0,05 * u_4(k-2) - 41,75$

...

Pravilo 10: if $y(k-1)$ is A101 and $y(k-2)$ is A102 and ... and $u_4(k-2)$ is A108
then $y(k) = 1,25 * y(k-1) - 0,4 * y(k-1) + ... - 2,85 * u_4(k-2) - 123,58$

Tabela 20: Parametri mehkih pravil modela dP 02962/2

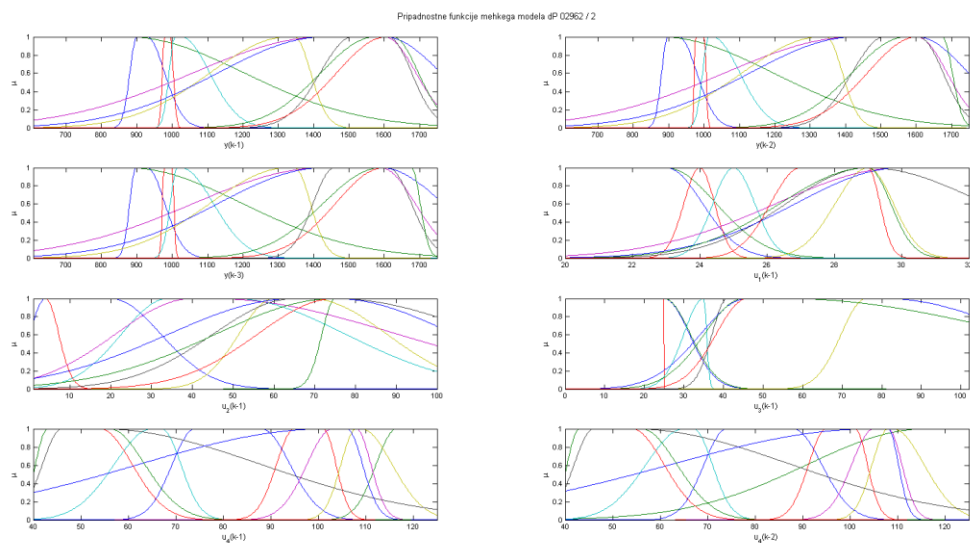
Pravilo	$y(k-1)$	$y(k-2)$	$y(k-3)$	$u_1(k-1)$	$u_2(k-1)$	$u_3(k-1)$	$u_4(k-1)$	$u_4(k-2)$	Odmik
1	0,70	0,10	0,18	2,75	-0,02	-0,05	0,02	0,05	-41,75
2	1,17	-0,36	0,07	9,82	-0,02	-0,24	-0,83	0,50	-72,84
3	0,52	0,06	0,19	0,00	-0,22	11,72	-0,55	-0,04	0,00
4	0,75	-0,02	0,13	33,18	-0,03	-0,22	1,41	-1,72	-657,50
5	1,13	-0,40	0,06	20,97	-0,03	-0,16	-2,90	2,22	-240,02
6	0,88	-0,11	-0,02	24,29	-0,19	-0,67	-2,06	1,26	-198,59
7	1,14	-0,41	0,08	19,64	0,01	-0,03	-6,47	5,70	-237,35
8	1,24	-0,43	0,08	11,89	-0,02	-0,01	-2,06	1,59	-151,75
9	1,24	-0,43	0,08	11,94	0,01	0,00	-6,33	5,76	-145,97
10	1,25	-0,40	0,06	10,04	0,01	0,00	-3,38	2,85	-123,58

