

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO
FIZIKALNA MERILNA TEHNIKA

Marko Svetličič

**MERILNA NEGOTOVOST IN ČASOVNA
KONSTANTA ONSET S-THB-M00x SENZORJEV ZA
MERJENJE TEMPERATURE IN RELATIVNE
VLAŽNOSTI ZRAKA**

Zaključna naloga

MENTOR: doc. dr. Gregor Skok

Ljubljana, 2015

Izjava o avtorstvu in objavi elektronske oblike

Izjavljam:

- da sem zaključno nalogo z naslovom Merilna negotovost in časovna konstanta onset S-THB-M00x senzorjev za merjenje temperature in relativne vlažnosti zraka izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Gregorja Skoka,
- da je elektronska oblika dela identična s tiskano obliko in
- da Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani dovoljujem objavo elektronske oblike svojega dela na spletnih straneh Repozitorija Univerze v Ljubljani.

Ljubljana, dne 18.03.2015

Podpis:

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Gregorju Skoku za vse koristne nasvete in strokovno pomoč pri nastajanju zaključne naloge. Prav tako se zahvaljujem Agenciji Republike Slovenije za okolje, da sem v Umerjevalnem laboratoriju lahko izvedel vse meritve. Zahvala gre tudi mag. Dragu Groslju (ARSO), saj bi brez njegovega sodelovanja in pomoči pri problemih, ki so nastali med meritvami, težko izpeljal to nalogo. Za prijetno vzdušje in spodbudne besede bi se rad zahvalil tudi vsem zaposlenim na ARSO s katerimi sem se vsak dan srečaval pri svojem delu.

Izvleček

V zaključni nalogi je predstavljen celovit postopek primerjalnega testiranja onset S-THB-M00x merilnikov relativne vlažnosti in temperature zraka. Namen je ovrednotenje merilne negotovosti merilnikov, pri čemer je skozi celoten postopek zagotovljena sledljivost na nacionalnem oziroma mednarodnem nivoju. Večji del meritev je bil izveden v Umerjevalnem laboratoriju Agencije Republike Slovenije za okolje.

Merilna negotovost kapacitivnega merilnika relativne vlažnosti zraka se je določila v merilni komori generatorja vlažnega zraka s primerjalno metodo z merilnikom temperature rosišča (referenčni etalon). Testirana merilnika relativne vlažnosti zraka po izvedeni linearni korekciji izmerkov na območju od 20 %RV do 95 %RV odstopata za največ 1,5 %RV. Iz časovnega odziva merilnikov na nenadno spremembo relativne vlažnosti zraka se je določila tudi časovna konstanta, ki je znašala 3,6 min oz. 17,6 min, odvisno od tega ali je bil merilnik nameščen v radiacijskem ščit.

Merilna negotovost uporovnega merilnika temperature zraka se je določila s primerjalno metodo z referenčnim uporovnim merilnikom temperature Pt100 (delovni etalon), pri čemer se je meritev izvedla v klimatski komori. Merilnika za temperaturo zraka po izvedeni linearni korekciji izmerkov na območju od -20 °C do +40 °C odstopata za največ 0,05 °C. Časovna konstanta merilnika za temperaturo znaša 4,3 oz. 13,6 min, odvisno od tega ali je bil merilnik nameščen v radiacijskem ščit.

Ključne besede:

temperatura, relativna vlažnost zraka, tlak, meritve, merilna negotovost, časovna konstanta

Abstract

A comprehensive procedure of a comparative testing of the onset S-THB-M00x humidity and air temperature meters was performed. The uncertainty of measurement which is traceable throughout the entire process at the national or international level is evaluated. The majority of the measurements was performed in the calibration laboratory of the Slovenian Environment Agency.

The uncertainty of measurement of capacitive relative humidity meter was determined by the comparative measurement of dew-point measuring instrument (reference standard) in the measuring chamber of the humidity generator. After linear correction the measurement error of relative humidity does not exceed 1.5 % (in the range 20 to 95 %). The time constant was determined by time response to the sudden change of humidity. Its value was 3.6 min or 17.6 min, depending on whether the meter was enclosed in a radiation shield.

The uncertainty of measurement of the resistant thermometer for air temperature was determined with the comparative method using a reference Pt100 resistance temperature measuring instrument (working standard), where the measurements were carried out in the climatic chamber. After linear correction the measurement error of temperature does not exceed 0.05 °C (in the range -20 to +40 °C). The time constant value was 4.3 min or 13.6 min, depending on whether the meter was enclosed in a radiation shield.

