

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Žiga Stržinar

Modeliranje in zaznavanje napak v klimatskih sistemih

Magistrsko delo

Mentor: doc. dr. Dejan Dovžan

Somentor: prof. dr. Igor Škrjanc

Ljubljana, 2017

Zahvala

Zahvala za vso pomoč in usmerjanje tekom magistrskega dela gre mentorju doc. dr. Dejanu Dovžanu ter somentorju prof. dr. Igorju Škrjancu. Brez njunega strokovnega znanja to delo ne bi bilo možno, njuni nasveti pa so rešili prenekatero zagato pri izvedbi modeliranja, simulacije in zaznavanja napak.

Zahvaljujem se tudi vsem sodelavcem iz Laboratorija za avtonomne mobilne sisteme in Laboratorija za modeliranje, simulacijo in vodenje, posebej pa Goranu Andonovskemu, saj so poskrbeli za prijetno delovno okolje in mi nudili številne koristne nasvete.

Za sprostitev ob študiju se zahvaljujem Andreju, Klemnu in Leji. Za vso podporo, nasvete in spodbudne besede tekom moje izobraževalne poti pa gre globoka zahvala moji družini.

Posebej pa se zahvaljujem Teji, ki me je vedno spodbujala ter mi stala ob strani.

Vsebina

1	Uvod	5
2	Modeliranje klimatskega sistema	7
2.1	Okolje Simscape	7
2.2	Razvoj modela	9
2.2.1	Osnovni domenski elementi	10
2.2.2	Model sobe	10
2.2.3	Gretje s toplotnim izmenjevalnikom	14
2.2.4	Električno gretje	19
2.2.5	Hlajenje	20
2.2.6	Rekuperacija	28
2.2.7	Vlažilec	29
2.2.8	Ostali elementi	31
2.2.9	Pomembne psihrometrične povezave	32
2.3	Nastavljanje parametrov modela	33
2.3.1	Predstavitev klimatskega sistema in merjenih signalov . . .	33
2.3.2	Odprtozančno nastavljanje parametrov	36
2.3.3	Dobljeni parametri	39

2.3.4	Rezultati	44
2.3.5	Primerjava v različnih načinih delovanja	50
2.3.6	Simulacijske nastavitve	53
2.3.7	Filtriranje in priprava signalov	54
2.3.8	Znane pomanjkljivosti modela	55
2.4	Zaprtozančno prileganje modela	55
2.4.1	Regulacija na klimatskem sistemu	55
2.4.2	Simulirano delovanje zaprte zanke	57
2.4.3	Znane pomanjkljivosti	75
2.5	Pohitritev delovanja	76
3	Zaznavanje napak	79
3.1	Knjižnica napak	79
3.1.1	Realizacija	81
3.1.2	Prikaz napak	82
3.2	Metoda glavnih komponent	86
3.2.1	Dinamična metoda glavnih komponent	87
3.2.2	Metriki za zaznavanje napak	88
3.3	Zaznavanje reda	89
3.3.1	Metoda z ugotavljanjem števila linearnih povezav	89
3.3.2	Metoda s spremljanjem lastnimi vrednostmi	90
3.4	Izvedba	91
3.4.1	Prikaz delovanja algoritma na testnem primeru	92
3.4.2	Učni in testni simulacijski teki za gradnjo in testiranje de- tektorjev	97

3.4.3	Modifikacije izvirnega algoritma	105
3.4.4	Iskanje najboljših nastavitev detektorjev	106
3.5	Dobljeni detektorji in rezultati	107
3.5.1	Znižana temperatura grelnega medija	107
3.5.2	Zaprt ventil vlažilca	112
3.5.3	Delno odprt ventil vlažilca	115
3.5.4	Zaprt ventil rekuperatorja	120
3.5.5	Odprt ventil rekuperatorja	126
3.5.6	Povišana temperatura grelnega medija	127
3.5.7	Zaprt ventil grelca	128
3.5.8	Odprt ventil grelca	133
3.5.9	Zaprt ventil hladilnika	136
3.5.10	Odprt ventil hladilnika	140
3.5.11	Znižana temperatura hladilnega medija	144
3.5.12	Povišana temperatura hladilnega medija	148
3.5.13	Zmanjšan pretok odvodnega zraka	152
3.5.14	Povečan pretok odvodnega zraka	153
3.5.15	Komentar rezultatov	154
3.6	Dodatna analiza razmerja med tlakom in vrtljaji ventilatorja . . .	155

Seznam slik

2.1	Vpliv parametrov M in k na izračun osnovne funkcije γ (pretok zraka je $7kg/s$).	18
2.2	Prikaz poteka faktorja $(1 - VPK e^{\dot{m}_{voda}})$	24
2.3	Prikaz poteka faktorja $(1 + (atan(Z(\dot{m}_{voda} - \dot{m}_+)) + atan(-Z(\dot{m}_{voda} - \dot{m}_-)))/(2d\pi))$	25
2.4	Vpliv dveh dodatnih členov na potek funkcije γ	26
2.5	Primer λ pri $p_1 = 1.1$, $p_0 = 8$	27
2.6	Prikaz razmer v hladilnem delu rekuperatorja – relativna vlažnost povratnega zraka nikoli ne doseže visokih vrednosti, kar bi nakazovalo na kondenzacijo na hladilnem delu rekuperatorja.	29
2.7	Shematski prikaz realnega klimatskega sistema.	34
2.8	Shematski prikaz regulacijskega algoritma klimatskega sistema. . .	36
2.9	Veljavnost setov parametrov pri različnih zunanjih temperaturah. .	38
2.10	Oblika funkcije γ pri poletnih in zimskih parametrih grelca.	40
2.11	Oblika funkcije γ za hladilnik.	41
2.12	Oblika funkcije γ za grelec v rekuperatorju pri poletnih in zimskih parametrih.	43
2.13	Oblika funkcije γ za hladilnik v rekuperatorju.	43
2.14	Primerjava temperature v juniju.	44

2.15	Primerjava vlažnosti v juniju.	44
2.16	Primerjava temperature v juliju.	45
2.17	Primerjava vlažnosti v juliju	45
2.18	Primerjava temperature v avgustu.	46
2.19	Primerjava vlažnosti v avgust.	46
2.20	Primerjava temperature v septembru.	47
2.21	Primerjava vlažnosti v septembru.	47
2.22	Primerjava temperature v oktobru.	47
2.23	Primerjava vlažnosti v oktobru.	48
2.24	Primerjava temperature v novembru.	48
2.25	Primerjava vlažnosti v novembru.	48
2.26	Primerjava temperature v decembru.	49
2.27	Primerjava vlažnosti v decembru.	49
2.28	Primerjava hlajenja med meritvami in modelom.	51
2.29	Primerjava rekuperacije med meritvami in modelom.	51
2.30	Primerjava gretja med meritvami in modelom.	52
2.31	Nastavitve Simscape solverja.	53
2.32	Nastavitve Simulink solverja.	54
2.33	Nastavitve optimizacije v Simulink shemi.	54
2.34	Zaslonska slika, ki prikazuje okvirno zasnovo vodenja na realnem sistemu.	56
2.35	Regulacija temperature – junij.	59
2.36	Regulacija temperature – oscilatorno delovanje 18. junij.	60
2.37	Regulacija vlage – junij.	61

2.38	Regulacija vlage – 25.–28. junij.	61
2.39	Regulacija vlage – 25.–28. junij – podroben pogled v delovanje regulatorjev.	62
2.40	Regulacija temperature – julij.	63
2.41	Regulacija temperature – primer oscilacij v juliju.	64
2.42	Regulacija vlage – julij.	65
2.43	Regulacija vlage – stanjšanje referenčnega pasu.	65
2.44	Regulacija temperature – avgust.	66
2.45	Regulacija temperature – primer oscilacij v avgustu.	67
2.46	Regulacija vlage – avgust.	67
2.47	Regulacija temperature – september.	68
2.48	Regulacija vlage - september.	69
2.49	Septembra se na realnem sistemu ni vklopil vlažilec.	69
2.50	Regulacija temperature – oktober.	70
2.51	Regulacija temperature – november.	71
2.52	Regulacija vlage – oktober.	72
2.53	Regulacija vlage – november.	72
2.54	Regulacija temperature – december.	73
2.55	Regulacija vlage – december.	74
2.56	Pohitritev v odprti zanki.	77
2.57	Pohitritev v zaprti zanki.	78
3.1	Simulacijska shema z dodanimi napakami.	80
3.2	Realizacija napak.	81
3.3	Primer prikaza napake (izpad komunikacije) ventila grelca.	82

3.4	Primer prikaza napake (ročni način, vrednost: 0 %) ventila rekuperatorja.	84
3.5	Primer prikaza napake (ročni način, vrednost: 0 %) ventila grelca.	85
3.6	Prikaz delovanja vzorčnega linearnega sistema z napako in brez napake.	93
3.7	Zaznavanje reda na učnih podatkih brez napake.	94
3.8	Zaznavanje reda na učnih podatkih s prisotno napako.	94
3.9	Testna simulacija, napaka se pojavi pri $t = 100s$	95
3.10	Q-mera pri zaznavanju napake na testnem primeru.	96
3.11	Q-mera pri zaznavanju napake na testnem sistemu – detajl.	96
3.12	Prikaz delovanja detektorja znižane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.	109
3.13	Prikaz delovanja detektorja znižane temperature grelnega medija na enostavnem testnem vzorcu.	110
3.14	Prikaz delovanja detektorja znižane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu.	110
3.15	Prikaz delovanja detektorja znižane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje zaprtega ventila grelca – nepravilno zaznana napaka.	111
3.16	Prikaz delovanja detektorja znižane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje zaprtega ventila rekuperatorja.	111
3.17	Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila vlažilca na enostavnem testnem vzorcu.	112

3.18 Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu.	113
3.19 Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo. . . .	113
3.20 Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu.	116
3.21 Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na enostavnem testnem vzorcu.	116
3.22 Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.	117
3.23 Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu – obdobje zaprtega ventila rekuperatorja.	117
3.24 Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu – obdobje odprtega ventila hladilnika – nepravilno zaznana napaka.	119
3.25 Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila rekuperatorja na enostavnem testnem vzorcu.	122
3.26 Detajl s slike 3.25.	122
3.27 Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu.	123
3.28 Detajl s slike 3.27.	123
3.29 Prikaz delovanja detektorja delno zaprtega ventila rekuperatorja na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.	124

3.30	Prikaz delovanja detektorja delno zaprtega ventila rekuperatorja na mešanem testnem vzorcu – obdobje zaprtega ventila grelca – nepravilno zaznana napaka.	124
3.31	Prikaz delovanja detektorja delno zaprtega ventila rekuperatorja na mešanem testnem vzorcu – obdobje odprtega ventila hladilnika – nepravilno zaznana napaka.	125
3.32	Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila grelca na enostavnem testnem vzorcu.	129
3.33	Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu.	129
3.34	Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo. . . .	130
3.35	Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu – obdobje znižane temperature grelnega medija – nepravilno zaznana napaka.	130
3.36	Prikaz delovanja detektorja odprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo. . . .	135
3.37	Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila hladilnika na enostavnem testnem vzorcu.	137
3.38	Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu.	137
3.39	Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.	138
3.40	Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu – obdobje povišane temperature hladilnega medija – nepravilno zaznana napaka.	138

3.41 Prikaz delovanja detektorja odprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.	141
3.42 Prikaz delovanja detektorja odprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu.	141
3.43 Prikaz delovanja detektorja odprtega ventila hladilnika na enostavnem testnem vzorcu.	143
3.44 Prikaz delovanja detektorja znižane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu.	145
3.45 Prikaz delovanja detektorja znižane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.	145
3.46 Prikaz delovanja detektorja znižane temperature hladilnega medija na enostavnem testnem vzorcu.	146
3.47 Prikaz delovanja detektorja znižane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu – slabo delovanje na koncu simulacijskega intervala.	146
3.48 Prikaz delovanja detektorja povišane temperature hladilnega medija na enostavnem testnem vzorcu.	150
3.49 Prikaz delovanja detektorja povišane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu.	150
3.50 Prikaz delovanja detektorja povišane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.	151
3.51 Prikaz delovanja detektorja povišane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje zaprtega ventila hladilnika – nepravilno zaznana napaka.	151

3.52 Slika procesa.	156
3.53 Normirani dovodni meritvi.	157
3.54 Normirani odvodni meritvi.	157
3.55 Dovodni meritvi, normirani na vsak interval posebej.	159
3.56 Normirani vzorci v prostoru meritev (dovod zraka).	160
3.57 Normirani vzorci v prostoru glavnih komponent (dovod zraka). . .	160
3.58 Normirani vzorci v prostoru meritev (odvod zraka).	161
3.59 Normirani vzorci v prostoru glavnih komponent (odvod zraka). . .	161

Seznam tabel

1	Veličine in simboli.	xxiv
2.1	Specifikacije naprave, ki so potrebne za uspešno modeliranje hladilnika po [1].	21
2.2	Tabela signalov – 1. del.	35
2.3	Tabela signalov – 2. del.	36
2.4	Sistemiški parametri.	39
2.5	Parametri grelca.	39
2.6	Parametri hladilnika.	40
2.7	Parametri rekuperatorja.	42
2.8	Parametri vlažilca.	42
2.9	Parametri ventilatorjev.	43
3.1	Tabela uspešnosti detektorja na testnem linearnem sistemu.	97
3.2	Tabela učnih podatkov – 1. del.	98
3.3	Tabela učnih podatkov – 2. del.	99
3.4	Tabela testnih podatkov – 1. del.	100
3.5	Tabela testnih podatkov – 2. del.	101
3.6	Tabela testnih podatkov – 3. del.	102
3.7	Tabela testnih podatkov – 4. del.	103

3.8	Mešan testni set (oznaka: testni mesano).	104
3.9	Nastavitve detektorja znižane temperature grelnega medija za mešan testni set.	108
3.10	Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature grelnega medija na učnem vzorcu brez napake.	108
3.11	Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature grelnega medija na učnem vzorcu s prisotno napako.	108
3.12	Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature grelnega medija na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).	109
3.13	Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	109
3.14	Nastavitve detektorja zaprtega ventila vlažilca za mešan testni set.	114
3.15	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila vlažilca na učnem vzorcu brez napake.	114
3.16	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila vlažilca na učnem vzorcu s prisotno napako.	114
3.17	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila vlažilca na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).	115
3.18	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	115
3.19	Nastavitve detektorja delno odprtega ventila vlažilca za mešan testni set.	118
3.20	Tabela uspešnosti detektorja delno odprtega ventila vlažilca na učnem vzorcu brez napake.	118
3.21	Tabela uspešnosti detektorja delno odprtega ventila vlažilca na učnem vzorcu s prisotno napako.	118

3.22	Tabela uspešnosti detektorja delno odprtega ventila vlažilca na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).	119
3.23	Tabela uspešnosti detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	119
3.24	Nastavitve detektorja zaprtega ventila rekuperatorja za mešan testni set.	120
3.25	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila rekuperatorja na učnem vzorcu brez napake.	121
3.26	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila rekuperatorja na učnem vzorcu s prisotno napako.	121
3.27	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila rekuperatorja na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).	121
3.28	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila rekuperatorja na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	121
3.29	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila rekuperatorja na učnem vzorcu brez napake.	126
3.30	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila rekuperatorja na učnem vzorcu s prisotno napako.	126
3.31	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila rekuperatorja na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).	127
3.32	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila rekuperatorja na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	127
3.33	Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature grelnega medija na učnem vzorcu brez napake.	127
3.34	Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature grelnega medija na učnem vzorcu s prisotno napako.	128

3.35	Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature grelnega medija na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).	128
3.36	Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	128
3.37	Nastavitve detektorja zaprtega ventila grelca za mešan testni set.	131
3.38	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila grelca na učnem vzorcu brez napake.	131
3.39	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila grelca na učnem vzorcu s prisotno napako.	131
3.40	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila grelca na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.5).	132
3.41	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	132
3.42	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila grelca na učnem vzorcu brez napake.	133
3.43	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila grelca na učnem vzorcu s prisotno napako.	134
3.44	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila grelca na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).	134
3.45	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	134
3.46	Nastavitve detektorja zaprtega ventila hladilnika za mešan testni set.	136
3.47	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila hladilnika na učnem vzorcu brez napake.	139
3.48	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila hladilnika na učnem vzorcu s prisotno napako.	139

3.49	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila hladilnika na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.5).	139
3.50	Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	139
3.51	Nastavitve detektorja odprtega ventila hladilnika za mešan testni set.	140
3.52	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila hladilnika na učnem vzorcu brez napake.	142
3.53	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila hladilnika na učnem vzorcu s prisotno napako.	142
3.54	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila hladilnika na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.5).	142
3.55	Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	142
3.56	Nastavitve detektorja znižane temperature hladilnega medija za mešan testni set.	144
3.57	Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature hladilnega medija na učnem vzorcu brez napake.	147
3.58	Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature hladilnega medija na učnem vzorcu s prisotno napako.	147
3.59	Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature hladilnega medija na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.5).	147
3.60	Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	147
3.61	Nastavitve detektorja povišane temperature hladilnega medija za mešan testni set.	148

3.62	Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature hladilnega medija na učnem vzorcu brez napake.	149
3.63	Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature hladilnega medija na učnem vzorcu s prisotno napako.	149
3.64	Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature hladilnega medija na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.5).	149
3.65	Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	149
3.66	Tabela uspešnosti detektorja zmanjšane pretoka odvodnega zraka na učnem vzorcu brez napake.	152
3.67	Tabela uspešnosti detektorja zmanjšane pretoka odvodnega zraka na učnem vzorcu s prisotno napako.	152
3.68	Tabela uspešnosti detektorja zmanjšane pretoka odvodnega zraka na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).	152
3.69	Tabela uspešnosti detektorja zmanjšane pretoka odvodnega zraka na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	153
3.70	Tabela uspešnosti detektorja povečanega pretoka odvodnega zraka na učnem vzorcu brez napake.	153
3.71	Tabela uspešnosti detektorja povečanega pretoka odvodnega zraka na učnem vzorcu s prisotno napako.	153
3.72	Tabela uspešnosti detektorja povečanega pretoka odvodnega zraka na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).	154
3.73	Tabela uspešnosti detektorja povečanega pretoka odvodnega zraka na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).	154
3.74	Detektorji in njihove napačno zaznane napake.	155

Seznam uporabljenih simbolov

V magistrskem delu so uporabljene naslednje veličine in simboli:

Vektorji in matrike so zapisani s poudarjeno pisavo.

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
toplotna energija	Q	joul	J
energijski tok	q	vat	W
masa	m	kilogram	kg
specifična toplota	c	-	$\frac{J}{kgK}$
masni pretok	$\dot{m}$	-	$\frac{kg}{s}$
temperatura	T	kelvin	K
volumen	V	kubični meter	m^3
gostota	ρ	-	$\frac{kg}{m^3}$
specifična vlažnost	H	-	$\frac{kg}{kg}$
moč	P	vat	W
število oseb v prostoru	n	-	-
faktor toplotnih izgub v okolico	F	-	$\frac{W}{K}$
frekvenca	f	Hertz	Hz
toplotna kapaciteta	C	-	$\frac{J}{K}$
površina	A	-	m^2
toplotna prevodnost	U	-	$\frac{J}{m^2K}$
koeficient toplotnega potenciala	C	-	$\frac{W}{K}$
tlak	p	bar	bar
dolžina	L	meter	m
hitrost	v	-	$\frac{m}{s}$
preseki	d	meter	m

Tabela 1: Veličine in simboli.

Povzetek

V delu je predstavljeno modeliranje ter zaznavanje napak v klimatskem sistemu.

Predstavljenih je več modelov pomembnejših elementov klimatskih sistemov: grelca, hladilnika, rekuperatorja, vlažilca, sobe, ventilatorjev. Modeli so uporabljeni za gradnjo skupnega modela klimatskega sistema, ki posnema realen sistem. Najdeni so parametri modela, doseženo je zadovoljivo ujemanje med zgrajenim modelom in realnim sistemom.

Generirani so učni simulacijski teki, ki ponazarjajo delovanje sistema ob pojavih štirinajstih različnih napak. Učni teki so uporabljeni za učenje detektorjev napak. Detektorji napak delujejo na osnovi dinamične metode glavnih komponent. Prikazano je delovanje detektorjev na tesnih simulacijskih setih. Predstavljen način zaznavanja napak za večino predvidenih napak deluje z zadovoljivo uspešnostjo.

Ključne besede: modeliranje, klimatski sistem, Simscape, zaznavanje napak, prepoznavanje napak, metoda glavnih komponent, zaznavanje reda

Abstract

This work presents modelling and fault detection in heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems.

Several models of the most important elements are presented. The modelled elements include: a heating element (heat exchanger), a cooling element, a recuperator, a humidifier, a room and fans. The models are used to construct an unified HVAC system model able to match the behaviour of a real system. Model parameters are determined and a sufficient fit between the model and the real device is achieved.

Several train simulation runs are generated representing system behaviour with fourteen different faults. These simulations are used to train fault detectors. Fault detection is based on dynamic principle component analysis (DPCA). Detectors are tested on test simulation runs and the results are presented. The achieved fault detection rates are satisfactory.

Key words: modelling, HVAC, Simscape, fault detection, fault classification, PCA, order detection

1 Uvod

S prehodom na industrijo 4.0 [2] in vse večjo vključenostjo industrijskih naprav v svetovni splet – internet stvari (ang. *internet of things*, IoT), se v industriji ponuja priložnost merjenja in shranjevanja velikega števila procesnih vrednosti. Na voljo so velike količine podatkov (ang. *big data*), ki jih je potrebno analizirati ter končnemu uporabniku predstaviti le bistvene vidike, tiste, ki najbolj opisujejo trenutno stanje v procesu.

Klimatski sistemi ali sistemi za pripravo zraka so pogosti tako v industrijskih obratih kot v drugih objektih. Sestojijo iz več samostojnih elementov. Tipični elementi so ventilator, grelec, hladilnik, rekuperator ter vlažilec zraka. Elemente vodi algoritem vodenja, katerega namen je priprava zraka z želenimi lastnostmi (temperatura, vlažnost, včasih tudi vsebnosti CO_2 ali drugih plinov/delcev).

V industrijskih procesih, tudi klimatskih, uspešno delovanje temelji na dobrem delovanju vseh podsistemov. V reguliranih procesih obravnava regulacijski algoritem izpad ali slabše delovanje enega od sestavnih delov kot motnjo. Nekatere napake v delovanju lahko regulacijski algoritem izniči. S tem se običajno močno spremenijo regulacijski signali, lahko se poslabša kakovost regulacije, a na prvi pogled, brez vpogleda v notranja stanja regulacijskega algoritma, napaka ni očitna. To je problematično, saj se napake ne odstrani, proces pa se permanentno nahaja izven optimalnih razmer, za katere je bil skonstruiran. To lahko povzroči delovanje v nasičenju, previsoko obrabo aktuatorjev, preveliko uporabo energije itd.

Namen zaznavanja in razpoznavanja napak je, na podlagi notranjih stanj regu-

lacijskega algoritma in merjenih signalov, zaznati prisotnost napake. To omogoči odpravo napake ter s tem zmanjšanje vseh zgoraj naštetih negativnih vplivov.

V delu je za zaznavanje napak uporabljen pristop, ki temelji na metodi glavnih komponent (ang. *principle component analysis*). Gre za pristop, po katerem se v koraku učenja detektorju poda dva seta podatkov: set meritev, ki podaja tipično delovanje brez napak, ter set meritev sistema za obdobje, ko je prisotna napaka, ki jo želimo zaznavati. V obratovanju se detektorju pošiljajo trenutne meritve s sistema ter preverja, kateremu načinu delovanja meritve ustrezajo. Za vsak vzorec (vektor meritev) se izračuna mera odstopanja od obeh načinov delovanja (z in brez napake). Vzorec se razvrsti v tisti 'razred' (način delovanja), kjer je mera manjša.

V tem magistrskem delu je v poglavju 2 opisano modeliranje klimatskega sistema. Najprej je predstavljeno okolje Simscape (poglavje 2.1), ki je uporabljeno za gradnjo in simulacijo modela. Sledi daljše poglavje s predstavitevijo matematičnih modelov posameznih elementov klimatskega sistema (poglavje 2.2). Za večino elementov je podanih več možnih modelov, podane so njihove prednosti in slabosti. Predstavljeni modeli so uporabljeni za gradnjo skupnega modela. Ta model vsebuje veliko število parametrov, katerih nastavljanje je opisano v poglavju 2.3. V poglavju 2.3.4 je predstavljena primerjava odzivov realnega sistema in modela. V poglavju 2.4 je predstavljen regulacijski algoritem na realnem sistemu.

Poglavje 3 je posvečeno detekciji napak. Predstavljena je metoda glavnih komponent (poglavje 3.2) ter njena razširitev – dinamična metoda glavnih komponent. Slednja potrebuje detekcijo reda, ki je prikazana v poglavju 3.3. Učne simulacijske teke za učenje detektorjev napak ter testne sete za ovrednotenje delovanja detektorjev podaja poglavje 3.4. V poglavju 3.5 sledijo končni rezultati detekcije.

2 Modeliranje klimatskega sistema

Klimatski sistemi za pripravo zraka (angleško *HVAC – Heating Ventilation and Air Conditioning*) so pogosti v industrijskih objektih. Za napredno vodenje kompleksnega klimatskega sistema ali za detekcijo napak v delovanju takega sistema so potrebni dobri modeli posameznih elementov ter sistema kot celote. Tipični elementi sistema za pripravo zraka so ventilatorji, cevi, ventili, grelni in hladilni elementi ter mešalniki zraka. V nadaljevanju je predstavljenih več matematičnih modelov posameznih elementov. Za nekatere osnovne elemente je podanih več modelov, opisane so razlike med njimi ter njihove pomanjkljivosti.

Model klimatskega sistema je bil realiziran v programskem okolju Matlab. Slednje ponuja več možnosti, kako matematični model pretvoriti v obliko, primerno za simulacijo. Prva možnost je realizacija s `.m` skriptno datoteko, druga možnost realizacije modela je uporaba dodatka Simulink, ki omogoča izgradnjo sheme procesa ter neposredno simulacijo, še zadnji način pa je okolje Simscape, ki je uporabljeno v magistrskem delu.

2.1 Okolje Simscape

Simscape je orodje za večdomensko, objektno orientirano, nekavzalno modeliranje. Zgrajene modele je možno vključiti v Simulink sheme ter izvajati mešane simulacije. Simscape paket vsebuje večdomensko Simulink knjižnico, ki vključuje elemente z različnih tehničnih področij. Okolje omogoča nekavzalno objektno orientirano modeliranje, kar pomeni, da se pri modeliranju zapisujejo zakoni,

po katerih naj se objekt ravna (denimo fizikalne zakone), ne ukvarjamo pa se s kavzalnostjo, kot pri klasičnem programiranju, kjer je kavzalnost vgrajena v operacijo prirejanja vrednosti. Simscape omogoča enačenje dveh delov enačbe, ne le enosmernega prirejanja rezultata desne strani levi strani, kot je to v kavzalnih okoljih. Tipičen primer iz elektrotehnike je modeliranje upora, kjer ne moremo trditi, da napetost povzroči tok ali obratno, da tok povzroči padec napetosti. Edini pravilen opis njunega razmerja je povezava z Ohmovim zakonom. Neka-vzalen model torej upošteva Ohmov zakon ter v času simulacije skrbi za fizikalno pravilne razmere v širšem modelu.

V Simscape knjižnici je vnaprej definiranih več 'domen' – področij uporabe (elektrika, mehanika, hidravlika). Za vsako od teh so definirana osnovna fizikalna ozadja (Kirchhoffovi zakoni za področje elektrotehnike, Newtonovi zakoni za mehaniko itd.). Vsaka od domen vključuje tudi elemente, ki jih lahko uporabimo za gradnjo modelov. Simscape omogoča gradnjo večdomenskih modelov (npr. električno vozilo vsebuje tako električne kot mehanske elemente). Okrog Simscape modela je možno zgraditi veljavno Simulink shemo in ju povezati.

Simscape omogoča gradnjo lastnih domen in elementov. Prvi korak ustvarjanja lastne Simscape knjižnice elementov je lastna Simscape domena. V naši domeni so zbrane domenske spremenljivke: temperatura, vlažnost, tlak in pretok. Temperatura, vlažnost in tlak so t. i. potencialne (v Simscape literaturi označene kot *across*) spremenljivke, to pomeni, da se na vsakem elementu posebej definira njihova sprememba, v elektrotehniki bi bila to napetost. Značilnost teh spremenljivk je, da je njihova vsota sprememb po zaprti zanki enaka 0. Spremenljivka pretok je pretočna spremenljivka (v literaturi *through*), kar pomeni, da 'teče' skozi vsako komponento – kot električni tok, v vsakem vozlišču pa je njihova vsota 0.

Simscape domena poleg spremenljivk definira tudi domenske parametre. Uporabnost domenskih parametrov je, da se jim vrednosti nastavljajo na različnih mestih v modelu in do njihovih trenutnih vrednosti lahko dostopamo kjer koli,

igrajo pa podobno vlogo kot globalne spremenljivke v klasičnem programiranju. V našem primeru imamo le en domenski parameter: zunanjo temperaturo (temperaturo okolice). Ta vrednost je kasneje uporabljena na mestih, kjer se računajo toplotne izgube v okolico.

Prednost okolja Simscape je v objektno orientiranem modeliranju. To nam omogoča večkratno uporabo razvitih osnovnih elementov v različnih konfiguracijah sistema.

2.2 Razvoj modela

V nadaljevanju so predstavljeni posamezni elementi klimatskih sistemov, fizikalno ozadje ter postopek modeliranja. Nekateri elementi imajo predstavljenih več modelov, ki so bili zgrajeni z različnimi pristopi in ob upoštevanju različnih poenostavitev. V nadaljevanju so predstavljeni naslednji elementi.

- vir zraka;
- ponor zraka;
- senzorji;
- več modelov sobe;
- več modelov grelca na osnovi izmenjevalca toplote med toplim medijem in zrakom;
- dva modela električnega grelca;
- dva modela hladilnika;
- rekuperator;
- trije modeli vlažilca;
- ventilator;

- razcep,
- zlitje in
- cev.

2.2.1 Osnovni domenski elementi

Vir zraka. Klimatski sistem potrebuje vir zraka, na primer zunanji zajem zraka. Na tej točki se zraku dodelijo začetne lastnosti – temperatura, vlažnost in tlak. Naš Simscape element ima tri vhode, na katerih lahko nastavljamo lastnosti zraka na vstopu v sistem. V primeru načrtovanja vodenja lahko spremembe teh vrednosti predstavljajo motnje v sistemu. Vir zraka ne določa pretoka. Pretok v sistemu je pogojen z ventilatorjem.

Ponor zraka. Tako kot potrebujemo vir zraka, je potreben tudi ponor zraka. Kot ponor lahko uporabimo samostojen element v naši knjižnici ali katerega od modelov sobe, predstavljenih v nadaljevanju.

Senzorji. Za spremljanje domenskih spremenljivk v Simscape okolju je potrebno definirati senzorje. V našem primeru smo zato implementirali modele idealnih senzorjev temperature, pretoka, tlaka in vlažnosti, ki nam omogočajo spremljanje lastnosti zraka.

2.2.2 Model sobe

Soba je eden od pomembnejših elementov klimatskega sistema, saj je cilj takega sistema vzdrževanje primernih razmer v prostoru. Za namene simulacije sobe smo implementirali več modelov različnih kompleksnosti, ki nam omogočajo upoštevanje različnih pojavov v sobi (na primer prisotnost oseb, izgube skozi stene ...). Pri vseh modelih pa smo se omejili na dve najpomembnejši spremenljivki: na notranjo temperaturo zraka in na vlažnost zraka v sobi. Ne zanimata

nas tlak ali kakšna druga spremenljiva veličina (koncentracije CO₂, drugih plinov ali delcev).

Osnovni model Prvi model sobe, povzet po [3], temelji na enačbi energijskega ravnotežja:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = q_{vhodni} - q_{izhodni} \quad (2.1)$$

Ob upoštevanju fizikalnih zakonov $Q = mTc$, $q = \dot{m}Tc$ in $m = V\rho$ in predpostavki $\dot{m}_{vhodni}(t) = \dot{m}_{izhodni}(t)$ (masa zraka v prostoru se ne spreminja), se dobita enačbi:

$$V\rho c \frac{dT(t)}{dt} = \dot{m}_{vhodni}(t)T_{vhodni}(t)c - \dot{m}_{vhodni}(t)T(t)c \quad (2.2)$$

$$V\rho c \frac{dH(t)}{dt} = \dot{m}_{vhodni}(t)H_{vhodni}(t)c - \dot{m}_{vhodni}(t)H(t)c \quad (2.3)$$

V enačbah m predstavlja maso zraka v sobi, $\dot{m}(t)$ predstavlja masni pretok zraka (indeks *vhodni* označuje pritok zraka, indeks *izhodni* pa odtok zraka), V je volumen zraka v sobi, ρ je gostota zraka, c je specifična toplota zraka, $T(t)$ je temperatura v sobi, $T_{vhodni}(t)$ je temperatura vhodnega zraka, $H(t)$ je vlažnost v sobi, $H_{vhodni}(t)$ pa vlažnost vhodnega zraka.

Analiza enačb pokaže, da je ojačenje modela enako 1, kar pomeni, da prostor, ko mine prehodni pojav, prevzame temperaturo in vlažnost vhodnega zraka. Na obliko prehodnega pojava, poleg temperature vhodnega zraka, pomembno vpliva tudi $\dot{m}_{vhodni}(t)$, ki predstavlja masni pritok zraka v sobo.

Upoštevanje izgub skozi stene in prisotnosti oseb. Iz vsakdanjih izkušenj je znano, da prisotnost oseb v prostoru s časom vpliva na povišanje temperature. V enačbi (2.4) je podana ocena, da je oddana toplotna moč ene osebe približno enaka grelcu z močjo 100W.

$$\begin{aligned}
P &= \frac{2000kcal}{dan} \\
&= \frac{2000kcal * 4184J/kcal}{24 * 60 * 60s} \\
&= \frac{8368000J}{86400s} \\
&\doteq 96.85W \\
&\approx 100W
\end{aligned} \tag{2.4}$$

V enačbo energijskega ravnovesja je vključen člen $n \times 100W$, kjer n predstavlja število oseb v prostoru, kar je obravnavano kot eden od vhodov v model.

Upoštevane so tudi toplotne izgube skozi stene zaradi razlike v temperaturi med notranjostjo in zunanostjo. Ta člen je proporcionalen razliki temperatur (s faktorjem F). Ob predpostavki konstantne zunanje temperature je mogoče celoten model predstaviti kot *deviacijski model*. Vse temperature so obravnavane kot odstopanja od zunanje temperature $T_{\Delta} = T_{znotraj} - T_{zunaj}$. Dopolnjen model podaja diferencialna enačba (2.5).

$$V\rho c \frac{dT_{\Delta}(t)}{dt} = \dot{m}_{in}T_{\Delta,in}(t)c + 100n - \dot{m}_{in}T_{\Delta}(t)c - FT_{\Delta}(t) \tag{2.5}$$

Vpliv prisotnosti oseb v prostoru ni omejen le na temperaturo, temveč je pomemben tudi z vidika vlažnosti zraka v prostoru. Izdihan zrak je nasičen [4], njegova relativna vlažnost je 100 %. Pri temperaturi $36,5^{\circ}C$ je to ekvivalentno $H_{izdih} = 0,0399kg/kg$. Vsako osebo je mogoče modelirati kot vir, ki v prostor z vsakim izdihom vnaša zrak z vnaprej določeno vlažnostjo. Potrebna sta še podatka o frekvenci dihanja ter masi izdihanega zraka. Frekvenca je $12 - 16/minuto$, volumen izdihanega zraka v mirovanju pa $V_{izdih} \approx 0,5dm^3$. V modelu je uporabljen masni pretok, zato je volumen preračunan v maso, upošteva se podatek o gostoti (suhega) zraka: $\rho_{zrak} = 1.225 \frac{kg}{m^3}$.

$$\begin{aligned}
\dot{m}_{dihanje} &= V[m^3] \times \rho_{zrak} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times f[s^{-1}] \\
&= 0,5 \cdot 10^{-3} \times 1,225 \times \frac{12}{60} \\
&= 1,225 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Podatek o masnem pretoku izdihanega zraka in specifični vlažnosti izdihanega zraka vključimo v model sobe in dobimo enačbo (2.7).

$$V\rho c \frac{dH(t)}{dt} = \dot{m}_{vhodni} H_{vhodni} c + n(t) [\dot{m}_{dihanje} H_{izdih} c] - \dot{m}_{vhodni} H(t) c \tag{2.7}$$

Razširitev modela s temperaturami zidov. Ta razširitev je povzeta po [5]. Model je razširjen z vključitvijo temperature zidu kot nove spremenljivke. V članku avtorji ločijo tri temperature: temperaturi severnega ter južnega zidu, temperaturi vzhodnega ter zahodnega zidu ter temperaturo strehe. V našem modelu smo vse tri temperature združili v enotno temperaturo zidov T_{zid} . Prilagojeni diferencialni enačbi za temperaturi sobe in zidov prikazujeta enačbi (2.8) in (2.9), kjer je C_{soba} toplotna kapaciteta sobe $[kJ/K]$, C_{zid} je toplotna kapaciteta zidov $[kJ/K]$, $\dot{m}_{in}$ je masni dotok novega zraka $[kg/s]$, ρ_{zrak} je gostota zraka $1,225 kg/m^3$, c_{zrak} je specifična toplota zraka $1,005 \frac{kJ}{kgK}$, A_{zid} predstavlja površino zidov, n pa število oseb v sobi.

$$\begin{aligned}
C_{soba} \frac{dT(t)}{dt} &= \dot{m}_{vhodni}(t) \rho_{zrak} c_{zrak} (T_{vhodni}(t) - T(t)) \\
&\quad + A_{zid} U_{zid} (T_{zid}(t) - T_{okolica}(t)) + n(t) * 100W
\end{aligned} \tag{2.8}$$

$$C_{zid} \frac{dT_{zid}(t)}{dt} = A_{zid} U_{zid} (T(t) - T_{zid}(t)) + U_{zid} A_{zid} (T_{okolica}(t) - T_{zid}(t)) \tag{2.9}$$

Diferencialna enačba (2.10) opisuje dinamiko vlažnosti. V je volumen sobe, H je vlažnost sobe, V_{izdih} je volumen izdihanega zraka $0,510^{-3} m^3$ (na en izdih),

f_{izdih} je frekvenca dihanja $12 \frac{1}{min} = \frac{12}{60} Hz$, H_{izdih} pa je vlažnost v izdihanem zraku $0,0399 \frac{kg_{VW}}{kg_{DA}}$.

$$V \rho_a \frac{dH(t)}{dT} = \dot{m}_{vhodni}(t)(H_{in}(t) - H(t)) + n(t)V_{izdih}\rho_a f_{izdih} H_{izdih} \quad (2.10)$$

2.2.3 Gretje s toplotnim izmenjevalnikom

Grelci po načelu izmenjave toplote (ang. *heating coil*) so naprave, v katerih se hladen zrak segreva ob stiku z vročo površino, ki jo na drugi strani greje grelni medij (najpogosteje se za gretje uporabi kar voda). Pri tem pride do prenosa toplote iz grelnega medija na hladno tekočino/zrak. Pri segrevanju se specifična vlažnost ne spreminja.

Model po ϵ -NTU metodi. To je metoda, opisana v [6], ki temelji na izkoristku izmenjevalca, označenem z ϵ . Izkoristek nam pove, koliko se obravnavni grelec približa idealnemu toplotnemu izmenjevalniku.

Definiran je koeficient $C = \dot{m}c$. Metoda razlikuje med dvema primeroma:

- A: $C_{hladna} < C_{vroca} \Rightarrow C_{min} = C_{hladna}$ in $C_{max} = C_{vroca}$
- B: $C_{vroca} < C_{hladna} \Rightarrow C_{min} = C_{vroca}$ in $C_{max} = C_{hladna}$

Indeks *hladna* označuje hladno stran toplotnega izmenjevalnika (običajno hladen zrak), indeks *vroca* pa vročo stran (običajno vročo vodo). Vsakemu od primerov ustreza formula za izračun ϵ . V primeru A je to enačba (2.11), v primeru B pa enačba (2.12). Parameter C_{max} je definiran kot $\max(C_{hladna}, C_{vroca})$, podobno je $C_{min} = \min(C_{hladna}, C_{vroca})$. Indeksa *vhod* in *izhod* označujeta mesto meritve temperature (na vhodu ali izhodu tekočine iz izmenjevalnika).

$$\epsilon = \frac{C_{max}(T_{vroca,vhod} - T_{vroca,izhod})}{C_{min}(T_{vroca,vhod} - T_{hladna,vhod})} \quad (2.11)$$

$$\epsilon = \frac{C_{max}(T_{hladna,izhod} - T_{hladna,vhod})}{C_{min}(T_{vroca,vhod} - T_{hladna,vhod})} \quad (2.12)$$

Ne glede na metodo izračuna parametra ϵ vedno velja enačba (2.13), po kateri se izračuna prenos toplote v izmenjevalniku. Na podlagi fizikalnih zakonov se, ko je določen prenos toplote, izračuna sprememba temperature ΔT za obe tekočini.

$$q = \epsilon C_{min}(T_{vroca,vhod} - T_{hladna,vhod}) \quad (2.13)$$

Model predvideva, da sta znani vhodni temperaturi obeh tekočin (na primer zraka, ki se greje, ter vroče vode, ki predstavlja grelni medij. Na podlagi teh dveh temperatur se izračunata izhodni temperaturi. V enačbo (2.13) se vstavi $q = \dot{m}c\Delta T$, upoštevajoč $\Delta T = T_{hladna,izhod} - T_{hladna,vhod}$, in se dobi:

$$C_{hladna}(T_{hladna,izhod} - T_{hladna,vhod}) = \epsilon C_{min}(T_{vroca,vhod} - T_{hladna,vhod}) \quad (2.14)$$

Izrazi se lahko veličina, ki nas zanima, to je $T_{hladna,izhod}$:

$$T_{hladna,izhod} = \frac{\epsilon C_{min}}{C_{hladna}} T_{vroca,vhod} + \frac{C_{hladna} - \epsilon C_{min}}{C_{hladna}} T_{hladna,vhod} \quad (2.15)$$

Ta model opisuje statične razmere.

Model s podanim padcem temperature vode. Model je opisan v [5]. Model (pri čemer so zanemarjene toplotne izgube grelca v okolico) opisuje enačba (2.16), kjer oznaka C_{grelec} predstavlja skupno toplotno kapaciteto izmenjevalnika, $\dot{m}_{voda}$ masni pretok vode oziroma grelnega medija, c_{voda} specifično toploto grelnega medija, $\dot{m}_{zrak}$ masni pretok zraka, ki ga grejemo in c_{zrak} pa specifično toploto zraka.

$$C_{grelec} \frac{dT_{zrak,izhod}}{dt} = \dot{m}_{voda} c_{voda} (T_{voda,vhod} - T_{voda,izhod}) + \dot{m}_{zrak} c_{zrak} (T_{zrak,vhod} - T_{zrak,izhod}) \quad (2.16)$$

Model v [5] predvideva še izgube skozi stene toplotnega izmenjevalnika v okolico. V enačbi (2.16) je ta vpliv z namenom poenostavitve modela zanemaren.

Pomanjkljivost tega modela je, da za izračun izhodne temperature segretega zraka potrebuje vhodno temperaturo hladnega zraka, vhodno temperaturo vročega medija ter izhodno temperaturo vročega medija. Zadnja zahteva je problematična, saj ta podatek v simulacijskem delovanju ni na voljo.

Dinamični model z izračunom ϵ . Model je opisan v [7]. V inicializacijskem koraku se po enačbah (2.17),(2.18) izračunata parametra ϵ_{zrak} ter ϵ_{voda} . Članek podaja dve diferencialni enačbi, ki definirata izhodni temperaturi zraka in vode v odvisnosti od vhodnih temperatur – enačbi (2.20) in (2.21).

$$\epsilon_{voda} = \frac{T_{voda,vhod} - T_{voda,izhod}}{T_{voda,vhod} - T_{zrak,vhod}} \quad (2.17)$$

$$\epsilon_{zrak} = \frac{T_{zrak,izhod} - T_{zrak,vhod}}{T_{voda,vhod} - T_{zrak,vhod}} \quad (2.18)$$

$$T_{hc} = \frac{m_{hc}c_{hc}(1 - \epsilon_{voda})}{\dot{m}_{voda}c_{voda}} \quad (2.19)$$

$$T_{hc} \frac{dT_{zrak,izhod}}{dt} + T_{zrak,out} = \epsilon_{zrak} T_{voda,vhod} + T_{hc} \frac{dT_{zrak,vhod}}{dt} + (1 + \epsilon_{zrak}) T_{air,vhod} \quad (2.20)$$

$$T_{hc} \frac{dT_{voda,izhod}}{dt} + T_{voda,izhod} = (1 - \epsilon_{voda}) T_{voda,vhod} + \epsilon_{voda} T_{zrak,vhod} \quad (2.21)$$

Iz sistema diferencialnih enačb lahko opazimo, da masni pretok vode vpliva samo na T_{hc} in s tem na hitrost prehodnega pojava, ne pa tudi na končne izhodne temperature. Avtor članka predpostavlja, da se pretoka zraka in vode ne spreminjata in sta njuna vpliva že zajeta v parametrih ϵ_{zrak} in ϵ_{voda} , ki sta izračunana za tipične obratovalne razmere. V našem primeru tak model ni primeren, saj mora omogočati spreminjanje pretoka vode ter zraka.

Osnovni γ model. Pomanjkljivosti prejšnjih modelov odpravlja enostaven model, podan v [8], predstavljen v enačbah (2.22)–(2.25), kjer sta k in M neznani konstanti, τ pa je neznana funkcija delovne točke.

$$\gamma = \frac{1 + k\left(\frac{1}{\dot{m}_{voda}}\right)^M}{1 + k\left(\left(\frac{1}{\dot{m}_{voda}}\right)^M + \left(\frac{1}{\dot{m}_{zrak}}\right)^M\right)} \quad (2.22)$$

$$\tau(T_{zrak,izhod}) \frac{dT_{zrak,izhod}}{dt} + T_{zrak,izhod} = \gamma T_{zrak,vhod} + (1 - \gamma) T_{voda,vhod} \quad (2.23)$$

$$P = -(T_{zrak,izhod} - T_{zrak,vhod}) \dot{m}_{zrak} c_{zrak} \quad (2.24)$$

$$T_{voda,izhod} - T_{voda,vhod} = \frac{P}{\dot{m}_{voda} c_{voda}} \quad (2.25)$$

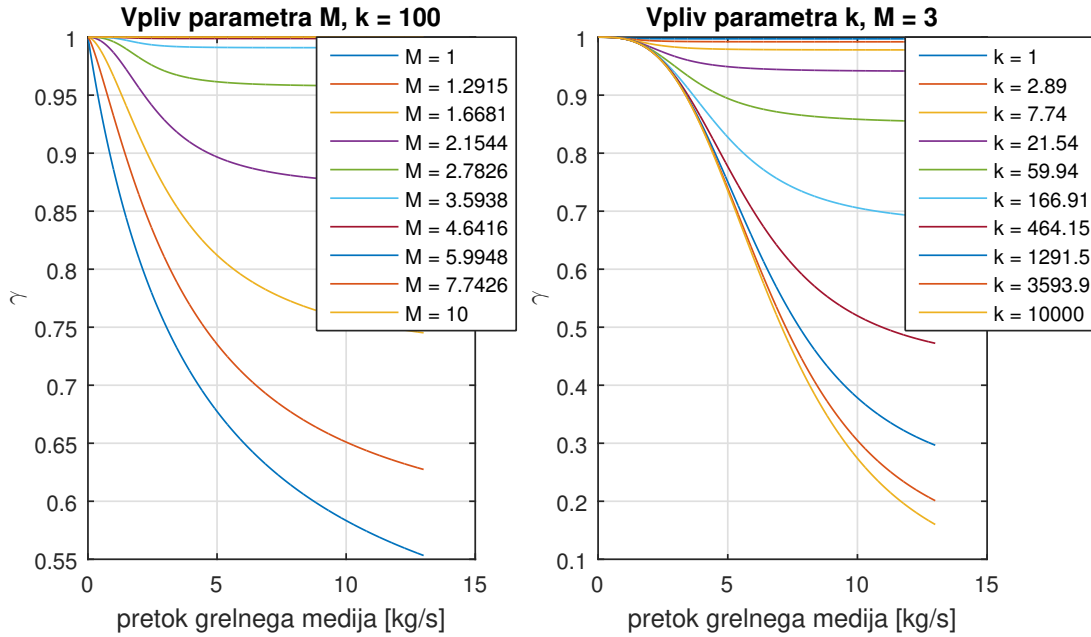
Temperaturo vode se določi tako, da se iz spremembe temperature zraka izračuna preneseno energijo ter predpostavi, da je vsa ta energija prišla iz vode, ki se je s tem ohladila.

Pri osnovnem γ modelu grelca s toplotnim izmenjevalnikom je jasen velik vpliv funkcije $\gamma(\dot{m}_{voda}, \dot{m}_{zrak})$ na karakteristiko izmenjevalnika.