Središča rojev

Tabela 21: Središča rojev in pripadnostnih funkcij mehkega modela dP 02962/2

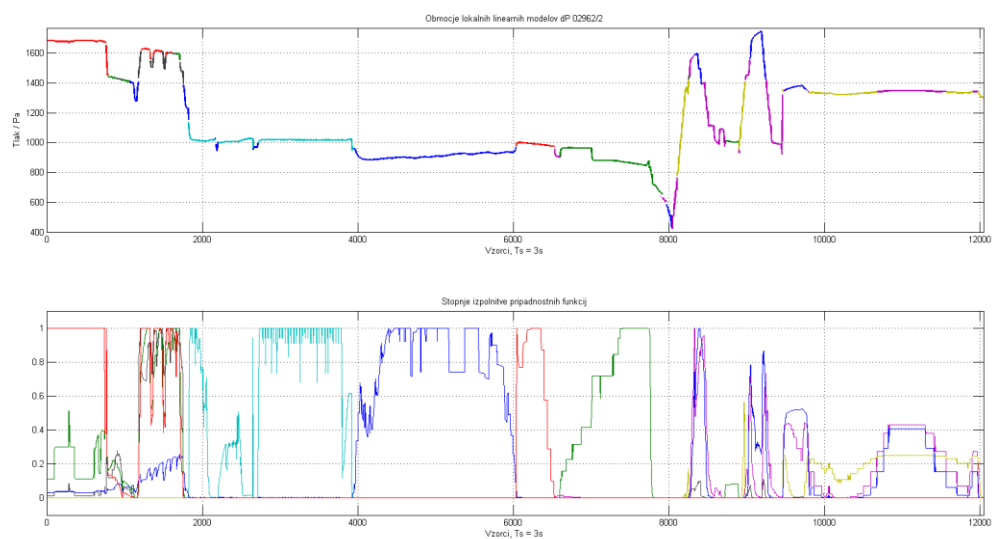
Pravilo	$y(k-1)$	$y(k-2)$	$y(k-3)$	$u_1(k-1)$	$u_2(k-1)$	$u_3(k-1)$	$u_4(k-1)$	$u_4(k-2)$
1	923,48	923,48	923,52	23,28	13,67	26,41	80,26	80,24
2	945,61	945,66	945,70	23,49	100,00	29,04	107,58	107,59
3	995,02	995,06	995,19	24,06	3,09	25,36	98,67	98,63
4	1023,19	1024,00	1024,55	25,03	42,61	34,66	67,52	67,52
5	1236,13	1236,13	1236,11	27,13	46,29	45,84	107,74	107,74
6	1325,74	1325,19	1324,78	28,82	98,59	102,00	110,15	110,15
7	1389,71	1412,09	1430,08	28,13	60,92	52,36	93,06	92,96
8	1401,03	1401,08	1401,15	28,65	59,10	52,20	101,19	101,12
9	1472,92	1473,93	1473,84	27,88	72,23	53,54	56,30	55,97
10	1579,21	1579,24	1579,27	28,38	86,24	77,03	46,56	46,56

Pripadnostne funkcije



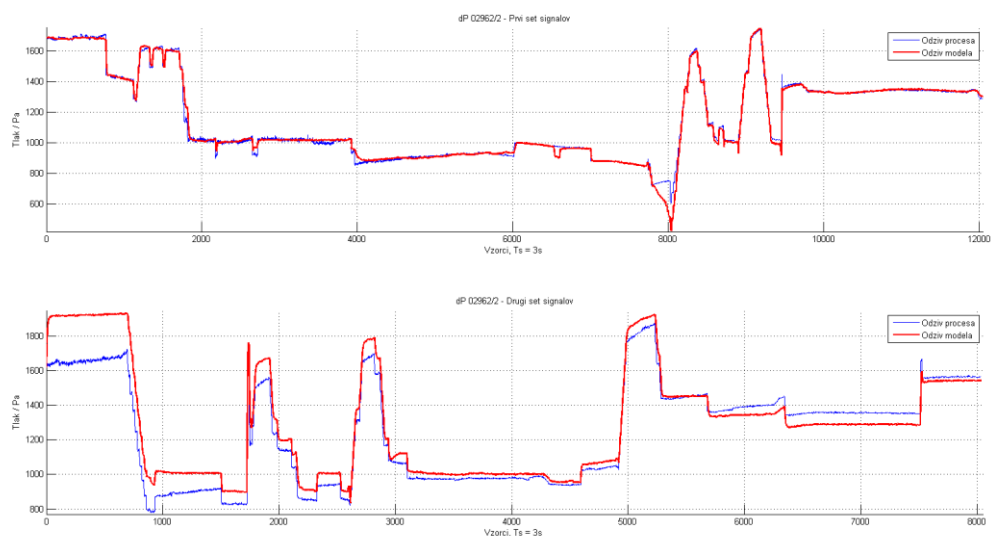
Slika 45: Pripadnostne funkcije mehkega modela dP 02962/2