Keywords:

temperature, relative humidity, pressure, measurements, uncertainty, time constant

PACS: 07.07.Vx, 07.20.Dt

Kazalo

1	Uvod	7
2	Metode	9
2.1	Relativna vlažnost zraka	9
2.2	Merjenci	9
2.2.1	S-THB-M00x - merilnik temperature in relativne vlažnosti zraka	9
2.2.2	HMP155 merilnik za temperaturo in relativno vlažnost zraka	12
2.3	Referenčni merilniki in naprave	13
2.3.1	Generator vlažnega zraka	13
2.3.2	Rosiščni merilnik relativne vlažnosti zraka (referenčni)	17
2.3.3	Uporovni merilnik temperature (referenčni)	19
2.3.4	Multimeter	20
2.3.5	Klimatska komora	21
2.4	Merilni postopki	22
2.4.1	Kalibracija merilnikov relativne vlažnosti zraka	22
2.4.2	Kalibracija merilnikov temperature zraka	22
2.4.3	Merjenje časovnega odziva senzorjev – časovna konstanta	22
2.4.4	Podajanje merilne negotovosti	25
3	Rezultati	26
3.1	Relativna vlažnost zraka	26
3.1.1	Kalibracija merilnikov relativne vlažnosti zraka pri temperaturi 0 °C	26
3.1.2	Kalibracija merilnikov relativne vlažnosti zraka pri temperaturi 20 °C	29
3.1.3	Kalibracija merilnikov relativne vlažnosti zraka pri temperaturi 35 °C	31
3.1.4	Meritve časovnega odziva senzorjev za relativno vlažnost zraka	33
3.2	Temperatura zraka	34
3.2.1	Kalibracija merilnikov temperature zraka	34
3.2.2	Meritve časovnega odziva senzorjev temperature zraka	36
4	Diskusija	37
5	Zaključek	39
	Literatura	40
	Dodatek A	41
	Merilne negotovosti merilnikov in naprav – kalibracija merilnikov RV zraka pri 0 °C	41
	Dodatek B	43
	Merilne negotovosti merilnikov in naprav – kalibracija merilnikov RV zraka pri 20 °C	43

Dodatek C	44
Merilne negotovosti merilnikov in naprav – kalibracija merilnikov RV zraka pri 35 °C	44
Dodatek D	45
Merilne negotovosti merilnikov in naprav – kalibracija merilnikov temperature zraka.....	45
Dodatek E	46
Izračun časovne konstante merilnikov RV zraka - brez radiacijskega ščita	46
Dodatek F.....	47
Izračun časovne konstante merilnikov RV zraka - z radiacijskim ščitom	47
Dodatek G	48
Izračun časovne konstante merilnikov temperature zraka brez/z rad. ščitom	48
Dodatek H	49
Primer izračuna časovne konstante s programom Origin ($q = \text{konst.}$, $RV_0 < RV_k$).....	49
Dodatek I	50
Časovni odziv senzorjev ($RV = \text{konst.}$ ali $T = \text{konst.}$).....	50
Dodatek J	51
Časovni odziv senzorjev ($q = \text{konst.}$)	51

1 Uvod

Umerjevalni laboratorij deluje v sklopu Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). Je del Urada za hidrologijo in stanje okolja, ki upravlja z nacionalno mrežo postaj na področju meteorološkega, hidrološkega in ekološkega monitoringa (kakovost zraka in voda) ter monitoringa ionizirnega sevanja. Monitoring obsega tekoče in sistematično zbiranje podatkov po predpisani merilni metodi na določeni lokaciji, ob zagotavljanju kakovosti vseh elementov monitoringa in pripravi dogovorjenih poročil, po potrebi tudi strokovnih analiz [1].

Umerjevalni laboratorij je bil ustanovljen v 90. letih prejšnjega stoletja. V zadnjih letih je bil opremljen predvsem za potrebe umerjanja merilnikov temperature, relativne vlažnosti zraka, zračnega in hidrostaticnega tlaka, sončnega obsevanja ter parametrov kakovosti zraka. Umerjevalni laboratorij je pomemben del podpore monitoringu okoljskih pojavov. Skrbi za redna in kakovostna umerjanja različnih merilnih inštrumentov za potrebe meteorologije, hidrologije in ekologije v mreži merilnih mest ARSO in za potrebe slovenskih letališč.