V enačbi (2.22) sta prisotna dva parametra – k in M , ki poleg pretokov medija in zraka vplivata na vrednost funkcije. Njun vpliv prikazuje slika 2.1.

Grafa, podana na sliki 2.1, prikazujeta vrednosti funkcije γ pri različnih setih parametrov (vsaka krivulja predstavlja en set parametrov). Na abscisni osi je podan pretok medija, ki je v modelu proporcionalen odprtosti ventila na napravi (npr. odprtost ventila hladilnika). Pri tem je pomemben podatek največji predviden pretok medija v napravi. Podatke dobimo iz strojnih specifikacij konkretnega sistema. Izkaže se, da se isti model (enačbe (2.22) – (2.25)) lahko uporabi tudi za modeliranje hladilnika, vendar je za to treba preoblikovati γ .

Predstavljen model grelca je veljaven, ko je grelec aktiven, prižgan. V primeru, da grelec prejme regulirni signal, naj se ventil grelca zapre in s tem pretok medija



Slika 2.1: Vpliv parametrov M in k na izračun osnovne funkcije γ (pretok zraka je 7 kg/s).

močno zmanjša ali celo doseže 0, pride do singularnosti v enačbi (2.25). Da bi se čim bolj približali resničnemu delovanju pri nizkih pretokih, je uveden obtok. Naloga obtoka je, da pri nizkih pretokih medija ne pride do spremembe temperature zraka in medija. Cilj je torej $T_{\text{zrak,izhod}} = T_{\text{zrak,vhod}}$ ter $T_{\text{medij,izhod}} = T_{\text{medij,vhod}}$.

Simscape nam omogoča če-potem (ang. *if-else*) stavke v razdelku *equations*, kjer podajamo fizikalne zakone, ki definirajo model. Kot pogoj v *if-else* stavku je postavljen: $\dot{m}_{\text{medija}} \geq \dot{m}_{\text{medija,min}}$. Smiselno je v pogoj dodati tudi preverjanje pretoka zraka. Simscape okolje zahteva, da veji če-potem strukture vsebujeta enako število diferencialnih enačb, v katerih so odvajana stanja sistema. Vse take diferencialne enačbe morajo imeti enako obliko. Iz tega razloga je potrebno v *else* delu (pretok zraka ali medija je manjši od spodnje meje) spremeniti le parametra γ in τ enačbe (2.23), ne pa tudi same strukture modela. Nastavljena sta $\gamma = 1$ ter $\tau = 1\text{ s}$.

Vrednost τ se v modelu grelca (v običajnem načinu delovanja) ne spreminja, ima konstantno vrednost $\tau = 100s$. Edina parametra, na voljo za nastavljanje delovanja grelca sta k in M (v izračunu γ).

2.2.4 Električno gretje

Predstavljena sta dva modela električnega grelca – enostavni, ki vso električno energijo pretvori v gretje zraka, in bolj napredni, ki vključuje tudi segrevanje samega telesa grelca ter izgube v okolico.

Enostavni model. To je model grelca, ki ima za vhod električno moč, ki se troši na njem. Vsa porabljena električna energija se prenese v segrevanje zraka. Enačba (2.26), ki opisuje dogajanje, je zato zelo enostavna:

$$P = c_{zrak} \dot{m}_{zrak} \Delta T \quad (2.26)$$

P predstavlja električno moč, c_{zrak} specifično toploto zraka, $\dot{m}_{zrak}$ masni pretok zraka, ΔT pa spremembo temperature zraka $T_{izhod} - T_{vhod}$.

Razširjeni model. Pri tem modelu je upoštevano, da električni grelec najprej segreva lastno telo in šele nato posredno segreva zrak. Istočasno prihaja do izgub v okolico. Enačbe, ki opisujejo tak grelec, so:

$$c_{telo} m_{telo} \frac{dT_{telo}}{dt} = P - q_{izgube} - q_{zrak} \quad (2.27)$$

$$c_{zrak} \dot{m}_{zrak} \Delta T_{zrak} = q_{zrak} \quad (2.28)$$

$$q_{zrak} = U_{izgube} (T_{telo} - T_{zunanja}) \quad (2.29)$$

$$q_{zrak} = U_{ogrevanje} (T_{telo} - \bar{T}_{zrak}) \quad (2.30)$$

$$\bar{T}_{zrak} = (T_{zrak,vhod} + T_{zrak,izhod})/2 \quad (2.31)$$

2.2.5 Hlajenje

V nadaljevanju sta opisana dva modela hladilnika: kompleksen model, izpeljan v [1], ter model, podoben predstavljenemu modelu grelca s toplotnim izmenjevalnikom.

Zaporedni cevni izmenjevalnik. Model hladilne tuljave temelji na [1]. Avtor predpostavlja določeno obliko izmenjevalnika – izmenjevalnik s cevmi. Cevi so razdeljene v vrste (*rows*). Model, predstavljen v nadaljevanju, je model ene vrste. Za združen model hladilnika se več modelov vrste zaporedno poveže. Pri simulaciji je izhod ene vrste (stanja zraka in hladilne tekočine) vhod v naslednjo vrsto. Znotraj vsake vrste se preveri, ali so pogoji za kondenzacijo izpolnjeni. To določa, kateri set enačb se uporabi. Do kondenzacije pride, če je srednja temperatura kontaktne površine (med zrakom in hladilnimi cevkami) nižja od temperature rosišča zraka, ki vstopa v razdelek.

V izračunih so potrebni parametri:

- ΔA_o in ΔA_i ;
- ΔNTU_o in ΔNTU_i ;
- R .

Ti parametri so konstantni za neko konfiguracijo izmenjevalnika. Za njihov izračun je potrebno poznavanje fizikalnih konstant in specifikacij naprave, kot so podane v tabeli 2.1.

$$\Delta A_o = \frac{\beta \times \Delta_L \times \dot{m}_{zrak}}{\rho_{zrak} \times v_{zrak}} \quad (2.32)$$

$$\Delta A_i = \left(\frac{A_n}{A_z}\right) \times \Delta A_o \quad (2.33)$$

oznaka	opis	enote
β	kompaktnost izmenjevalnika	$\frac{m^2}{m^3}$
Δ_L	vzdolžna razmaknjenost cevi	mm
v_{zrak}, v_{medij}	hitrost zraka/medija	$\frac{m}{s}$
A_n, A_z	notranja/zunanja površina	m^2
η	učinkovitost 'plavuti'	-
h_o	učinkovitost konveksnega prenosa toplote	$\frac{W}{m^2 K}$
h_i	koeficient prenosa toplote na strani medija	$\frac{W}{m^2 K}$

Tabela 2.1: Specifikacije naprave, ki so potrebne za uspešno modeliranje hladilnika po [1].

$$\Delta NTU_o = \frac{\eta h_o \Delta A_o}{\dot{m}_{zrak} c_{zrak}} \quad (2.34)$$

$$\Delta NTU_i = \frac{h_i \Delta A_i}{\dot{m}_{medij} c_{medij}} \quad (2.35)$$

$$R = \left[\frac{h_i c_{zrak}}{h_o \eta} \frac{\Delta A_i}{\Delta A_o} \right] \times \left[\frac{1 + \frac{\Delta NTU_o}{2}}{1 + \frac{\Delta NTU_i}{2}} \right] \quad (2.36)$$

V primeru, da je temperatura hladilne površine v trenutni vrsti (izračunana po enačbi (2.37)) enaka ali nižja od temperature rosišča zraka, uporabimo enačbe, ki predvidevajo kondenzacijo in s tem zmanjšanje vsebnosti vlage v zraku ob prehodu te vrste.

$$T_{povrsina} = \frac{-(R + 1.4)}{0.092} + \frac{\sqrt{(R + 1.4)^2 + 0.184(ha + RT_{medij,izhod} - 10.76)}}{0.092} \quad (2.37)$$

$$\Delta Q_c = \frac{h_i \Delta A_i}{1 + \frac{\Delta NTU_i}{2}} \times (T_{povrsina} - T_{medij,izhod}) \quad (2.38)$$

$$T_{medij,vhod} = T_{medij,izhod} - \frac{\Delta Q_c}{\dot{m}_{medij} c_{medij}} \quad (2.39)$$

$$H_{zrak,izhod} = H_{zrak,vhod} - \frac{\Delta Q_c}{\dot{m}_{zrak}} \quad (2.40)$$

$$T_{zrak,izhod} = \left[\frac{1 - \frac{\Delta NTU_o}{2}}{1 + \frac{\Delta NTU_o}{2}} \right] \times T_{zrak,vhod} + \left[\frac{\Delta NTU_o}{1 + \frac{\Delta NTU_o}{2}} \right] \times T_{povrsina} \quad (2.41)$$

Če pogoj za kondenzacijo iz prejšnjega odstavka ni izpolnjen, ne pride do kondenzacije v trenutno obravnavi vrsti. Tedaj veljajo naslednje enačbe:

$$T_{povrsina} = \frac{T_{zrak,vhod} + R \times T_{medij,izhod}}{R + 1} \quad (2.42)$$

$$\Delta Q_c = \frac{h_i \Delta A_i}{1 + \frac{\Delta NTU_i}{2}} \times (T_{povrsina} - T_{medij,izhod}) \quad (2.43)$$

$$T_{medij,vhod} = T_{medij,izhod} - \frac{\Delta Q_c}{\dot{m}_{medij} c_{medij}} \quad (2.44)$$

$$T_{zrak,izhod} = T_{zrak,vhod} - \frac{\Delta Q_c}{\dot{m}_{zrak} c_{zrak}} \quad (2.45)$$

$$H_{zrak,izhod} = H_{zrak,vhod} \quad (2.46)$$

V viru ([1]) je nekaj nepojasnjenih odstopanj (morda napak pri avtorjevem prepisovanju enačb) med teoretično izpeljavo in rešenimi primeri. V našem modelu smo upoštevali izpeljane enačbe. Naslednja težava pri načrtovanju je bila, da je avtor modela vse temperature podajal in računal v *stopinjah celzija*, medtem ko je naš celoten model spisan v *kelvinih*.

Izkaže se, da je predstavljeni model numerično problematičen. Tekom simulacije pride do pogostih prehodov ničle, velikokrat odvodi stanj in stanja postanejo neskončni.

Model na osnovi γ modela grelca. Zaradi omenjenih pomanjkljivosti prvega modela hladilnika je v nadaljevanju predstavljen alternativni model, ki temelji na enakem pristopu kot γ model grelca v poglavju 2.2.3. Poglavitne enačbe modela so enake kot pri modelu grelca:

$$\tau(T_{zrak,izhod})\frac{dT_{zrak,izhod}}{dt} + T_{zrak,izhod} = \gamma T_{zrak,vhod} + (1 - \gamma)T_{voda,vhod} \quad (2.47)$$

$$P = -(T_{zrak,izhod} - T_{zrak,vhod})\dot{m}_{zrak}c_{zrak} \quad (2.48)$$

$$T_{voda,izhod} - T_{voda,vhod} = \frac{P}{\dot{m}_{voda}c_{voda}} \quad (2.49)$$

Ponovno je seveda bistvenega pomena funkcija γ . Tekom nastavljanja parametrov se izkaže, da je potrebna razširitev funkcije γ . Doda se člen, ki pri visokih pretokih zmanjša vrednost γ . Razširjeni izračun prikazuje enačba (2.50), z odebeljeno pisavo je poudarjen novi del. Uveden je nov parameter modela – visoko pretočni koeficient (VPK).

$$\gamma = \frac{1 + k(\frac{1}{\dot{m}_{voda}})^M}{1 + k((\frac{1}{\dot{m}_{voda}})^M + (\frac{1}{\dot{m}_{zrak}})^M)} \times \left(\mathbf{1} - \mathbf{VPK} \mathbf{e}^{\dot{m}_{voda}} \right) \quad (2.50)$$

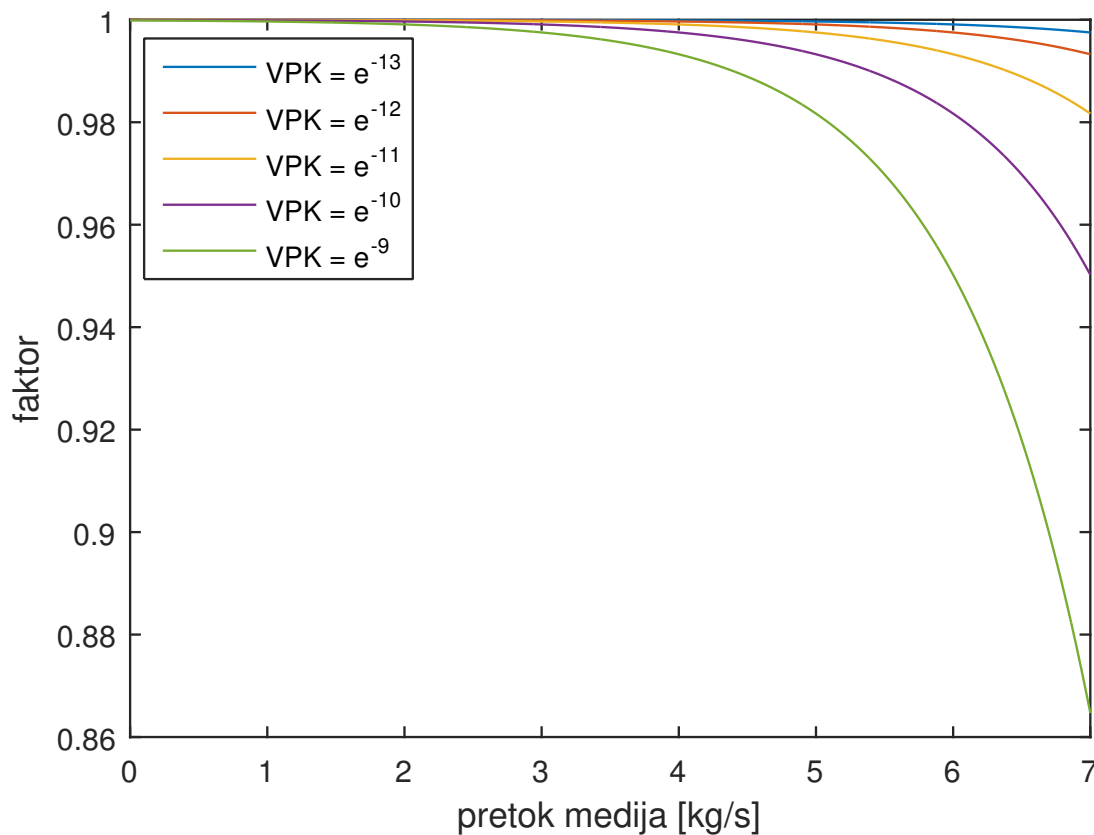
Graf na sliki 2.2 prikazuje potek funkcije $1 - VPK e^{\dot{m}_{voda}}$ v odvisnosti od $\dot{m}_{voda}$ pri različnih VPK .

Vpliv dodatnega člena na γ prikazuje slika 2.4.

Da je omogočena še večja prilagodljivost izračuna γ , je dodan še en člen, ki omogoči lokalno spremembo samo na omejenem intervalu pretokov medija. To spremembo prikazuje enačba (2.51). Dodan člen je poudarjen z odebeljeno pisavo. Kombinacija funkcij *atan* je bila izbrana zaradi omogočanja lokalne spremembe, kot prikazuje slika 2.3. Uvedena sta parametra $\dot{m}_+$ in $\dot{m}_-$, ki določata interval, ter parametra Z in d , ki določata intenzivnost lokalne spremembe.

$$\gamma = \frac{1 + k\left(\frac{1}{\dot{m}_{voda}}\right)^M}{1 + k\left(\left(\frac{1}{\dot{m}_{voda}}\right)^M + \left(\frac{1}{\dot{m}_{zrak}}\right)^M\right)} \times \left(1 - VPK e^{\dot{m}_{voda}}\right) \times \left(1 + \left(\text{atan}(\mathbf{Z}(\dot{\mathbf{m}}_{voda} - \dot{\mathbf{m}}_+)) + \text{atan}(-\mathbf{Z}(\dot{\mathbf{m}}_{voda} - \dot{\mathbf{m}}_-))\right)/(2d\pi)\right) \quad (2.51)$$

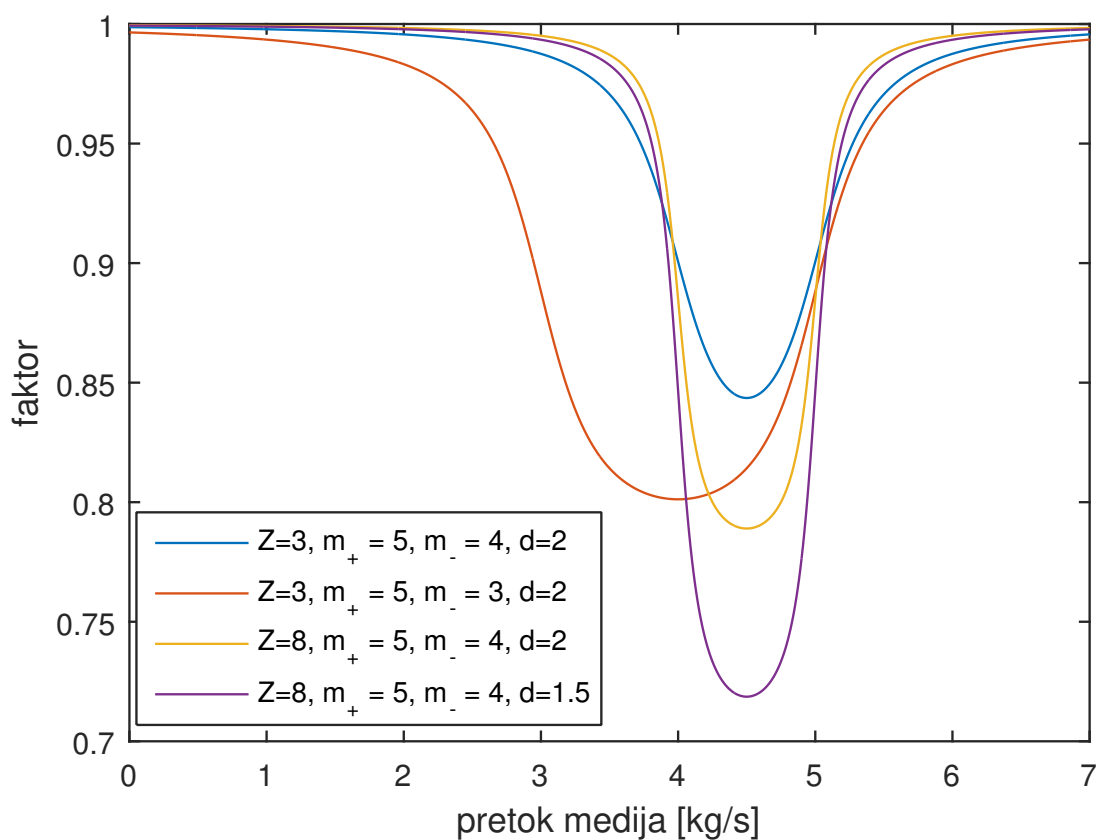
Vpliv dodatnega člena na γ prikazuje slika 2.4.



Slika 2.2: Prikaz poteka faktorja $(1 - VPK e^{\dot{m}_{voda}})$.

Spodaj je podan povzetek novih uvedenih parametrov razširjene funkcije γ .

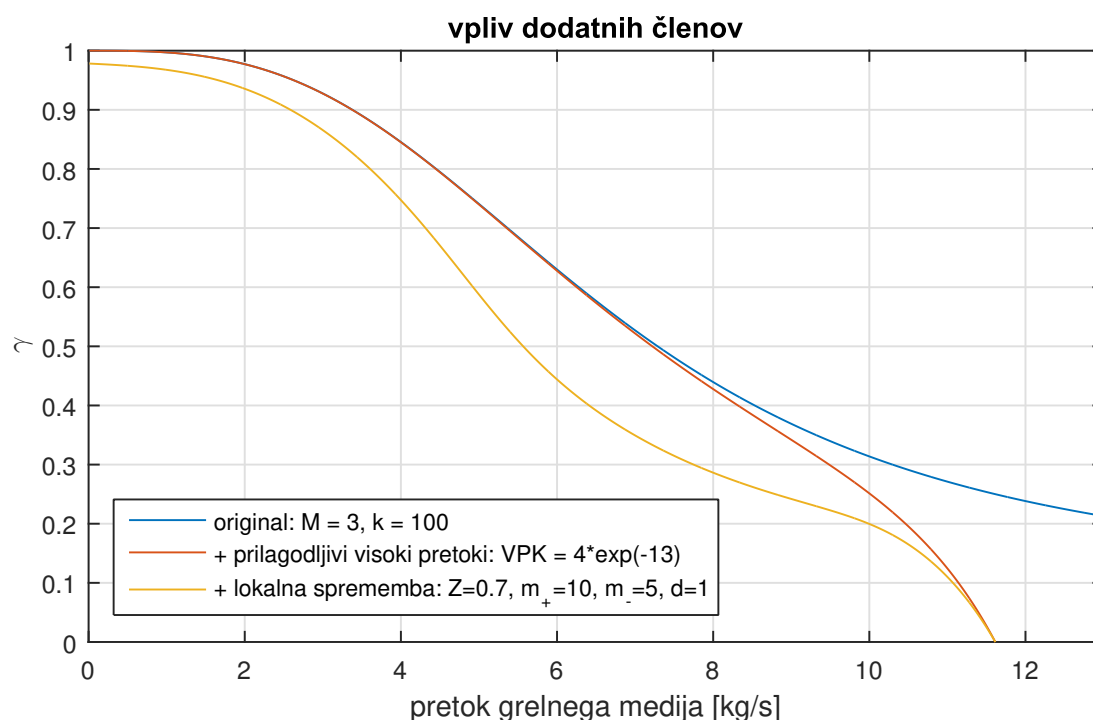
- Visoko-pretočno ojačenje, ki skalira eksponentno funkcijo. V nadaljevanju je označeno kot parameter VPO .
- Visoko-pretočno slabljenje, ki prav tako skalira eksponentno funkcijo. V nadaljevanju je označeno kot parameter VPS .



Slika 2.3: Prikaz poteka faktorja

$$(1 + (\tan(Z(\dot{m}_{voda} - \dot{m}_+)) + \tan(-Z(\dot{m}_{voda} - \dot{m}_-)))/(2d\pi)).$$

- VPO in VPS lahko nadomestimo s skupnim parametrom: visoko-pretočni koeficient je označen z $VPK = VPO/e^{VPS}$.
- Spodnja meja intervalnega ojačenja, označena je z $\dot{m}_-$.
- Zgornja meja intervalnega ojačenja, označena je z $\dot{m}_+$.
- Zgostitev intervalnega ojačenja, označena je z Z .
- Skaliranje intervalnega ojačenja, označeno je z d .



Slika 2.4: Vpliv dveh dodatnih členov na potek funkcije γ .

$$\gamma = \frac{1 + k\left(\frac{1}{\dot{m}_{voda}}\right)^M}{1 + k\left(\left(\frac{1}{\dot{m}_{voda}}\right)^M + \left(\frac{1}{\dot{m}_{zrak}}\right)^M\right)} \times \left(1 - VPK e^{\dot{m}_{voda}}\right) \times \left(1 + \left(\frac{\text{atan}(Z(\dot{m}_{voda} - \dot{m}_+)) + \text{atan}(-Z(\dot{m}_{voda} - \dot{m}_-))}{2d\pi}\right)\right) \quad (2.52)$$

Poleg temperature je v klimatskih sistemih pomembna tudi vlažnost. Hladilnik je pomemben element v klimatskih sistemih, saj v njem lahko pride do kondenzacije, kar omogoča spreminjanje vlažnosti zraka.

Kondenzacija je realizirana z naslednjo enačbo:

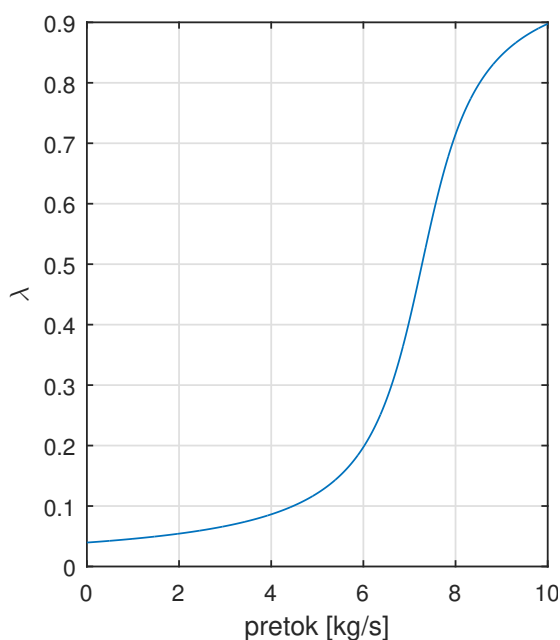
$$H_{izhod} = H_{100\%} * \lambda + H_{vhod} * (1 - \lambda) \quad (2.53)$$

Ko pride do kondenzacije, je relativna vlažnost na izhodu visoka – blizu 100 %. Pri ohlajanju se namreč relativna vlažnost povečuje do točke, pri kateri pride do kondenzacije. Zato se najprej izračuna največjo možno specifično vlažnost zraka

(relativna vlažnost 100 %). Za izračun se uporabi izhodna temperatura zraka iz hladilnika in enačba (2.68). Največja možna specifična vlažnost je označena s $H_{100\%}$.

Vrednost λ v enačbi (2.53) določa, koliko se pri hlajenju približamo točki popolne nasičenosti zraka. Vrednost λ izračunamo po enačbi (2.54), kjer sta parametra p_0 in p_1 izbrana na podlagi predvidenih pretokov hladilnega medija ($\dot{m}_{voda}$). Funkcija $atan$ je izbrana, ker omogoča gladek nelinearen prehod med delovanjem brez kondenzacije pri nizkih pretokih hladilnega medija in delovanjem s kondenzacijo pri visokih pretokih hladilnega medija. Funkcija $atan$ je primerna tudi, ker onemogoča nepredvidljivo delovanje, če pretok hladilnega medija zapusti predvideno območje delovanja. Primer poteka funkcije λ prikazuje slika 2.5.

$$\lambda = \frac{atan(p_1 \dot{m}_{voda} - p_0) + \frac{\pi}{2}}{\pi} \quad (2.54)$$



Slika 2.5: Primer λ pri $p_1 = 1.1$, $p_0 = 8$.

2.2.6 Rekuperacija

Rekuperator na shemi je sestavljen iz štirih elementov: grelca, hladilnika ter dveh zalogovnikov za medij. Zalogovnika sta potrebna, da se izognemo algebraski zanki pri računanju temperature rekuperatorske tekočine.

Zalogovnik. Zalogovnik zapišemo kot enostaven filter prvega reda:

$$\frac{dT_{medij,izhod}}{dt}\tau = T_{medij,vhod} - T_{medij,izhod} \quad (2.55)$$

Pomanjkljivost je, da ta model nikjer ne upošteva pretoka medija.

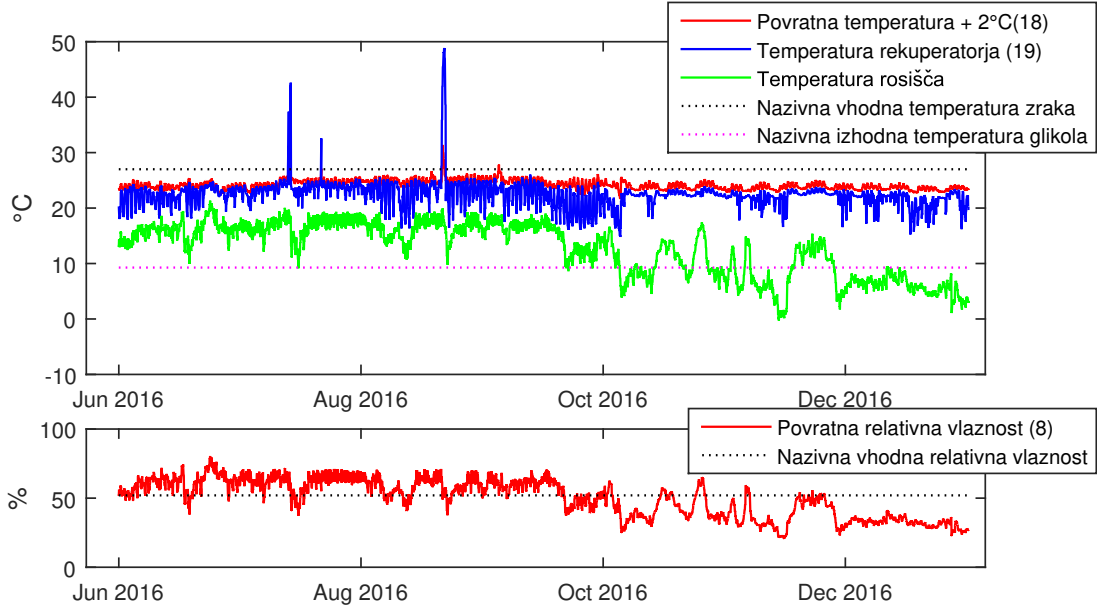
Hladilni del. Hladilnik v rekuperatorju je zelo podoben elementu, opisanemu v 2.2.5. Elementa se razlikujeta po izračunu γ – hladilnik v rekuperatorju za izračun uporabi osnovno enačbo (2.22). Razlika je tudi v izračunu moči gretja medija. Iz meritev realnega sistema lahko ugotovimo, da pri nizkih pretokih ($\gamma \approx 1$) medij na izhodu iz hladilnika prevzame temperaturo vhodnega zraka. To dodatno znanje vključimo v model s spremembo enačbe (2.24) tako, da upoštevamo tudi γ :

$$P = (1 - \gamma) \left(-c_{zrak} \dot{m}_{zrak} (T_{zrak,izhod} - T_{zrak,vhod}) \right) + \gamma \left(\dot{m}_{voda} c_{voda} (T_{voda,vhod} - T_{zrak,vhod}) \right) \quad (2.56)$$

Pri $\gamma = 1$ velja:

$$\begin{aligned} P &= \dot{m}_{voda} c_{voda} (T_{voda,vhod} - T_{zrak,vhod}) \\ T_{voda,izhod} &= T_{voda,vhod} - \frac{\dot{m}_{voda} c_{voda} (T_{voda,vhod} - T_{zrak,vhod})}{\dot{m}_{voda} c_{voda}} \\ T_{voda,izhod} &= T_{voda,vhod} - T_{voda,vhod} + T_{zrak,vhod} \\ T_{voda,izhod} &= T_{zrak,vhod} \end{aligned}$$

Iz meritev dejanskega sistema je razvidno, da rekuperator vedno deluje v takem načinu delovanja, da ne pride do kondenzacije v hladilnem delu, zato lahko uporabimo element, ki nima predvidenega razvlaževanja.



Slika 2.6: Prikaz razmer v hladilnem delu rekuperatorja – relativna vlažnost povratnega zraka nikoli ne doseže visokih vrednosti, kar bi nakazovalo na kondenzacijo na hladilnem delu rekuperatorja.

Grelni del. Grelec v rekuperatorju se razlikuje od γ modela grelca, predstavljenega v poglavju 2.2.3. Razlika je v izračunu funkcije γ . Na podlagi meritev in simulacije sistema lahko ugotovimo, da izračun po enačbi (2.22) ni zadovoljiv. Zato je bilo potrebno za model grelca v rekuperatorju uporabiti razširjen model grelca, opisanega z enačbo (2.57).

$$\gamma = \frac{1 + k\left(\frac{1}{\dot{m}_{voda}}\right)^M}{1 + k\left(\left(\frac{1}{\dot{m}_{voda}}\right)^M + \left(\frac{1}{\dot{m}_{zrak}}\right)^M\right)} \times \left(1 + \left(\text{atan}(Z(\dot{m}_{voda} - \dot{m}_+)) + \text{atan}(-Z(\dot{m}_{voda} - \dot{m}_-))\right)/(2d\pi)\right) \quad (2.57)$$

2.2.7 Vlažilec

Za vlažilec smo preizkusili najprej dva preprosta modela – statičnega in dinamičnega. Ker z nobenim izmed njih nismo uspeli zadovoljivo ujeti obnašanja sistema, smo vpeljali svoj model.

Statični model. Statičen model temelji na preprosti enačbi (2.58). Enačba predpostavlja, da se izhodna vlažnost v trenutku poveča.

$$H_{izhod}(t) = H_{vhod}(t) + u(t) \quad (2.58)$$

Dinamični model. Drugi predstavljen model je dinamičen model z dvema diferencialnima enačbama, ki opisujeta spremembo temperature (enačba (2.59)) in vlažnosti (enačba (2.60)). Model je povzet po [5].

$$C_h \frac{dT_{izhod}}{dt} = \dot{m}_{zrak} c_{zrak} (T_{vhod} - T_{izhod}) \quad (2.59)$$

$$V_h \frac{dH_{izhod}}{dt} = \dot{m}_{zrak} \frac{H_{vhod} - H_{izhod}}{\rho_{zrak}} + \frac{H_{dodatno}(t)}{\rho_{zrak}} \quad (2.60)$$

Oznake v enačbah (2.59) in (2.60) predstavljajo naslednje veličine: C_h je toplotna kapaciteta naprave (specifična toplota pomnožena z maso), $\dot{m}_{zrak}$ je, masni pretok zraka skozi vlažilec, c_{zrak} je specifična toplota zraka, T_{vhod} ter T_{izhod} pa sta vhodna in izhodna temperatura zraka. V_h predstavlja volumen mešalne posode vlažilca, H_{vhod} in H_{izhod} sta vlažnosti na vhodu in izhodu, ρ_{zrak} predstavlja gostoto zraka, $H_{dodatno}(t)$ pa je vlaga, ki jo dodajamo v zrak v $\frac{kg}{s}$.

Model z upoštevanjem vpliva vlaženja na temperaturo. Enostaven dinamični model ni bil zadovoljiv. Model ne upošteva spremembe temperature zraka med vlaženjem. Namreč, ko se zrak vlaži, se vanj vpihuje vodno paro, ki ima določeno temperaturo, pogosto drugačno od temperature zraka v vlažilcu. To povzroči, da je temperatura na izstopu iz vlažilca odvisna tako od temperature zraka, ki v vlažilec prihaja, kot tudi od temperature vode, s katero zrak vlažimo. Model mora upoštevati vpliv temperature vode. V ta namen je bil vpeljan model, pri katerem je delovanje vlažilca razdeljeno na dva dela: vpliv vlažnosti in vpliv temperature. Enačbi (2.61) in (2.62) opisujeta vpliv na temperaturo, enačba (2.63) pa vpliv na vlažnost.

$$T_{skupaj} = \frac{T_{zrak}\dot{m}_{zrak}c_{zrak} + T_{voda}\dot{m}_{voda}c_{voda}}{\dot{m}_{zrak}c_{zrak} + \dot{m}_{voda}c_{voda}} \quad (2.61)$$

$$C_{vlazilec} \frac{dT_{zrak}}{dt} = \dot{m}_{zrak}c_{zrak}(T_{skupaj} - T_{zrak}) \quad (2.62)$$

$$V_{vlazilec} \frac{dH_{zrak,izhod}}{dt} = \frac{\dot{m}_{air}(H_{zrak,vhod} - H_{zrak,izhod})}{\rho_{zrak}} + \frac{\dot{m}_{vlazenje}}{\rho_{zrak}} \quad (2.63)$$

2.2.8 Ostali elementi

V prejšnjih razdelkih smo predstavili teoretično zahtevnejše modele sistema. Za samo delovanje in gradnjo klimatskih sistemov v okolju Simscape potrebujemo še sledeče elemente:

Ventilator. Ventilator na vhodu sprejme želen pretok zraka $\dot{m}_{zrak,SP}$. Obnašanje je zapisano z enačbo (2.64). Drugi vpliv ventilatorja je povečanje temperature, ki ga omenja literatura [5]. Segrevanje je eden od parametrov ventilatorja, drugi parameter je časovna konstanta τ v spodnji enačbi.

$$\tau \frac{d\dot{m}_{zrak}}{dt} = \dot{m}_{zrak,SP} - \dot{m}_{zrak} \quad (2.64)$$

Razcep. V klimatskih sistemih je potreben Simscape blok, ki realizira razcep. Na vhod bloka sta pripeljani ena cev ter številsko vrednost, ki določa razmerje razcepa. Na izhodu sta dva priključka. Na elementu se temperatura, vlažnost in tlak ne spreminjata. Ohranja se skupni pretok.

Zlitje. Simscape blok za zlivanje dveh cevi ima dva vhoda in en izhod. Pretok zraka na izhodu je seštevek pretokov obeh vhodnih cevi. Zmesno temperaturo in vlažnost prikazujeta naslednji enačbi:

$$T_{izhod} = \frac{\dot{m}_{vhod,1}T_{vhod,1} + \dot{m}_{vhod,2}T_{vhod,2}}{\dot{m}_{vhod,1} + \dot{m}_{vhod,2}} \quad (2.65)$$

$$H_{izhod} = \frac{\dot{m}_{vhod,1}H_{vhod,1} + \dot{m}_{vhod,2}H_{vhod,2}}{\dot{m}_{vhod,1} + \dot{m}_{vhod,2}} \quad (2.66)$$

Obnašanje, ko tlak na obeh 'vhodnih' ceveh ni enak, ni modelirano.

Cev. Model cevi je potreben, ker na cevi pride do padca tlaka. Formula za izračun padca tlaka je naslednja [9]:

$$\Delta p = f_d \frac{L}{d} \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.67)$$

Kjer je f_d Darcy-Weisbachov koeficient trenja, L je dolžina cevi, d je presek cevi, ρ je gostota plina zraka, v pa je hitrost zraka [m/s], ki jo lahko iz pretoka izračunamo: $v = \frac{\dot{m}}{\rho A}$ ($\dot{m}$ je masni pretok [kg/s], A je površina preseka cevi).

Določanje koeficienta f_d je težavno, saj je odvisen od konkretne cevi, turbulentnosti pretoka itd.

2.2.9 Pomembne psihrometrične povezave

V klimatskih sistemih se ukvarjamo z zrakom, katerega poglobitni lastnosti sta temperatura ter vlažnost. Pomembno je, da poznamo temeljne povezave med temperaturo ter vlažnostjo ter možnost preračunavanja med različnimi oblikami vlažnosti (relativna, specifična). Pomembna lastnost zraka, ki je povezana z relativno vlažnostjo in temperaturo zraka, je tudi temperatura rosišča. Pretvorbo med relativno (RH) in specifično (H) vlažnostjo lahko izvedemo s pomočjo naslednjih enačb [10], [11]:

$$\begin{aligned} RH &= \frac{H}{H_s} \\ H_s &= (0.622 \frac{kg}{kg}) e_s / p \\ e_s &= 611 Pa \exp\left(\frac{17.67 * (T - T_0)}{T - 29.65 K}\right) \end{aligned} \quad (2.68)$$

kjer $T_0 = 273.16K$, p je tlak ($100kPa$), T je temperatura $[K]$, H je specifična vlažnost $[\frac{kg_{VW}}{kg_{DA}}]$, RH pa relativna vlažnost.

Temperatura rosišča (ang. *dew point temperature*) je pomembna psihrometrična lastnost zraka. Odvisna je od specifične vlažnosti $H[\frac{kg_{VW}}{kg_{DA}}]$. Odvisnost podaja enačba (2.70) [12]:

$$P_w = H \frac{P}{0.621945 + H} \quad (2.69)$$

$$T_{dp} = 6.54^\circ C + 14.526\alpha + 0.7389\alpha^2 + 0.09486\alpha^3 + 0.4569(P_w^{0.1984}) \quad (2.70)$$

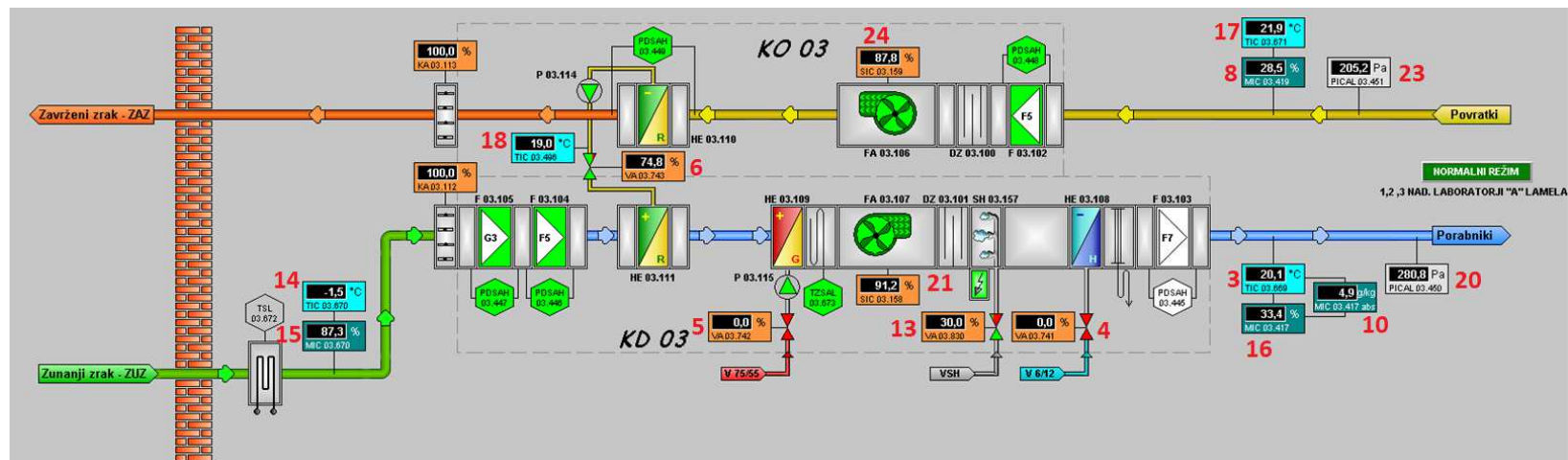
kjer je: $\alpha = \log(P_w)$

2.3 Nastavljanje parametrov modela

2.3.1 Predstavitev klimatskega sistema in merjenih signalov

Namen tega magistrskega dela je razviti sistem za testiranje detektorjev napak v klimatskih sistemih. Elemente, predstavljene v prejšnjem poglavju, lahko uporabimo za gradnjo modela klimatskega sistema. Shema realnega sistema v našem primeru podaja slika 2.7. Sistem vsebuje osnovne elemente, kot so: rekuperator za prenos toplote z odvodnega zraka na zrak za vpih, grelec, hladilnik in vlažilec. Za pretok zraka skrbita dva ventilatorja – po en na strani vpiha (spodaj) in odvodni strani (zgoraj). Na shemi vidimo tudi nekaj elementov, ki jih nismo modelirali: lopute na vhodu in izhodu iz sistema ter zračni filtri.

Za podan klimatski sistem smo pridobili merjene podatke. Podatki obsegajo sedem mesecev (junij 2016–december 2016) tipičnega delovanja. Tabeli 2.2 in 2.3 podajata seznam merjenih signalov ter njihov opis. Signali so označeni na slikah 2.7 in 2.8.



Slika 2.7: Shematski prikaz realnega klimatskega sistema.

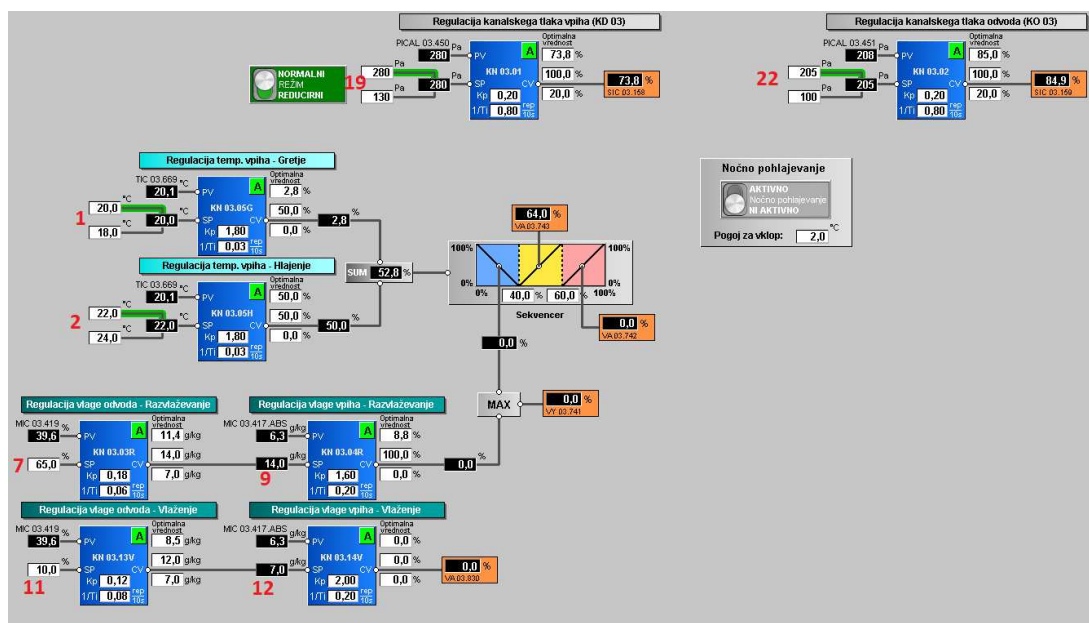
Oznaka na sliki	Opis
1	Temperatura vpiha, gretje, SP
2	Temperatura vpiha, hlajenje, SP
3	Temperatura vpiha
4	Ventil hladilnika
5	Ventil grelnika
6	Ventil rekuperatorja
7	Vlaga odvoda, razvlaževanje, SP
8	Vlaga odvoda
9	Vlaga vpiha, razvlaževanje, SP
10	Absolutna vlažnost vpiha
11	Vlaga odvoda, vlaženje SP
12	Vlaga vpiha, vlaženje, SP
13	Ventil parnega vlažilnika
14	Temperatura zunanjega zraka
15	Vlaga zunanjega zraka
16	Vlaga vpiha
17	Temperatura odvoda
18	Temperatura rekuperacije
19	Tlak vpiha, SP
20	Tlak vpiha

Tabela 2.2: Tabela signalov – 1. del.

Signali 25–28 iz tabele 2.3 niso prisotni na slikah 2.7 in 2.8.

Oznaka na sliki	Opis
21	Vrt. dovodnega frek. pretvornika
22	Tlak odvoda, SP
23	Tlak odvoda
24	Vrt. odvodnega frek. pretvornika
25	Temperatura hladilne tekočine
26	Temperatura grelne tekočine
27	Vklop črpalke tople vode
28	Vklop črpalke hladne vode

Tabela 2.3: Tabela signalov – 2. del.



Slika 2.8: Shematski prikaz regulacijskega algoritma klimatskega sistema.

2.3.2 Odprtozančno nastavljanje parametrov

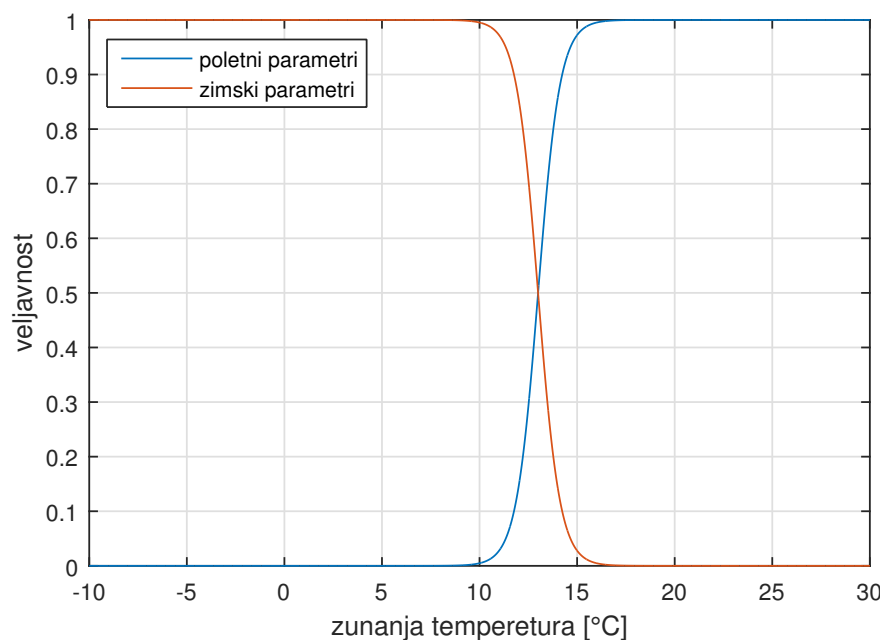
Primerjavo med modelom in meritvami smo izvedli v časovnem prostoru. Parametre modela smo ročno nastavljali tako, da smo dobili čim boljše vizualno ujemanje.

Nastavljanje parametrov je bilo sprva izvedeno po mesecih. Najprej je bilo doseženo ujemanje med simulacijo in meritvami za mesec junij, nato so bili parametri preverjeni na juliju. Na tak način smo v nekaj iteracijah dobili parametre vseh elementov. Pri primerjavi delovanja z določenimi parametri za mesec oktober je v prvi fazi prišlo do večjih odstopanj. Iz meritev smo opazili, da je v juniju, juliju, avgustu in septembru rekuperator skoraj vedno ali povsem prižgan (ventil 100 %) ali pa popolnoma ugasnjen (ventil 0 %). Oktober je prvi mesec, ko rekuperator deluje tudi v vmesnem območju, pri drugih odprtostih ventila. Oktober se je zato izkoristil za iskanje parametrov rekuperatorja. Pri tem smo upoštevali tudi merjeno temperaturo medija v rekuperatorju.