Območja lokalnih modelov in stopnje izpolnitve pripadnostnih funkcij



Slika 46: Območja lokalnih modelov in DOF mehkega modela dP 02962/2

Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanimi motnjami in šumom



Slika 47: Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanim šumom - dP 02962/2

7.6.5 Model dP 02965/1

Parametri mehkih pravil

Pravila imajo naslednjo obliko:

Pravilo 1: if $y(k-1)$ is A11 and $y(k-2)$ is A12 and ... and $u_4 * (k-2)$ is A17 (9)
then $y(k) = 0,7 * y(k-1) + 0,22 * y(k-1) + ... + 0,02 * u_4(k-1) + 0,05$

...

Pravilo 6: if $y(k-1)$ is A61 and $y(k-2)$ is A62 and ... and $u_4 * (k-2)$ is A67
then $y(k) = 0,87 * y(k-1) + 0,06 * y(k-1) + ... + 0,07 * u_4 * (k-2) - 3,62$

Tabela 22: Parametri mehkih pravil modela dP 02965/1

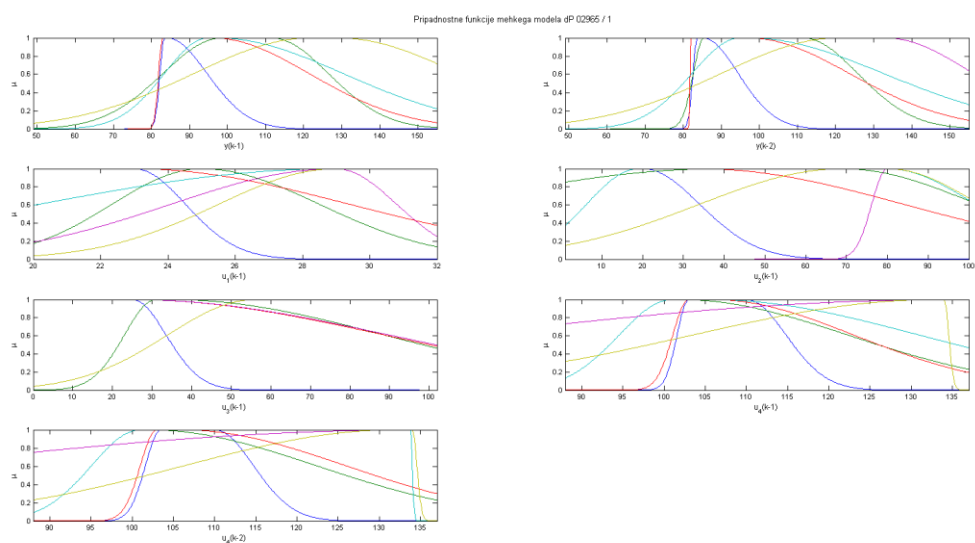
Pravilo	$y(k-1)$	$y(k-2)$	$u_1(k-1)$	$u_2(k-1)$	$u_3(k-1)$	$u_4(k-1)$	$u_4(k-2)$	Odmik
1	0,70	0,22	0,12	0,01	0,07	0,02	0,00	0,05
2	0,91	0,05	0,16	0,00	0,01	0,10	-0,10	-0,04
3	0,85	0,12	0,14	0,00	0,01	0,06	-0,07	-0,29
4	0,92	0,04	0,17	0,00	0,01	0,06	-0,07	-0,33
5	0,81	0,14	0,25	-0,02	0,02	0,08	-0,08	-0,60
6	0,87	0,06	0,41	0,00	0,02	-0,07	0,07	-3,62