Umerjevalni laboratorij izvaja merilne postopke v skladu z zakonodajo, standardi, predpisi in priporočili. To je predvsem Zakon o varstvu okolja in priporočila mednarodnih organizacij kot sta Svetovna meteorološka organizacija (WMO) in Mednarodna organizacija civilnega letalstva (ICAO). Zato je bila ključnega pomena vzpostavitev sistema kakovosti na področju zagotavljanja tehničnih zmožnosti, kakovosti in mednarodne primerljivosti podatkov. Kot potrditev svojih merilnih zmožnosti je v letu 1997 Umerjevalni laboratorij pristopil k postopku akreditacije v skladu z mednarodnim in slovensko privzetim standardom SIST/EN 45001 oziroma vodilom ISO/IEC Guide 25. Akreditacija namreč predstavlja dokazljivo usposobljenost za izvajanje kalibracij v skladu s strogimi zahtevami standarda. Aprila 1999 je bil postopek akreditacije uspešno zaključen za področje umerjanja merilnikov temperature. Akreditacija s številko No: 2.1404 je bila laboratoriju podeljena s strani francoske akreditacijske službe COFRAC. Paralelno pa je tudi Slovenska akreditacija pri Uradu RS za standardizacijo in meroslovje laboratoriju podelila akreditacijo št. L-010 po postopku, ki ga je izvajala skupaj s francosko akreditacijsko službo.

Po uspešno končani akreditaciji na področju temperature, je laboratorij nadaljeval s pridobivanjem akreditacije še za druga področja. Tako je v letu 2002 akreditacijo pridobil tudi Laboratorij za umerjanje inštrumentov za merjenje zračnega tlaka. V istem letu je laboratorij napredoval iz sistema kakovosti po standardu EN 45000 v sistem po standardu SIST EN ISO/IEC 17025. V letu 2005 je laboratorij razširil akreditacijsko domeno še na področje kakovosti zraka in na področje kalibracije merilnih inštrumentov za merjenje relativne vlažnosti zraka.

Kalibracijski postopki, meroslovno vzdrževanje etalonske baze in akreditacija Umerjevalnemu laboratoriju omogočajo zagotavljanje sledljivosti rezultatov kalibracije do nacionalnega oziroma mednarodnega nivoja. S tem pa laboratorij izpolnjuje vse potrebne kriterije za zagotavljanje kakovosti merilnih podatkov za potrebe ARSO, ki se nato uporabljajo za obveščanje javnosti, kot tudi za potrebe meteoroloških modelov, podnebnih in ekoloških analiz ter za potrebe prometa in kmetijstva.

Namen zaključne naloge je ovrednotenje merilne negotovosti merilnikov relativne vlažnosti in temperature zraka S-THB-M00x proizvajalca Onset Computer Corporation (podatkovni zapisovalnik), ki se uporablja na Katedri za meteorologijo na Fakulteti za matematiko in fiziko v Ljubljani. Da dobimo celovito oceno lastnosti merilnikov, izmerimo tudi časovni konstanti.

Osnovni postopek kalibracije je podoben za obe merilni količini. V merilnem prostoru pripravimo zrak (medij), ki je ogret (ohlajen) na določeno temperaturo in z ustrezno relativno vlažnostjo zraka. Ko so parametri zraka stabilni, izvedemo meritve in jo primerjamo z rezultati izmerjenimi z ustreznim referenčnim merilnikom, ki ima zagotovljeno sledljivost na nacionalnem oziroma mednarodnem nivoju. Da je vpliv medija na meritve in posledično na skupno merilno negotovost čim manjši, mora biti prostorsko čim bolj homogen in časovno čim bolj stabilen.

Za kalibracijo merilnikov relativne vlažnosti zraka uporabimo generator vlažnega zraka, ki deluje na principu dveh tlakov. Meritve se običajno izvedejo v območju od 20 % do 95 % relativne vlažnosti zraka v korakih po 15 % pri temperaturi zraka 20 °C. Zaradi doseganja manjše časovne in prostorske negotovosti medija, ki je lahko bistven vir negotovosti, se meritve izvajajo v reduciranem volumnu merilnega prostora.

Ker pa ima generator vlažnega zraka premajhen temperaturni razpon, se za kalibracijo merilnikov temperature zraka uporablja klimatska komora s širšim temperaturnim območjem, ki znaša od -20 °C do +40 °C.

Meritve časovne konstante merilnikov brez radiacijskega ščita so bile opravljene v Umerjevalnem laboratoriju ARSO v dveh generatorjih vlažnega zraka z različnima temperaturama zraka in/ali z različno relativno vlažnostjo zraka. Pri tem merimo časovni odziv senzorja, ko ga prestavimo iz npr. hladnega merilnega prostora prvega generatorja v toplejši merilni prostor drugega. Ker zaradi premajhnih odprtih na generatorjih v njih ni možno opraviti meritev časovne konstante merilnikov z radiacijskim ščitom, le te izvedemo v improviziranem domačem »laboratoriju«.