Dobljeni parametri rekuperatorja so močno odstopali od parametrov, dobljenih za mesece junij–september. Ujemanje v poletnih mesecih se s spremembo parametrov rekuperatorja močno poslabša. Iz simulacijskih rezultatov (ob uporabo novih – 'oktobrskih' parametrov rekuperatorja) je opaziti, da v poletnih mesecih ob povsem izklopljenem grelcu (ne glede na regulacijski signal) pride do premočnega gretja. Rekuperator je v taki konfiguraciji (z ročno zaprtim ventilom grelca) edini element, ki greje zrak. To pomeni, da parametrov rekuperatorja, ki veljajo za oktober, ne smemo uporabiti v poletnih mesecih in obratno.

Zaradi zgoraj opisanih razlogov sta bila implementirana dva seta parametrov: en za mesece junij–september in en set za mesece oktober–december. Za preklapljanje med različnima setoma parametrov je bila izvedena preklopna logika, ki je opisana v nadaljevanju.

Preklopna logika za preklapljanje med setoma parametrov. Da bi zagotovili mehke preklope med posameznima setoma parametrov, smo preklopno logiko izvedli s pomočjo mehke logike. Za oba seta parametrov smo določili nazivno zunanjo temperaturo in standardno deviacijo temperature. Za nazivno temperaturo poletnih parametrov je bila določena temperatura 21°C , za zimske pa 5°C . V obeh primerih je bila določena standardna deviacija 3°C .



Slika 2.9: Veljavnost setov parametrov pri različnih zunanjih temperaturah.

Vrednost posameznega parametra (Ω) v vsakem časovnem trenutku se izračuna po enačbah (2.71)–(2.73), kjer Ω predstavlja končno vrednost posameznega parametra, $\Omega_{poletje}$ in Ω_{zima} sta konstantni vrednosti parametra za poletno in zimsko obdobje, $w_{poletje}$ in w_{zima} sta pripadnosti, T je trenutna zunanja temperatura, $T_{poletje}$ in T_{zima} sta nazivni temperaturi ($21^{\circ}C$ in $5^{\circ}C$), $\sigma_{poletje}$ in σ_{zima} pa sta standardna odklona.

$$\Omega = \frac{w_{poletje}\Omega_{poletje} + w_{zima}\Omega_{zima}}{w_{poletje} + w_{zima}} \quad (2.71)$$

$$w_{poletje} = e^{-\frac{(T-T_{poletje})^2}{2\sigma_{poletje}^2}} \quad (2.72)$$

$$w_{zima} = e^{-\frac{(T-T_{zima})^2}{2\sigma_{zima}^2}} \quad (2.73)$$

Slika 2.9 prikazuje normirani vrednosti pripadnosti prvega in drugega seta parametrov v odvisnosti od zunanje temperature

Z namenom zmanjšanja števila kratkotrajnih preklopov (npr. ko jeseni nočna

temperatura pade pod $7\text{ }^{\circ}\text{C}$), je vhodni signal (zunanja temperatura) filtriran s filtrom prvega reda s časovno konstanto 24ur .

2.3.3 Dobljeni parametri

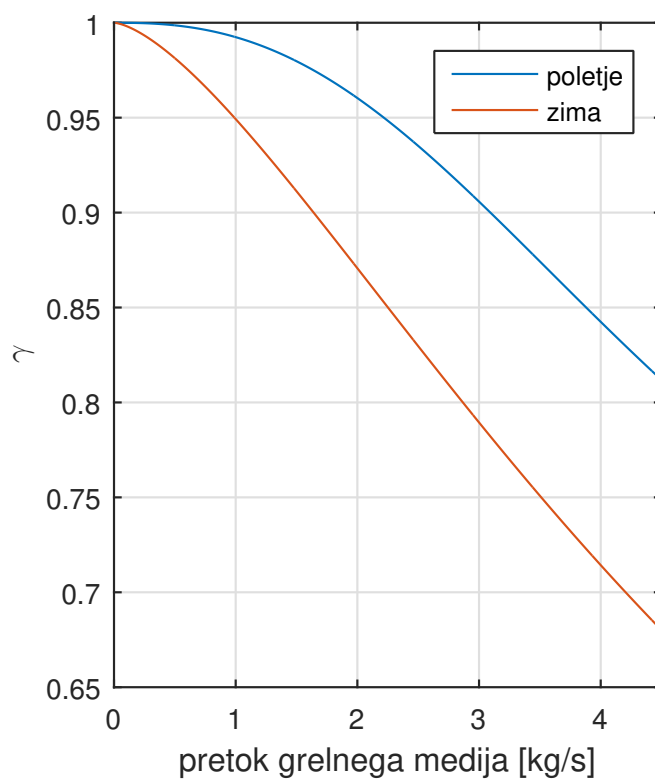
Tabele 2.4 - 2.9 podajajo dobljene parametre. Slike 2.10 - 2.13 pa prikazujejo poteke funkcije γ , pri različnih parametrih.

Parameter	Oznaka	Vrednost
najmanjši dovoljen pretok	$\dot{m}_{zrak,min}$	$0.5\frac{kg}{s}$
srednja temperatura poletnih parametrov	$T_{poletje}$	21°C
srednja temperatura zimskih parametrov	T_{zima}	5°C
standardna deviacija poletne temperature	$\sigma_{poletje}$	3°C
standardna deviacija zimske temperature	σ_{zima}	3°C

Tabela 2.4: Sistemski parametri.

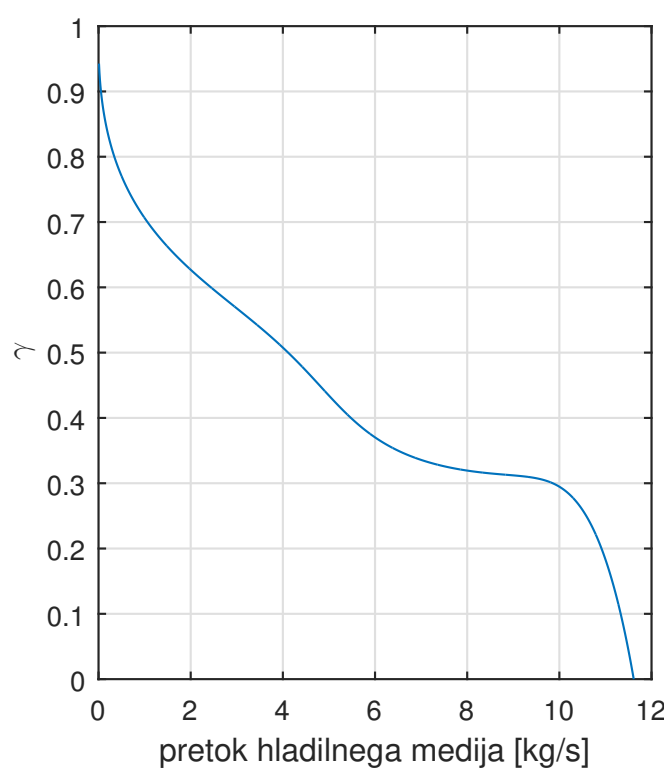
Parameter	Oznaka	Vrednost
minimalni pretok skozi grelec	$\dot{m}_{grelec,min}$	$0.01\frac{kg}{s}$
k grelca	k	100
poletni M	$M_{poletje}$	2.5
zimski M	M_{zima}	1.5

Tabela 2.5: Parametri grelca.

Slika 2.10: Oblika funkcije γ pri poletnih in zimskih parametrih grelca.

Parameter	Oznaka	Vrednost
najmanjši dovoljen pretok hladilnika	$\dot{m}_{hladilnik,min}$	$0,1 \frac{kg}{s}$
k	k	100
M	M	0.5
visoko-pretočni koeficient	VPK	$4e^{-13}$
spodnja meja intervalnega ojačenja	$\dot{m}_-$	5
zgornja meja intervalnega ojačenja	$\dot{m}_+$	10
zgostitev intervalnega ojačenja	Z	0.7
skaliranje intervalnega ojačenja	d	1
razvlaževanje: gostota	p_1	1.1
razvlaževanje: offset	p_0	9

Tabela 2.6: Parametri hladilnika.

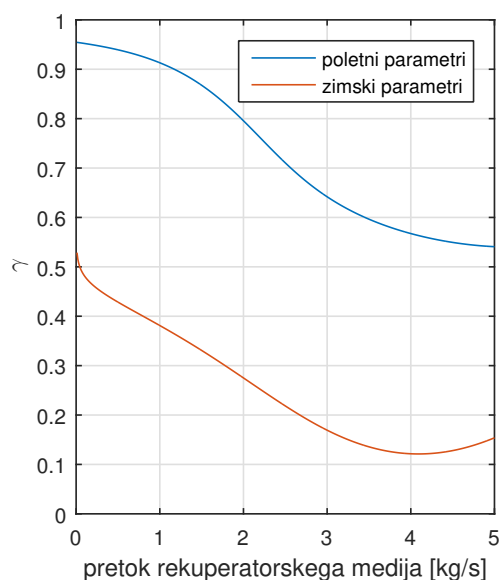
Slika 2.11: Oblika funkcije γ za hladilnik.

Parameter	Oznaka	Vrednost
najmanjši pretok v rekuperatorju	$\dot{m}_{rekuperator,min}$	$0.1 \frac{kg}{s}$
k grelca	k_{grelec}	100
poletni M grelca	$M_{grelec,poletje}$	3
zimski M grelca	$M_{grelec,zima}$	0.1
poletna zgostitev intervalnega ojačenja grelca	$Z_{poletje}$	1
zimska zgostitev intervalnega ojačenja grelca	Z_{zima}	0.5
poletna spodnja meja intervalnega ojačenja grelca	$\dot{m}_{-,poletje}$	2.2
zimska spodnja meja intervalnega ojačenja grelca	$\dot{m}_{-,zima}$	2.4
poletna zgornja meja intervalnega ojačenja grelca	$\dot{m}_{+,poletje}$	7
zimska zgornja meja intervalnega ojačenja grelca	$\dot{m}_{+,zima}$	5.75
poletno skaliranje intervalnega ojačenja grelca	$d_{poletje}$	1
zimsko skaliranje intervalnega ojačenja grelca	d_{zima}	0.29
k hladilnika	$k_{hladilnik}$	10000
M hladilnika	$M_{hladilnik}$	2.4
časovna konstanta glikolnih zalogovnikov	$\tau_{zalogovnik}$	500s
začetna temperatura glikola v zalogovnikih	$T_{glikol,0}$	273.15K

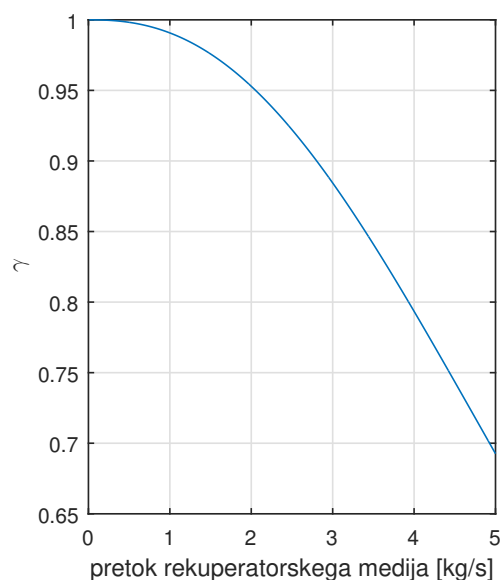
Tabela 2.7: Parametri rekuperatorja.

Parameter	Oznaka	Vrednost
Temperatura dovodne vode	$T_{vlazilec}$	$20^{\circ}C$
Volumen vlažilca	$V_{vlazilec}$	$(1,5m)^3$
Toplotna kapaciteta vlažilca	$C_{vlazilec}$	$4,0743 \frac{kJ}{K}$

Tabela 2.8: Parametri vlažilca.



Slika 2.12: Oblika funkcije γ za grelec v rekuperatorju pri poletnih in zimskih parametrih.



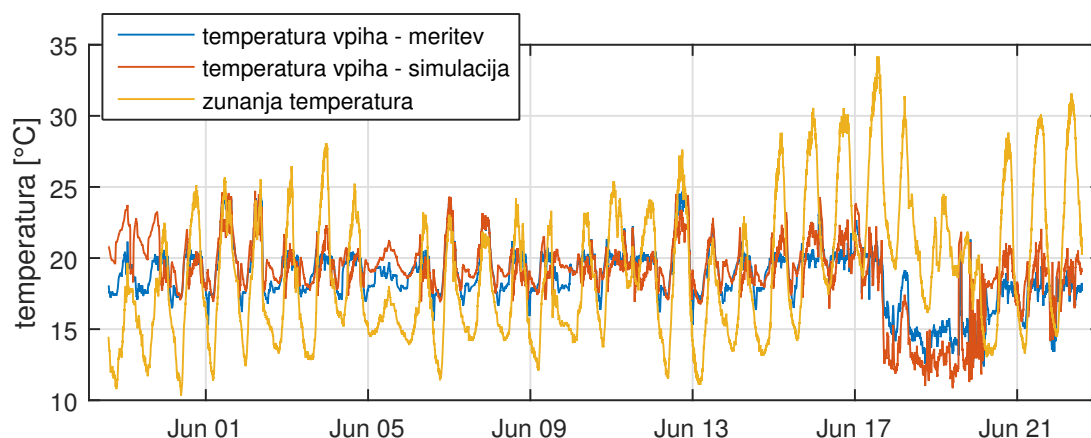
Slika 2.13: Oblika funkcije γ za hladilnik v rekuperatorju.

Parameter	Oznaka	Vrednost
časovna konstanta dovodnega ventilatorja	τ_{vpih}	10s
začetni pretok dovodnega ventilatorja	$\dot{m}_{vpih,0}$	$\frac{\dot{m}_{vpih,max}}{2}$
narast temperature na dovodnem ventilatorju	ΔT_{vpih}	1,3K
časovna konstanta odvodnega ventilatorja	τ_{odvod}	10s
začetni pretok odvodnega ventilatorja	$\dot{m}_{odvod,0}$	$\frac{\dot{m}_{odvod,max}}{2}$
narast temperature na odvodnem ventilatorju	ΔT_{odvod}	1.2K

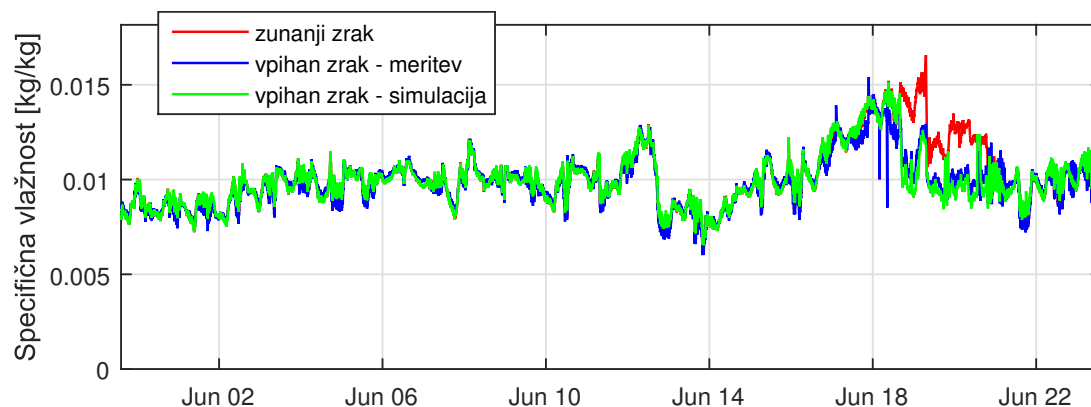
Tabela 2.9: Parametri ventilatorjev.

2.3.4 Rezultati

Spodnje slike prikazujejo primerjavo modela klimatskega sistema in meritev po posameznih mesecih. Model je vzbujaan z enakimi signali (temperature hladilnega in grelnega medija, odprtosti ventilov in črpalk, moči ventilatorjev, zunanje temperature in vlažnosti) kot realen sistem.



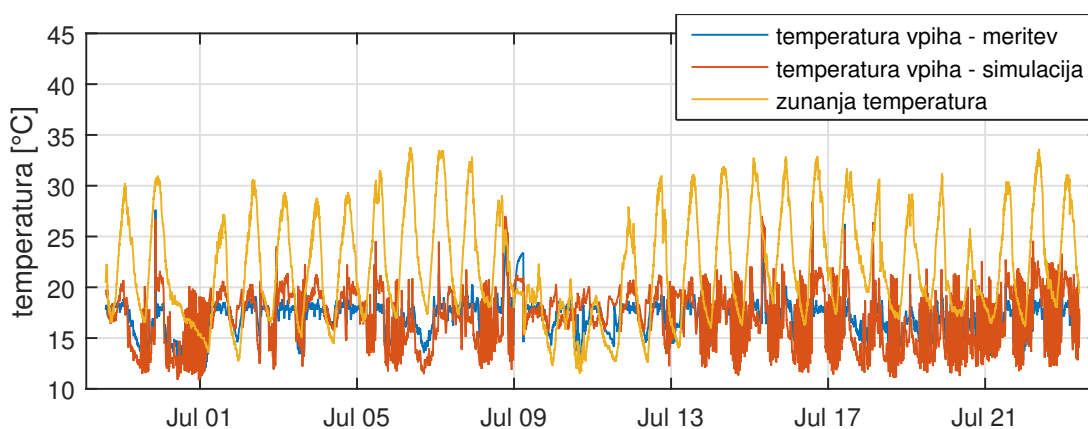
Slika 2.14: Primerjava temperature v juniju.



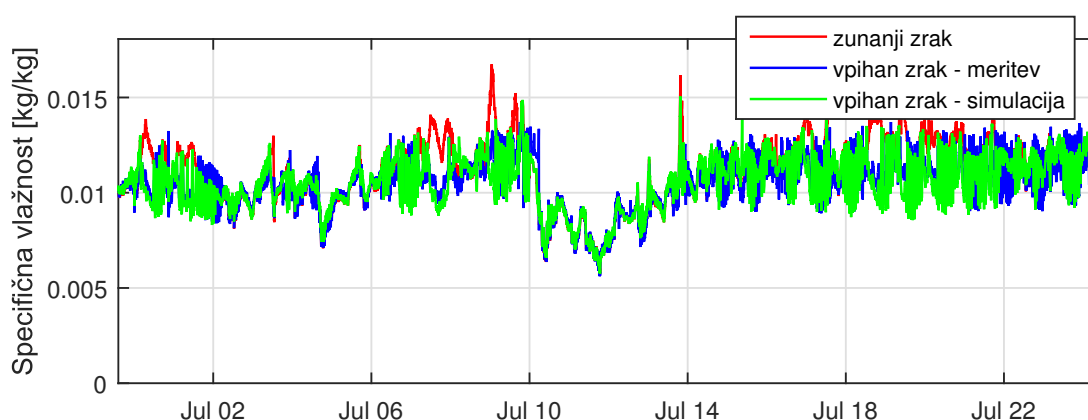
Slika 2.15: Primerjava vlažnosti v juniju.

Na sliki 2.14 je prikazano ujemanje temperature vpiha simuliranega modela ter ustrezne meritve na realnem sistemu. Ob upoštevanju, da je vhodna temperatura v simuliran sistem na grafu označena z 'zunanja temperatura', lahko trdimo, da je ujemanje po temperaturi v mesecu juniju zadovoljivo.

Slika 2.15 prikazuje specifično vlažnost vpihanega zraka v simuliranem modelu in izmerjene vrednosti. Večino opazovanega obdobja nista vključena niti vlažilec niti hladilnik, ki sta edina elementa, ki vplivata na spremembo specifične vlažnosti zraka opisanega klimatskega sistema. Edino obdobje, ko je opazna razlika med zunanjim zrakom (zajem) ter vpihanim zrakom, je v obdobju med 18. in 21. junijem. Tedaj pride do razvlaževanja. Opazno je zadovoljivo ujemanje modela in meritev.



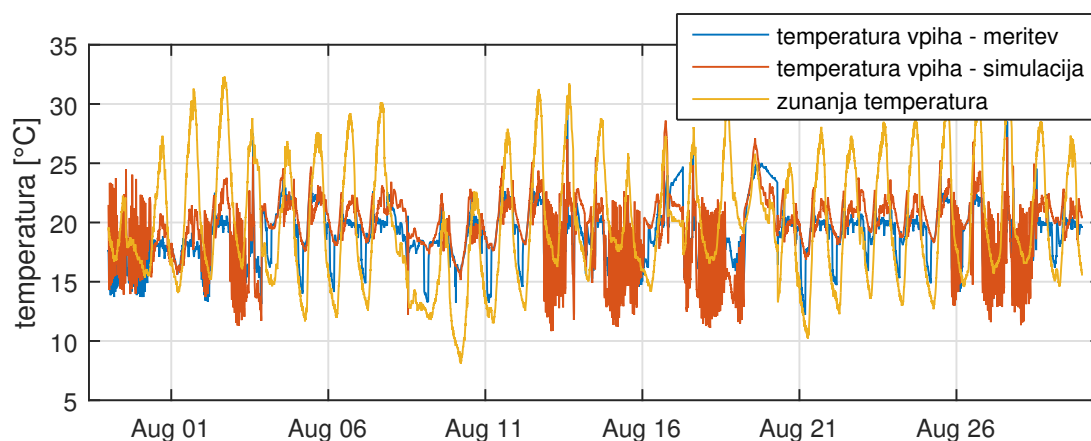
Slika 2.16: Primerjava temperature v juliju.



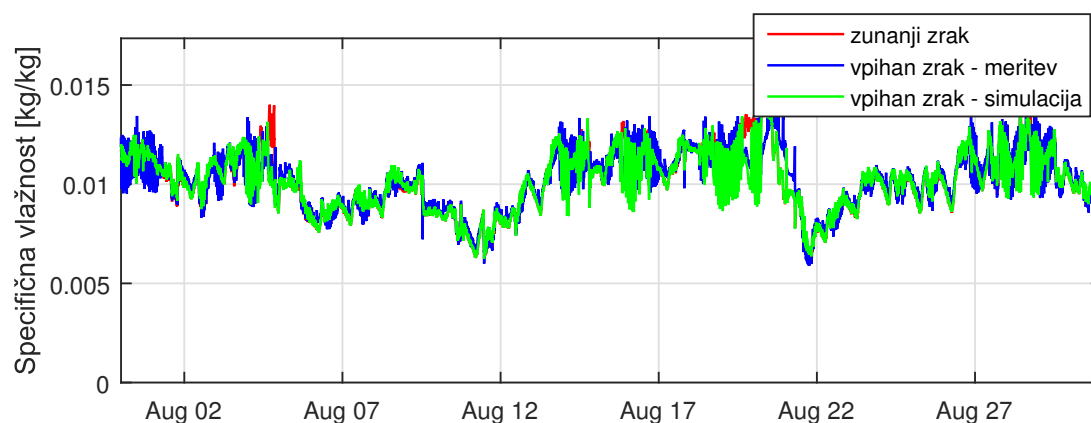
Slika 2.17: Primerjava vlažnosti v juliju

Na slikah 2.16 in 2.17 so opazna številna nihanja. Vzrok za ta nihanja so vzbujaalni signali, ki so enaki kot na realnem sistemu. Vseeno je z grafov o obdobjih, ko slike ne kvarijo nihanja, opazno dobro ujemanje merjenih ter simuliranih

temperatur vpiha. Enako je s specifično vlažnostjo, kjer velja enak komentar kot za mesec junij. Večino časa vlažnost na vpihu sledi vlažnosti na zajemu zraka ('zunanji zrak'). V obdobjih, kjer pride do izraza vpliv razvlaževanja, je opazno dobro ujemanje med modelom in realnim sistemom.



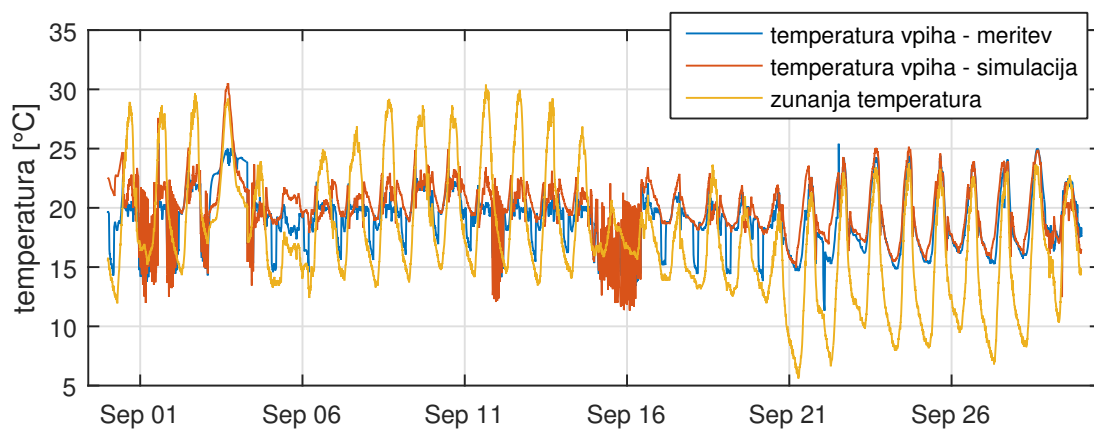
Slika 2.18: Primerjava temperature v avgustu.



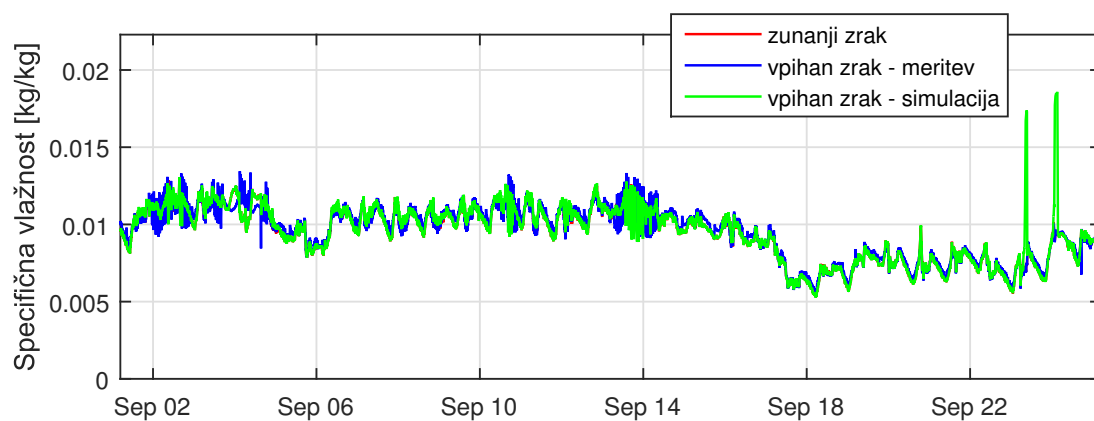
Slika 2.19: Primerjava vlažnosti v avgust.

Analiza dogajanja za mesec avgust (sliki 2.18 in 2.19) ter september (sliki 2.20 in 2.21), ponovno pokaže dobro ujemanje tako po vlažnosti kot temperaturi. Opazni pa so periodični izklopi klimatskega sistema, ki se jih ne da pojasniti iz pridobljenih meritev.

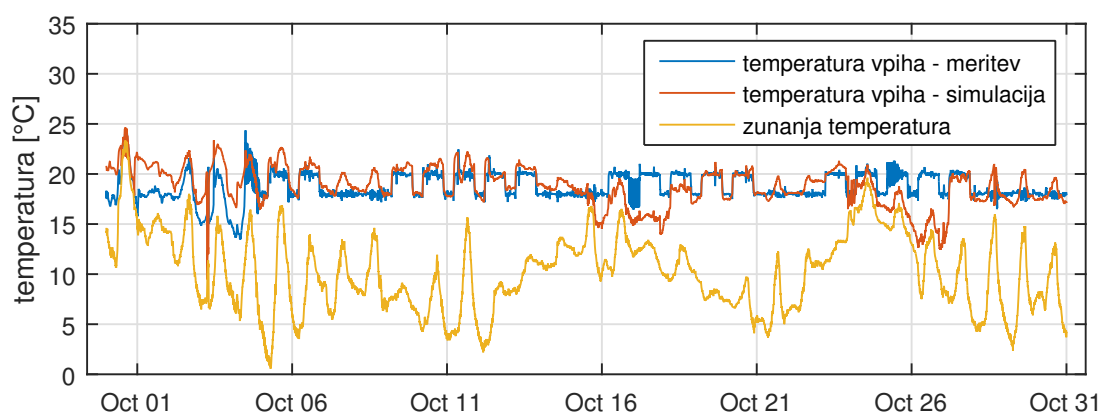
Sliki 2.22 in 2.24, ki predstavljata primerjavo temperature za oktober in no-



Slika 2.20: Primerjava temperature v septembru.



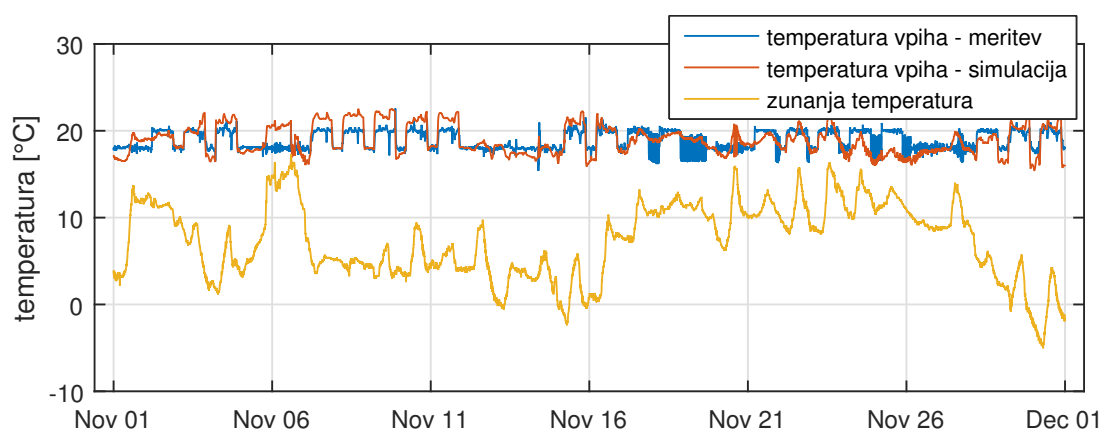
Slika 2.21: Primerjava vlažnosti v septembru.



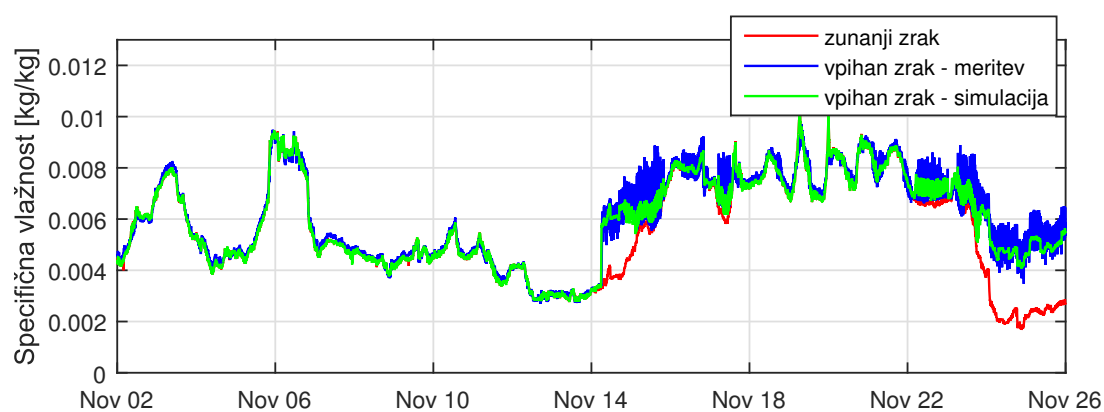
Slika 2.22: Primerjava temperature v oktobru.



Slika 2.23: Primerjava vlažnosti v oktobru.



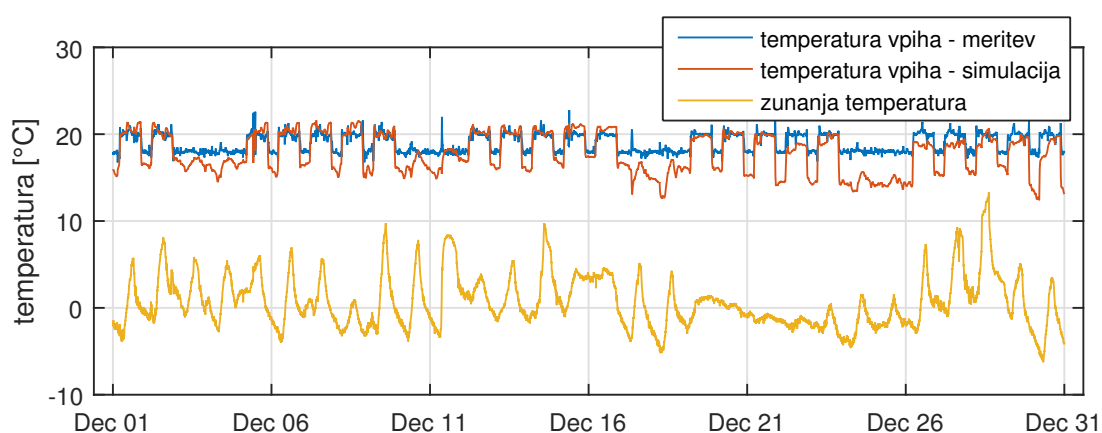
Slika 2.24: Primerjava temperature v novembru.



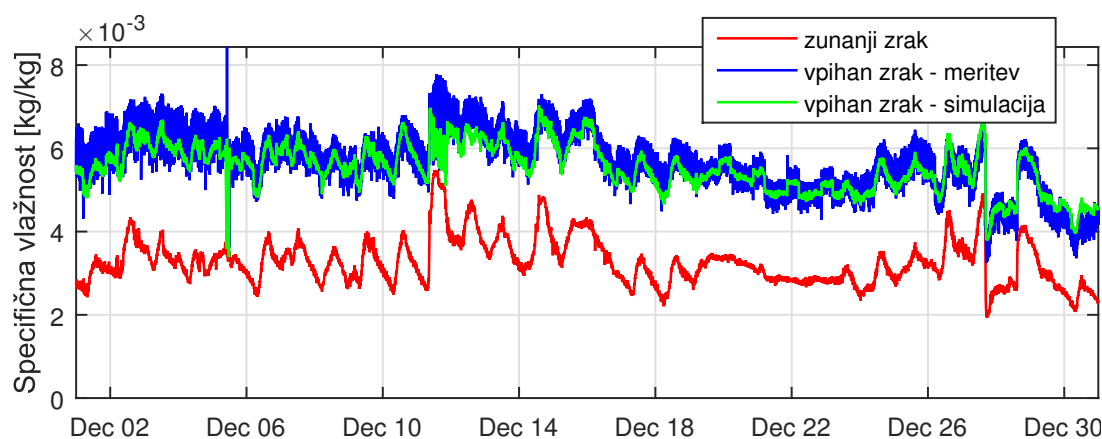
Slika 2.25: Primerjava vlažnosti v novembru.

vember, prikazujeta relativno dobro ujemanje med modelom in realnim sistemom. Potrebno je poudariti, da model izračunava prirast temperature (ΔT). Ta se z nižanjem zunanje temperature povečuje. Odstopanja med modelom in meritvami je potrebno gledati skozi oči razmerja med napako ter celotnim ΔT .

Z vidika specifične vlažnosti je za oba meseca (sliki 2.23 in 2.25) ujemanje zelo dobro.



Slika 2.26: Primerjava temperature v decembru.



Slika 2.27: Primerjava vlažnosti v decembru.

V decembru so opazna absolutno večja odstopanja med simulirano in merjeno temperaturo vpiha (slika 2.26), vendar je napaka ob upoštevanju celotnega ΔT

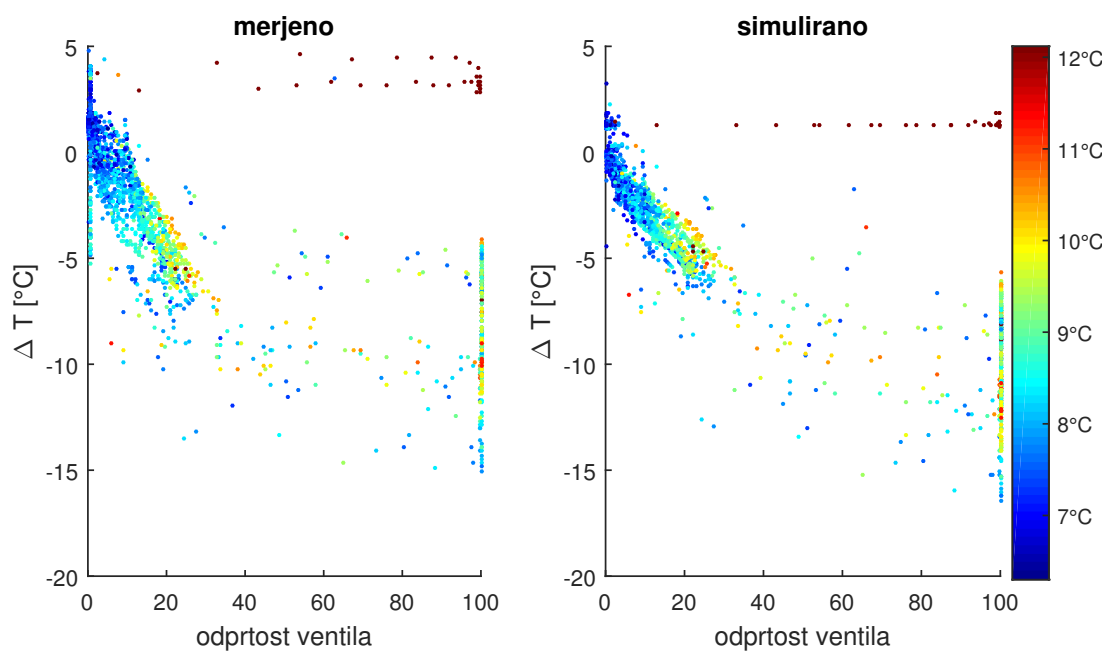
sprejemljiva. Z vidika vlažnosti je v celotnem mesecu opazen vpliv vlažilca, ki je po rezultatih sodeč (slika 2.27) v modelu pravilno modeliran.

2.3.5 Primerjava v različnih načinih delovanja

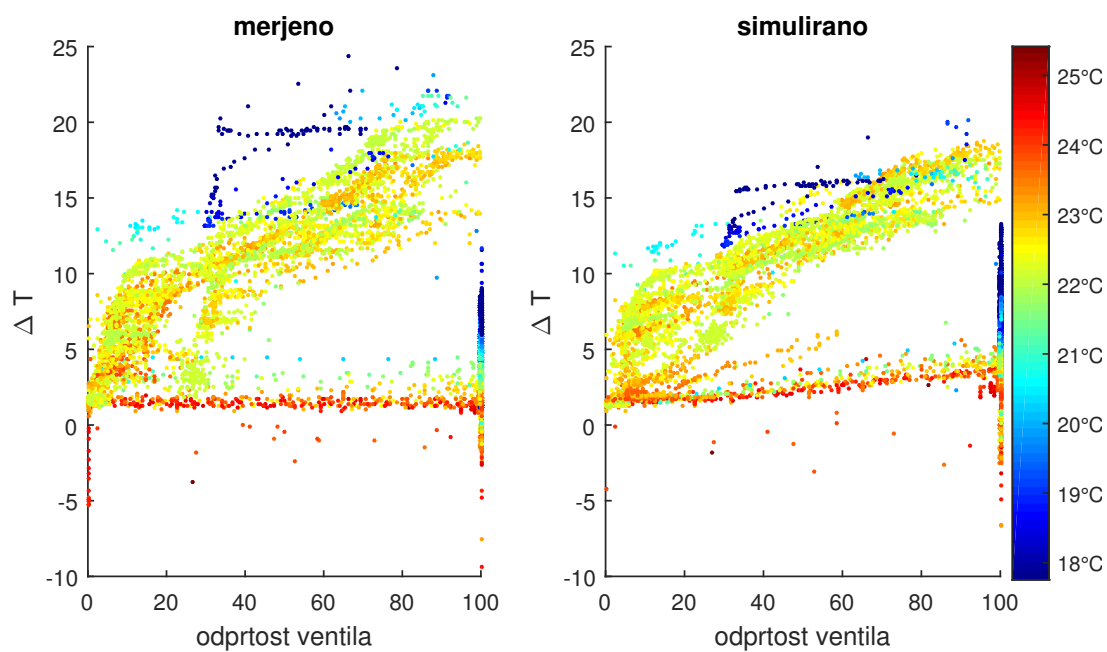
Kot je razvidno iz specifikacij, sistem obratuje v treh načinih delovanja: hlajenje, rekuperacija in gretje. V prvem načinu (hlajenje) je prižgan (ventil > 0 %) le hladilnik, grelec in rekuperator sta ugasnjena (ventila oba na 0 %). Drugi način delovanja je rekuperacija, ko vse delo opravlja le rekuperator, hladilnik in grelec pa imata zaprta ventila. V zadnjem načinu delovanja (gretje), je hladilnik ugasnjen, rekuperator na 100 %, ventil grelca pa se giblje med 0 in 100 %.

Primerjava med modelom in dejanskimi meritvami je predstavljena na slikah 2.28 – 2.30. Grafi prikazujejo temperaturno razliko med vhodnim (zunanjim) in izhodnim (vpihanim) zrakom (ΔT) v odvisnosti od odprtosti ventila. Vsaka točka predstavlja en časovni trenutek, čas vzorčenja za prikazane grafe je 10 minut. Barva točke predstavlja temperaturo (grelnega, hladilnega ali rekuperatorskega) medija.

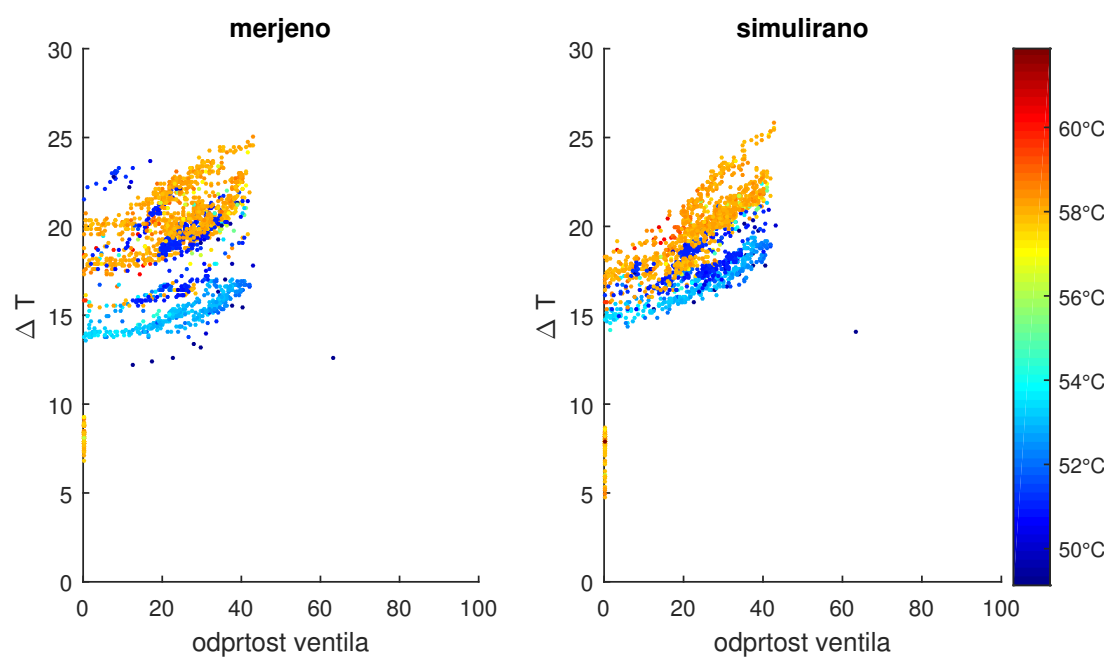
Z grafov je opazno zadovoljivo ujemanje.



Slika 2.28: Primerjava hlajenja med meritvami in modelom.



Slika 2.29: Primerjava rekuperacije med meritvami in modelom.

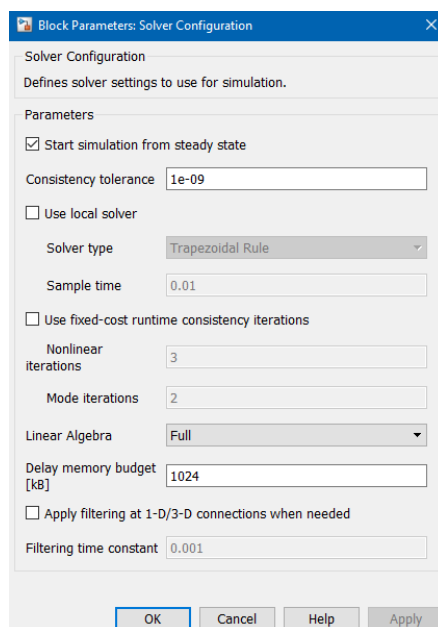


Slika 2.30: Primerjava gretja med meritvami in modelom.

2.3.6 Simulacijske nastavitve

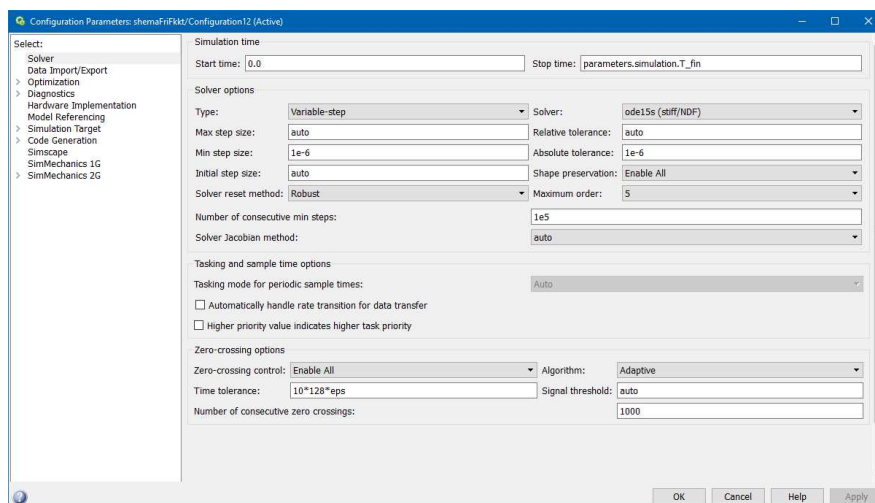
Za obnašanje modelov je pomembna tudi pravilna izbira simulacijskih nastavitev. Zato so v tem poglavju podane simulacijske nastavitve. Pri uporabi Simscape modela se ločeno nastavlja nastavitve Simscape *solverja* in Simulink simulacijske nastavitve.

Simscape solver. Nastavitve Simscape solverja prikazuje slika 2.31.

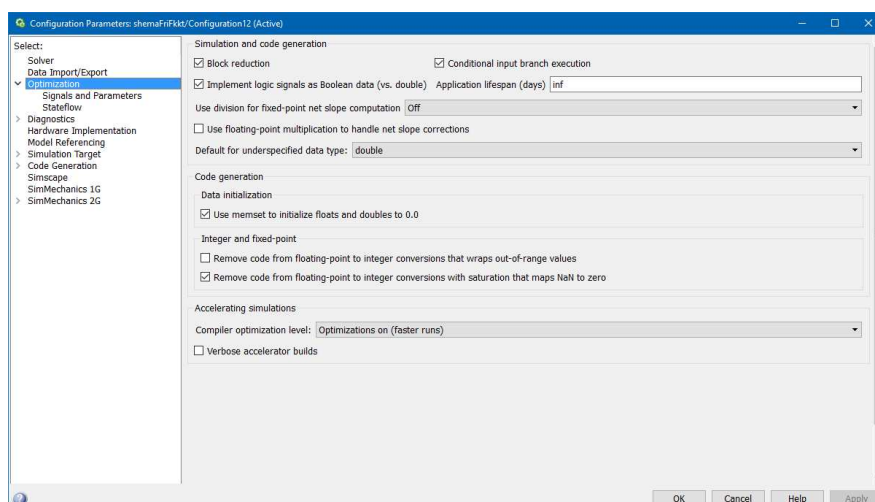


Slika 2.31: Nastavitve Simscape solverja.

Simulink nastavitve. Izbrana je integracijska metoda ODE15s, ki je primerna za Simscape modele [13]. Določen je minimalni korak simulacije $10^{-6}s$ in absolutna toleranca 10^{-6} . Vključena je detekcija prehodov ničle (ang. *zero-crossing detection*) in izbran adaptivni algoritem. Ostale nastavitve prikazujeta sliki 2.32 in 2.33.