Središča rojev

Tabela 23: Središča rojev in pripadnostnih funkcij mehkega modela dP 02965/1

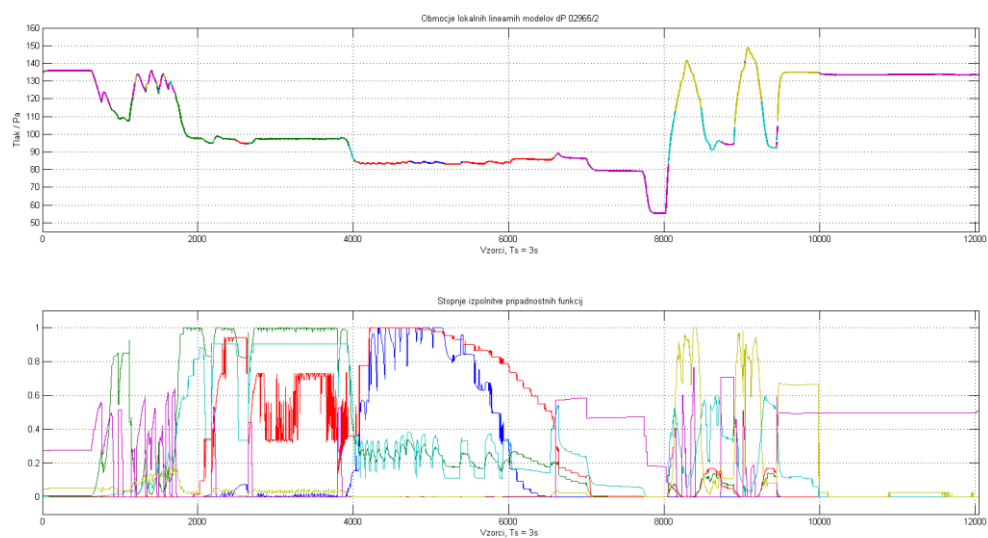
Pravilo	$y(k-1)$	$y(k-2)$	$u_1(k-1)$	$u_2(k-1)$	$u_3(k-1)$	$u_4(k-1)$	$u_4(k-2)$
1	90,64	90,63	23,97	23,58	29,51	106,81	106,81
2	99,05	99,07	25,19	34,82	39,36	109,27	109,27
3	99,14	99,15	25,37	33,71	38,51	110,70	110,63
4	106,21	106,22	26,19	46,22	49,56	110,32	110,28
5	113,76	113,75	26,92	100,00	74,66	125,76	125,76
6	115,28	115,25	27,32	58,30	61,81	113,85	113,81

Pripadnostne funkcije



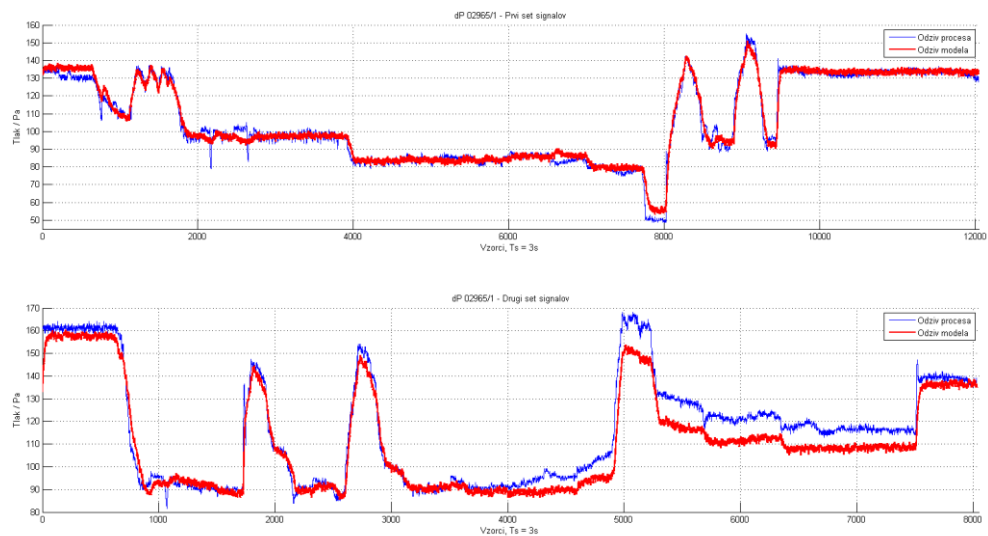
Slika 48: Pripadnostne funkcije mehkega modela dP 02965/1

Območja lokalnih modelov in stopnje izpolnitve pripadnostnih funkcij



Slika 49: Območja lokalnih modelov in DOF mehkega modela dP 02965/1

Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanimi motnjami in šumom



Slika 50: Primerjava odziva modela in realnega sistema z dodanim šumom - dP 02965/1

7.7 Primerjava sistema vodenja z regulatorji PI pri uporabi različnih kombinacij mrtvih con in filtriranja

Zaradi boljše preglednosti grafov je podan samo izsek sekvence vodenja.

S *PV e* je označen reguliran ter z *MV e* regulirni signal (vijolična) ob uporabi mrtve cone samo na pogrešku.

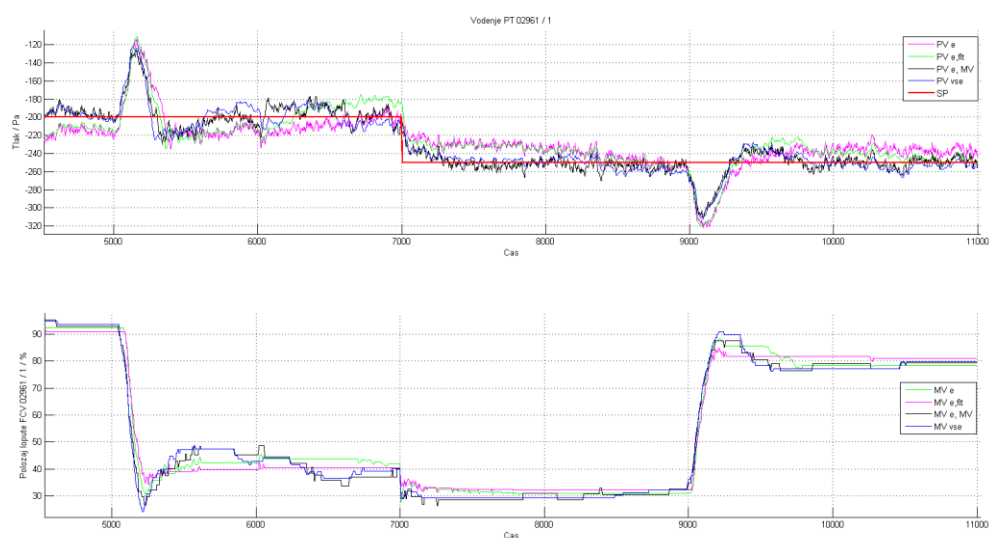
S *PV e, flt* je označen reguliran ter z *MV e, flt* regulirni signal (zelena) ob uporabi mrtve cone na pogrešku in filtriranjem reguliranega signala.

S *PV e, MV* je označen reguliran ter z *MV e, MV* regulirni signal (črna) ob uporabi mrtve cone na pogrešku in regulirnem signalu.

S *PV vse* je označen reguliran ter z *MV vse* regulirni signal (modra) ob uporabi mrtve cone na pogrešku in regulirnem signalu ter filtriranjem reguliranega signala.

V tabelah pod grafi so podane vrednosti mrtvih con in časovna konstanta uporabljenega filtra.

7.7.1 Vodenje PT 02961/1

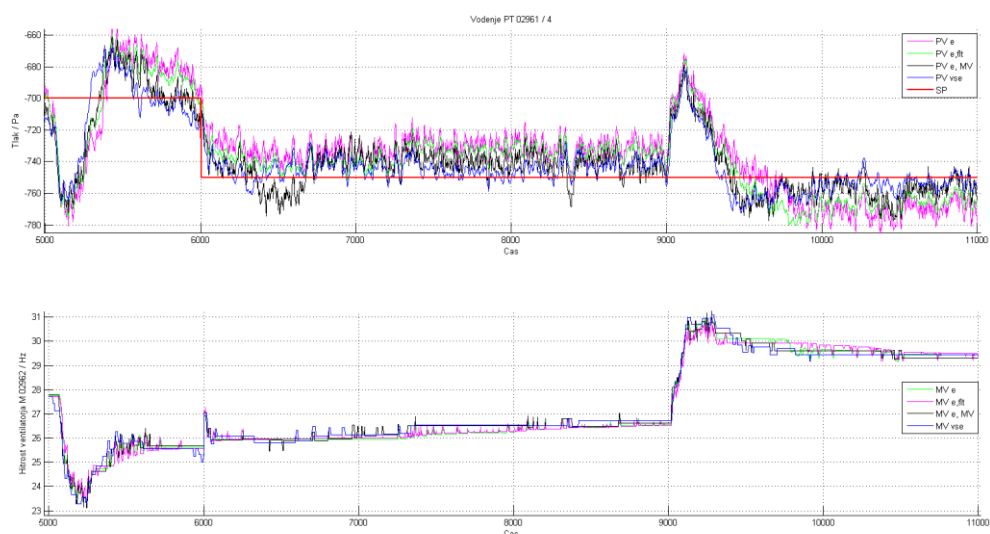


Slika 51: Primerjava različnih kombinacij mrtvih con in filtriranja – PT 02961/1

Tabela 24: Vrednosti mrtvih con in čas. konstante filtra pri različnih kombinacijah – PT 02961/1