Slika 2.32: Nastavitve Simulink solverja.



Slika 2.33: Nastavitve optimizacije v Simulink shemi.

2.3.7 Filtriranje in priprava signalov

Nekateri signali so v Simulink shemi filtrirani. S filtrom 2. reda (obe časovni konstanti sta 100 sekund) so filtrirani: pretok v rekuperatorju, pretok v hladilniku in vrtiljaji ventilatorja na odvodni strani.

Vsi signali, s katerimi vzbujaemo naš model (meritve signalov na realnem sistemu) – odprtosti ventilov, temperatura in vlažnost zunanjega zraka, temperatura

grelne in hladilne tekočine itd.), imajo izklopljeno interpolacijo.

2.3.8 Znane pomanjkljivosti modela

Predstavljen model ima nekaj pomanjkljivosti:

- počasna simulacija;
- razvlaževanje v modelu nima dobrega fizikalnega ozadja, a simulacijski rezultati se dobro ujemajo z meritvami;
- slabo ujemanje prehodnega pojava;
- slabo ujemanje pri ugasnjenem sistemu;
- temperatura vodne pare, ki prehaja v zrak preko vlažilca, je neznana – v modelu je predpostavljena temperatura 20 °C;
- slabo ujemanje temperature medija v rekuperatorju.

2.4 Zaprtozančno prileganje modela

2.4.1 Regulacija na klimatskem sistemu

Na realnem sistemu je realizirano vodenje, slika 2.34 prikazuje okvirno zasnovo regulacijskega algoritma. Opaznih je osem regulatorjev. Na vsakem regulatorju sta vpisana dva parametra - K_p in $\frac{1}{T_i}$, kar nakazuje, da gre za proporcionalno-integrirne (PI) regulatorje. Vsak regulator ima dva vhoda – PV (vrednost procesne spremenljivke – npr. trenutna temperatura vpiha) ter SP (referenčna vrednost). Na desni strani regulatorja vidimo izhod CV (regulirni signal) ter tri polja. Spodnji dve polji označujeta zgornjo in spodnjo mejo regulirnega signala. Zadnje polje na desni strani regulatorja zgoraj predstavlja 'optimalno' vrednost regulirnega signala – to je vrednost, ki jo regulator daje na izhod CV v primeru izpada senzorja (vrednosti PV) na vhodu.

ostane ventil rekuperatorja povsem odprt, začne pa se odpirati še ventil grelca. Pri vходу 100 % tudi grelec deluje s polno zmogljivostjo.

Razlaga regulacijske strukture. Regulacija se razdeli na tri dele: pretok, temperatura in vlažnost, ki pa se med seboj prepletajo.

Dva regulatorja skrbita za regulacijo kanalskega tlaka na vpihu in odvodu zraka iz klimatskega sistema. V praksi to pomeni, da skrbita za ustrezen pretok zraka v sistemu. V predstavljenem modelu je tlak v vseh elementih zanemarljiv, zato regulacija kanalskega tlaka za nas ni pomembna.

Regulaciji temperature in vlažnosti delujeta s po dvema referencama. Skupaj referenci določata minimalno in maksimalno dopustno vrednost procesne veličine.

Regulacija temperature. Izvedena je z dvema regulatorjema ter uporabo delilnika.

Regulacija vlage. Ta je razdeljena na dva dela – vlaženje in razvlaževanje. Obe regulaciji sta kaskadni. Referenci prvih regulatorjev se nanašata na vlažnost na odvodu (ponovno referenci oblikujeta pas – najvišjo in najnižjo zaželeno vlažnost). Izhoda iz prvih regulatorjev predstavljata referenčno vrednost za vlažnost na vpihu, to predstavlja referenci za drugi par regulatorjev (ponovno eden za vlaženje in eden za razvlaževanje).

2.4.2 Simulirano delovanje zaprte zanke

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati regulacije temperature in vlažnosti. Priказana je tudi primerjava med vodenjem na realnem sistemu in simulacijo.

Za namen izvedbe zaprtozančnega vodenja simuliranega sistema smo preizkusili dva tipa PI regulatorja – zveznega in diskretnega. Izkaže se, da najboljše uje-manje z realnim sistemom dobimo z diskretnim PI regulatorjem s časom vzorčenja 10 sekund.

Pri primerjavi regulacije vlažnosti opazujemo vlago na vpihu. Pomembno je, da sta referenčni meji za vlago na vpihu že sami predmet simulacije – predstavljata izhoda dveh regulatorjev. Prvi cilj pri regulaciji vlažnosti je ujemanje referenčnih pasov (merjenega na napravi in simuliranega).

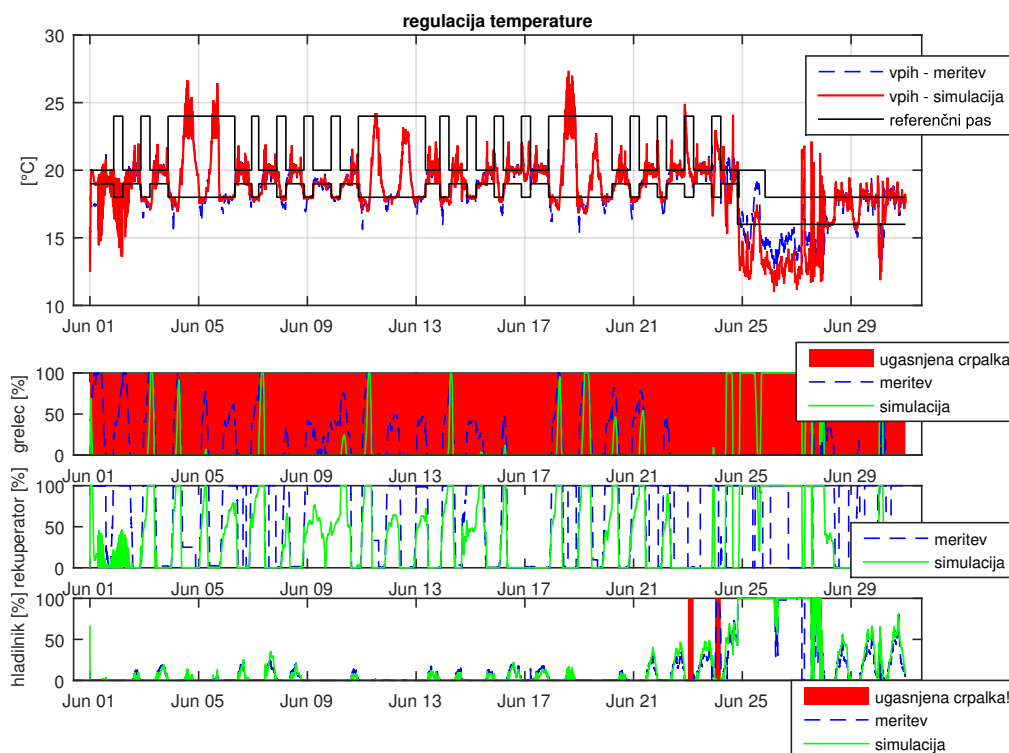
Druga stopnja ujemanja so regulirni signali, ki vplivajo na vlažnost. To sta v odprtosti ventilov hladilnika in vlažilca. Odprtost ventila vlažilca predstavlja izhod enega od regulatorjev, na delovanje hladilnika pa vpliva tudi regulacija temperature. Pri regulirnem signalu za hladilnik so z rdečim pasom na grafu označeni časovni trenutki, ko je črpalka hladilnika izklopljena. Velja opozoriti, da signal za vklop/izklop črpalke ni bil del regulacije v predstavljenem zaprto zračnem sistemu in je obravnavan kot podan signal.

Končna signala, ki se morata ujemati, sta vlažnosti na vpihu – izmerjena in simulirana. Vsi ti signali so v nadaljevanju prikazani po posameznih mesecih. Pri tem velja omeniti, da je na začetku meseca pričakovano odstopanje med simuliranim in realnim obnašanjem, saj je simuliran sistem (tako regulacija kot model procesa) še v prehodnem pojavu.

Pri primerjavi regulacije temperature se opazuje temperatura na vpihu. Za razliko od regulacije vlažnosti sta tukaj referenčni meji neposredno podani. Na istem grafu kot referenčni meji sta prikazani še merjena in simulirana temperatura na vpihu.

Poleg grafa referenc in reguliranih veličin so prikazani še trije grafi, ki prikazujejo regulirne signale – odprtosti ventilov grelca, rekuperatorja ter hladilnika. Na grafih za odprtosti ventilov grelca ter hladilnika so označeni tudi trenutki, ko je ugasnjena katera od črpalk (hladilnega ali grelnega) medija.

Junij. V veliki meri se simulirana regulacija temperature ujema z delovanjem realnega sistema (slika 2.35), razlike pa so opazne predvsem v (na trenutke) bolj oscilatornem delovanju (na primer 18. junij – slika 2.36). Ugotovimo, da je to posledica slabšega ujemanja prehodnega pojava med modelom in resničnim

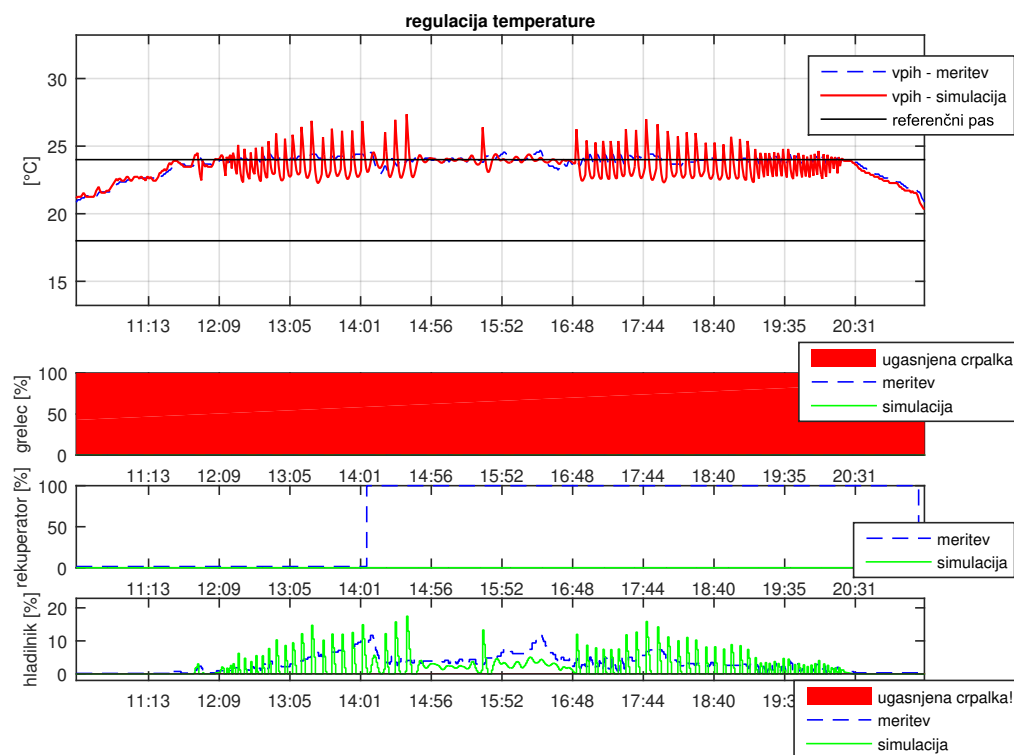


Slika 2.35: Regulacija temperature – junij.

sistemom. Predstavljeni model je nekoliko hitrejši in se na hitro spreminjajoče se vzbujalne signale odzove bolj burno kot realna naprava. V povratni zanki (z regulatorjem, ki ni načrtovan za tako obnašanje) se lahko ta pojav še okrepi, kot je to vidno na sliki 2.36.

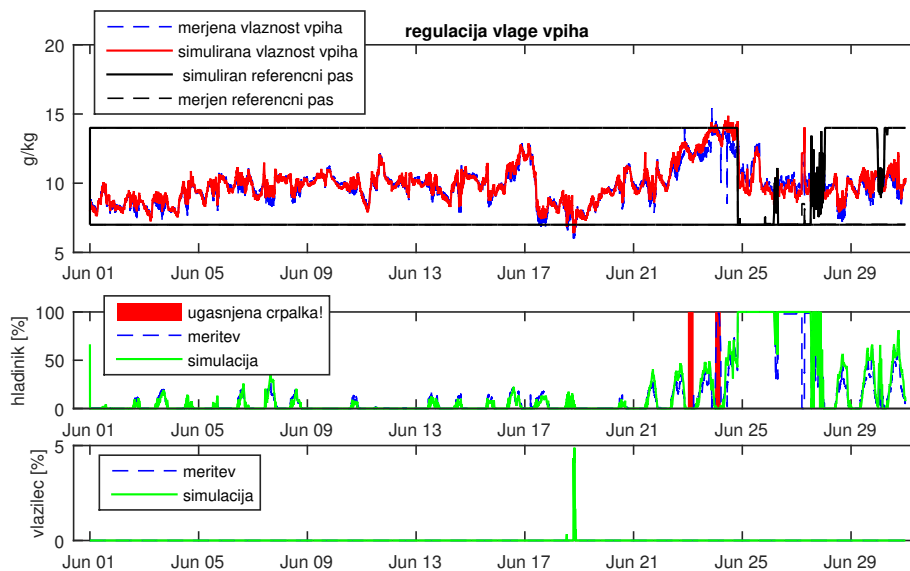
Na sliki 2.37 se opazi, da v začetnem obdobju (do 25. junija) regulirana vlažnost na vpihu ostane znotraj referenčnega pasu. V tem obdobju se simulirana specifična vlažnost tudi ustrezno ujema z izmerjeno.

V obdobju od 25. do 28. junija (slika 2.38) se je, tako kot tudi na realnem sistemu, spremenila širina referenčnega pasu. Vzrok za to je prikazan na sliki 2.39 – spremenila se je referenčna vlažnost na odvodu zraka (levi graf na sliki 2.39). Izmerjena vlažnost na odvodu je s tem postala previsoka. Zaradi strukture algoritma vodenja (kaskadna regulacija) se je spremenila referenčna vlažnost na

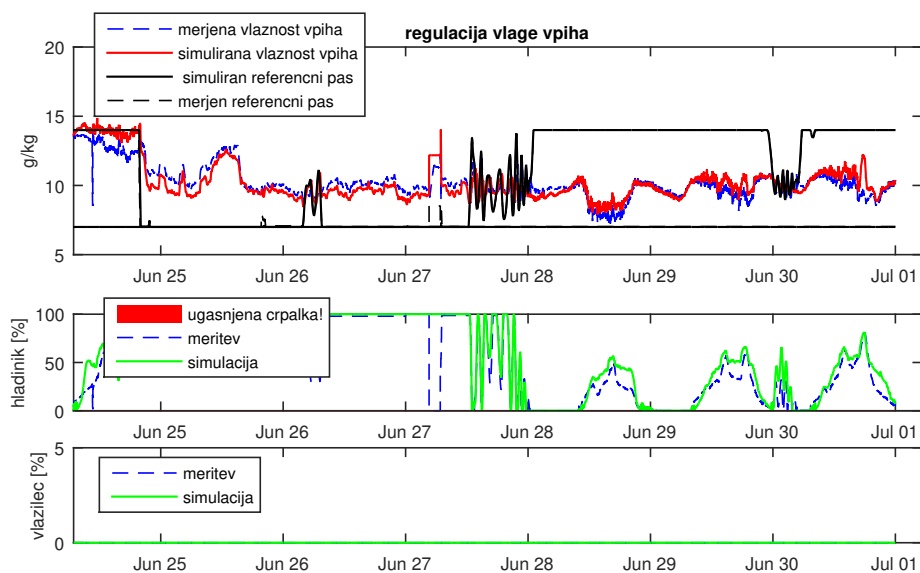


Slika 2.36: Regulacija temperature – oscilatorno delovanje 18. junij.

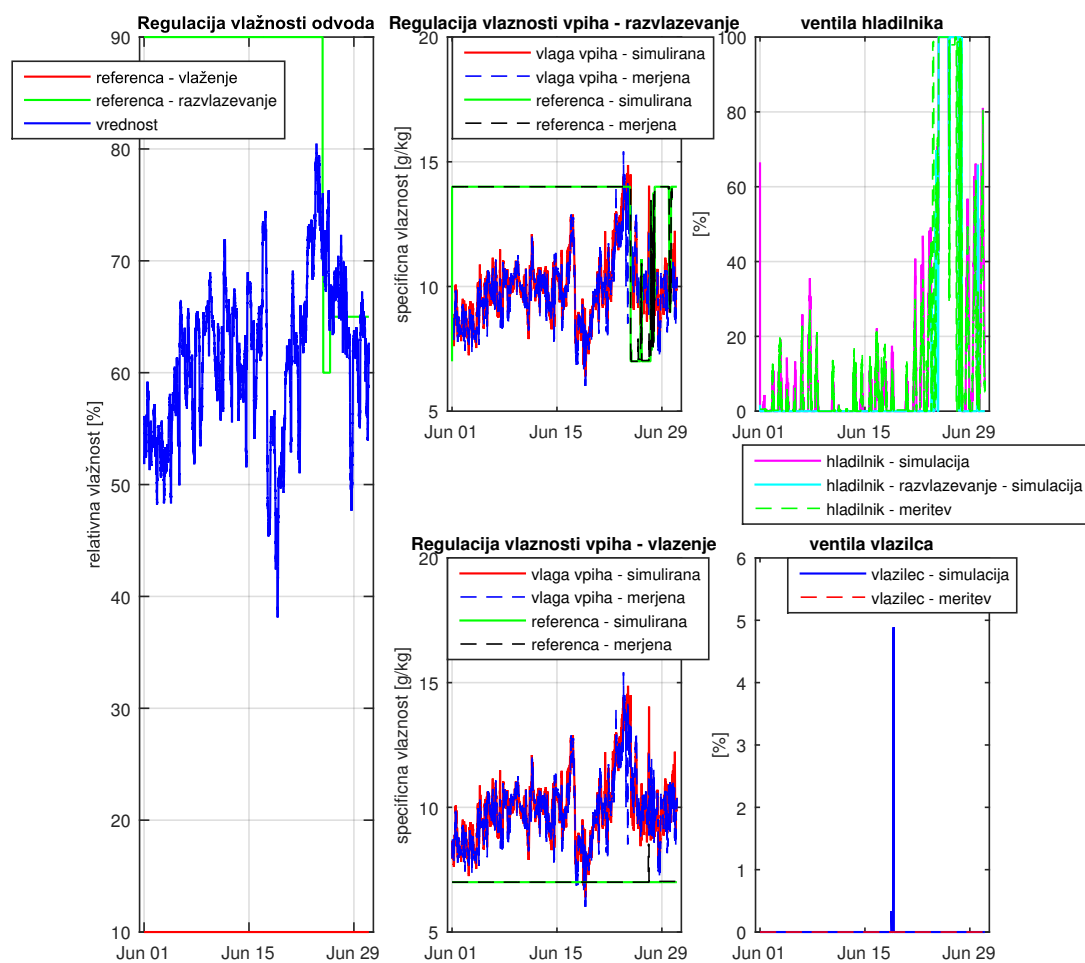
vpihu (srednji graf zgoraj na sliki 2.39). Na previsoko vlažnost zraka na vpihu se je regulator odzval s hlajenjem zraka. Vlažnost na vpihu (zgornji srednji graf na sliki 2.39 in zgornji graf na 2.38) se zniža, a ne doseže želene vrednosti.



Slika 2.37: Regulacija vlage – junij.

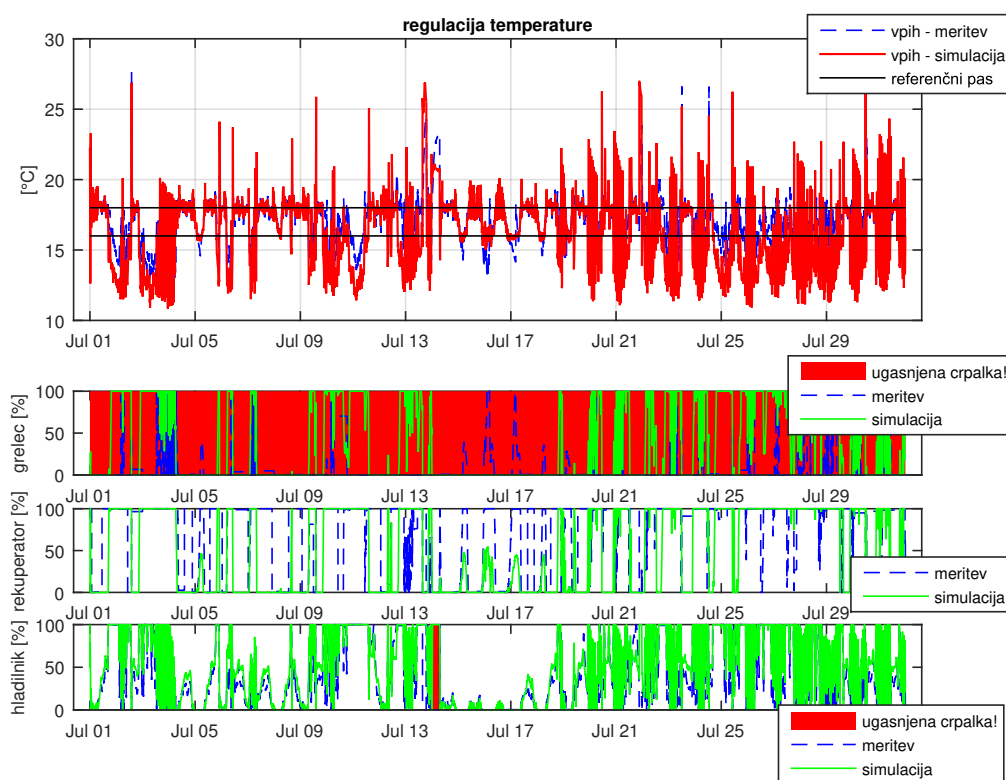


Slika 2.38: Regulacija vlage – 25.–28. junij.

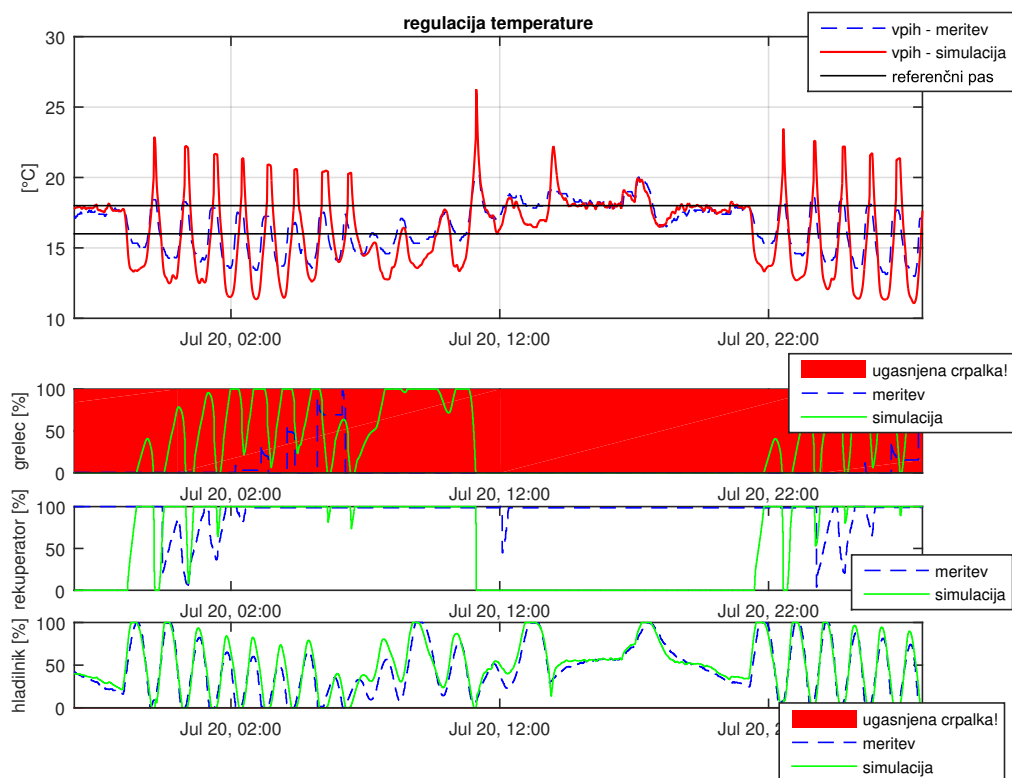


Slika 2.39: Regulacija vlage – 25.–28. junij – podroben pogled v delovanje regulatorjev.

Julij in avgust. Regulacijo temperature na vpihu za mesec julij prikazuje slika 2.40. Regulacija je opazno slabša, kot je bila v mesecu juniju. Referenčni meji sta v tem obdobju konstantni in široki dve stopinji Celzija. V celotnem prikazanem obdobju, najbolj pa v drugi polovici meseca, lahko opazimo oscilacije, ki jih bolj podrobno prikazuje slika 2.41.

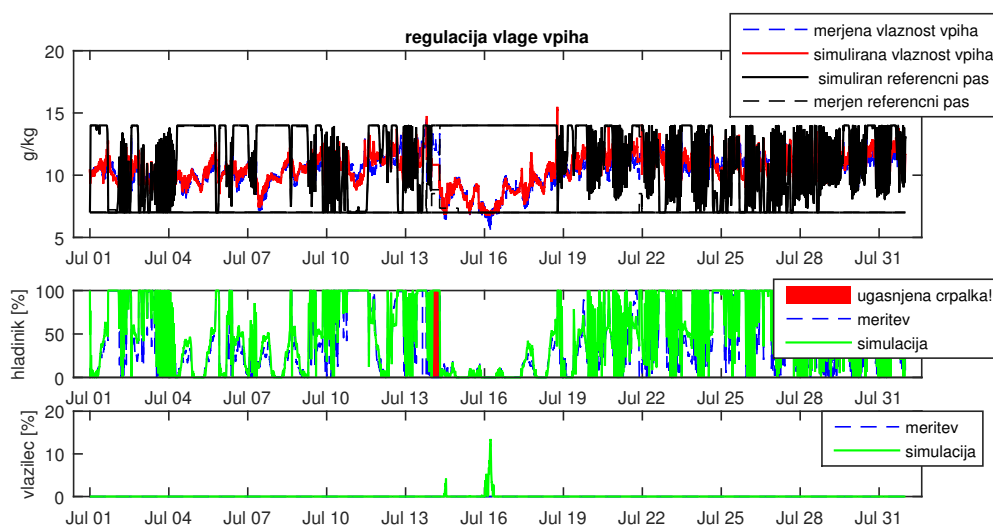


Slika 2.40: Regulacija temperature – julij.

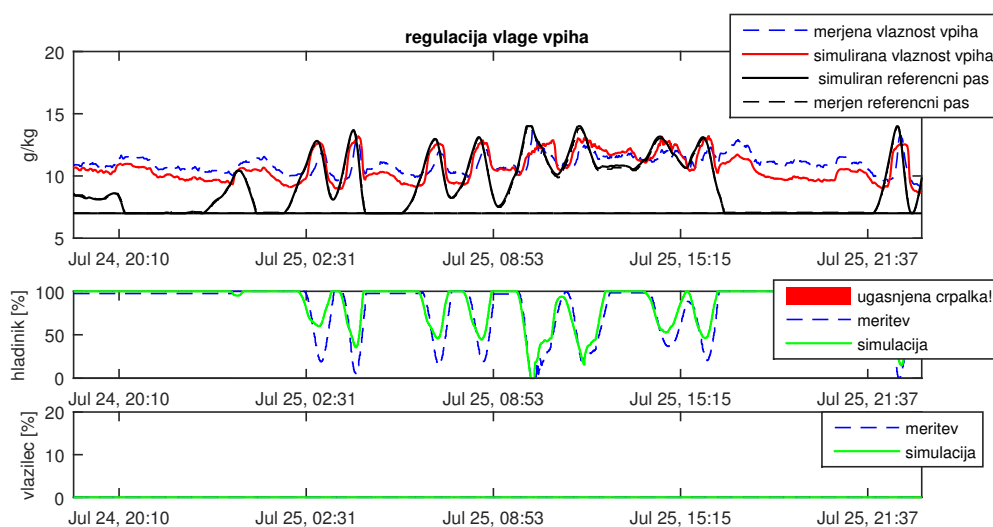


Slika 2.41: Regulacija temperature – primer oscilacij v juliju.

Slika 2.42 prikazuje regulacijo vlage vpiha v juliju. Opazne so pogoste spremembe zgornje meje referenčnega pasu. Podrobnejši pogled (slika 2.43) razkrije, da do istega pojava pride tudi na realni napravi, kar kaže, da je naš zaprtozančni sistem zelo podoben realnemu.

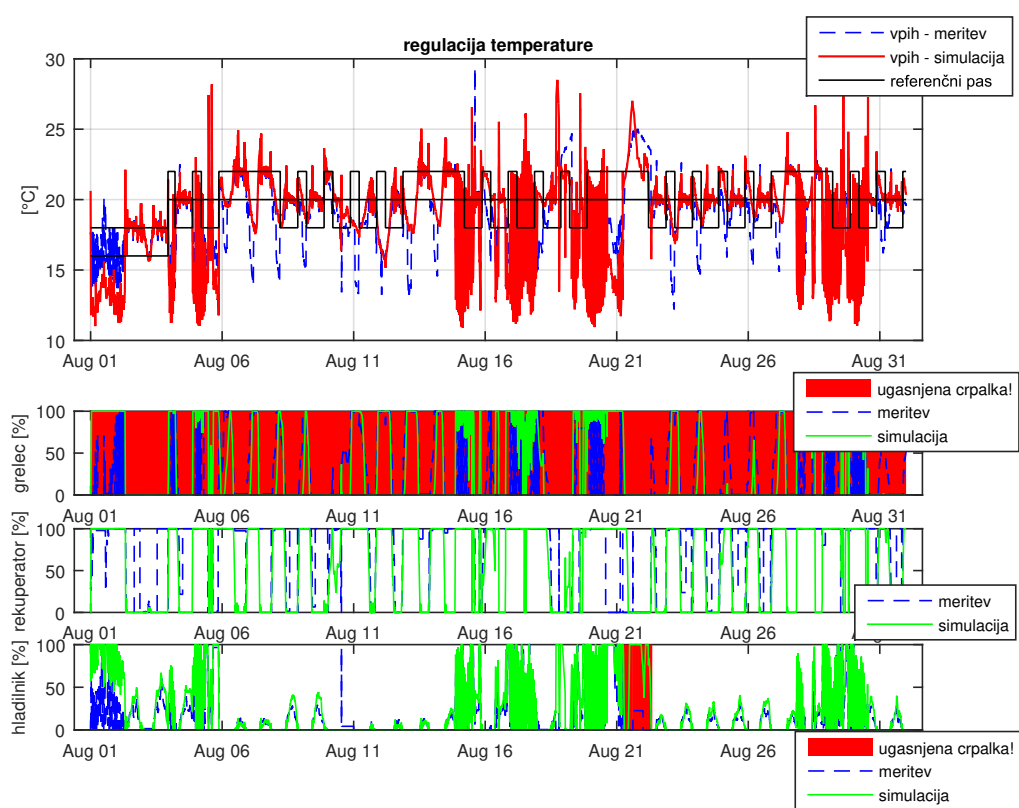


Slika 2.42: Regulacija vlage – julij.

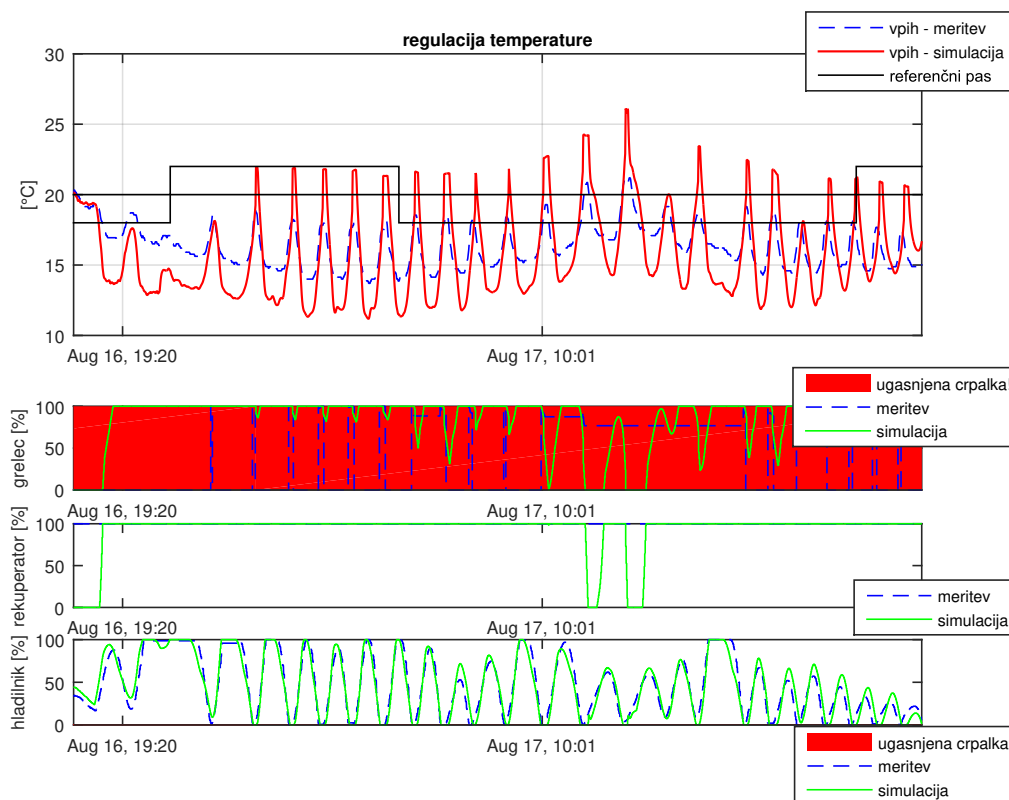


Slika 2.43: Regulacija vlage – stanjšanje referenčnega pasu.

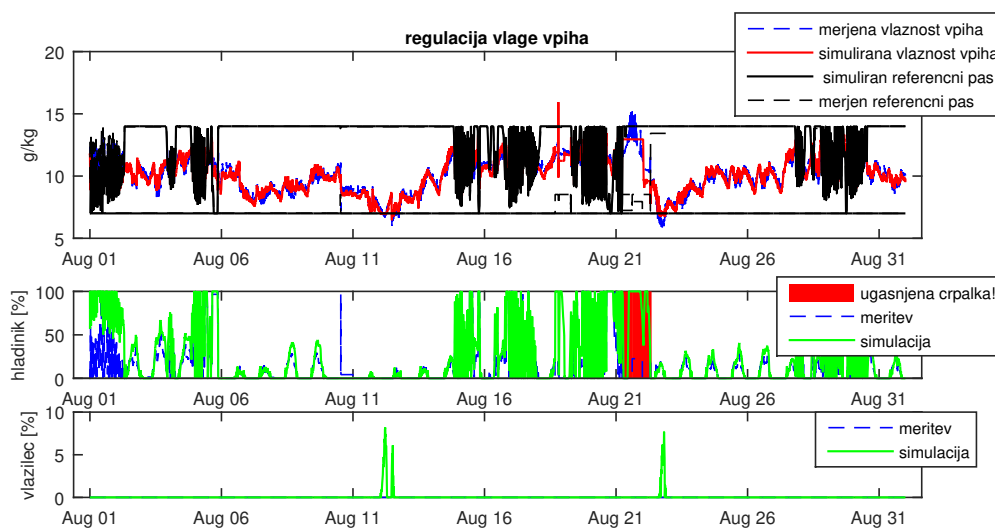
Slike 2.44, 2.45 in 2.46 prikazujejo delovanje regulacije temperature ter regulacije vlažnosti v avgustu. Ugotovitve so enake kot za mesec julij.



Slika 2.44: Regulacija temperature – avgust.

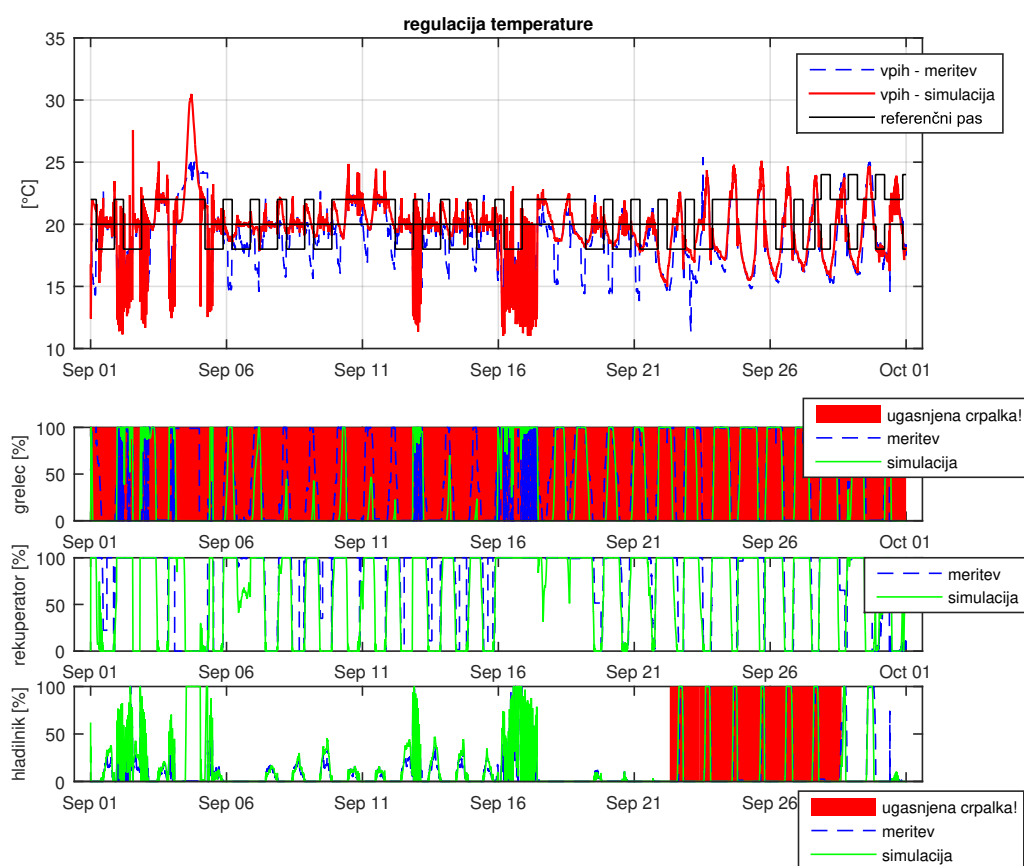


Slika 2.45: Regulacija temperature – primer oscilacij v avgustu.



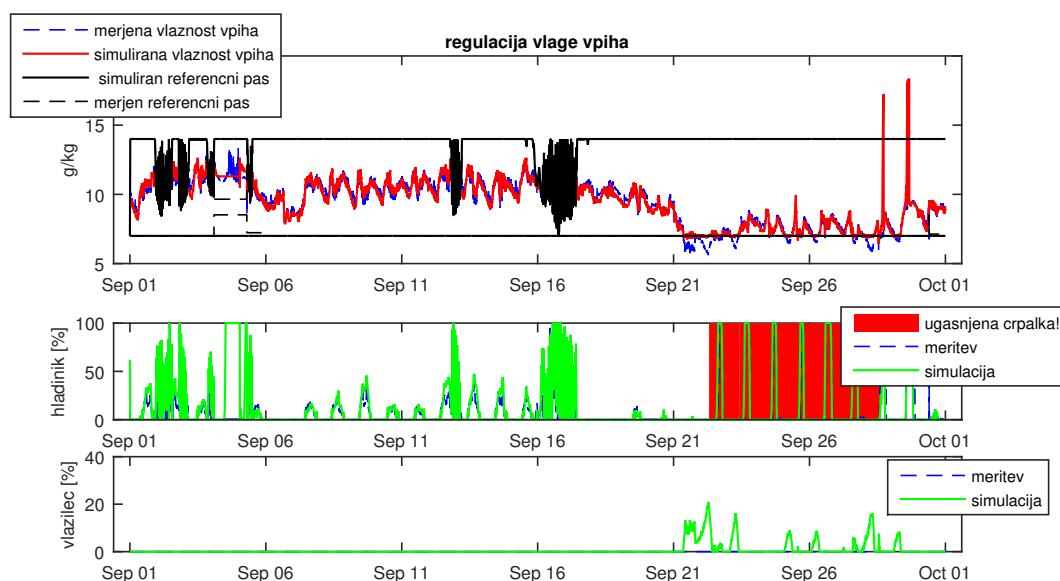
Slika 2.46: Regulacija vlage – avgust.

September. Septembra se z vidika regulacije temperature (slika 2.47) nadaljuje delovanje, ki ga je bilo opaziti v juliju in avgustu, le da je število pojavov oscilacij manjše.

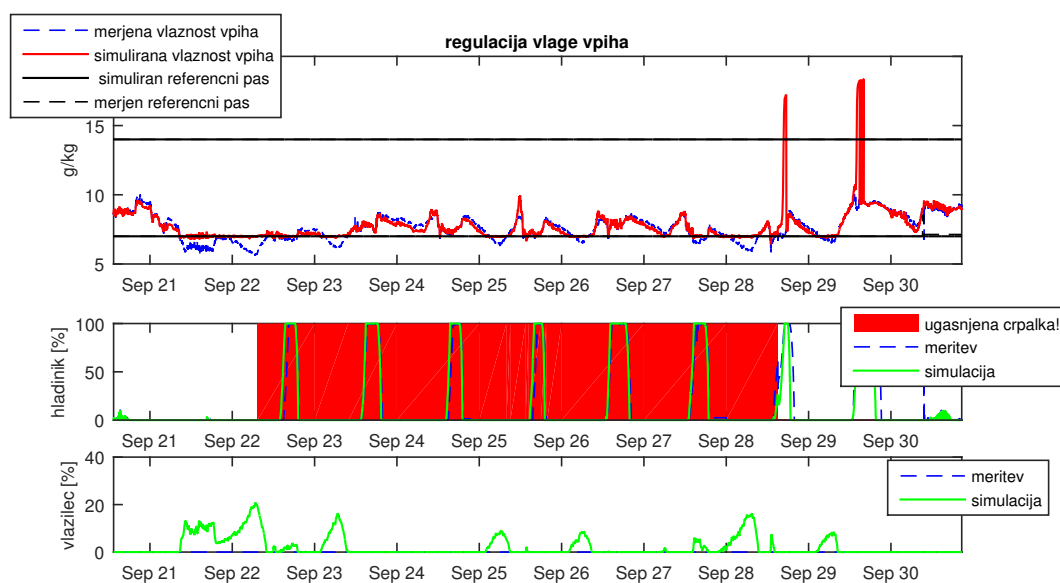


Slika 2.47: Regulacija temperature – september.

Z vidika vlažnosti (slika 2.48) konec septembra opazimo zanimiv pojav, ki je podrobneje prikazan na sliki 2.49. Opazno je, da se merjena vlažnost (črtkana modra črta) spusti pod vrednost reference. To bi na merjenem sistemu moralo izzvati vklop vlažilca. Ravno to se zgodi na simuliranem sistemu (vklop vlažilca) in zato vlažnost vpiha nikoli znatno ne pade pod spodnjo referenčno mejo. Iz meritev ni razvidno, da bi na realnem sistemu prišlo do vklopa vlažilca.



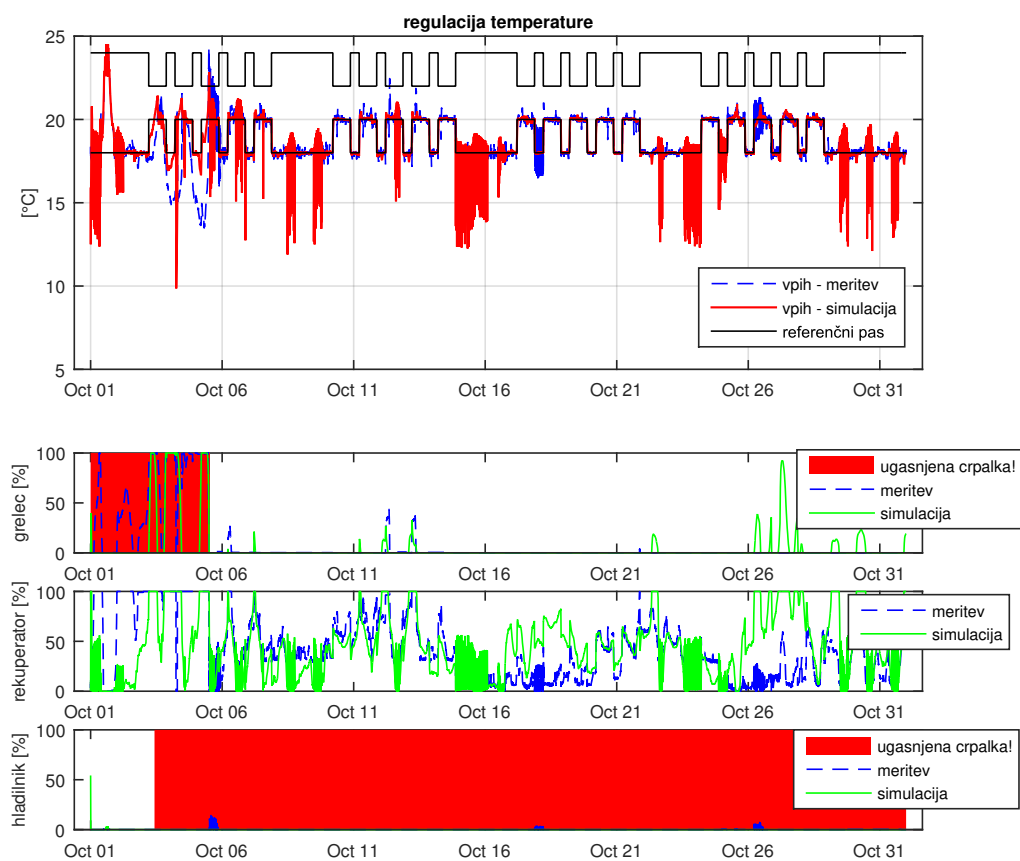
Slika 2.48: Regulacija vlage - september.



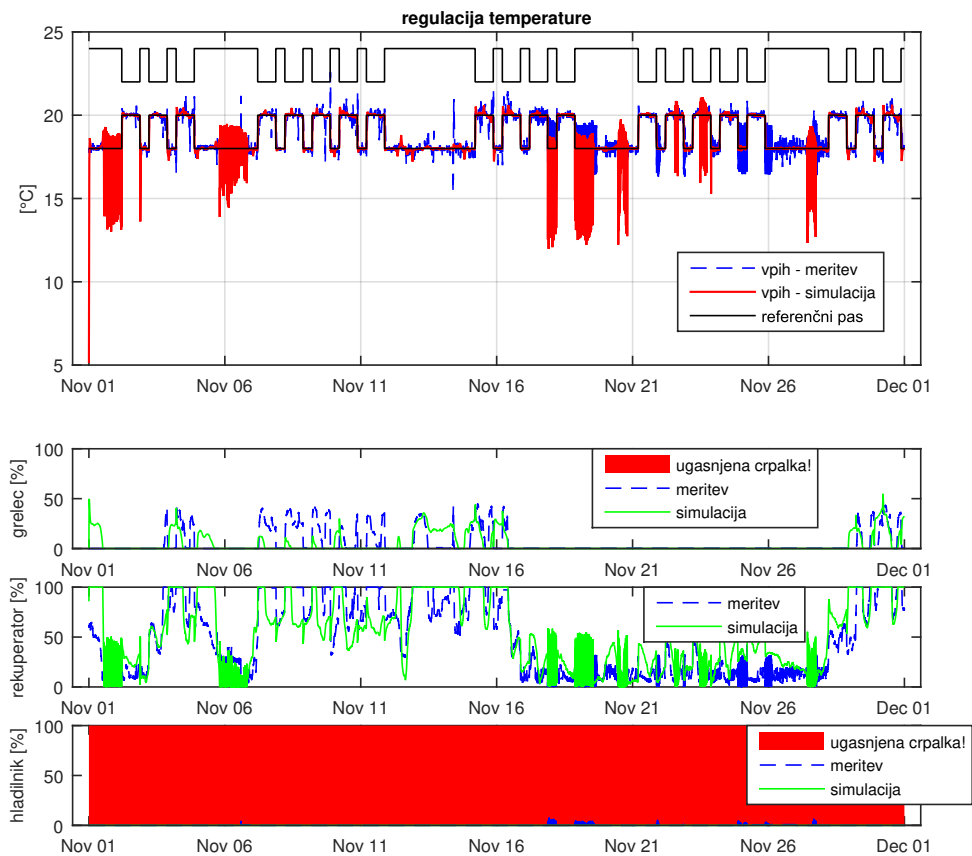
Slika 2.49: Septembra se na realnem sistemu ni vklopil vlažilec.

Oktobar in november. Regulacija temperature (sliki 2.50 in 2.51) v oktobru in novembru je ustrezna. Temperatura zraka na vpihu je vseskozi (z izjemo že znanih težav z oscilacijami) na spodnji referenčni meji, kar je pričakovano, saj je

zrak na zajemu vedno hladnejši od spodnje referenčne meje. Tako simulirana kot merjena temperatura zraka na vpihu sledita referenci.