Kombinacija	PV e	PV e, flt	PV e, MV	vse
Mrtva cona na pogrešku	25 Pa	20 Pa	10 Pa	10 Pa
Mrtva cona na regulirnem signalu	/	/	2 %	1 %
Čas. konst. filtra reguliranega sig.	/	6 s	/	10 s

7.7.2 Vodenje PT 02961/4

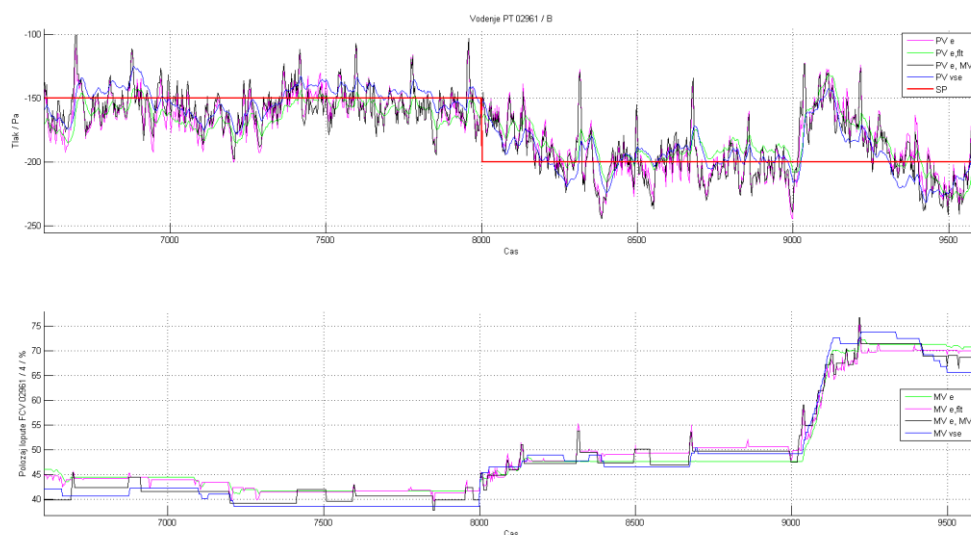


Slika 52: Primerjava različnih kombinacij mrtvih con in filtriranja – PT 02961/4

Tabela 25: Vrednosti mrtvih con in čas. konstante filtra pri različnih kombinacijah – PT 02961/4

Kombinacija	PV e	PV e, flt	PV e, MV	vse
Mrtva cona na pogrešku	25 Pa	20 Pa	15 Pa	10 Pa
Mrtva cona na regulirnem signalu	/	/	0,33 Hz	0,25 Hz
Čas. konst. filtra reguliranega sig.	/	6 s	/	6 s