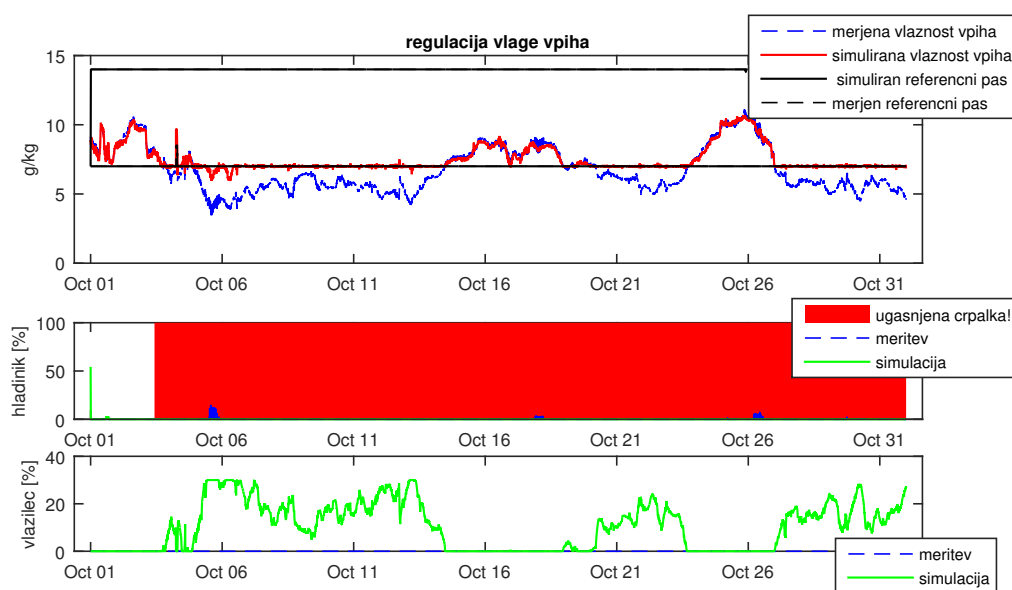


Slika 2.50: Regulacija temperature – oktober.

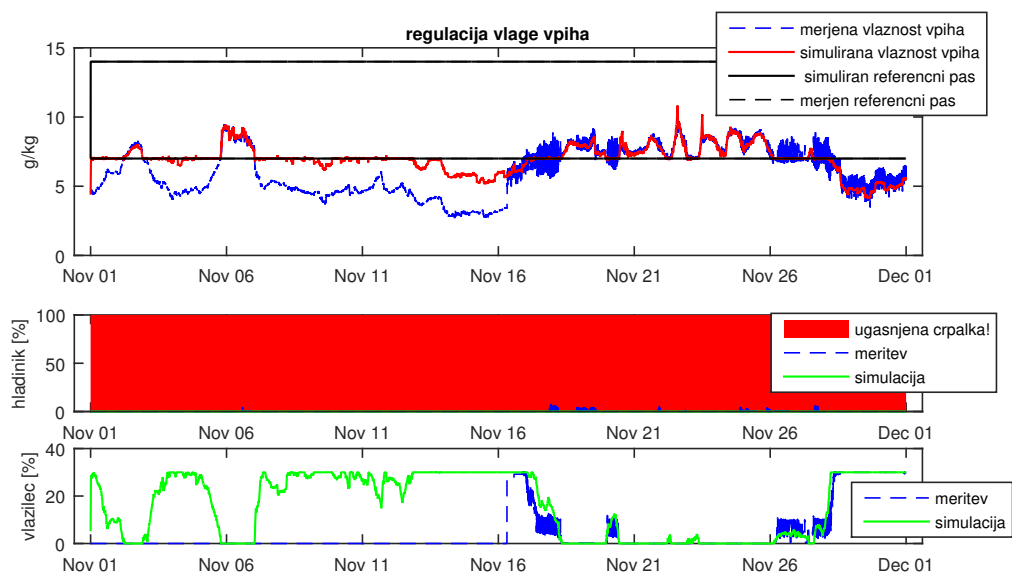


Slika 2.51: Regulacija temperature – november.

Pri regulaciji vlažnosti v oktobru in novembru (sliki 2.52 in 2.53) je opazen isti pojav kot v septembru. 16. novembra se odsotnost vlaženja na realni napravi hipoma konča in regulaciji na realni napravi ter simuliranem zaprtozančnem sistemu se ponovno ujemata.

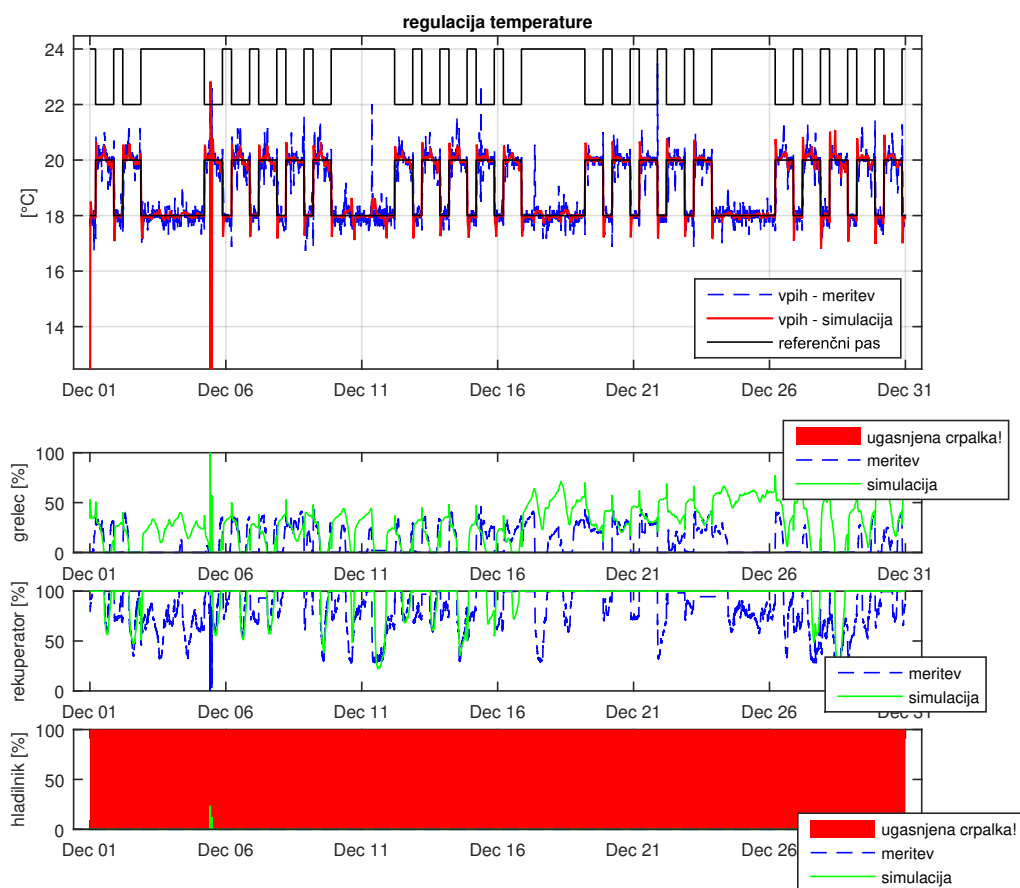


Slika 2.52: Regulacija vlage – oktober.

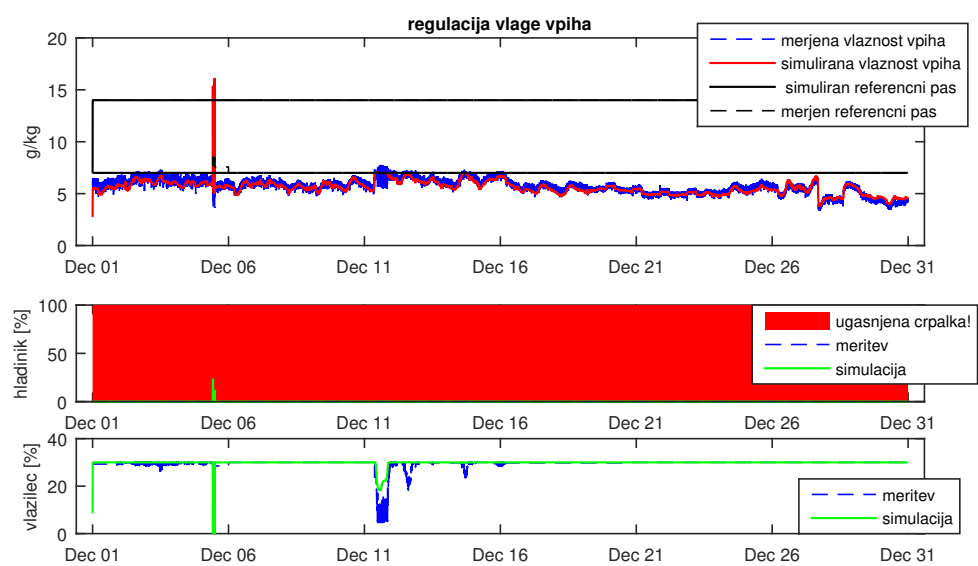


Slika 2.53: Regulacija vlage – november.

December. Zaprtiozračno delovanje (temperatura: slika 2.54 in vlaga: slika 2.55) v decembru se dobro ujemata z delovanjem realnega sistema.



Slika 2.54: Regulacija temperature – december.



Slika 2.55: Regulacija vlage – december.

2.4.3 Znane pomanjkljivosti

Predstavljeni zaprtozančni sistem ima nekaj pomanjkljivosti in poenostavitev:

- počasna simulacija;
- algebrajska zanka;
- ne uporabljamo modela sobe.

Seveda vplivajo na kakovost zaprtozančnega sistema, poleg p naštetih, tudi pomanjkljivosti v odprti zanki (glej poglavje 2.3.8).

Hitrost simulacije. Ta problem se je pojavil že v odprti zanki, z vključitvijo regulatorjev v simulacijsko shemo pa se je simulacija še bolj upočasnila, kar predstavlja oviro pri učinkovitem delu.

Algebrajska zanka. To je eden od vzrokov za počasnost. Dokler vzbujanje modela (regulirni signali) ni pogojeno, Simulink ne more izvesti simulacije Simscape modelov. Regulirni signali pa se lahko (zaradi P-členov v regulatorjih) določijo šele, ko so poznane temperature in vlažnosti v modelu. To zaprto zanko smo poskusili rešiti tako, da smo med regulatorje in model procesa dodali mrtvi čas. Prisotnost mrtvega časa v regulacijskem sistemu načeloma povzroča težave, a izbrani mrtvi čas, ki je relativno kratek (1 sekunda) napram časovnim konstantam zaprtozančnega sistema, zato s stališča vodenja ne povzroča težav.

Model sobe. Tega modela v zaprtozančni shemi ne uporabljamo. Končni model klimatskega sistema ima dva zajema zraka: prvi predstavlja zajem zunanjega zraka, drugi pa zajem odvodnega zraka. Obema izviroma zraka na vhod podamo lastnosti zraka (temperaturo, vlago). V obeh primerih te lastnosti izmerimo na procesu. Bolje bi bilo, če bi bil na vpihu priključen Simscape objekt 'soba', iz katerega bi se črpal odvodni zrak. Za vključitev modela sobe se nismo odločili, ker

je kompleksen prostor (naš klimatski sistem oskrbuje velik objekt) težko natančno modelirati.

2.5 Pohitritev delovanja

Ena od zaznanih pomanjkljivosti je počasna simulacija. V tem poglavju je raziskana možnost pohitritve simulacije brez bistvenega poslabšanja ujemanja z meritvami.

Simulink omogoča več načinov simulacije. V predstavljenih simulacijah je bil izbran privzeti način – '*normal*'. Z namenom pohitritve preverimo še načina '*accelerator*' in '*rapid accelerator*'. Hitrost simulacije se bistveno ne spremeni, zato pustimo to nastavitev kar na '*normal*'.

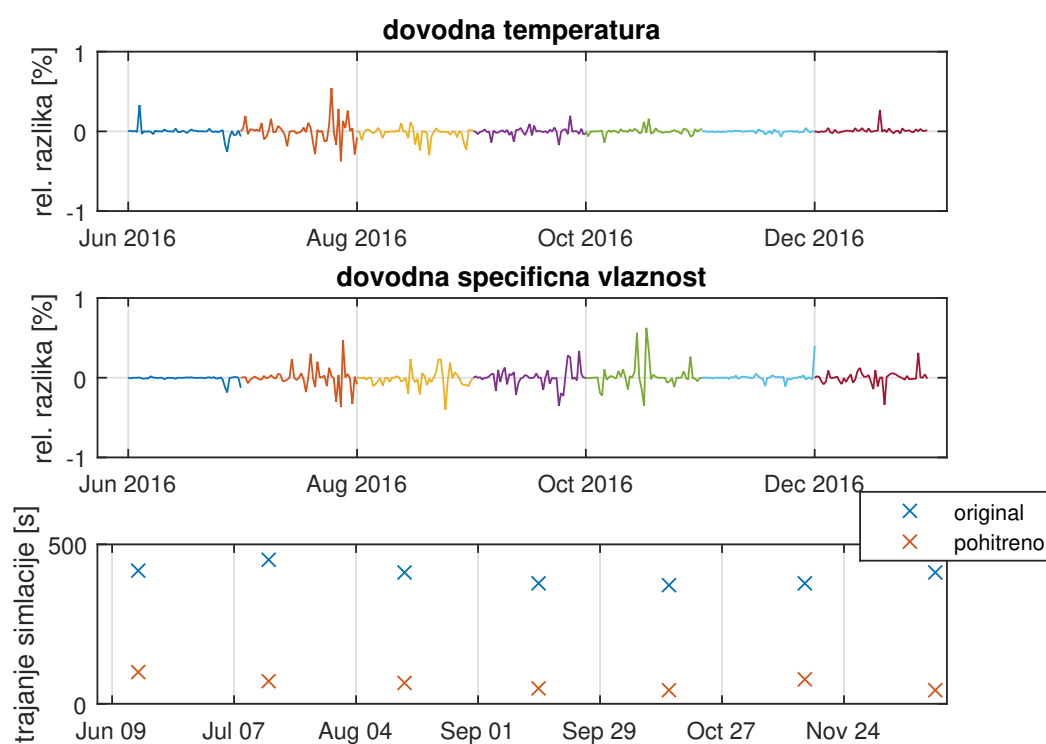
V nastavitvah *solverja* (*ode15s*) nastavljamo absolutno toleranco 10^{-6} . Preverili smo, ali je pohitritev možno doseči tako, da se absolutna toleranca nastavi na '*auto*', relativna toleranca pa na 10^{-2} . S to spremembo je dosežena občutna pohitritev simulacije.

Tukaj ne opisujemo lokalnih nastavitev *solverja* za Simscape. Tam imamo nastavljen *consistency tolerance* 10^{-9} .

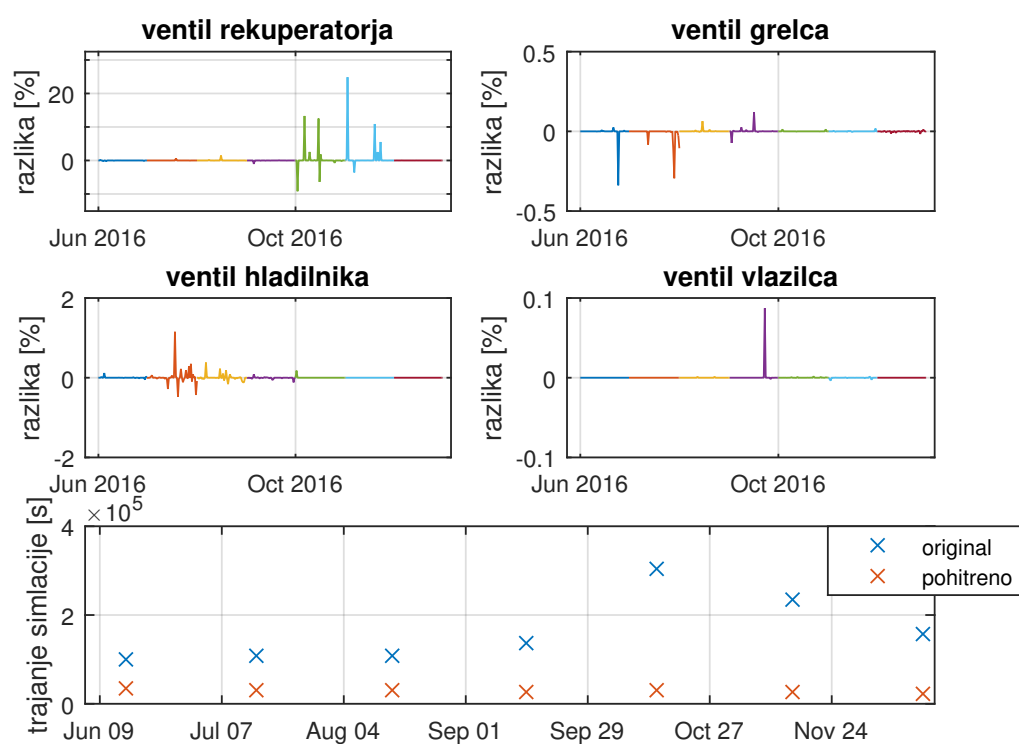
Primerjavo med počasnim in pohitrenim modelom v odprti zanki prikazuje slika 2.56. Na zgornjih dveh grafih je prikazano relativno odstopanje med pohitrenim in originalnim modelom.

Primerjavo v zaprti zanki prikazuje slika 2.57. Na grafih je prikazana absolutna razlika med regulirnimi signali pri originalni in pohitreni simulaciji.

V odprti zanki ni opaznih večjih odstopanj med počasno in pohitreno simulacijo. V zaprti zanki pa so v oktobru in novembru opazna kratkotrajna večja odstopanja, tudi nad 20 %. Ker so ta odstopanja le kratkotrajna, se kot končna realizacija modela uporabi pohitrena izvedba.



Slika 2.56: Pohitritev v odprti zanki.



Slika 2.57: Pohitritev v zaprti zanki.

3 Zaznavanje napak

V prejšnjem poglavju je predstavljen dober model klimatskega sistema. Model je uspešno parametriran, njegovo delovanje se dobro ujema z delovanjem realnega sistema. Model se lahko uporabi za simuliranje delovanja sistema v poljubnih pogojih: prosto se lahko odpirajo in zapirajo ventili, preučuje se lahko obnašanje sistema pri različnih zunanjih temperaturah in vlažnostih, analizirajo se lahko vplivi temperatur medijev (grelnih in hladilnih tekočin) itd.

V tem poglavju je predstavljen in testiran koncept za zaznavanje tipičnih napak v klimatskem sistemu. Za potrebe testiranja so generirani testni podatki – simulacijski teki, kjer se v različnih časovnih intervalih pojavljajo različne napake v delovanju sistema, ki naj jih detektorji uspešno zaznavajo in prepoznavajo.

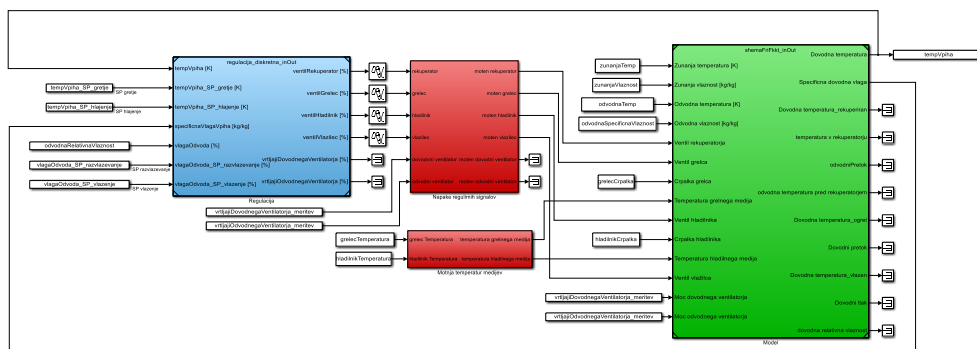
Predstavljeni detektorji temeljijo na metodi glavnih komponent (*principle component analysis* – PCA) [14] in njenih izpeljankah.

3.1 Knjižnica napak

Za zaznavanje napak je potrebna možnost simuliranja napak na zaprtozančnem sistemu. Zgradili smo ogrodje, ki uporabniku omogoča enostavno vnašanje napak ter opazovanje njihovega vpliva na delovanje sistema.

Napake so v zaprto zanko vnešene med regulator in proces. Motijo se torej regulirni signali ter temperaturi grelnega in hladilnega medija. Slika 3.1 prikazuje simulacijsko shemo. Modro obarvan del predstavlja regulator, rdeče obarvan del

predstavlja implementacijo napak, zeleno obarvan del predstavlja model klimat-skega sistema.



Slika 3.1: Simulacijska shema z dodanimi napakami.

Predvidene so napake na signalih:

- odprtost ventila rekuperatorja;
- odprtost ventila grelca;
- odprtost ventila hladilnika;
- odprtost ventila vlažilca;
- moč dovodnega ventilatorja;
- moč odvodnega ventilatorja;
- temperatura grelnega medija;
- temperatura hladilnega medija.

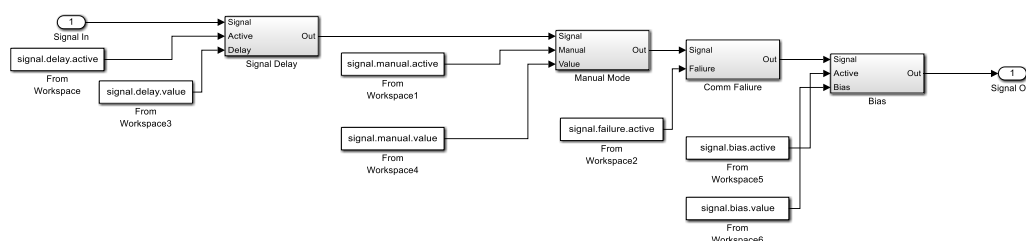
Na vsakem signalu so omogočene napake:

- zakasnen signal (označen z *delay*);

- ročno nastavljena vrednost signala (oznaka *manual mode*);
- premik signala po amplitudi (označen z *bias*);
- izpad komunikacije – signal obdrži zadnjo veljavno vrednost (oznaka *communication failure*).

3.1.1 Realizacija

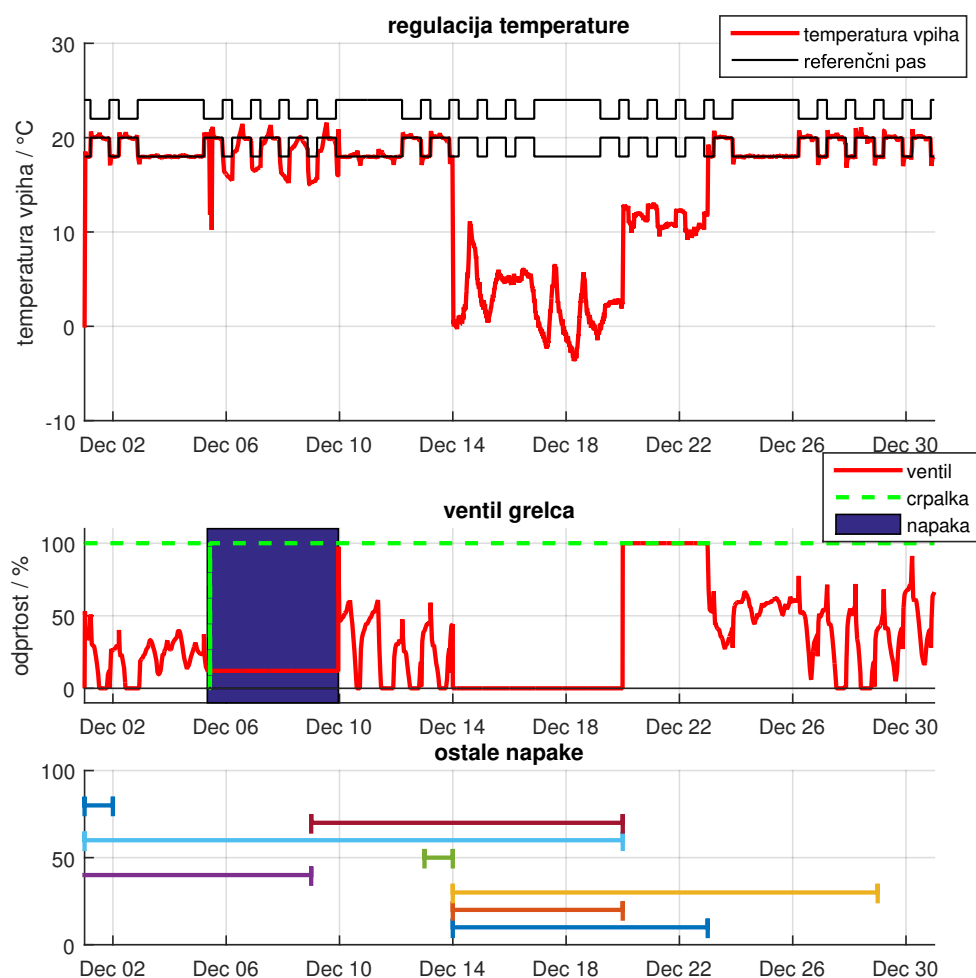
Vsak signal, na katerem lahko pride do napake, je peljan skozi blok, ki je sposoben realizacije vseh možnih napak (zakasnitev, ročni način, premik ali izpad komunikacije). V tem bloku (prikazan na sliki 3.2) je signal zaporedno 'speljan' skozi bloke, ki realizirajo napake (vsaka napaka ima svoj blok). Blok za realizacijo napake na vhod dobi še signala, ki označujeta pojav napake (*active*) in vrednost napake (na primer dolžina zamika pri napaki *delay*). Izbrana implementacija (zaporedna implementacija napak) omogoča, da se ob različnih časovnih trenutkih pojavljajo na istem signalu (npr. odprtost ventila grelca) različne napake (npr. ročni način in izpad komunikacije). Do nepričakovanega obnašanja lahko pride, ko se na istem signalu istočasno pojavi več različnih napak. V tem primeru se upošteva zaporedje (ki definira prioriteto) napak. Realizacija je prikazana na sliki 3.2.



Slika 3.2: Realizacija napak.

3.1.2 Prikaz napak

Po končani simulaciji je omogočen prikaz vpliva napak. Slika 3.3 prikazuje primer napake na ventilu grelca – izpad komunikacije, ki povzroči, da ventil ves čas simulirane napake obdrži odprtost, ki jo je imel ob nastopu napake. Napaka je aktivna od 5. decembra do 9. decembra.

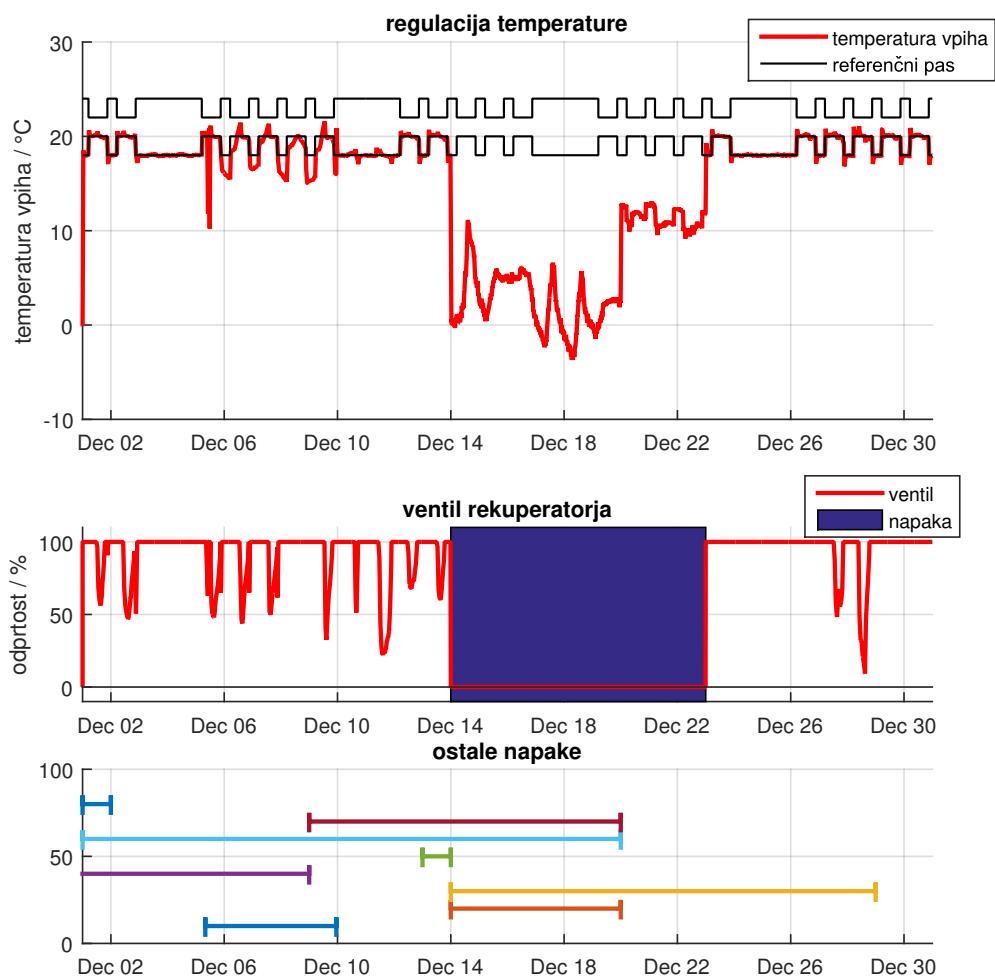


Slika 3.3: Primer prikaza napake (izpad komunikacije) ventila grelca.

Opazno je, da je kakovost regulacije temperature (s stališča sledenja referenci) v obdobju, ko je prisotna napaka, slabša kot v nekaterih drugih časovnih intervalih (seveda z izjemo obdobja med 14. in 23. decembrom, ko so prisotne druge napake, ki jih obravnavamo kasneje). To kaže, da model za implementacijo napak deluje.

Slika 3.4 prikazuje primer napake na ventilu rekuperatoja v obdobju 12. 12.–23. 12. Napaka je nepričakovan preklon v ročni način, ki povzroči, da ventil za čas napake obdrži odprtost, ki je bila podana ob deklaraciji napake – 0 %.

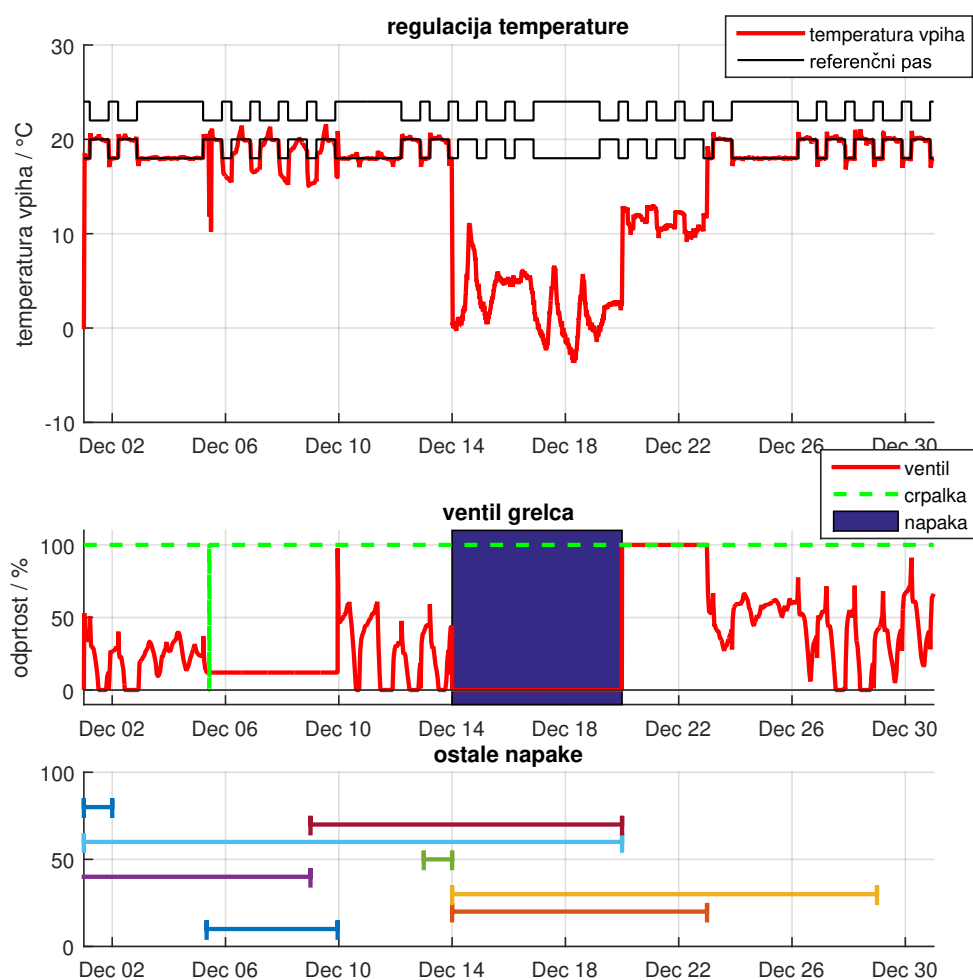
V obdobju, ko je rekuperator izklopljen (zaprt ventil), se temperatura na vpihu pričakovano zniža in ne doseže zelenih vrednosti. Ko se napaka konča, regulacijski algoritem uspešno izregulira nastali pogrešek.



Slika 3.4: Primer prikaza napake (ročni način, vrednost: 0 %) ventila rekuperatorja.

Slika 3.5 od 12.12. do 20.12. prikazuje vpliv napake na ventilu grelca. Napaka je nepričakovan preklon v ročni način, ki povzroči, da je ventil v obdobju prisotne napake zaprt.

Opazimo, da je ta napaka prisotna v istem obdobju kot prejšnja (izklopljen



Slika 3.5: Primer prikaza napake (ročni način, vrednost: 0 %) ventila grelca.

rekuperator), kar pojasni večji padec temperature na vpihu. Ko se napaka na grelcu konča, regulacijski algoritem povsem prižge grelec (ventil 100 %) z namenom izničiti pogrešek, ki nastane zaradi izpada rekuperatorja (na ventilu rekuperatorja je v tem obdobju napaka še vedno prisotna – povsem zaprt ventil).

3.2 Metoda glavnih komponent

Za gradnjo detektorjev različnih napak smo preizkusili metodo glavnih komponent. Statična metoda glavnih komponent (angl. *static principal components analysis* – PCA) poišče linearna razmerja med spremenljivkami ter omogoči preslikavo osnovnih podatkov v prostor glavnih komponent, katerega osi so med seboj ortogonalne. Spremenljivke meritev v novem prostoru so med seboj nekorelirane. Metoda je uporabna, ko imamo opravka z visoko-dimenzionalnimi podatki, saj omogoča predstavitev podatkov z manjšim številom spremenljivk.

Metoda definira transformacijsko matriko $\mathbf{P}$, ki preslika matriko vhodnih podatkov $\mathbf{X}$ v matriko zadetkov (ang. *scores*) $\mathbf{T}$:

$$\mathbf{T} = \mathbf{XP} \quad (3.1)$$

V matriki $\mathbf{X}$ vsaka vrstica predstavlja en vzorec. Število stolpcev matrike $\mathbf{X}$ je dimenzija vhodnih podatkov (meritev). Stolpec v matriki $\mathbf{X}$ predstavlja eno procesno spremenljivko, v našem primeru so to lahko odprtosti ventilov, referenčne vrednosti, merjene temperature zraka, medijev itd.

Spremenljivke v $\mathbf{X}$ so normirane (srednja vrednost 0 in varianca 1). Izračunamo lahko kovariančno matriko $\mathbf{X}_{\text{cov}}$:

$$\mathbf{X}_{\text{cov}} = \mathbf{X}^T \mathbf{X} \quad (3.2)$$

Kovariančno matriko se lahko razstavi:

$$\mathbf{X}_{\text{cov}} = \mathbf{P} \mathbf{\Lambda} \mathbf{P}^T \quad (3.3)$$

kjer je $\mathbf{P}$ matrika, katere stolpci predstavljajo lastne vektorje, matrika $\mathbf{\Lambda}$ pa diagonalna matrika lastnih vrednosti. Matriko $\mathbf{P}$ v enačbi (3.1) se lahko dodatno skalira:

$$\mathbf{T} = \mathbf{XP} \mathbf{\Lambda}^{-\frac{1}{2}} = \mathbf{XP}_S \quad (3.4)$$

stolpci v matriki $\mathbf{T}$ imajo zdaj enotino varianco [15].

Uporabna lastnost PCA je, da omogoča uporabo manjšega števila komponent (stolpcev) za predstavitev zadetkov, kot jih je potrebnih za zapis izvirnih podatkov ($\mathbf{X}$). Transformacijska matrika $\mathbf{P}_S$, ki podatke preslika iz izvirnega prostora v prostor zadetkov, je v osnovi kvadratna. Lahko se jo zmanjša in izbere le nekaj glavnih komponent. Katere komponente izbrati, nam pokaže matrika $\mathbf{\Lambda}$, ki po diagonali vsebuje lastne vrednosti kovariančne matrike $\mathbf{X}_{\text{cov}}$. Opaziti je, da nekatere komponente nosijo zelo malo informacije (nizke lastne vrednosti) in se jih zato lahko zanemari. Namesto $\mathbf{P}_S$ se torej lahko uporabi matrika $\mathbf{P}_{SK}$, ki vsebuje le prvih k stolpcev $\mathbf{P}_S$. S tem se zmanjša dimenzijo matrike zadetkov $\mathbf{T}$, ki ima sedaj k stolpcev [15].

$$\mathbf{T} = \mathbf{X}\mathbf{P}_{SK} \quad (3.5)$$

Število izbranih komponent (k) določa parameter CPV :

$$CPV \leq \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (3.6)$$

Uporabnik določi CPV , ki določa, koliko komponent moramo izbrati za preslikavo v prostor glavnih komponent – s tem določimo dimenzijo prostora glavnih komponent. Tipična vrednost je $CPV = 0,95 = 95 \%$.

Ko smo zanemarili nekaj komponent, smo izgubili del informacije o osnovnih meritvah. To lahko zapišemo z enačbo (3.7), kjer $\mathbf{E}_X$ predstavlja matriko residualov, poimenujemo jo lahko tudi matrika šuma [15].

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\mathbf{P}_{SK}^T + \mathbf{E}_X \quad (3.7)$$

Matriko šuma bomo kasneje uporabili za zaznavanje napak.

3.2.1 Dinamična metoda glavnih komponent

PCA, kot je opisana v prejšnjem poglavju, ni primerna za opisovanje dinamičnih sistemov, saj opisuje le stacionarne razmere in ne predvideva prehodnih pojavov. Zato je bila razvita razširitev statične metode PCA, dinamična metoda glavnih komponent (angl. *Dynamic PCA*, DPCA). Ko govorimo o vzorčenem linearnem

sistemu, ki se mu lahko določi red l , se lahko prilagodi matrika $\mathbf{X}$ tako, da vsebuje tudi podatek o predhodnih stanjih sistema. V prilagojeno matriko se doda ustrezno število (l) zakasnenih vzorcev. S tem se poveča število stolpcev matrike, ustrezno pa se zmanjša število vrstic, ker ni podatka o stanju sistema pred začetkom vzorčenja. [15]

$$\mathbf{X}(l) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_k & \mathbf{X}_{k-1} & \mathbf{X}_{k-2} & \dots & \mathbf{X}_{k-l} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

V zgornji enačbi k označuje časovni trenutek (vrstica v matriki). Tako razširjeno matriko se uporabi enako, kot bi uporabili statično matriko $\mathbf{X}$.

Za sisteme z neznanim redom ali nelinearne sisteme je določanje potrebnega reda ključen korak postopka DPCA. Določanje reda je predstavljeno v poglavju 3.3

3.2.2 Metriki za zaznavanje napak

Za zaznavanje napak s PCA se pogosto uporabljata dve metriki: Hotelling- T^2 in Q-mera. Napaka je zaznana v tistih trenutkih, ko je mera za delovanje z napako nižja kot mera za delovanje brez napake.

Hotteling- T^2 . Ta mera, poznana tudi kot Mahalanobisova razdalja, je definirana (povzeto po [15]) z enačbo:

$$h_i = (\mathbf{x}_i - \mathbf{m})^T \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{m}) \quad (3.9)$$

kjer je i oznaka indeksa vzorca, torej h_i predstavlja mero za trenutni vzorec, $\mathbf{x}_i$ predstavlja vrstico v matriki vzorcev ($\mathbf{X}$), $\mathbf{m}$ je (vrstični) vektor srednjih vrednosti vzorcev v matriki $\mathbf{X}$. $\mathbf{S}$ je kovariančna matrika:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i - \mathbf{m})^T (\mathbf{x}_i - \mathbf{m}) \quad (3.10)$$

N predstavlja število vzorcev (vrstic matrike $\mathbf{X}$).

Ta mera je v nekateri literaturi (npr. [16]) definirana tudi kot:

$$\mathbf{h} = (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}_k \mathbf{\Lambda}_k^{-1} \mathbf{P}_k^T (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) = \mathbf{T}^T \mathbf{\Lambda}_k^{-1} \mathbf{T} \quad (3.11)$$

Ta način izračuna omogoča izračun mere za celoten simulacijski tek (vse časovne trenutke v $\mathbf{X}$) naenkrat.

Q-mera. To je kvadrat evklidske razdalje med merjenim vzorcem in nazaj v osnovni prostor preslikanim zadetkom [15]. Z drugimi besedami je ta mera kvadrat 'dolžine' residuala (glej enačbo (3.7)).

$$q_i = (\mathbf{x}_i - \mathbf{t}_i \mathbf{P}_{SK}^T)^T (\mathbf{x}_i - \mathbf{t}_i \mathbf{P}_{SK}^T) \quad (3.12)$$

3.3 Zaznavanje reda

Zaznavanje reda je prvi korak DPCA, ki je zelo pomemben. V nadaljevanju sta predstavljeni dve metodi zaznavanja reda.

3.3.1 Metoda z ugotavljanjem števila linearnih povezav

Metoda z ugotavljanjem števila linearnih povezav je na primeru sistema za zaznavanje napak prikazana v [15]. Glede na [17] je metodo prvi prikazal Ku. Metoda temelji na iskanju števila linearnih razmerij v (za določen red) razširjeni matriki podatkov. Metodo prikazuje algoritem 1.

Algoritem 1 Psevdokoda za zaznavanje reda po Ku-ju.

 $l = 0$
repeat

$$\mathbf{X}(l) = [\mathbf{X}_k \quad \mathbf{X}_{k-1} \quad \mathbf{X}_{k-2} \quad \dots \quad \mathbf{X}_{k-l}]$$

izvedi PCA, določi lastne vrednosti kovariančne matrike

 Nastavi $j = m \times (l + 1)$ in $r(l) = 0$
while j -ta komponenta predstavlja linearno zvezo **do**

$$j = j - 1$$

$$r(l) = r(l) + 1$$

end while

 Izračunaj število novih razmerij: $r_{nova}(l) = r(l) - \sum_{i=0}^{l-1} ((l - i + 1)r_{nova}(i))$
if $r_{nova}(l) < 0$ **then**

$$l = l + 1$$

end if
until $r_{nova}(l) < 0$

3.3.2 Metoda s spremljanjem lastnimi vrednostmi

Drugi način zaznavanja reda sta razvila Rato in Reis in je predstavljen v [17]. Metoda izbere en red za celoten sistem – ne izbira različnih redov za različne spremenljivke.

Najprej se predpostavi maksimalni red l_{max} . V procesu določanja najbolj primerne reda se zaporedoma preverijo vsi redi od 1 do l_{max} . Metoda temelji na spremljanju lastnih vrednosti kovariančne matrike. V vsakem koraku se red sistema poveča in s tem se povečuje oziroma širi tudi matrika podatkov. Za vsako matriko podatkov izračunamo glavno lastno vrednost (angl. *Key Singular Value* – KSV) in razmerje med trenutno glavno lastno vrednostjo in glavno lastno vrednostjo iz prejšnjega koraka (angl. *Key Singular Value Ratio* – KSVR).

KSV je definirana kot $(m * l + 1)$ -ta največja singularna vrednost, kjer je m število spremenljivk (avtorja predpostavljata, da je število linearnih dinamičnih

razmerij enako številu spremenljivk). $KSVR$ je razmerje dveh zaporednih KSV : $KSVR(l) = KSV(l)/KSV(l-1)$.

Metoda izbire red, pri katerem KSV vrednost neha padati – torej nizki vrednosti KSV ter $KSVR$:

$$\operatorname{argmin}_{l \in [1, l_{max}]} \sqrt{KSV_N(l)^2 + KSVR_N(l)^2} \quad (3.13)$$

$KSV_N(l)$ ter $KSVR_N(l)$ so vrednosti KSV in $KSVR$, normirane na interval $[0, 1]$.

Algoritem, kot je podan v [17], je zapisan v algoritmu 2.

Algoritem 2 Psevdokoda za zaznavanje reda po Rato in Reis.

določi max. red l_{max}

nastavi začetni red $l = 0$

while $l < l_{max}$ **do**

$\mathbf{X}(l) = [\mathbf{X}_k \quad \mathbf{X}_{k-1} \quad \mathbf{X}_{k-2} \quad \dots \quad \mathbf{X}_{k-l}]$

SVD kovariančne matrike matrike podatkov: $\Sigma_{\mathbf{X}(l)} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$

$KSV(l) = s_{m \times l+1}$, kjer je $s_{m \times l+1}$ ($m \times l + 1$)-ta singularna vrednost $\Sigma_{\mathbf{X}(l)}$

if $l > 0$ **then**

$KSVR(l) = KSV(l)/KSV(l-1)$

end if

$l = l + 1$

end while

Normaliziraj KSV in $KSVR$

Določi $\operatorname{argmin}_{l \in [1, l_{max}]} \sqrt{KSV_N(l)^2 + KSVR_N(l)^2}$, pri čemer naj velja $l > l^*$, kjer je l^* najmanjši l , da velja $KSVR(l) < KSVR(l-1)$

3.4 Izvedba

Gradnja modela, iskanje parametrov modela in zaznavanje napak je bilo realizirano v okolju Matlab.

3.4.1 Prikaz delovanja algoritma na testnem primeru

Za namene začetnega testiranja algoritma ter osnovnega prikaza načela delovanja smo ustvarili linearen sistem, ki se mu ob pojavu napake spremenijo koeficienti. Sistem brez napak opisuje diferencialna enačba (3.14). Prenosna funkcija sistema je zapisana z enačbo (3.15).

$$\frac{d^3 y(t)}{dt^3} = u(t) - 4 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} - 2 \frac{dy(t)}{dt} - y(t) \quad (3.14)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^3 + 4s^2 + 2s + 1} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -2 & -4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

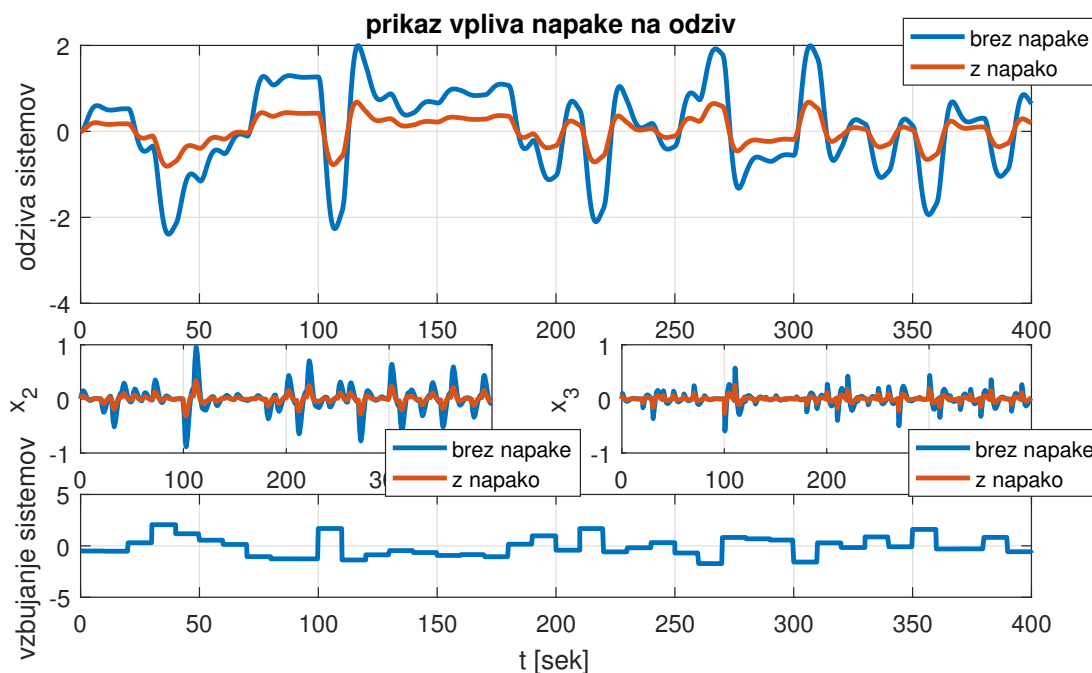
Ob nastopu napake se močno spremenijo koeficienti imenovalca prenosne funkcije. Diferencialno enačbo ter prenosno funkcijo sistema z napako podajata enačbi (3.17) in (3.18).

$$\frac{d^3 y(t)}{dt^3} = u(t) - 10 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} - 5 \frac{dy(t)}{dt} - 3y(t) \quad (3.17)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^3 + 10s^2 + 5s + 3} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -3 & -5 & -10 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Slika 3.6 prikazuje odziva obeh sistemov na enako vzbujanje.