7.7.3 Vodenje PT 02961/B

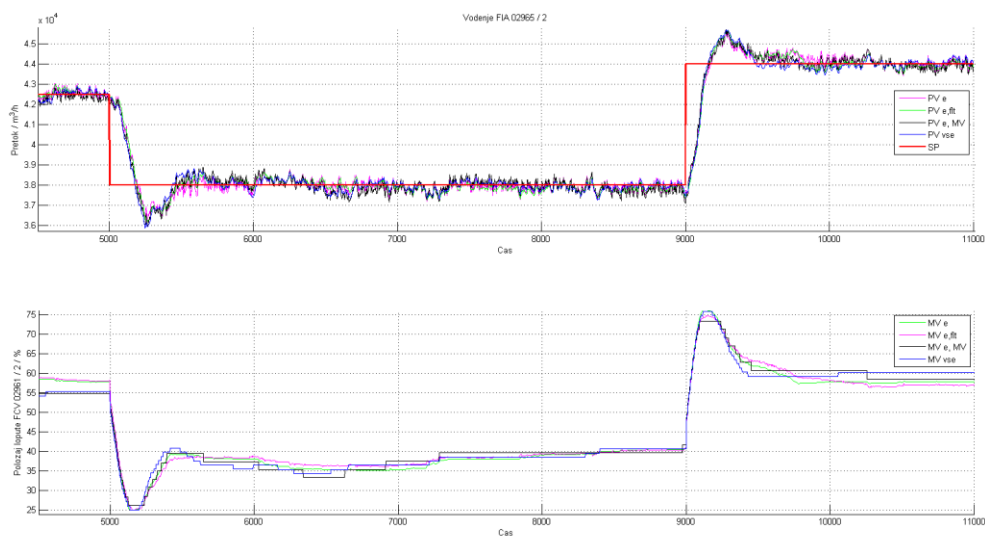


Slika 53: Primerjava različnih kombinacij mrtvih con in filtriranja – PT 02961/B

Tabela 26: : Vrednosti mrtvih con in čas. konstante filtra pri različnih kombinacijah – PT 02961/B

Kombinacija	PV e	PV e, flt	PV e, MV	vse
Mrtva cona na pogrešku	30 Pa	25 Pa	25 Pa	15 Pa
Mrtva cona na regulirnem signalu	/	/	2 %	1 %
Čas. konst. filtra reguliranega sig.	/	25 s	/	25 s

7.7.4 Vodenje FIA 02965/2



Slika 54: Primerjava različnih kombinacij mrtvih con in filtriranja – FIA 02965/2

Tabela 27: Vrednosti mrtvih con in čas. konstante filtra pri različnih kombinacijah – FIA 02965/2

Kombinacija	PV e	PV e, flt	PV e, MV	vse
Mrtva cona na pogrešku	250 m³/h	250 m³/h	250 m³/h	200 m³/h
Mrtva cona na regulirnem signalu	/	/	2 %	1 %
Čas. konst. filtra reguliranega sig.	/	6 s	/	6 s

8. Literatura in viri

- [1]. O avtomobilskem katalizatorju, Wikipedia, (9.10.2015):
http://sl.wikipedia.org/wiki/Avtomobilski_katalizator,
- [2]. Cutting vehicle pollution with auto catalysts and diesel particle filters, Johnson Matthey, 2011:
http://ect.jmcatalysts.com/cuttingpollution/files/jm_cuttingvehiclepollution.pdf,
- [3]. B.Pereda-Ayo, J R. González-Velasco: Diesel Engine – Combustion, Emissions and Condition Monitoring, <http://dx.doi.org/10.5772/55729> (18.12.2015),
- [4]. Spletna Stran podjetja Johnson Matthey Emission Control Technologies (18.12.2015):
<http://ect.jmcatalysts.com/Diesel-oxidation-catalyst-DOC-johnson-matthey>,
- [5]. Interna gradiva podjetja INEA d.o.o.,
- [6]. Spletna stran podjetja Yara UK Limited, (9.10.2015): <http://yara.co.uk/nox-reduction/nox-control-systems/nox-reduction-reagents/ammonia-solution-for-nox-control>,
- [7]. Spletna stran podjetja Hidrodonics Corporation, (9.10.2015): <http://hydronics-env.com/air-pollution-control-and-abatement>,
- [8]. S. Gluck, C. Glenn, T. Logan, B. Vu, M. Walsh, P. Williams: Evaluation of NO_x Flue Gas Analyzers for Accuracy and Their Applicability for Low-Concentration Measurements, *Journal of the Air & Waste Management Association*, februar 2012,
- [9]. Učno gradivo pri predmetu Inteligentni sistemi za podporo odločanju (9.10.2015):
<http://msc.fe.uni-lj.si/Download//skrjanc/ISO-2013.pdf>,
- [10]. Uvod v mehko logiko, Igor Škrjanc, Fakulteta za elektrotehniko UL,
- [11]. Fuzzy Systems, Modeling and Identification, Robert Babuška, Delft University of Technology,
- [12]. Fuzzy Identification Toolbox for MATLAB (ver. 4.0), (9.10.2015),
<http://www.dsc.tudelft.nl/~rbabuska>.