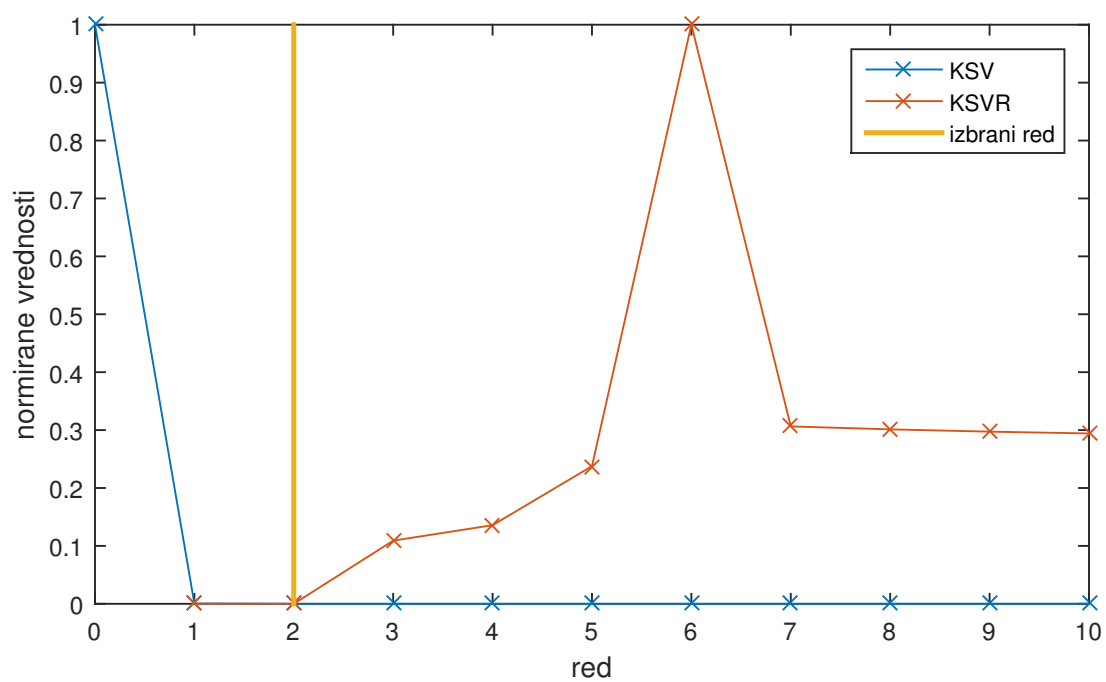


Slika 3.6: Prikaz delovanja vzorčnega linearnega sistema z napako in brez napake.

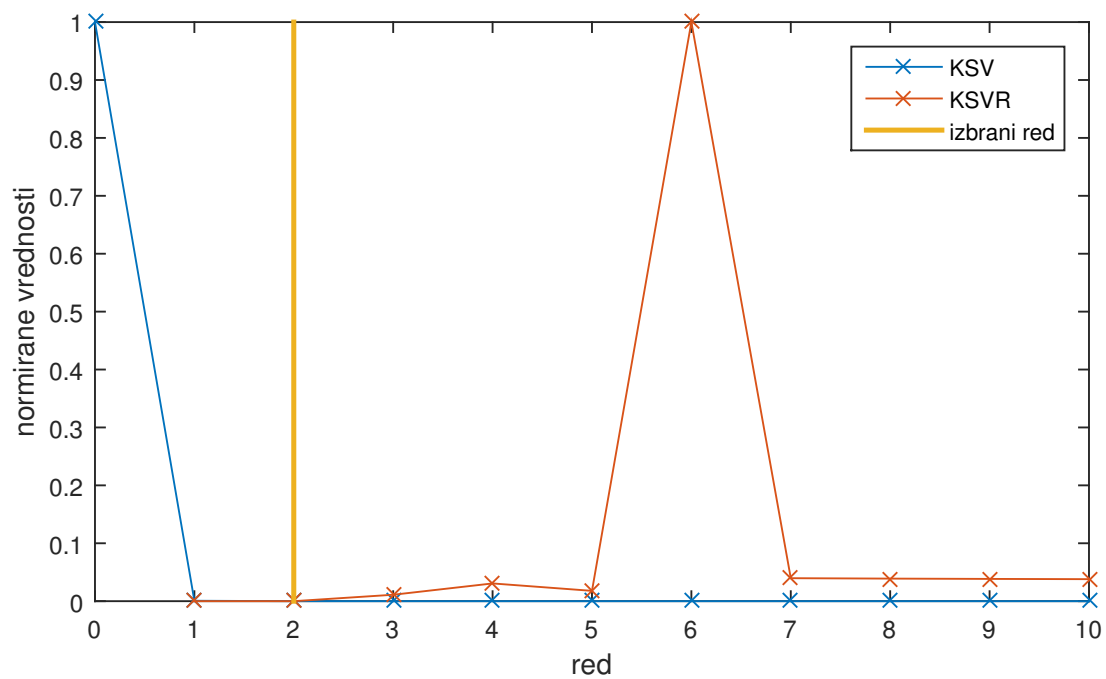
Detektor napake lahko zgradimo z dvema setoma podatkov – setom brez prisotne napake ter setom s prisotno napako v delovanju. Najprej je potrebno zaznati red sistema po eni od metod, opisanih v poglavju 3.3. Za ta demonstracijski primer je uporabljena metoda, ki sta jo razvila Rato in Reis. Metoda zazna 2. red tako za učne podatke brez napake (slika 3.7), kot za učne podatke s prisotno napako (slika 3.8).

Detektiran red pove, kako je potrebno razširiti osnovni matriki učnih podatkov. Drugi red pomeni, da imata novi, razširjeni matriki podatkov, trikrat toliko stolpcev kot izvirni – torej 12.

Obe učni matriki podatkov osrediščimo in izračunamo kovariančni matriki (dimenzij 12×12). Po postopku, opisanem v poglavju 3.2, določimo polno transformacijsko matriko $\mathbf{P}$. Sledi izbor glavnih komponent. V našem vzorčnem primeru smo določili, da naj izbrane komponente predstavljajo 95% skupne variance. Za oba učna seta to pomeni, da se izberejo tri glavne komponente (vseh skupaj je 12). Naši transformacijski matriki imata sedaj 12 vrstic ter 3 stolpce.

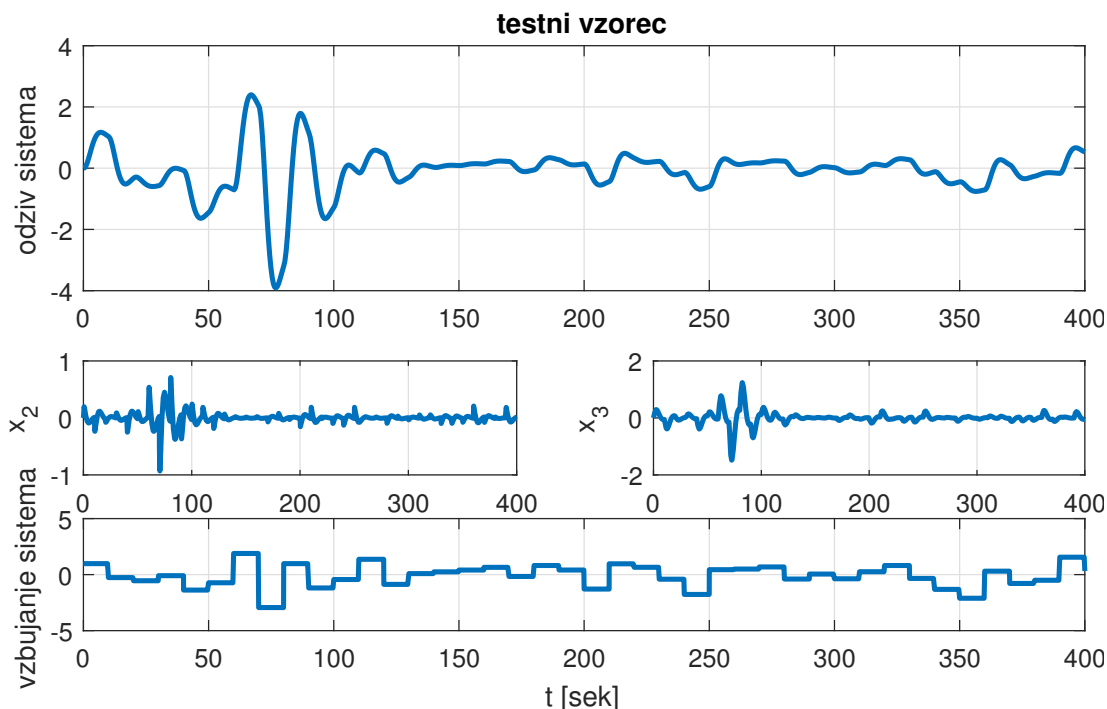


Slika 3.7: Zaznavanje reda na učnih podatkih brez napake.



Slika 3.8: Zaznavanje reda na učnih podatkih s prisotno napako.

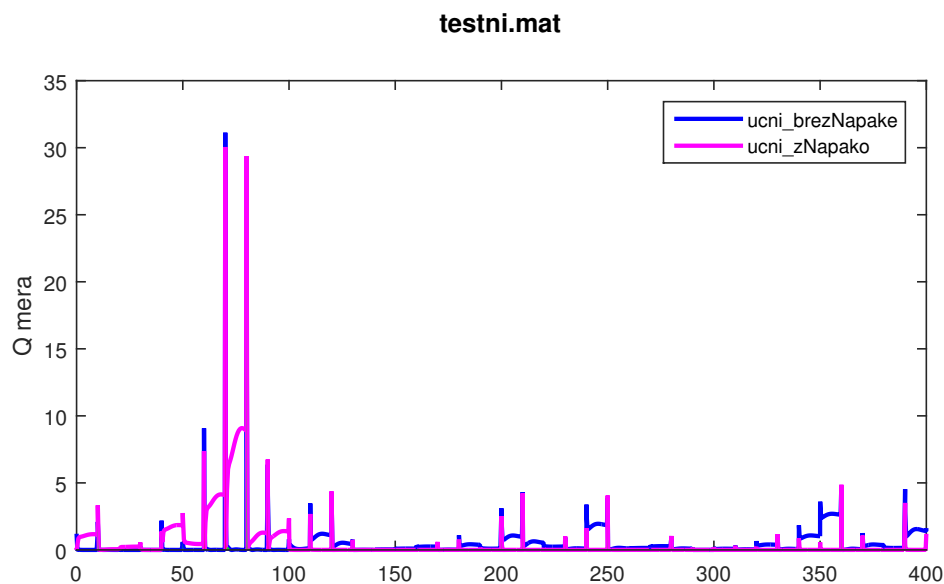
Naučen detektor preverimo na testnih podatkih. Testni podatki so generirani tako, da se ob času $t = 100s$ (na četrtini trajanja simulacije) pojavi napaka (sprememba parametrov linearnega modela). Testne podatke prikazuje slika 3.9. Vzbujanje sistema je drugačno, kot je bilo uporabljeno za učenje.



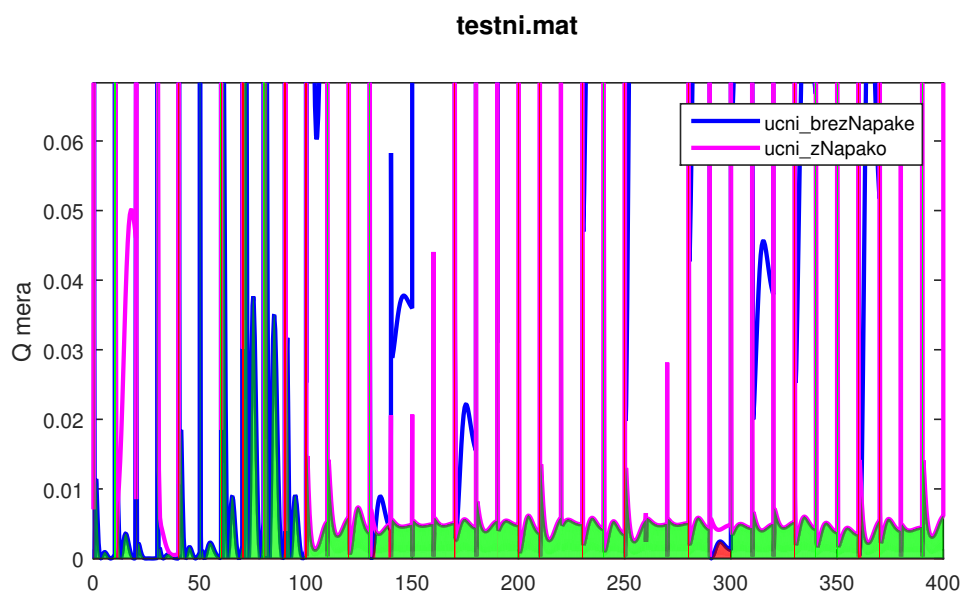
Slika 3.9: Testna simulacija, napaka se pojavi pri $t = 100s$.

Testni podatki se lahko zapišejo v obliki matrike s štirimi stolpci. Nato se ta matrika razširi do ustreznega (drugega) reda. V našem primeru to rezultira v matriki z 12 stolpci. Če bi v postopku učenja za učna seta dobili različna reda, bi tudi za testni set morali generirati dve različni matriki podatkov. Razširjeno matriko testnih podatkov se lahko po enačbi (3.5) transformira v prostor zadetkov. Skladno z enačbo (3.7) nastane pri tej transformaciji residual, ki se ga uporabi za izračun Q-mere in Hotelling- T^2 -mere. Slika 3.10 prikazuje rezultate zaznavanja napak z uporabo Q-mere, slika 3.11 prikazuje iste rezultate pri spremenjeni skali prikaza. Na sliki 3.11 so z zeleno označeni trenutki, ko je klasifikacija (zaznavanje napak) pravilna – algoritem je pravilno zaznal prisotnost napake, z rdečo so označena odstopanja rezultatov detektorja od dejanskih. Rezultati so podani

tudi v obliki matrike zamenjav (angl. *confusion matrix*) – tabela 3.1.



Slika 3.10: Q-mera pri zaznavanju napake na testnem primeru.



Slika 3.11: Q-mera pri zaznavanju napake na testnem sistemu – detajl.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	94,9%	5,1%
ni dejanske napake	2,9%	97,1%

Tabela 3.1: Tabela uspešnosti detektorja na testnem linearnem sistemu.

3.4.2 Učni in testni simulacijski teki za gradnjo in testiranje detektorjev

Za izgradnjo in testiranje detektorjev napak potrebujemo množico učnih in testnih podatkov, ki jih v našem primeru generiramo s pomočjo simulacije modeliranega sistema. Tabele 3.2 – 3.8 opisujejo učne in testne simulacijske teke.

oznaka učnega simulacijskega teka trajanje simulacije	napaka
ucni_brezNapake 1. 6. 2016–31. 12. 2016	brez napak
ucni_grelecTemperatura_bias-40 1. 12. 2016–31. 12. 2016	V času trajanja simulacije je temperatura grelnega medija znižana za 40 °C.
ucni_hladilnikTemperatura_bias-40 25. 6. 2016–1. 8. 2016	V času trajanja simulacije je temperatura hladilnega medija znižana za 40 °C.
ucni_hladilnikTemperatura_bias+40 25. 6. 2016–1. 8. 2016	V času trajanja simulacije je temperatura hladilnega medija povišana za 40 °C.
ucni_ventilGrelec_man00 1. 12. 2016–31. 12. 2016	V času trajanja simulacije je ventil grelca povsem zaprt.
ucni_ventilGrelec_man100 1. 6. 2016–31. 12. 2016	V času trajanja simulacije je ventil grelca povsem odprt.
ucni_ventilHladilnik_man00 25. 6. 2016–1. 8. 2016	V času trajanja simulacije je ventil hladilnika povsem zaprt.
ucni_ventilRekuperator_man00 1. 6. 2016–31. 12. 2016	V času trajanja simulacije je ventil rekuperatorja povsem zaprt.
ucni_ventilRekuperator_man100 1. 6. 2016–31. 12. 2016	V času trajanja simulacije je ventil rekuperatorja povsem odprt.

Tabela 3.2: Tabela učnih podatkov – 1. del.

oznaka učnega simulacijskega teka	napaka
trajanje simulacije	
ucni.odvodniVentilator_man20	V času trajanja simulacije je
1. 6. 2016–31. 6. 2016	pretok odvodnega zraka zmanjšan.
ucni.odvodniVentilator_man100	V času trajanja simulacije je
1. 6. 2016–31. 12. 2016	pretok odvodnega zraka povečan.
učni.ventilVlažilec_man00	V času trajanja simulacije je
27. 11. 2016–31. 12. 2016	ventil vlažilca povsem zaprt
učni.ventilVlažilec_man33	V času trajanja simulacije je
1. 6. 2016–15. 11. 2017	ventil vlažilca povsem odprt

Tabela 3.3: Tabela učnih podatkov – 2. del.

oznaka testnega simulacijskega teka trajanje simulacije	napaka
testni_ventilRekuperator_man00 1. 6. 2016–31. 12. 2016	Povsem zaprt ventil rekuperatorja v obdobjih:
	1. 6.–14. 6.
	1. 7.–14. 7.
	1. 8.–14. 8.
	1. 9.–14. 9.
	1. 10.–14. 10.
	1. 11.–14. 11.
testni_ventilRekuperator_man100 1. 6. 2016–31. 12. 2016	1. 12.–14. 12.
	Povsem odprt ventil rekuperatorja v obdobjih:
	1. 6.–14. 6.
	1. 7.–14. 7.
	1. 8.–14. 8.
	1. 9.–14. 9.
	1. 10.–14. 10.
testni_odvodniVentilator_man00 1. 6. 2016–31. 12. 2016	1. 11.–14. 11.
	1. 12.–14. 12.
	Zmanjšan pretok odvodnega zraka v obdobjih:
	1. 6.–14. 6.
	1. 7.–14. 7.
	1. 8.–14. 8.
	1. 9.–14. 9.
	1. 10.–14. 10.
	1. 11.–14. 11.
	1. 12.–14. 12.

Tabela 3.4: Tabela testnih podatkov – 1. del.

oznaka testnega simulacijskega teka trajanje simulacije	napaka
testni_odvodniVentilator_man100 1. 6. 2016–31. 12. 2016	Zmanjšan pretok odvodnega zraka v obdobjih: 1. 6.–14. 6. 1. 7.–14. 7. 1. 8.–14. 8. 1. 9.–14. 9. 1. 10.–14. 10. 1. 11.–14. 11. 1. 12.–14. 12.
testni_grelecTemperatura_bias+40 1. 12. 2016–31. 12. 2016	Povišana temperatura grelnega medija v obdobjih: 1. 12.–7. 12. 14. 12.–21. 12.
testni_grelecTemperatura_bias-40 1. 12. 2016–31. 12. 2016	Znižana temperatura grelnega medija v obdobjih: 1. 12.–7. 12. 14. 12.–21. 12.
testni_ventilGrelec_man100 1. 6. 2016–31. 12. 2016	Povsem odprt ventil grelca v obdobjih: 1. 6.–14. 6. 1. 7.–14. 7. 1. 8.–14. 8. 1. 9.–14. 9. 1. 10.–14. 10. 1. 11.–14. 11. 1. 12.–14. 12.

Tabela 3.5: Tabela testnih podatkov – 2. del.

oznaka testnega simulacijskega teka trajanje simulacije	napaka
testni_ventilGrelec_man00 1. 12. 2016–31. 12. 2016	Povsem zaprt ventil grelca v obdobjih: 1. 12.–7. 12. 14. 12.–21. 12.
testni_hladilnikTemperatura_bias+40 25. 6. 2016–1. 8. 2016	Močno povišana temperatura hladilnega medija v obdobjih: 25. 6.–30. 6. 7. 7.–14. 7. 21. 7.–28. 7.
testni_hladilnikTemperatura_bias-40 25. 6. 2016–1. 8. 2016	Znižana temperatura hladilnega medija v obdobjih: 25. 6.–30. 6. 7. 7.–14. 7. 21. 7.–28. 7.

Tabela 3.6: Tabela testnih podatkov – 3. del.

oznaka testnega simulacijskega teka trajanje simulacije	napaka
testni_ventilHladilnik_man100 1. 8. 2016–31. 12. 2016	Povsem odprt ventil hladilnika v obdobjih: 1. 8.–14. 8. 1. 9.–14. 9. 1. 10.–14. 10. 1. 11.–14. 11. 1. 12.–14. 12.
testni_ventilHladilnik_man00 25. 6. 2016–1. 8. 2016	Povsem zaprt ventil hladilnika v obdobjih: 25. 6.–30. 6. 7. 7.– 14. 7. 21. 7.–28. 7.
testni_ventilVlazilec_man33 1. 6. 2016–14. 11. 2016	Povsem zaprt ventil vlažilca v obdobjih: 27. 11.–4. 12. 10. 12.–17. 12. 24. 12.–31. 12.
testni_ventilVlazilec_man33 1. 6. 2016–14. 11. 2016	Ventil vlažilca odprt 33% v obdobjih: 1. 6.–14. 6. 1. 7.–14. 7. 1. 8.–14. 8. 1. 9.–14. 9. 1. 10.–14. 10. 1. 11.–14. 11.

Tabela 3.7: Tabela testnih podatkov – 4. del.

napaka	interval
zaprt ventil rekuperatorja	1. 6.–14. 6.
zmanjšana temperatura hladilnega medija	25. 6.–30. 6.
povišana temperatura hladilnega medija	7. 7.–14. 7.
zaprt ventil hladilnika	21. 7.–28. 7.
povsem odprt ventil rekuperatorja	1. 8.–14. 8.
povsem odprt ventil grelca	15. 8.–26. 8.
zmanjšán pretok odvodnega zraka	1. 9.–14. 9.
povečan pretok odvodnega zraka	1. 10.–14. 10.
delno odprt ventil vlažilca	1. 11.–14. 11.
povsem odprt ventil hladilnika	16. 11.–30. 11.
povišana temperatura grelnega medija	1. 12.–7. 12.
znižana temperatura grelnega medija	7. 12.–14. 12.
zaprt ventil grelca	14. 12.–21. 12.
zaprt ventil vlažilca	24. 12.–31. 12.

Tabela 3.8: Mešan testni set (oznaka: testni·mesano).

Izbira časovnih intervalov napak. Kot je vidno v tabelah 3.2 in 3.3, so učni seti za različne napake pridobljeni s simulacijami v različnih časovnih obdobjih. Tudi dolžine teh setov so različne. Razlog leži v dejstvu, da sam pojav napake na sistemu ne pomeni nujno tudi vpliva te napake na delovanje sistema. Za primer vzamemo napako povsem zaprtega ventila grelca: delovanje sistema z napako se od delovanja sistema brez napake ne bo razlikovalo v obdobjih, ko je ventil grelca zaprt že v normalnem obratovanju. Iz tega razloga smo analizirali normalno delovanje sistema po vseh signalih, kjer smo predvideli napake, ter za učenje izbrali le obdobja, ko ima pojav napake vpliv na delovanje sistema.

3.4.3 Modifikacije izvirnega algoritma

Z namenom izboljšanja delovanja algoritma smo vključili nekaj posebnosti:

Povprečenje. To pomeni povprečenje določenega števila (n) zaporednih vzorcev. Skupno število vzorcev se zmanjša za faktor n . Z zmanjšanjem efektivnega časa vzorčenja se zmanjša število vzorcev in ohrani le bistvena dinamika procesa, ki se najbolj spremeni ob pojavu napake.

Decimiranje. Pomeni, da se v vektorju vzorcev izbere le vsak n -ti vzorec ter ta nova množica uporabi kot matrika podatkov. Decimiranje se vključi v naš algoritem z namenom zmanjšanja vpliva prehodnega pojava in povečanja vpliva statičnih razmer.

Uteževanje. Pomeni, da se nekatere vzorce v PCA analizi bolj uteži kot druge. Želja je, da se v procesu učenja (določanja transformacijske matrike) utežijo vzorci, pri katerih je napaka zares prisotna, ter zanemarijo vzorci, pri katerih napaka ne vpliva na delovanje.

3.4.4 Iskanje najboljših nastavitev detektorjev

Za učenje vsakega detektorja smo uporabili dva učna seta iz tabel 3.2 in 3.3 – simulacijo brez napake (`ucni.brezNapake`) ter enega od učnih setov z napakami.

Vsak detektor je preizkušen na obeh učnih setih ter na dveh testnih setih: prvi je predstavljen v tabeli 3.8, drugi je izbran izmed setov v tabelah 3.4–3.7 (tisti testni set, ki vsebuje le napako, ki naj bi jo detektor zaznaval). Za vsako napako se poišče detektor z nastavitvami:

- izbor regresorjev (simulacijski signali);
- osnovni čas vzorčenja;
- čas vzorčenja po povprečenju;
- prisotnost in stopnja decimacije;
- uporaba uteži;
- izbrana metoda skaliranja in premika;
- izbrana metoda zaznavanja reda;
- CPV;
- izbrana mera.

Za vsak detektor smo preiskali širok nabor nastavitev ter pri vsakem setu nastavitev ovrednotili. Upoštevani sta tako splošna uspešnost, izračunana na podlagi matrike zamenjav, kot ocena robustnosti. Slednja je izračunana iz razdalje med obema merama v različnih trenutkih.

Oceno uspešnosti detektorja predstavlja uspešnost delovanja za mešani testni set (tabela 3.8), saj ta rezultat najboljše ponazarja realno delovanje.

Cilj je čim bolj robusten algoritem, zato stremimo k čim večji razdalji med merama, ki podajata ujemanje z delovanjem brez napake in delovanjem z napako

(dve črti na grafu – npr. slika 3.11). Razdalja naj bo seveda čim večja takrat, ko je detektor napako razpoznal pravilno, in čim manjša takrat, ko je detektor zagrešil napako.

Ko je preiskan celoten prostor predvidenih možnih nastavitev algoritma, se na podlagi ocen robustnosti ter uspešnosti izbere nekaj najboljših setov parametrov, jih vizualno primerja ter izbere tistega, ki nudi najboljše razmerje med robustnostjo ter uspešnostjo. V naslednjem poglavju so predstavljeni dobljeni detektorji.

3.5 Dobljeni detektorji in rezultati

V razdelkih 3.5.1 - 3.5.14 so prikazane nastavitve najdenih detektorjev. Za vsak detektor so tudi podani rezultati (grafično in v obliki matrik zamenjav).

3.5.1 Znižana temperatura grelnega medija

Ob pojavu te napake je pričakovan zmanjšan vpliv delovanja grelca. Pričakujemo povečano odprtost ventila grelca – odziv regulacijskega algoritma na prešibko gretje.

Uspešnost detektorja na učnih in testnih setih prikazujejo tabele 3.10 – 3.13.

nastavitev	vrednost
	ΔT
regresorji	odprtost ventila rekuperatorja
	odprtost ventila grelca
	temperatura grelnega medija
	odprtost ventila hladilnika
osnovni čas vzorčenja	60 s
čas vzorčenja po povprečenju	60 s
decimiranje	brez
uporaba uteži	enaki rezultati z uporabo uteži in brez
metoda skaliranja in premika	osrediščenje in enotina varianca
metoda zaznavanja reda	kot opisana v [15]
CPV	95 %
mera	Q-mera

Tabela 3.9: Nastavitve detektorja znižane temperature grelnega medija za mešan testni set.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	5,8%	94,2%

Tabela 3.10: Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature grelnega medija na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	82,6 %	17,4 %
ni dejanske napake	/	/

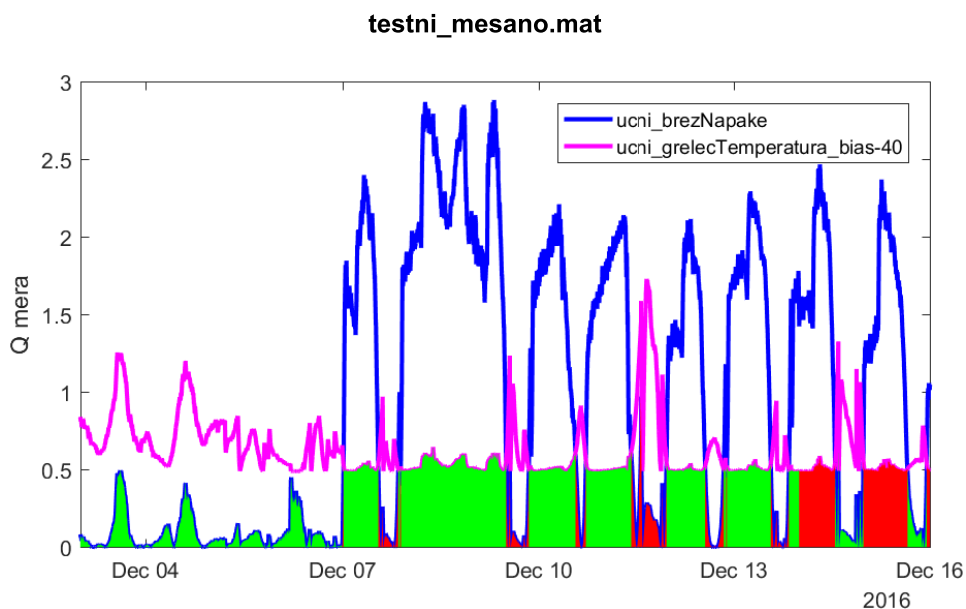
Tabela 3.11: Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature grelnega medija na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	81,8 %	18,2 %
ni dejanske napake	24,8 %	75,2 %

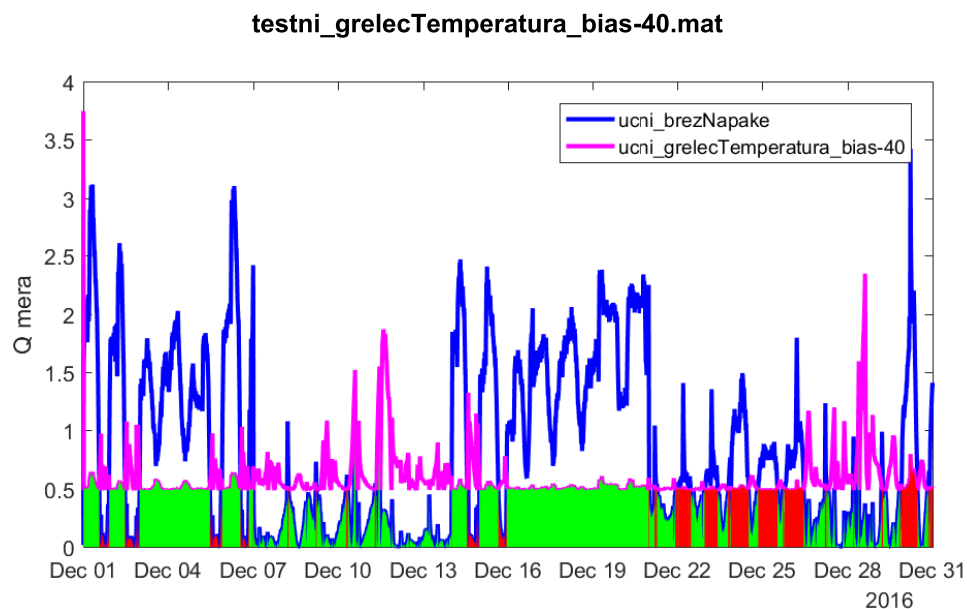
Tabela 3.12: Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature grelnega medija na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	71,7 %	28,3 %
ni dejanske napake	8,7 %	91,3 %

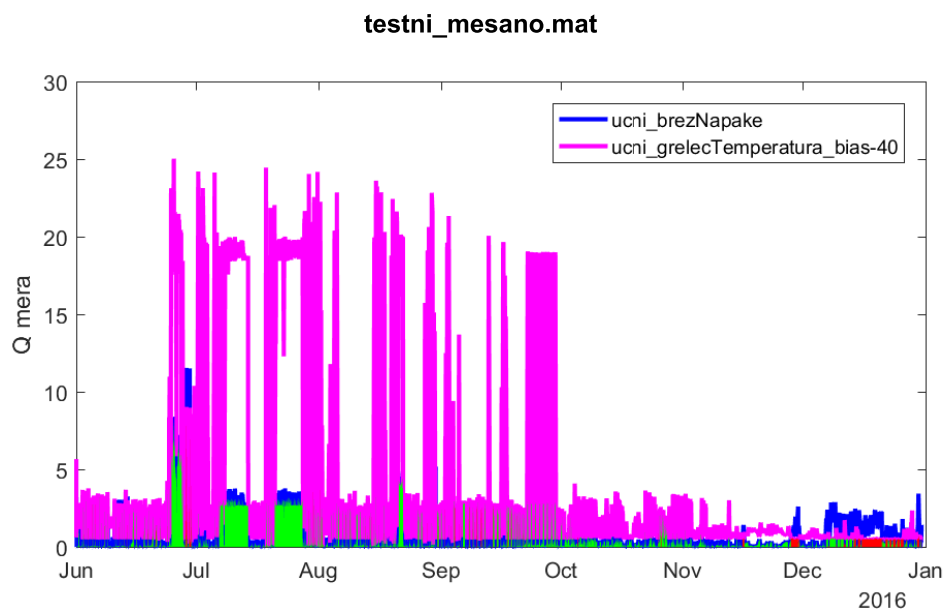
Tabela 3.13: Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).



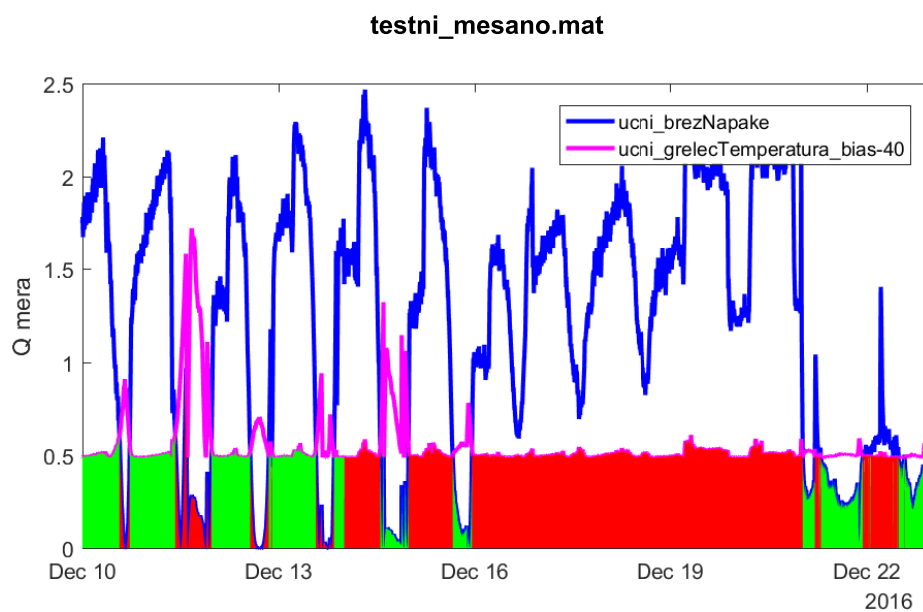
Slika 3.12: Prikaz delovanja detektorja znižane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.



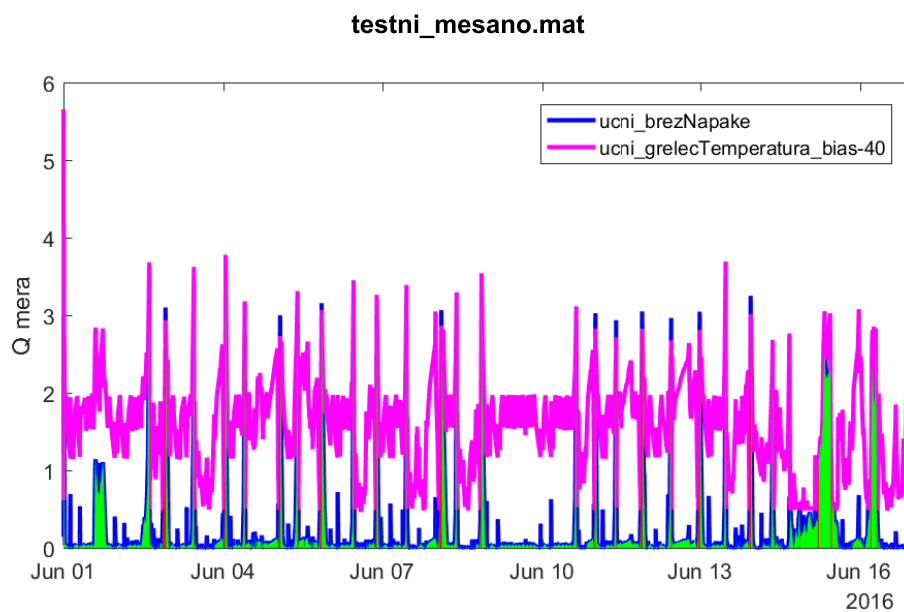
Slika 3.13: Prikaz delovanja detektorja znižane temperature grelnega medija na enostavnem testnem vzorcu.



Slika 3.14: Prikaz delovanja detektorja znižane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu.



Slika 3.15: Prikaz delovanja detektorja znižane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje zaprtega ventila grelca – nepravilno zaznana napaka.



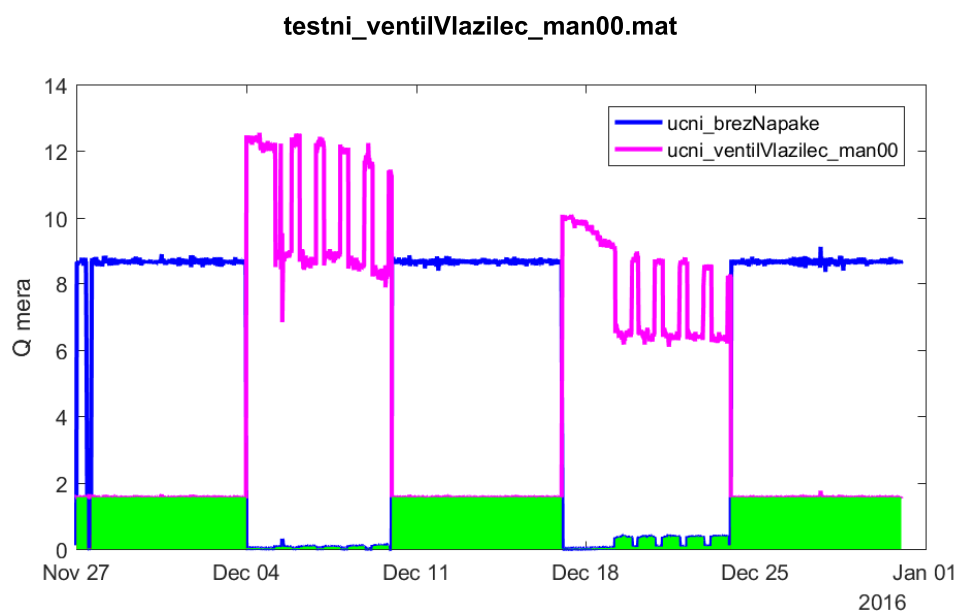
Slika 3.16: Prikaz delovanja detektorja znižane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje zaprtega ventila rekuperatorja.

Iz slike 3.12 je razvidno delovanje detektorja, ko se pojavi napaka, ki bi jo moral detektor zaznati. Opazno je, da večino časa zaznavanje deluje. Slika 3.15 prikazuje obdobje, ko detektor zmotno zazna napako. V prikazanem časovnem obdobju (od 14. decembra do 21. decembra) je na mešanem testnem vzorcu prisotna napaka zaprtega ventila grelca (glej tabelo 3.8), ki tako kot zmanjšana temperatura grelnega medija povzroči nedelovanje grelca. Slika 3.16 prikazuje dobro delovanje detektorja, ko je prisotna neka tretja napaka (zaprt ventil rekuperatorja).

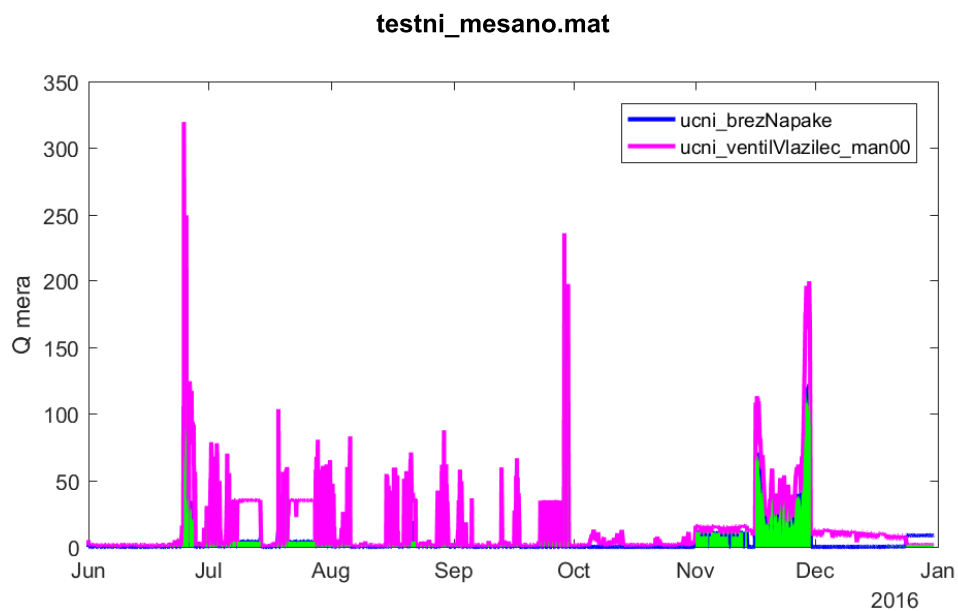
3.5.2 Zaprt ventil vlažilca

Pričakovan vpliv te napake je znižanje izmerjene vlažnosti na vpihu, na kar se regulacijski algoritem odzove z večjim odpiranjem ventila vlažilca. To zaradi prisotnosti napake ne izboljša razmer na vpihu.

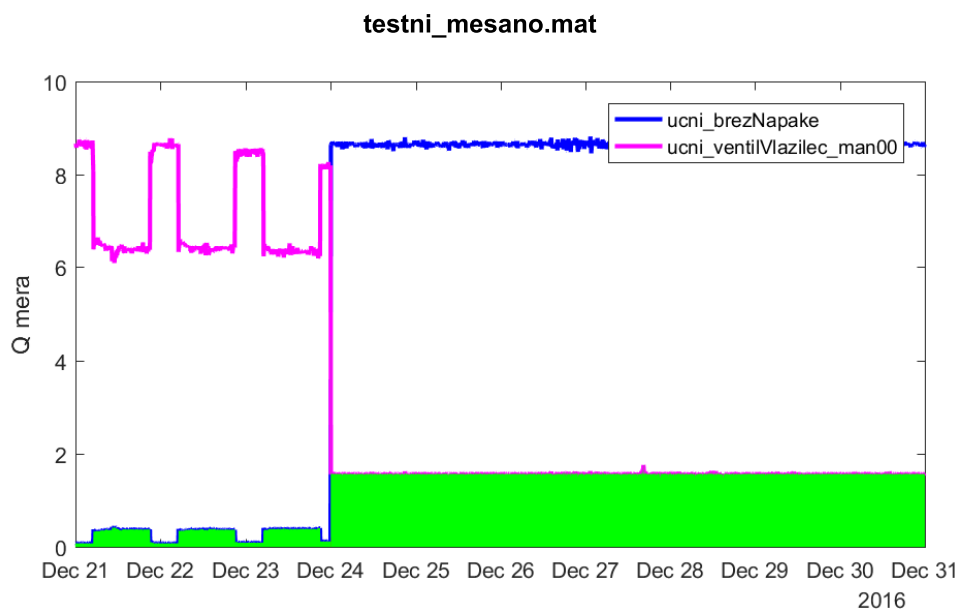
Uspešnost detektorja na učnih in testnih setih prikazujejo tabele 3.15 – 3.18.



Slika 3.17: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila vlažilca na enostavnem testnem vzorcu.



Slika 3.18: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu.



Slika 3.19: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.

nastavitev	vrednost
regresorji	odprtost ventila vlažilca
	odprtost ventila hladilnika
	sprememba specifične vlažnosti
	SP vlage vpiha za vlaženje
osnovni čas vzorčenja	60 s
čas vzorčenja po povprečenju	60 s
decimiranje	brez
uporaba uteži	enaki rezultati z uporabo uteži in brez
metoda skaliranja in premika	osrediščenje in enotina varianca
metoda zaznavanja reda	Rato&Reis
CPV	enake rezultate dobimo pri vrednostih 80 %, 90 % in 95 %
mera	Q-mera

Tabela 3.14: Nastavitve detektorja zaprtega ventila vlažilca za mešan testni set.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	1,6 %	98,4 %

Tabela 3.15: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila vlažilca na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	99,9 %	0,1 %
ni dejanske napake	0,0 %	100,0 %

Tabela 3.16: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila vlažilca na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	99,8 %	0,2 %
ni dejanske napake	0,0 %	100,0 %

Tabela 3.17: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila vlažilca na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	100,0 %	0,0 %
ni dejanske napake	1,6 %	98,4 %

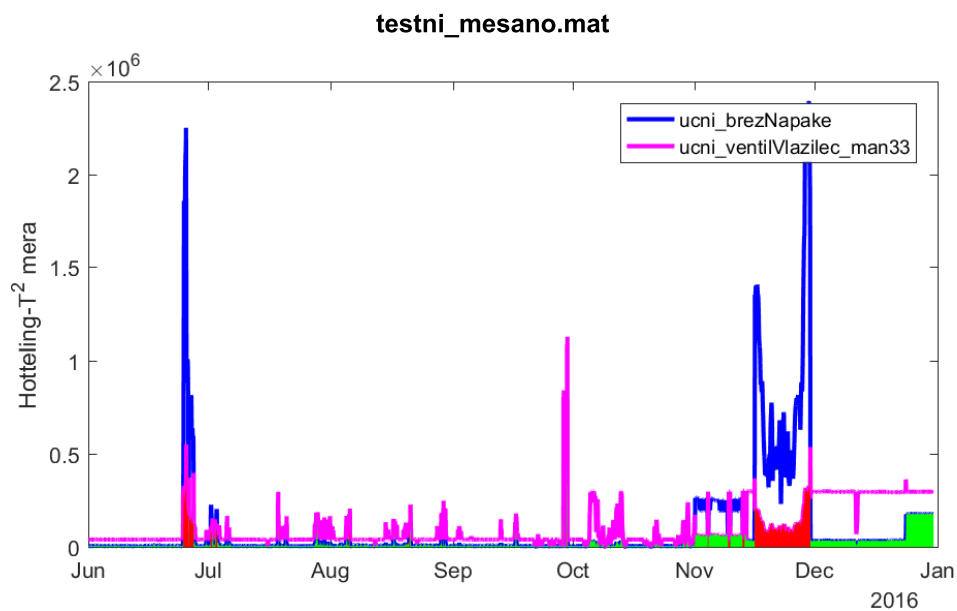
Tabela 3.18: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).

Detektor te napake deluje odlično, kar povzemajo tabele 3.15 – 3.18 ter prikazujeta sliki 3.17 ter 3.19.

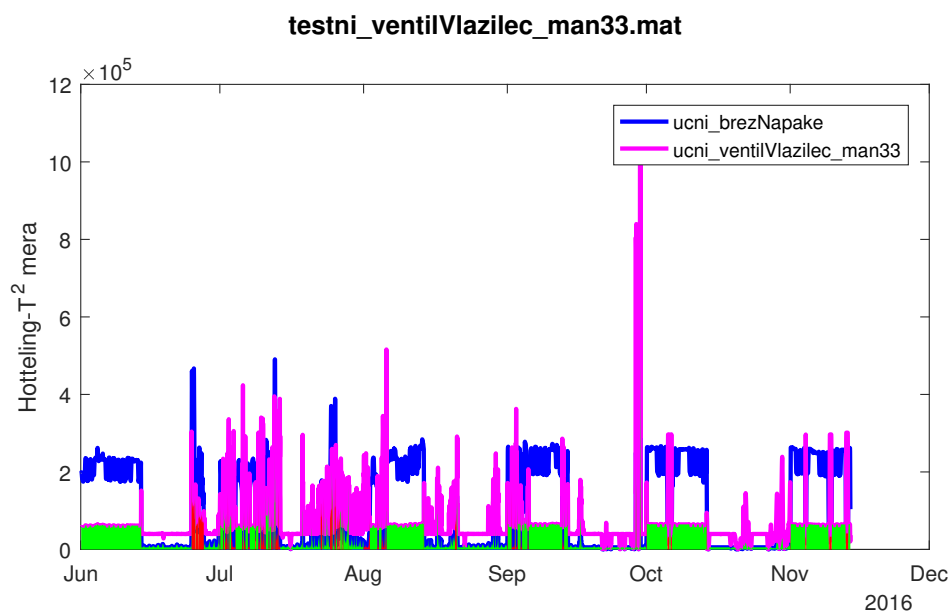
3.5.3 Delno odprt ventil vlažilca

Ob pojavu te napake pričakujemo povišano izmerjeno vlažnost na vpihu zraka. Pričakovan odziv regulacijske strukture je zapiranje ventila vlažilca ter, ko dosežemo zaprt ventil vlažilca, odpiranje ventila hladilnika. Povečano hlajenje se pokaže na znižani temperaturi vpihanega zraka, kar regulacijski algoritem 'popravlja' z odpiranjem ventilov rekuperatorja ter grelca.

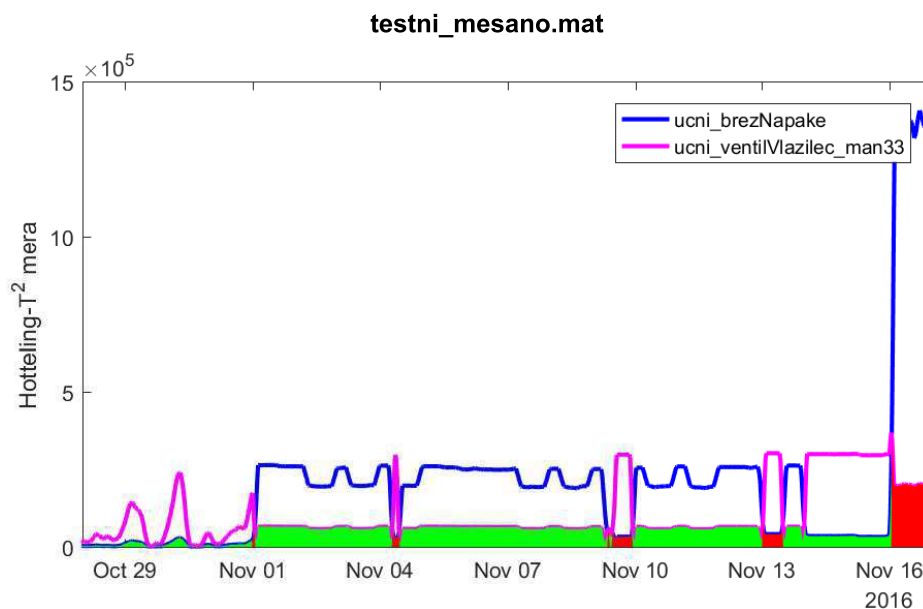
Uspešnost detektorja na učnih in testnih setih prikazujejo tabele 3.20 – 3.23.



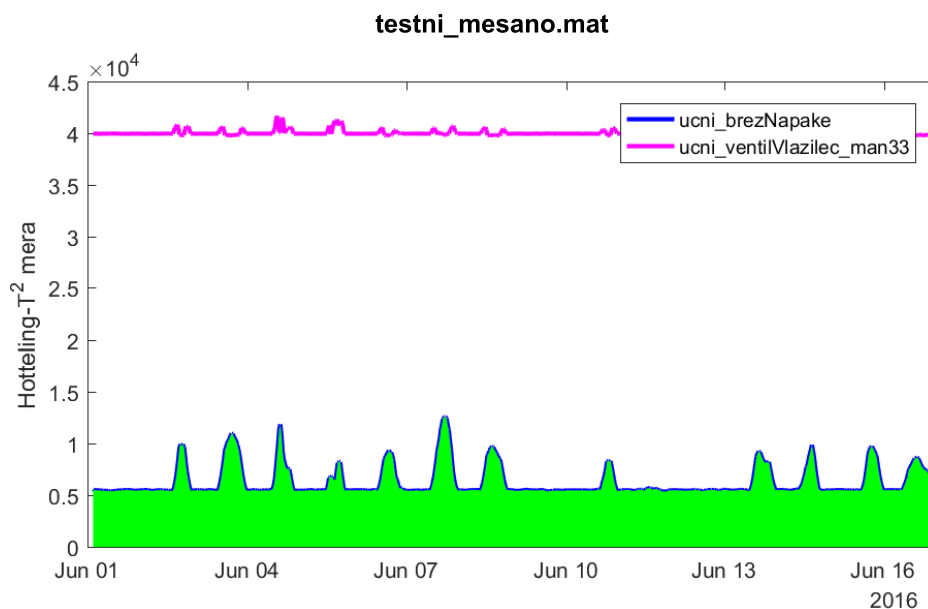
Slika 3.20: Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu.



Slika 3.21: Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na enostavnem testnem vzorcu.



Slika 3.22: Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.



Slika 3.23: Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu – obdobje zaprtega ventila rekuperatorja.

nastavitev	vrednost
regresorji	odprtost ventila vlažilca
	sprememba specifične vlažnosti
	SP vlage vpiha za vlaženje
osnovni čas vzorčenja	60 s
čas vzorčenja po povprečenju	600 s
decimiranje	obdržimo vsak tretji vzorec
uporaba uteži	ne
metoda skaliranja in premika	osrediščenje in enotina varianca
metoda zaznavanja reda	Rato&Reis
CPV	95 %
mera	Hotteling- T^2 mera

Tabela 3.19: Nastavitve detektorja delno odprtega ventila vlažilca za mešan testni set.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	3,6%	96,4%

Tabela 3.20: Tabela uspešnosti detektorja delno odprtega ventila vlažilca na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	79,7 %	20,3 %
ni dejanske napake	/	/

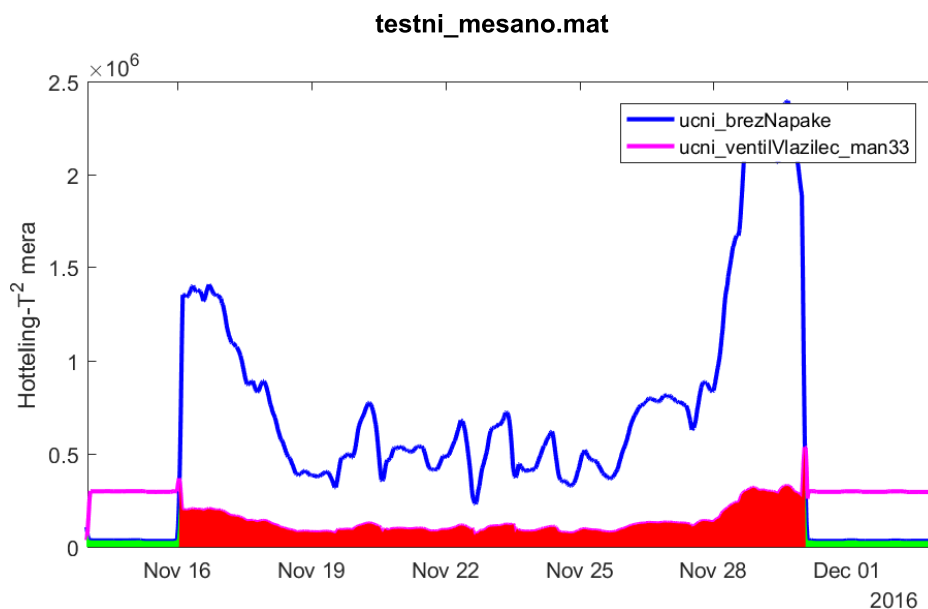
Tabela 3.21: Tabela uspešnosti detektorja delno odprtega ventila vlažilca na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	83,8 %	16,2 %
ni dejanske napake	5,6 %	94,4 %

Tabela 3.22: Tabela uspešnosti detektorja delno odprtega ventila vlažilca na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	90,5 %	9,5 %
ni dejanske napake	9,3 %	90,7 %

Tabela 3.23: Tabela uspešnosti detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).



Slika 3.24: Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu – obdobje odprtega ventila hladilnika – nepravilno zaznana napaka.

Na podlagi tabel 3.20–3.23 ter slik 3.20–3.24 lahko ugotovimo, da v večini primerov detektor deluje dobro, težavo pa povzroča lažno zaznavanje napake, ko se pojavi napaka na ventilu hladilnika, ko je ta povsem odprt.

3.5.4 Zaprt ventil rekuperatorja

Vpliv te napake na zaprtozančni sistem bo zmanjšano gretje, kar regulacijska struktura odpravi z dodatnim odpiranjem ventila rekuperatorja, kar nima vpliva na proces, ter kasneje tudi odpiranjem ventila grelca. Pričakujemo, da grelec lahko nadomesti izpad hlajenja na rekuperatorju, zato se napaka ne pokaže na temperaturi vpiha, pokaže pa se na razmerju med prirastkom temperature na sistemu in odprtostjo grelnega in rekuperatorskega ventila.

nastavitev	vrednost
	ΔT
regresorji	odprtost ventila rekuperatorja odprtost ventila grelca
osnovni čas vzorčenja	60 s
čas vzorčenja po povprečenju	60 s
decimiranje	vzamemo vsak drugi vzorec
uporaba uteži	da
metoda skaliranja in premika	osrediščenje in enotina varianca
metoda zaznavanja reda	Rato&Reis
CPV	enake rezultate dobimo pri vrednostih 70 %, 80 % in 90 %
mera	Q-mera

Tabela 3.24: Nastavitve detektorja zaprtega ventila rekuperatorja za mešan testni set.

Uspešnost detektorja na učnih in testnih setih prikazujejo tabele 3.25 – 3.28.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	19,6 %	80,4 %

Tabela 3.25: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila rekuperatorja na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	70,7 %	29,3 %
ni dejanske napake	0,0 %	100,0 %

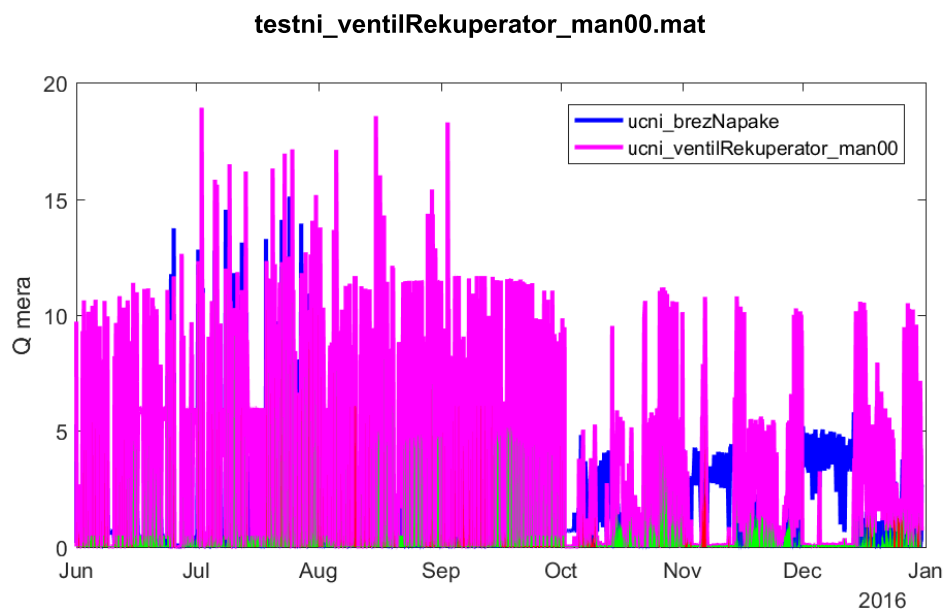
Tabela 3.26: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila rekuperatorja na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	77,0 %	23,0 %
ni dejanske napake	18,2 %	81,8 %

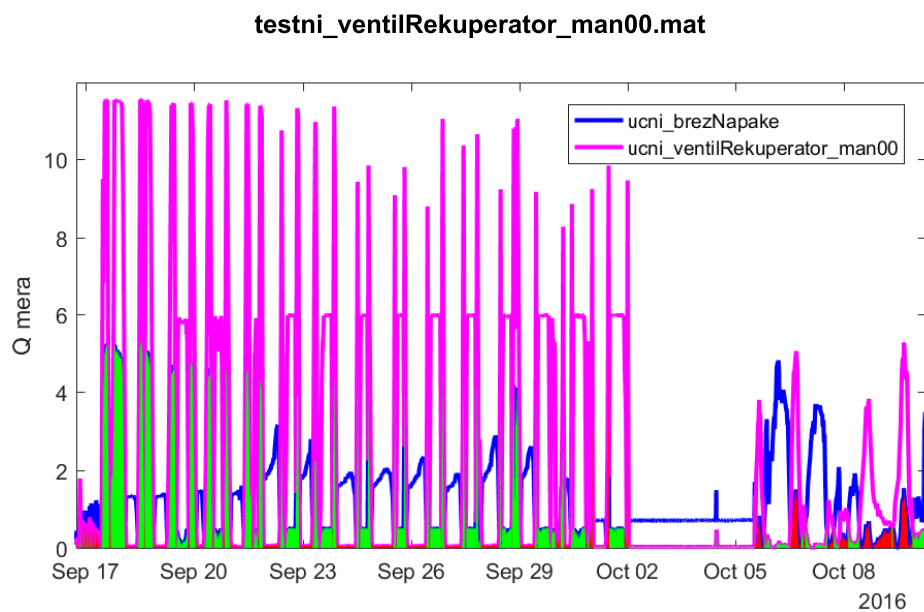
Tabela 3.27: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila rekuperatorja na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	76,0 %	24,0 %
ni dejanske napake	30,1 %	69,9 %

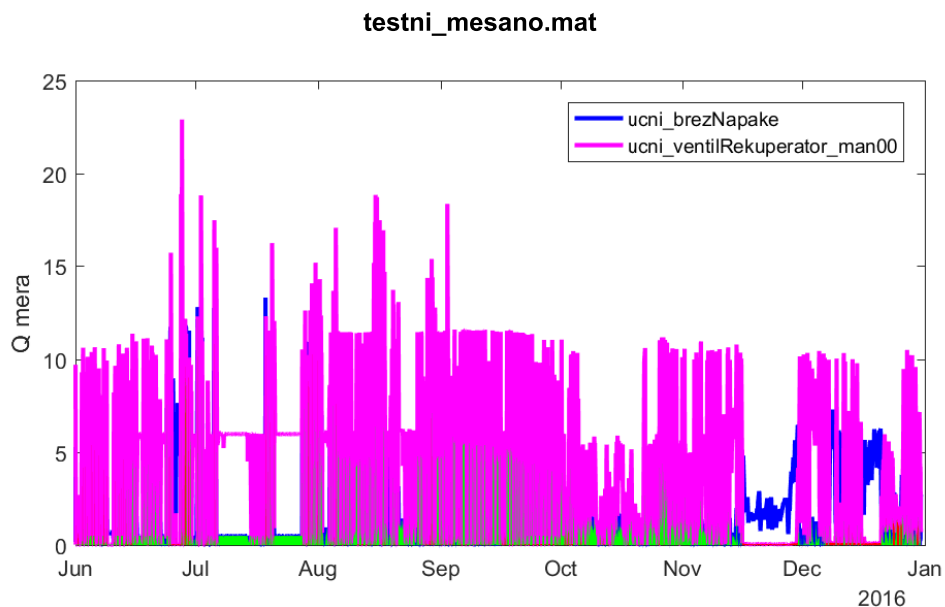
Tabela 3.28: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila rekuperatorja na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).



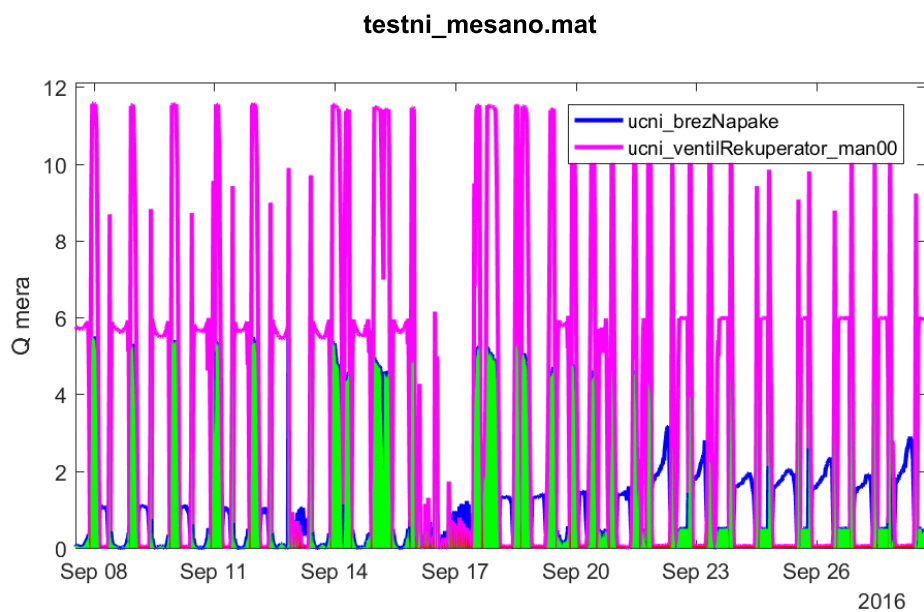
Slika 3.25: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila rekuperatorja na enostavnem testnem vzorcu.



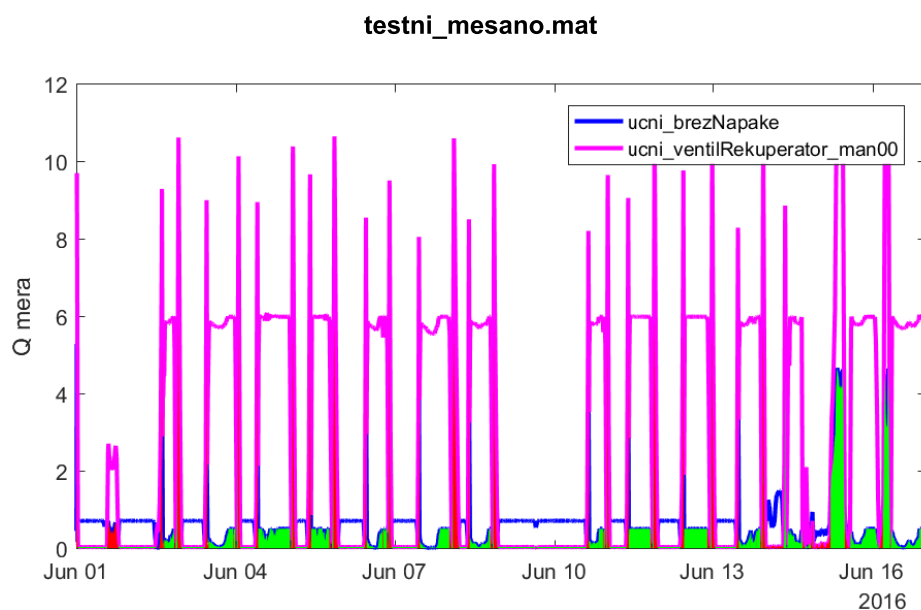
Slika 3.26: Detajl s slike 3.25.



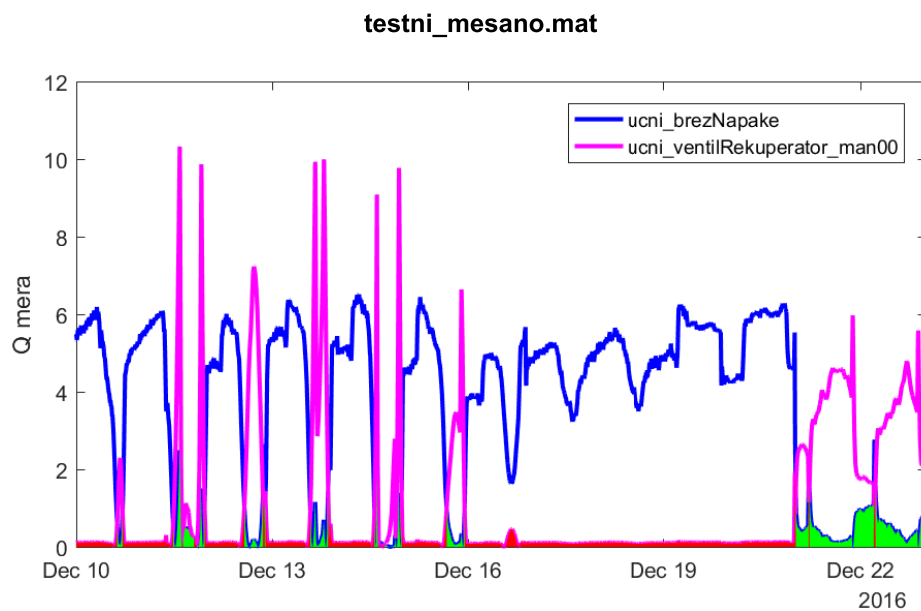
Slika 3.27: Prikaz delovanja detektorja delno odprtega ventila vlažilca na mešanem testnem vzorcu.



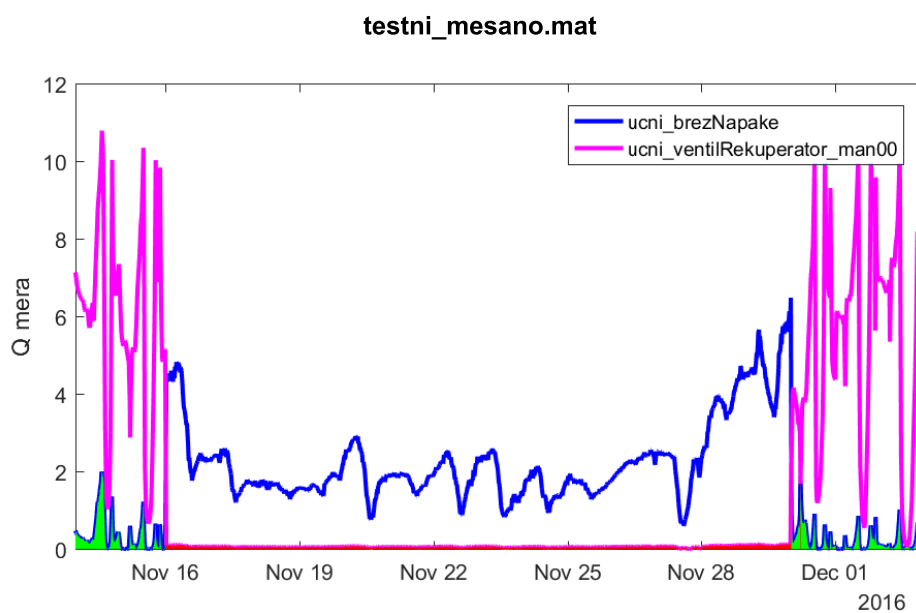
Slika 3.28: Detajl s slike 3.27.



Slika 3.29: Prikaz delovanja detektorja delno zaprtega ventila rekuperatorja na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.



Slika 3.30: Prikaz delovanja detektorja delno zaprtega ventila rekuperatorja na mešanem testnem vzorcu – obdobje zaprtega ventila grelca – nepravilno zaznana napaka.



Slika 3.31: Prikaz delovanja detektorja delno zaprtega ventila rekuperatorja na mešanem testnem vzorcu – obdobje odprtega ventila hladilnika – nepravilno zaznana napaka.

Kot prikazujeta sliki 3.30 in 3.31 ter tabela 3.28, ima detektor z nekaterimi napakami težave (lažna zaznavanja napak).

3.5.5 Odprt ventil rekuperatorja

Pričakovan vpliv te napake na sistem je začasno povišana temperatura na vpihu zraka. Pričakujemo, da odstopanje od referenčnih vrednosti regulacijski algoritem odpravi s spremembo odprtosti ventila hladilnika, ne pa tudi s spremembo odprtosti ventila grelca.

Za to napako nismo našli dovolj dobrega detektorja. Vseeno so tukaj podani najboljši (z vidika uspešnosti delovanja na mešanem testnem setu) rezultati (glej tabele 3.29–3.32). Ker so rezultati slabi, ne podajamo samih nastavitev detektorja.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	47,9 %	52,1 %

Tabela 3.29: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila rekuperatorja na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	81,9 %	18,1 %
ni dejanske napake	23,3 %	71,1 %

Tabela 3.30: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila rekuperatorja na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	82,0 %	18,0 %
ni dejanske napake	45,2 %	54,8 %

Tabela 3.31: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila rekuperatorja na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	83,5 %	16,5 %
ni dejanske napake	45,7 %	54,3 %

Tabela 3.32: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila rekuperatorja na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).

3.5.6 Povišana temperatura grelnega medija

Ob pojavu te napake pričakujemo povečan vpliv grelnega elementa, kar bo povzročilo njegovo postopno zapiranje.

Za to napako nismo našli dovolj dobrega detektorja. Vseeno so tukaj podani najboljši (z vidika uspešnosti delovanja na mešanem testnem setu) rezultati (glej tabele 3.33–3.36). Ker so rezultati slabi, ni podanih samih nastavitev detektorja.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	52,5 %	47,5 %

Tabela 3.33: Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature grelnega medija na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	83,2 %	16,8 %
ni dejanske napake	/	/

Tabela 3.34: Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature grelnega medija na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	85,3 %	14,7 %
ni dejanske napake	86,3 %	13,7 %

Tabela 3.35: Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature grelnega medija na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).

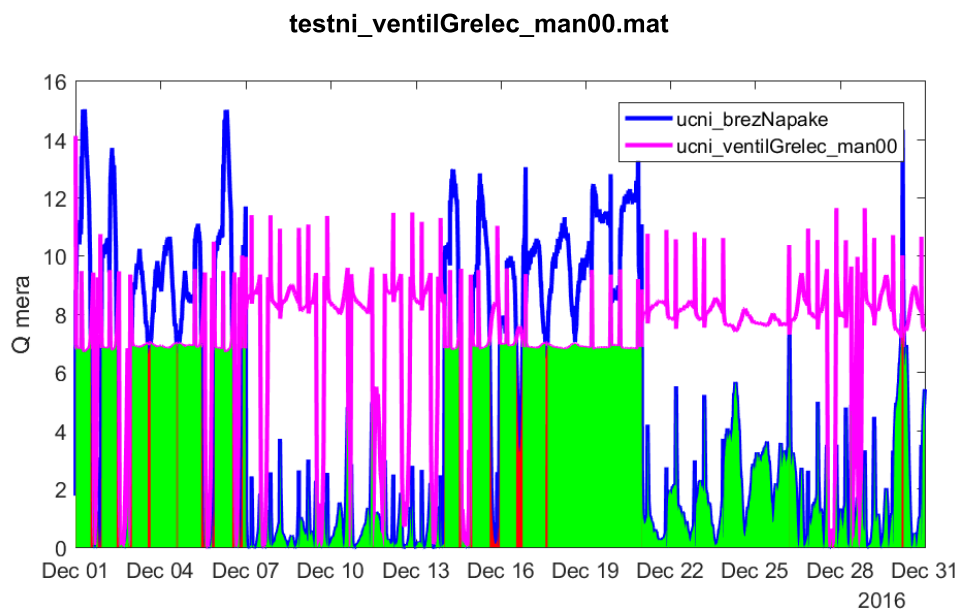
	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	89,9 %	10,1 %
ni dejanske napake	51,6 %	48,4 %

Tabela 3.36: Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).

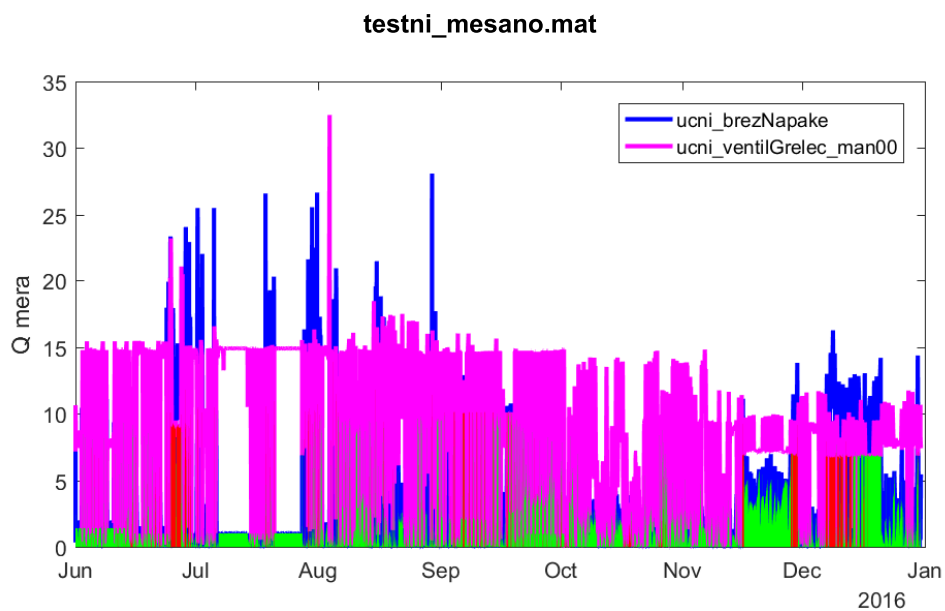
3.5.7 Zaprt ventil grelca

Pričakovati je, da je vpliv napake zaprtega ventila grelca podoben vplivoma napake znižane temperature grelnega medija ter napake zaprtega ventila rekuperatorja.

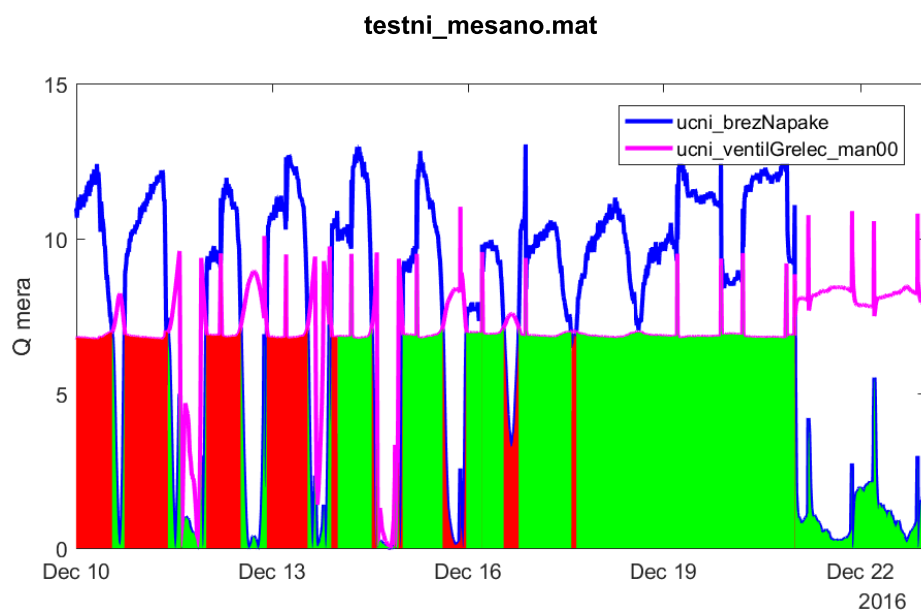
Uspešnost detektorja, predstavljenega v tabeli 3.37, na učnih in testnih setih prikazujejo tabele 3.38 – 3.41.



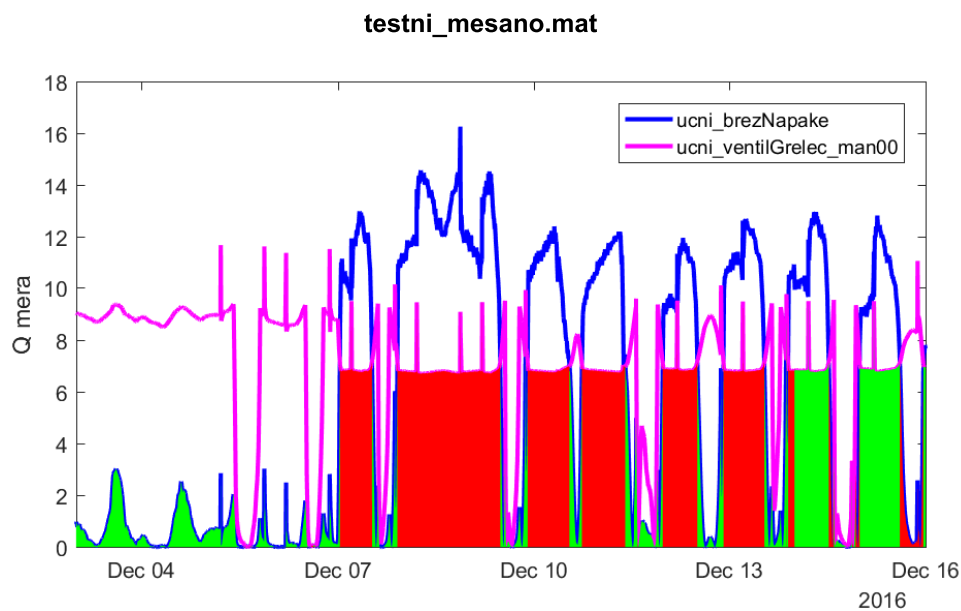
Slika 3.32: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila grelca na enostavnem testnem vzorcu.



Slika 3.33: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu.



Slika 3.34: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.



Slika 3.35: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu – obdobje znižane temperature grelnega medija – nepravilno zaznana napaka.

nastavitev	vrednost
	ΔT
regresorji	SP temperature vpiha za gretje odprtost ventila rekuperatorja odprtost ventila grelca
osnovni čas vzorčenja	60 s
čas vzorčenja po povprečenju	60 s
decimiranje	brez
uporaba uteži	da
metoda skaliranja in premika	osrediščenje in enotina varianca
metoda zaznavanja reda	Rato&Reis
CPV	95 %
mera	Q-mera

Tabela 3.37: Nastavitve detektorja zaprtega ventila grelca za mešan testni set.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	9,6 %	90,4 %

Tabela 3.38: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila grelca na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	86,4 %	13,6 %
ni dejanske napake	9,2 %	90,8 %

Tabela 3.39: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila grelca na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	84,7 %	15,3 %
ni dejanske napake	2,3 %	97,7 %

Tabela 3.40: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila grelca na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.5).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	87,9 %	12,1 %
ni dejanske napake	11,9 %	88,1 %

Tabela 3.41: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).

Iz slik 3.32–3.35 lahko razberemo kakovost detektorja. Slika 3.32 potrjuje dobro delovanje na enostavnem (prisotna je le napaka zaprtega ventila grelca) testnem vzorcu. Sliki 3.34 in 3.35 podrobneje kažeta delovanje detektorja na mešanem testnem setu (slika 3.33). Na sliki 3.34 je opazno dobro zaznavanje napake, za katero je detektor zgrajen in naučen. Na sliki 3.35 lahko opazimo težavo napačne zaznave napake (ang. *false positive*) v obdobju, ko je na testnem setu prisotna napaka 'povišana temperatura grelnega medija'. Druge nepravilnosti v delovanju detektorja (napačne zaznave) se pojavijo ob prehodnih pojavih in hitro izzvenijo.

3.5.8 Odprt ventil grelca

Napaka odprtega ventila grelca po naših pričakovanjih pomeni povišano temperaturo na vpihu zraka, kar izzove ustrezen odziv regulatorjev: zapiranje najprej grelca (kar nima vpliva), nato rekuperatorja (ki je bil povsem odprt), sledi odpiranje ventila hladilnika. V nekaterih situacijah je pričakovati, da odpiranje ventila hladilnika povzroči padec vlažnosti.

Rezultate dobljenega detektorja na učnih in testnih vzorcih prikazujejo tabele 3.42–3.45. Na podlagi rezultatov, podanih v tabelah, se detektor zdi zadovoljiv, a grafičen prikaz na sliki 3.36 govori drugače. Slika prikazuje zaznavanje napake odprtega ventila grelca na mešanem testnem setu, opaziti je slabo robustnost ter veliko prehodov med zaznavanjem in nezaznavanjem napake. Detektor ni primeren.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	38,8 %	61,2 %

Tabela 3.42: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila grelca na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	80,0 %	20,0 %
ni dejanske napake	35,5 %	64,5 %

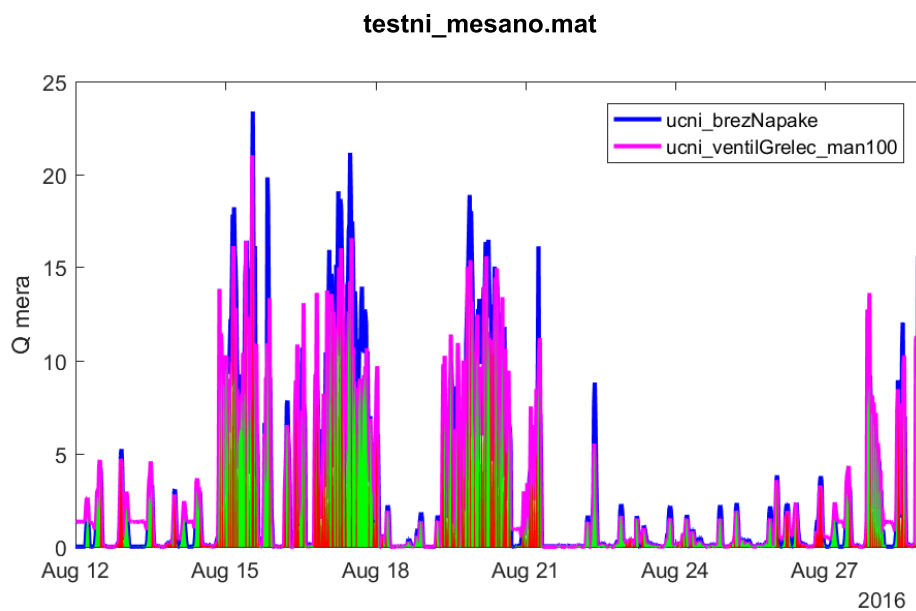
Tabela 3.43: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila grelca na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	79,6 %	20,4 %
ni dejanske napake	40,5 %	59,5 %

Tabela 3.44: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila grelca na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	80,6 %	19,4 %
ni dejanske napake	29,4 %	70,6 %

Tabela 3.45: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).



Slika 3.36: Prikaz delovanja detektorja odprtega ventila grelca na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.

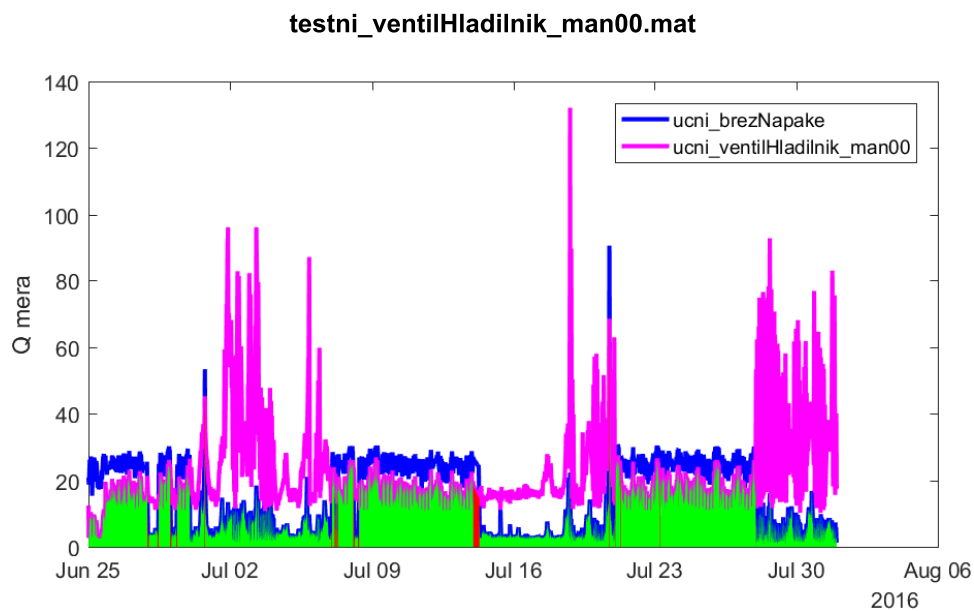
3.5.9 Zaprt ventil hladilnika

Pričakujemo, da zaprt ventil na tem elementu povzroči višanje regulacijskega signala za odpiranje ventila hladilnika, kar pa nima vpliva na odziv sistema. Pričakujemo, da vpliva te napake regulacijski sistem ne more izničiti.

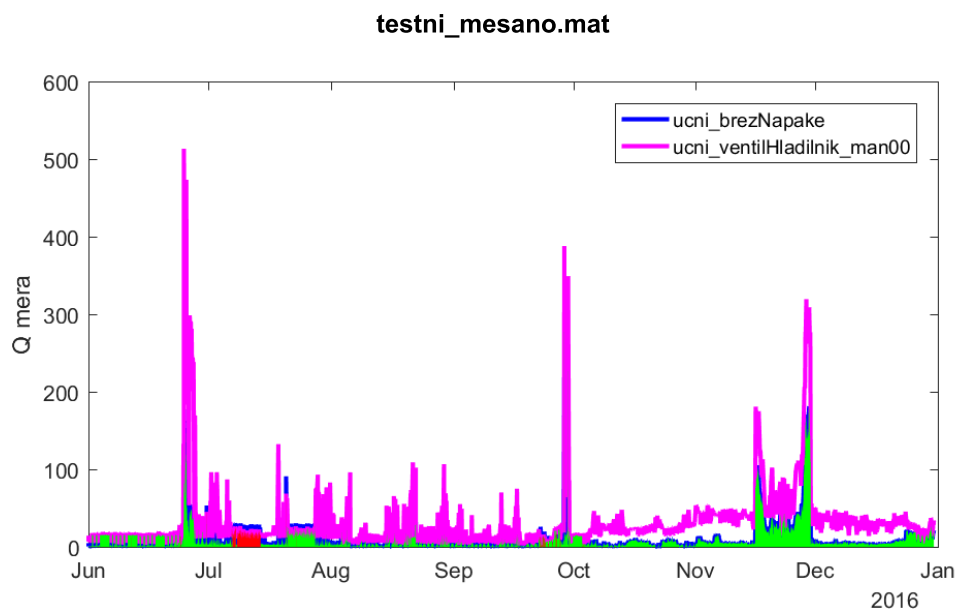
nastavitev	vrednost
	ΔT
regresorji	SP temperature vpiha za hlajenje odprtost ventila hladilnika temperatura hladilnega medija sprememba specifične vlažnosti
osnovni čas vzorčenja	60 s
čas vzorčenja po povprečenju	60 s
decimiranje	brez
uporaba uteži	da
metoda skaliranja in premika	osrediščenje in enotina varianca
metoda zaznavanja reda	Rato&Reis
CPV	enake rezultate dobimo pri vrednostih 70 % in 80 %
mera	Q-mera

Tabela 3.46: Nastavitve detektorja zaprtega ventila hladilnika za mešan testni set.

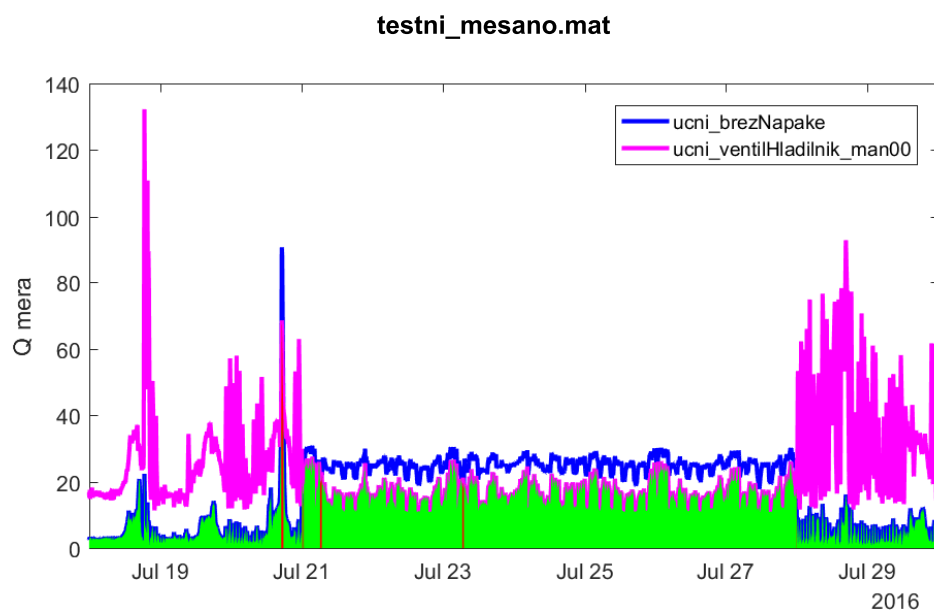
Uspešnost detektorja na učnih in testnih setih prikazujejo tabele 3.47 – 3.50.



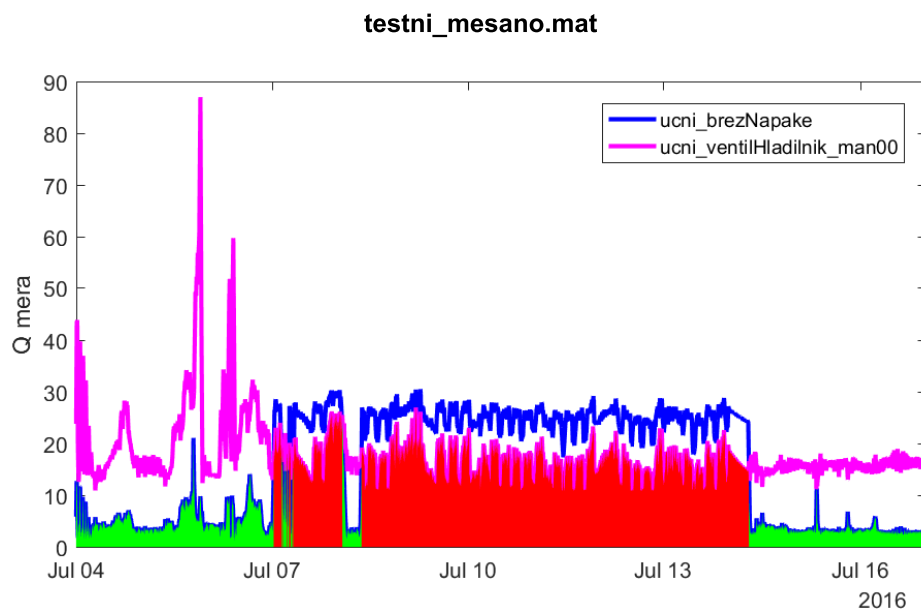
Slika 3.37: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila hladilnika na enostavnem testnem vzorcu.



Slika 3.38: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu.



Slika 3.39: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.



Slika 3.40: Prikaz delovanja detektorja zaprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu – obdobje povišane temperature hladilnega medija – nepravilno zaznana napaka.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	1,1 %	98,9 %

Tabela 3.47: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila hladilnika na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	93,9 %	6,1 %
ni dejanske napake	0,0 %	100,0 %

Tabela 3.48: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila hladilnika na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	96,8 %	3,2 %
ni dejanske napake	2,0 %	98,0 %

Tabela 3.49: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila hladilnika na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.5).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	99,1 %	0,9 %
ni dejanske napake	4,4 %	95,6 %

Tabela 3.50: Tabela uspešnosti detektorja zaprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).

Slike 3.37–3.40 prikazujejo delovanje detektorja za zaprt ventil hladilnika. Vidno je, da je delovanje dobro tako na enostavnem, kot na mešanem testnem vzorcu. Edina izjema oziroma težava je napačna zaznava napake prikazana na sliki 3.40. Detektor v tem primeru javi zaznano napako v obdobju, ko je v testnem setu prisotna napaka 'povišana temperatura hladilnega medija', čeprav je

bila napaka zaprt ventil hladilnika.

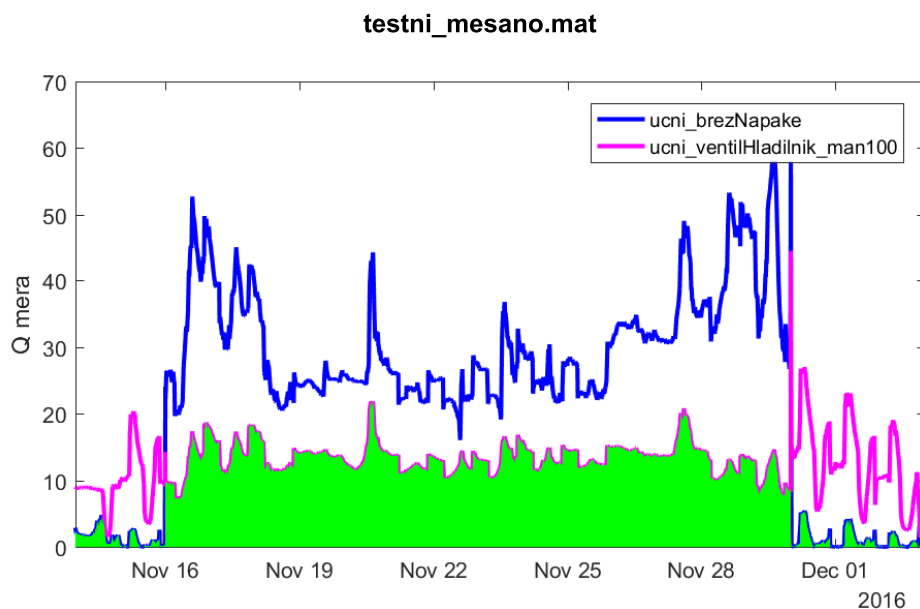
3.5.10 Odprt ventil hladilnika

Pričakovan vpliv napake vedno odprtega ventila hladilnika je: sprva znižanje temperature vpihanega zraka, zapiranje ventila hladilnika ter odpiranje ventilov rekuperatorje ter grelca. Odprt ventil hladilnika povzroči tudi povišano kondenzacijo ter posledično nižjo vlažnost zraka na vpihu, kar regulacijski algoritem kompenzira z odpiranjem ventila vlažilca.

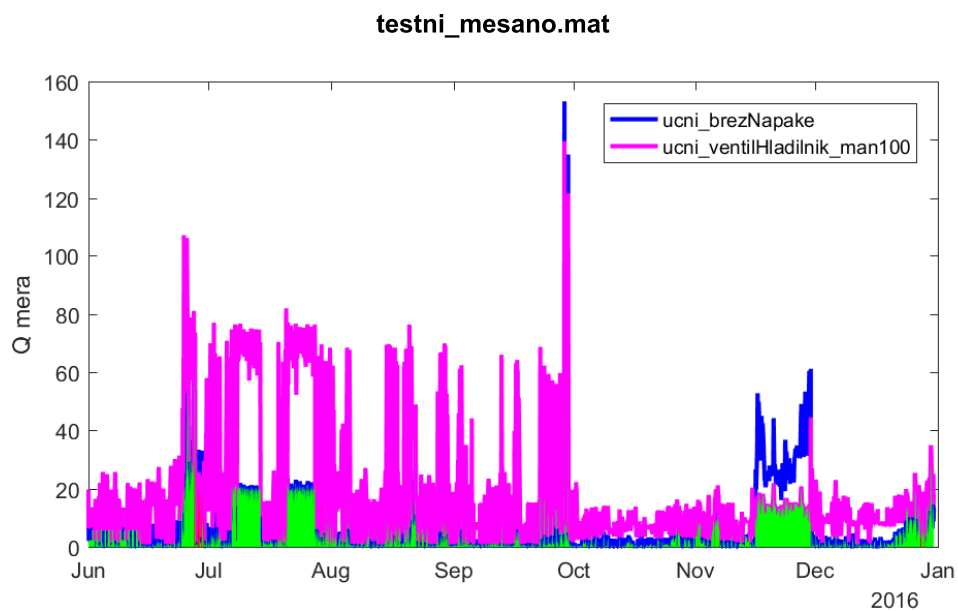
nastavitev	vrednost
	ΔT
regresorji	SP temperature vpiha za hlajenje
	odprtost ventila hladilnika
	temperatura hladilnega medija
	odprtost ventila rekuperatorja
	sprememba specifične vlažnosti
osnovni čas vzorčenja	60 s
čas vzorčenja po povprečenju	60 s
decimiranje	brez
uporaba uteži	da
metoda skaliranja in premika	osrediščenje in enotina varianca
metoda zaznavanja reda	Rato&Reis
CPV	enake rezultate dobimo pri vrednostih
	95 % in 80 %
mera	Q-mera

Tabela 3.51: Nastavitve detektorja odprtega ventila hladilnika za mešan testni set.

Uspešnost detektorja na učnih in testnih setih prikazujejo tabele 3.52 – 3.55.



Slika 3.41: Prikaz delovanja detektorja odprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.



Slika 3.42: Prikaz delovanja detektorja odprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	0,3 %	99,7 %

Tabela 3.52: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila hladilnika na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	71,4 %	28,6 %
ni dejanske napake	2,0 %	98,0 %

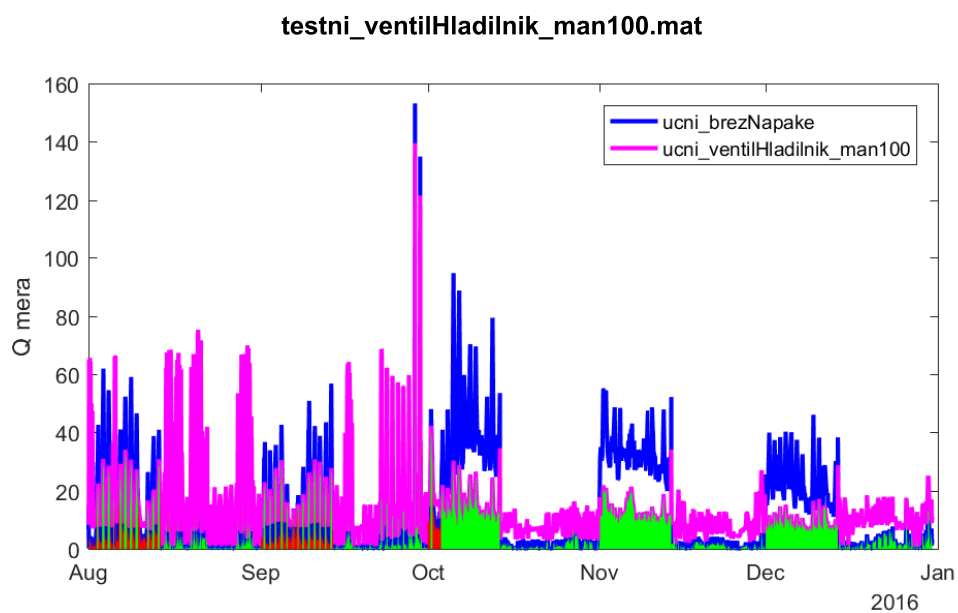
Tabela 3.53: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila hladilnika na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	68,1 %	31,9 %
ni dejanske napake	0,3 %	99,7 %

Tabela 3.54: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila hladilnika na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.5).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	100,0 %	0,0 %
ni dejanske napake	1,3 %	98,7 %

Tabela 3.55: Tabela uspešnosti detektorja odprtega ventila hladilnika na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).



Slika 3.43: Prikaz delovanja detektorja odprtega ventila hladilnika na enostavnem testnem vzorcu.

Slika 3.42 potrjuje dobre rezultate tabele 3.55. Na sliki 3.43 je opazno občutno slabše delovanje v začetnem obdobju (avgusta in septembra).

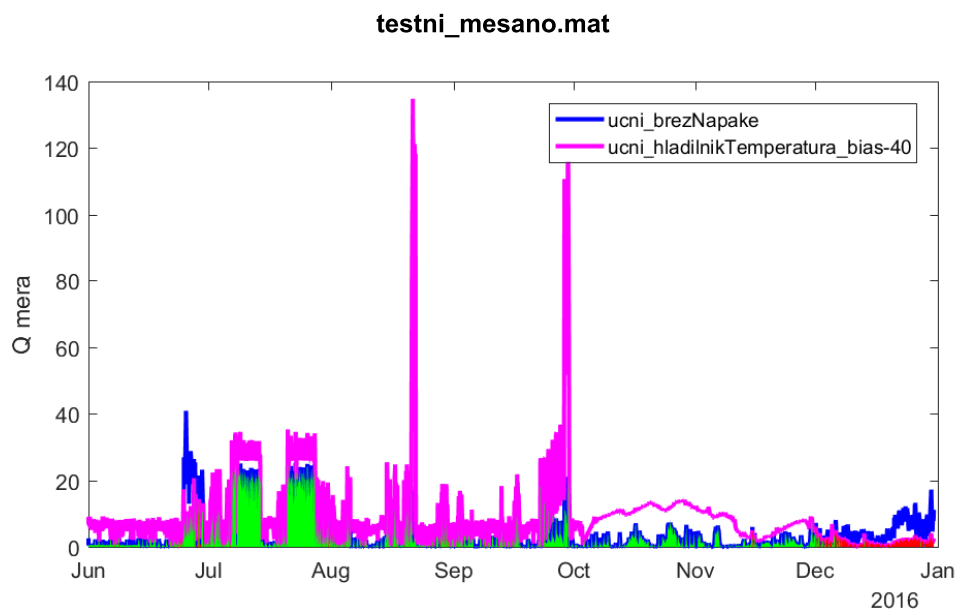
3.5.11 Znižana temperatura hladilnega medija

Napaka znižane temperature hladilnega medija se po naših predvidevanjih pokaže v povečanem vplivu odprtosti ventila hladilnika, kar povzroči zapiranje ventila hladilnika.

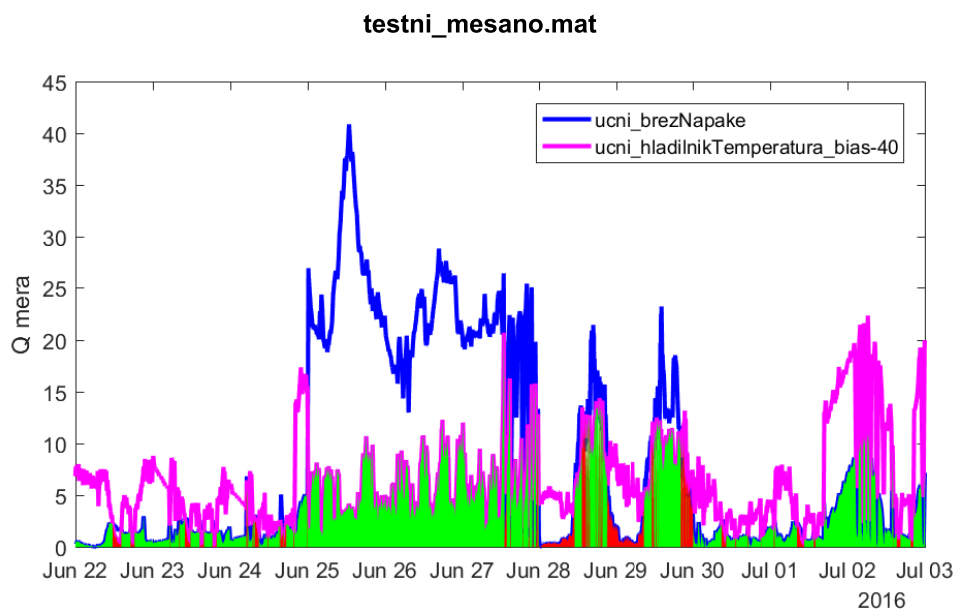
nastavitev	vrednost
	ΔT
regresorji	odprtost ventila hladilnika temperatura hladilnega medija
osnovni čas vzorčenja	60 s
čas vzorčenja po povprečenju	60 s
decimiranje	obdržimo vsak drugi vzorec
uporaba uteži	enaki rezultati z uporabo uteži in brez
metoda skaliranja in premika	osrediščenje in enotina varianca
metoda zaznavanja reda	Rato&Reis
CPV	enake rezultate dobimo pri vrednostih 60 %, 70 % in 80 %
mera	Q-mera

Tabela 3.56: Nastavitve detektorja znižane temperature hladilnega medija za mešan testni set.

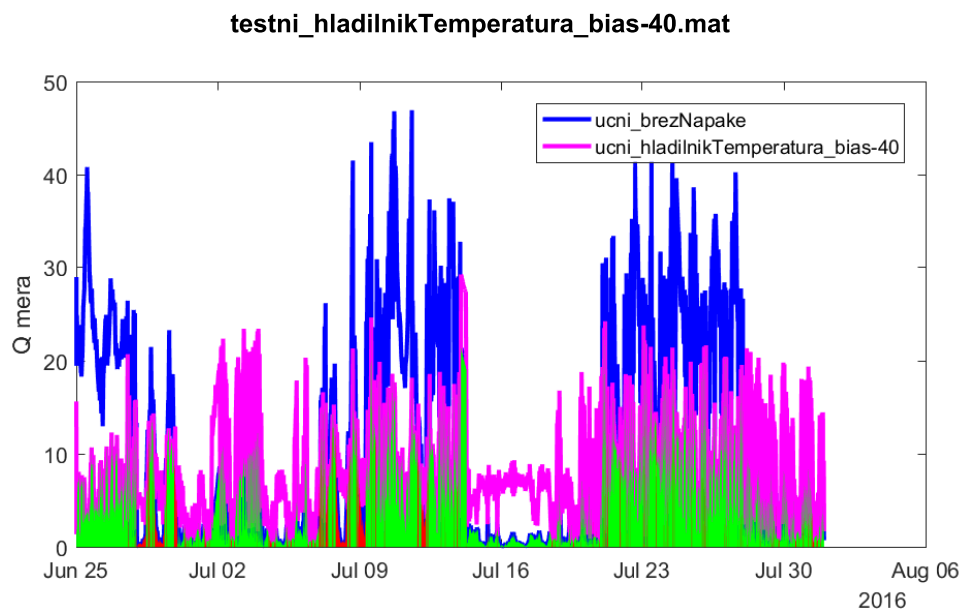
Uspešnost detektorja na učnih in testnih setih prikazujejo tabele 3.57 – 3.60.



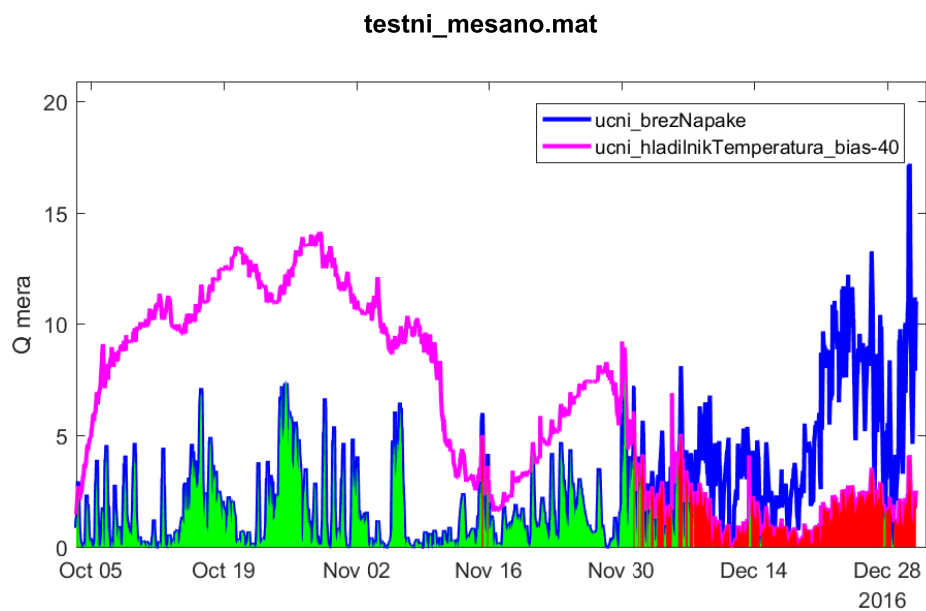
Slika 3.44: Prikaz delovanja detektorja znižane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu.



Slika 3.45: Prikaz delovanja detektorja znižane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.



Slika 3.46: Prikaz delovanja detektorja znižane temperature hladilnega medija na enostavnem testnem vzorcu.



Slika 3.47: Prikaz delovanja detektorja znižane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu – slabo delovanje na koncu simulacijskega intervala.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	16,0 %	84,0 %

Tabela 3.57: Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature hladilnega medija na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	69,0 %	31,0 %
ni dejanske napake	/	/

Tabela 3.58: Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature hladilnega medija na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	81,3 %	18,7 %
ni dejanske napake	7,9 %	92,1 %

Tabela 3.59: Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature hladilnega medija na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.5).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	73,6 %	26,4 %
ni dejanske napake	15,5 %	84,5 %

Tabela 3.60: Tabela uspešnosti detektorja znižane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).

Slika 3.45 prikazuje dobro delovanje – uspešno zaznavanje napake na mešanem testnem setu. Slika 3.47 kaže težave detektorja v decembru, saj v daljšem obdobju napačno zazna napako.

3.5.12 Povišana temperatura hladilnega medija

Ob pojavu te napake predvidevamo močno poslabšano delovanje hlajenja v našem simuliranem sistemu. Temperatura in specifična vlažnost izhodnega zraka se dvigneta. Regulacijska struktura poskrbi za dodatno odpiranje ventila hladilnika, kar lahko povzroči poslabšanje razmer (če je povišana temperatura hladilnega medija višja od temperature zraka na vhodu v hladilnik) ali omogoči izregulacijo motnje.

nastavitev	vrednost
	ΔT
regresorji	SP temperature vpiha za hlajenje odprtost ventila hladilnika temperatura hladilnega medija sprememba specifične vlažnosti
osnovni čas vzorčenja	60 s
čas vzorčenja po povprečenju	60 s
decimiranje	brez
uporaba uteži	enaki rezultati z uporabo uteži in brez
metoda skaliranja in premika	osrediščenje in enotina varianca
metoda zaznavanja reda	Rato&Reis
CPV	enake rezultate dobimo pri vrednostih 70 % in 80 %
mera	Q-mera

Tabela 3.61: Nastavitve detektorja povišane temperature hladilnega medija za mešan testni set.

Uspešnost detektorja na učnih in testnih setih prikazujejo tabele 3.62 – 3.65.

Slike 3.48–3.51 kažejo dobro delovanje detektorja v večini situacij. Težava je v napačnem zaznavanju napake v obdobju, ko je na testnem setu prisotna napaka

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	1,1 %	98,9 %

Tabela 3.62: Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature hladilnega medija na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	85,5 %	14,5 %
ni dejanske napake	/	/

Tabela 3.63: Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature hladilnega medija na učnem vzorcu s prisotno napako.

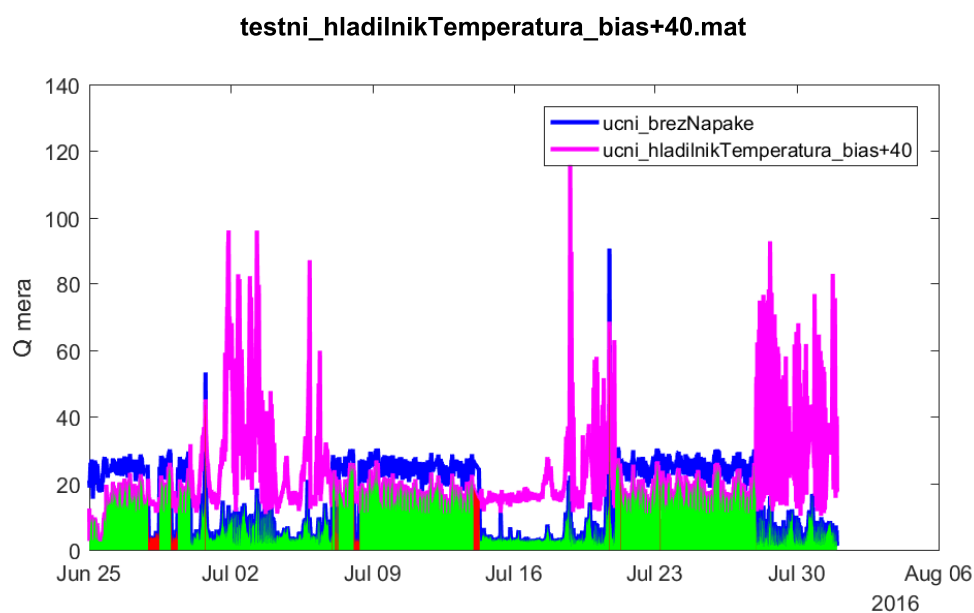
	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	92,6 %	7,4 %
ni dejanske napake	2,0 %	98,0 %

Tabela 3.64: Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature hladilnega medija na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.5).

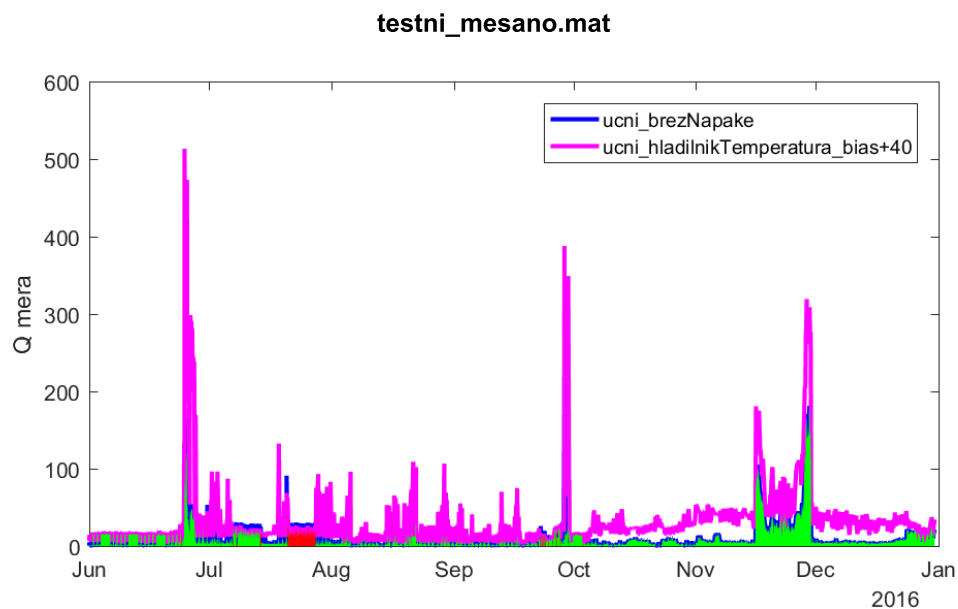
	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	93,6 %	6,4 %
ni dejanske napake	4,5 %	95,5 %

Tabela 3.65: Tabela uspešnosti detektorja povišane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).

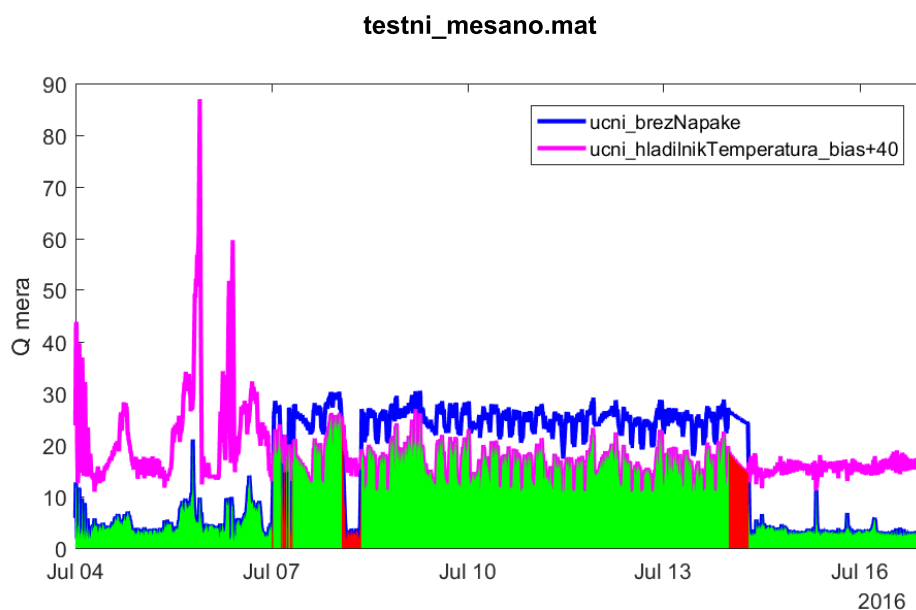
zaprtega ventila hladilnika.



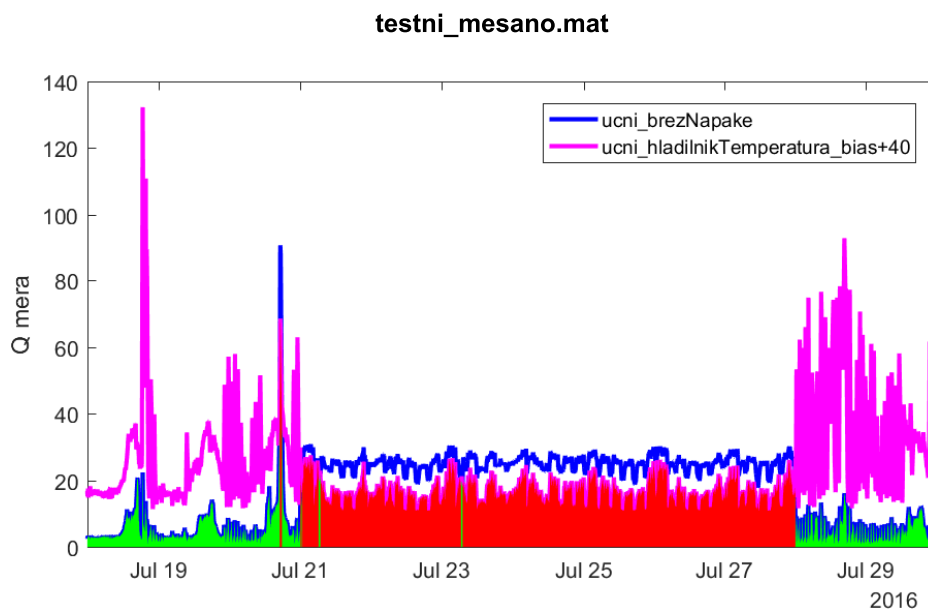
Slika 3.48: Prikaz delovanja detektorja povišane temperature hladilnega medija na enostavnem testnem vzorcu.



Slika 3.49: Prikaz delovanja detektorja povišane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu.



Slika 3.50: Prikaz delovanja detektorja povišane temperature hladilnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje prisotne napake, ki jo zaznavamo.



Slika 3.51: Prikaz delovanja detektorja povišane temperature grelnega medija na mešanem testnem vzorcu – obdobje zaprtega ventila hladilnika – nepravilno zaznana napaka.

3.5.13 Zmanjšan pretok odvodnega zraka

Zmanjšan pretok odvodnega zraka pomeni manj razpoložljive energije za gretje dovodnega zraka v rekuperatorju. Pričakovati je torej zmanjšan vpliv delovanja rekuperatorja ter posledično večanje odprtosti ventilov rekuperatorja ter grelca.

Za to napako nismo dobili dovolj dobrega detektorja. Vseeno so tukaj podani najboljši (z vidika uspešnosti delovanja na mešanem testnem setu) rezultati (tabele 3.66–3.69). Ker so rezultati slabi, se ne podajajo same nastavitve detektorja.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	48,8 %	51,2 %

Tabela 3.66: Tabela uspešnosti detektorja zmanjšanega pretoka odvodnega zraka na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	68,4 %	31,6 %
ni dejanske napake	/	/

Tabela 3.67: Tabela uspešnosti detektorja zmanjšanega pretoka odvodnega zraka na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	71,4 %	28,6 %
ni dejanske napake	49,0 %	51,0 %

Tabela 3.68: Tabela uspešnosti detektorja zmanjšanega pretoka odvodnega zraka na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	68,5 %	31,5 %
ni dejanske napake	54,4 %	45,6 %

Tabela 3.69: Tabela uspešnosti detektorja zmanjšane pretoka odvodnega zraka na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).

3.5.14 Povečan pretok odvodnega zraka

Napaka ima ravno nasproten učinek od napake zmanjšane pretoka odvodnega zraka – poveča se energija, ki je na voljo rekuperatorju, njegova grelna moč se poveča. Pričakovati je zapiranje ventilov grelca in rekuperatorja.

Za to napako nismo dobili dovolj dobrega detektorja. Vseeno so tukaj podani najboljši (z vidika uspešnosti delovanja na mešanem testnem setu) rezultati (tabele 3.70–3.73). Ker so rezultati slabi, se ne podajajo same nastavitve detektorja.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	/	/
ni dejanske napake	49,7 %	50,3 %

Tabela 3.70: Tabela uspešnosti detektorja povečanega pretoka odvodnega zraka na učnem vzorcu brez napake.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	60,0 %	40,0 %
ni dejanske napake	100,0 %	0,0 %

Tabela 3.71: Tabela uspešnosti detektorja povečanega pretoka odvodnega zraka na učnem vzorcu s prisotno napako.

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	57,8 %	42,2 %
ni dejanske napake	51,2 %	48,8 %

Tabela 3.72: Tabela uspešnosti detektorja povečanega pretoka odvodnega zraka na enostavnem testnem vzorcu (tabela 3.4).

	zaznana napaka	ni zaznane napake
dejanska napaka	75,6 %	24,4 %
ni dejanske napake	43,5 %	56,5 %

Tabela 3.73: Tabela uspešnosti detektorja povečanega pretoka odvodnega zraka na mešanem testnem vzorcu (tabela 3.8).

3.5.15 Komentar rezultatov

V predstavljenih rezultatih je opazno, da naketeri detektorji zmoto zaznavajo tudi druge napake. Primer je detektor napake znižane temperature grelnega medija, ki zaznava tudi napako zaprtega ventila grelca. To si lahko razlagamo z dejstvom, da imata obe napaki podoben vpliv na zaprtozančni sistem. Povzročita motnjo v obliki padajočega učinka grelca, kar regulacijski algoritem kompenzira s povečanjem odprtosti ventila grelca.

Drug tak primer je detektor delno odprtega ventila vlažilca, ki zaznava tudi napako povsem odprtega ventila hladilnika.

Vse pare prikazuje tabela 3.74 in za vse lahko ugotovimo, da sta si napaki (tista, za katero je detektor zgrajen, ter tista, ki jo je zmotno zaznal) podobni po vplivu na zaprtozančni sistem.

Za reševanje težave zmotnih zaznav na višjem nivoju, nad predstavljenim zaznavanjem napak, predlagamo uporabo ekspertnega sistema, ki na podlagi rezultatov različnih detektorjev ugotovi, ali je prišlo do lažnega zaznavanja ali ne (tipično se ob lažni zaznavi 'sprožita' tako 'pravi' kot 'napačni' detektor). Pri-

Detektor	Zmotno zaznane (<i>false positive</i>) napake
Povišana temperatura grelnega medija	Zaprt ventil grelca
Delno odprt ventil vlažilca	Povsem odprt ventil hladilnika
Zaprt ventil rekuperatorja	Odprt ventil hladilnika Zaprt ventil grelca
Zaprt ventil grelca	Povišana temperatura grelca
Zaprt ventil hladilnika	Povišana temperatura hladilnega medija
Povišana temperatura hladilnega medija	Zaprt ventil hladilnika

Tabela 3.74: Detektorji in njihove napačno zaznane napake.

prava takšnega ekspertnega sistema ni predmet tega magistrskega dela.

3.6 Dodatna analiza razmerja med tlakom in vrtljaji ventilatorja

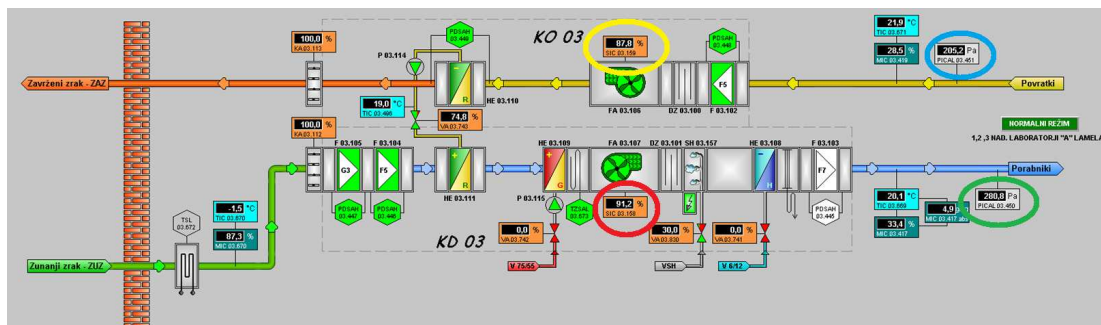
V predstavljenem modelu nimamo možnosti simulacije tlaka, zato nismo obravnavali detektorja za tlak. Zaznavanje napake na tlaku oziroma nepričakovane padce tlaka smo poskušali analizirati na meritvah realnega sistema.

Cilj analize, predstavljene v tem poglavju, je ugotoviti, ali je možno razmerja med merjenimi tlaki ter nastavljenimi vrtljaji dovodnega in odvodnega ventilatorja uporabiti za detekcijo napak.

Slika 3.52 prikazuje relevantne merjene signale:

- vrtljaji dovodnega frekvenčnega pretvornika (rumena oznaka);
- vrtljaji odvodnega frekvenčnega pretvornika (rdeča oznaka);
- tlak na vpihu (zelena oznaka) in

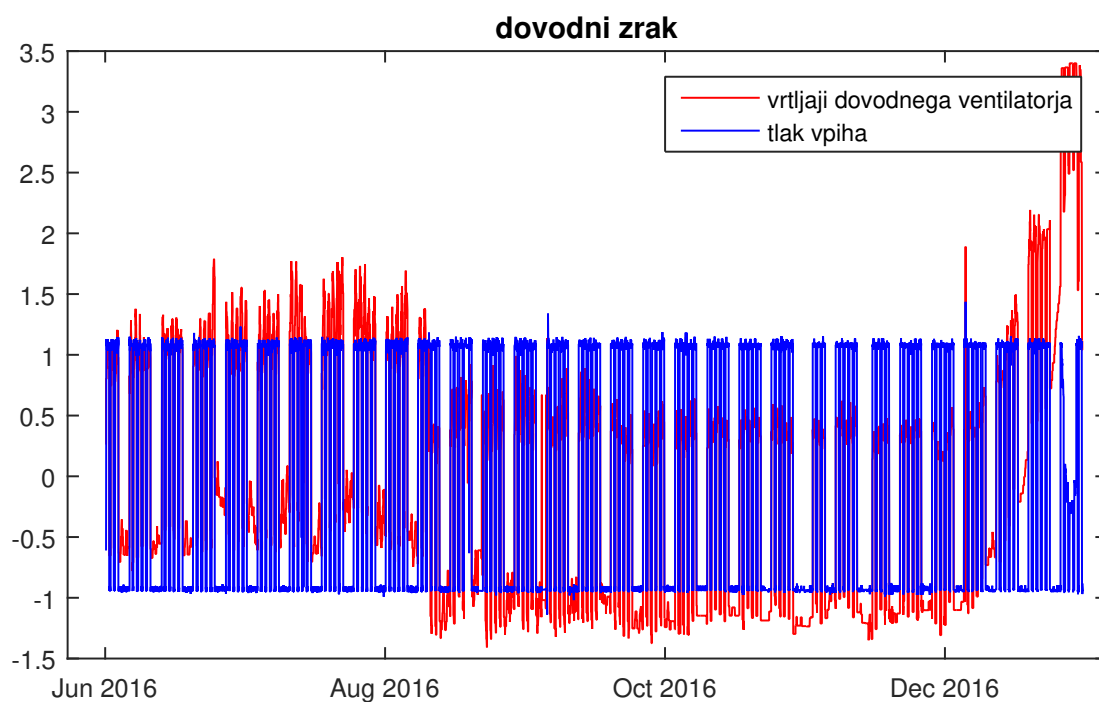
- tlak na odvodu (modra oznaka).



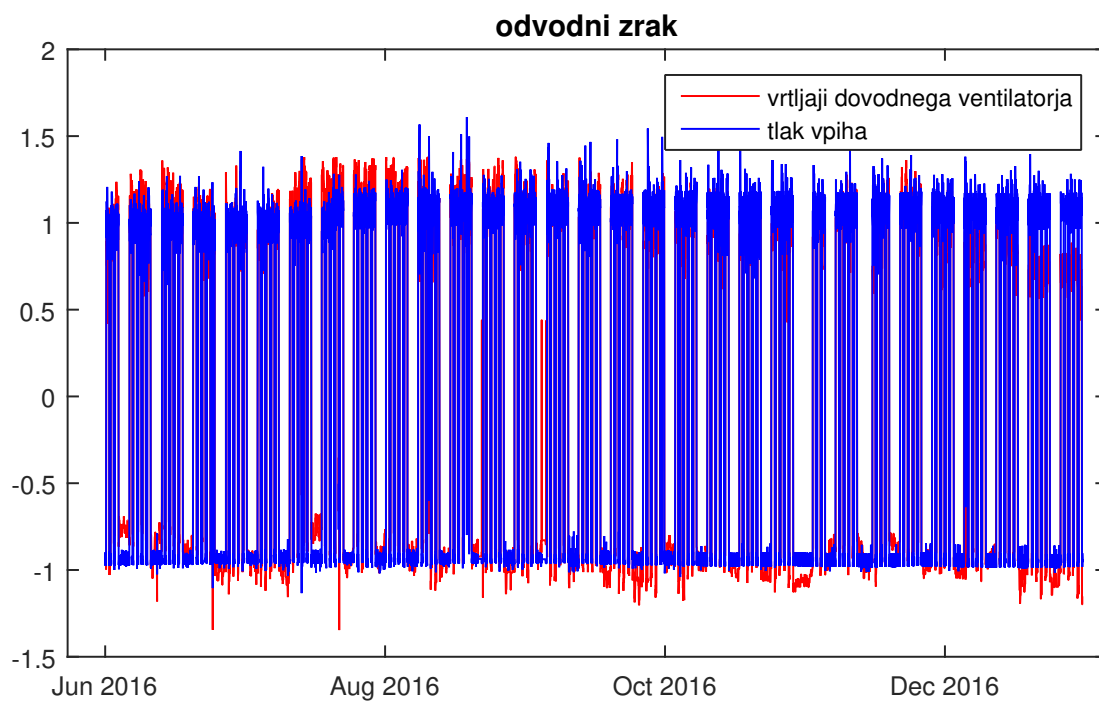
Slika 3.52: Slika procesa.

Cilj analize je bil ugotoviti, ali je med podanimi signali povezava, ki bi omogočala detekcijo napak. Odstopanje od te tipične povezave (razmerja) bi lahko pomenilo prisotnost napake.

Vsaka smer (dovod in odvod zraka) je bila analizirana samostojno. Oba merjena signala (vrtljaji in tlak) sta bila ustrezno prevzorčena (čas vzorčenja deset minut). Oba signala smo normirali. Normirane signale odvodnega in dovodnega tlaka ter vrtljaje pripadajočih ventilatorjev prikazujeta sliki 3.53 in 3.54.



Slika 3.53: Normirani dovodni meritvi.

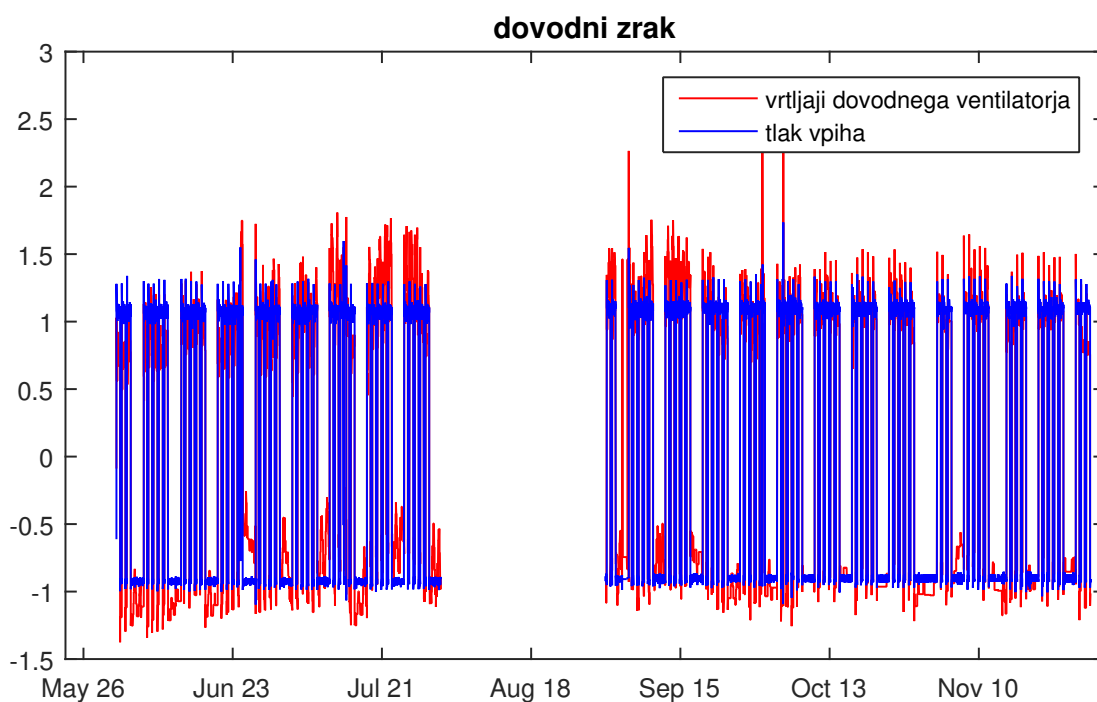


Slika 3.54: Normirani odvodni meritvi.

S prikaza normiranih dovodnih meritev lahko prepoznamo več tipov delovanja:

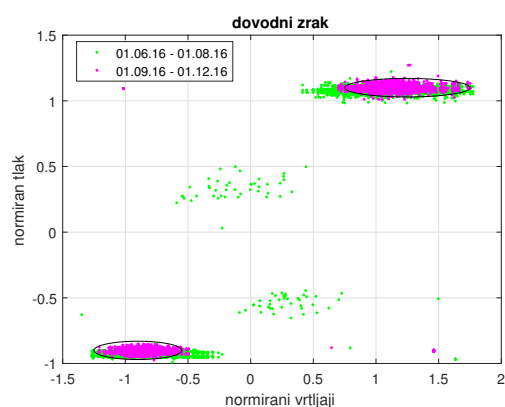
- od 1. 6. 2016 do 1. 8. 2016;
- prehodno obdobje od 1. 8. 2016 do 1. 9. 2016;
- od 1. 9. 2016 do 1. 12. 2016 in
- od 1. 12. 2016 do 31. 12. 2016.

Osredotočimo se predvsem na dve jasno definirani obdobji (prvo od 1. 6. do 1. 8. ter drugo od 1. 9. do 1. 12.). Slika 3.55 na enem grafu prikazuje dovodni meritvi, normirani v vsakem časovnem intervalu posebej.

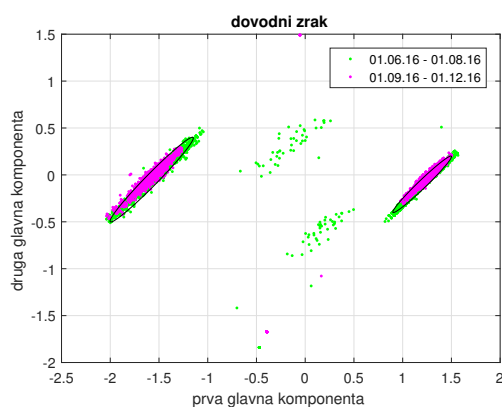


Slika 3.55: Dovodni meritvi, normirani na vsak interval posebej.

Slika 3.56 prikazuje normirane vzorce v prostoru meritev (osi sta komponenti vzorcev). Ena barva vzorcev predstavlja eno časovno obdobje. Opaziti je veliko prekrivanje med obema časovnima obdobjema v normiranem prostoru. Na vzorcih smo izvedeli PCA (obdržijo se vse komponente). Slika 3.57 prikazuje rezultate po opravljenem PCA. Opazna sta dva izrazita roja. Odstopanje od roja bi lahko razlagali kot delovanje z napako.



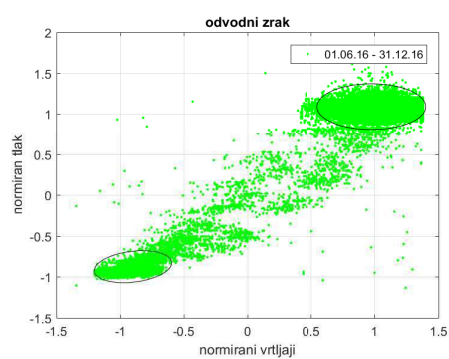
Slika 3.56: Normirani vzorci v prostoru meritev (dovod zraka).



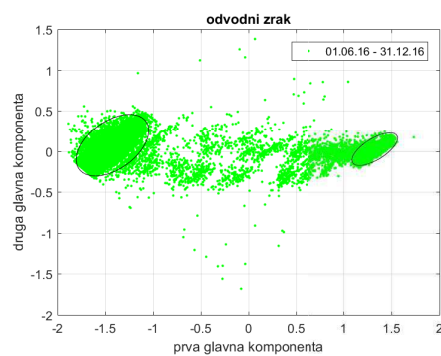
Slika 3.57: Normirani vzorci v prostoru glavnih komponent (dovod zraka).

Sliki 3.58 in 3.59 prikazujeta vzorce v normiranem prostoru meritev ter prostoru glavnih komponent. Za razliko od meritev dovodnega zraka, pri odvodnem zraku ni potrebno razdeliti vzorcev v več časovnih intervalov. Opaznih je več vzorcev, ki ne pripadajo nobenemu od dveh rojev.

Opravljen analiza pokaže, da je PCA metoda bolj primerna za zaznavanje napak v pretoku dovodnega zraka in manj primerna za zaznavanje napak v pretoku odvodnega zraka.



Slika 3.58: Normirani vzorci v prostoru meritev (odvod zraka).



Slika 3.59: Normirani vzorci v prostoru glavnih komponent (odvod zraka).

4 Zaključek

V magistrskem delu je predstavljeno modeliranje ter zaznavanje napak v klimatskem sistemu.

Predstavljeni so modeli pomembnejših elementov klimatskega sistema, za nekatere elemente je prikazanih več različnih modelov. Iz modelov posameznih elementov je zgrajen model celotnega klimatskega sistema. Z vizualno primerjavo modela ter signalov realnega sistema smo poiskali primerne parametre modela. Doseženo je zadovoljivo ujemanje med zgrajenim modelom in realnim sistemom. Uvedeno je tudi enako vodenje kot je realizirano na realnem sistemu.

V modelu je omogočena možnost vsiljevanja napak na nekaterih signalih: na ventilih odprtosti hladilnega, grelnega ter rekuperatorskega elementa, na ventilu odprtosti vlažilnega elementa, na vrtljajih ventilatorjev, na temperaturah grelnega in hladilnega medija. Predstavljeni so učni simulacijski teki, ki ponazarjajo delovanje simuliranega sistema ob pojavih štirinajstih različnih napak. Učni teki so uporabljeni za detektorje napak. Preiskali smo širok prostor nastavitvev ter za vsak detektor poiskali najboljše nastavitve. Prikazano je delovanje detektorjev na tesnih simulacijskih setih.

Zaznavanje napak deluje na osnovi metode glavnih komponent oziroma njene izpeljanke, dinamične metode glavnih komponent. Slednja se od prve razlikuje po tem, da se podanim meritvam najprej določi red. Glavna lastnost naučenega detektorja je transformacijska matrika, ki slika iz prostora meritev v prostor zadetkov. Predlagani sta dve metriki za ocenjevanje vhodnih vzorcev in s tem zaznavanje tistih z napakami.

Predstavljen način zaznavanja napak za večino predvidenih napak deluje z zadovoljivo uspešnostjo. V nekaterih primerih se pojavijo lažne zaznave napak (detektor napake A zazna napako, tudi ko je v sistemu prisotna napaka B). Vsi primeri lažnih zaznav so pojasnjeni in ne predstavljajo ovire za uspešno delovanje sistema.

Literatura

- [1] M. K. Mansour in M. Hassab, *Thermal Design of Cooling and Dehumidifying Coils*. INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [2] “Industrie 4.0.” <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/Home/home.html>. Accessed: 2017-12-04.
- [3] D. P. Gatley, *Understanding psychrometrics*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2005.
- [4] “Relative humidity of human exhaled breath.” <http://sci.bio.misc.narkive.com/Ix3hNM5I/relative-humidity-of-human-exhaled-breath>. Accessed: 2016-10-30.
- [5] B. Tashtoush, M. Molhim in M. Al-Rousan, “Dynamic model of an hvac system for control analysis,” *Energy*, vol. 30, no. 10, str. 1729–1745, 2005.
- [6] “Heat exchangers.” <http://www.engr.mun.ca/~yuri/Courses/MechanicalSystems/HeatExchangers.pdf>. Accessed: 2016-11-10.
- [7] Ø. Alvsvåg, “Hvac-systems: Modeling, simulation and control of hvac-systems,” 2011.
- [8] I. Skrjanc in D. Matko, “Predictive functional control based on fuzzy model for heat-exchanger pilot plant,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 8, no. 6, str. 705–712, 2000.

-
- [9] G. O. Brown, “The history of the darcy-weisbach equation for pipe flow resistance,” v *Environmental and Water Resources History*, str. 34–43, 2003.
- [10] “Converstion between relative and specific humidity.” <http://earthscience.stackexchange.com/questions/2360/how-do-i-convert-specific-humidity-to-relative-humidity>. Accessed: 2017-03-06.
- [11] C. Ramis, R. Romero in S. Alonso, “Relative humidity,” *Water Encyclopedia*, 2005.
- [12] “Si psychrometric chart.” <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49154-si-psychrometric-chart>. Accessed: 2017-03-06.
- [13] “Important concepts and choices in physical simulation.” <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/important-concepts-and-choices-in-physical-simulation.html>. Accessed: 2017-04-20.
- [14] I. T. Jolliffe in J. Cadima, “Principal component analysis: a review and recent developments,” *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 374, no. 2065, str. 20150202, 2016.
- [15] G. Klančar, “Fault detection and isolation by means of principal component analysis,” v *PhD Workshop*, 2000.
- [16] B. De Ketelaere, M. Hubert in E. Schmitt, “Overview of pca-based statistical process monitoring methods for time-dependent, high-dimensional data,” *Journal of Quality Technology*, vol. 47, str. 318–335, 2015.
- [17] T. J. Rato in M. S. Reis, “Defining the structure of dpca models and its impact on process monitoring and prediction activities,” *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 125, str. 74–86, 2013.