2 Metode

2.1 Relativna vlažnost zraka

Količino vodne pare v zraku lahko podamo na več načinov: absolutna vlažnost zraka ali delna gostota nam poda maso vodne pare na enoto volumna vlažnega zraka (g/m^3), specifična vlažnost zraka nam podaja maso vodne pare na enoto mase vlažnega zraka (g/kg), mešalno razmerje predstavlja maso vodne pare na enoto mase suhega zraka (g/kg) ali pa kot relativno vlažnost zraka, ki je v vsakdanjem življenju najbolj pogosto uporabljena oblika in nam podaja razmerje med dejanskim parnim tlakom in nasičenim parnim tlakom vodne pare, ki bi obstajal pri enaki temperaturi zraka (de Luc, leta 1775). Ko količina vodne pare v zraku z določeno temperaturo doseže zgornjo mejo oz. je v zraku maksimalna količina vodne pare, ki jo lahko zrak vsebuje, pravimo da je zrak nasičen. Zrak z višjo temperaturo lahko vsebuje večjo količino vodne pare (absolutno) in obratno: če zrak kontinuirano ohlajamo, bo slej ali prej postal nasičen z vodno paro in ko dosežemo temperaturo rosišča, se bo z nadaljnjim ohlajanjem višek vodne pare izločil s kondenzacijo [2].

Relativno vlažnost zraka merimo z merjenjem temperature rosišča, z razliko suhega in mokrega termometra pri psihrometru, z električnimi merilniki, ki so bodisi uporovni bodisi kapacitivni ali pa s higrometrom na las. Kapacitivni merilniki so manj občutljivi na kondenzacijo od uporovnih in so zato tudi bolj razširjeni, saj slednje kondenzacija v večini primerov poškoduje ali celo uniči.

2.2 Merjenci

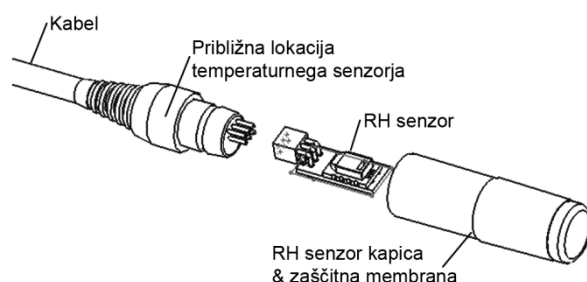
2.2.1 S-THB-M00x - merilnik temperature in relativne vlažnosti zraka

Merilnik S-THB-M00x (x označuje dolžino el. vodnika) proizvajalca Onset Computer Corporation je sestavljen iz dveh komponent. Prva komponenta predstavlja senzor na električnem vodniku z analogno-digitalnim pretvornikom (slika 1). Majhno senzorsko ohišje ima odprtino zaščiten z membrano in se nahaja na enem koncu vodnika. Na drugem koncu je podolgovato ohišje z 12 bitnim A/D pretvornikom za temperaturo in 10 bitnim za relativno vlažnost zraka ter priključkom za podatkovni zapisovalnik [3].



Slika 1: merilnik temperature in relativne vlažnosti zraka S-THB-M00x proizvajalca Onset Computer Corporation[4].

Senzor za relativno vlažnost zraka je električni kapacitivni (slika 2) in se nahaja na vrhu ohišja zaščiteno z ASA polistiren kapico in modificirano hidrofoбно polietersulfone plastično membrano (PESU), ki omogoča prehod vodne pare in hkrati ščiti senzor pred kondenzacijo. V primeru onesnaženja, se senzor lahko spere z destilirano vodo oz. se ga zamenja, če meritve preveč odstopajo. Senzor za temperaturo je vgrajen v samem ohišju. Podatki o njegovi sestavi oz. modelu žal niso objavljeni (katalogi, internet), pa tudi na vprašanje, ki sem ga poslal proizvajalcu, ni bilo odziva. Glede na temperaturni razpon bi lahko sklepali, da je tipa Pt1000.



Slika 2: zgradba merilnika S-THB-M00x [3].

Drugo komponento predstavlja ločen podatkovni zapisovalnik H21-002 HOBO micro station s štirimi kanali, ki ima vgrajen serijski vmesnik RS232 za komunikacijo z osebnim računalnikom (slika 3). Nanj lahko priklopimo največ štiri merilnike, ki so lahko tudi različni. Na osebnem računalniku lahko spremljamo trenutne podatke o temperaturi zraka, relativni vlažnosti in temperaturi rosišča oziroma shranjene podatke prenesemo na računalnik in jih nato kasneje analiziramo ter arhiviramo.



Slika 3: podatkovni zapisovalnik H21-002 HOBO micro station proizvajalca Onset Computer Corporation [4].

Merilniku je dodan tudi radiacijski ščit RS3 (slika 4) za zaščito pred direktnim sončnim obsevanjem in padavinami, kadar merilnik uporabljamo na prostem brez klasičnega Stevensonovega zaslona.



Slika 4: podatkovni zapisovalnik H-21-002, radiacijska ščita RS3 in merilnika S-THB-M00x (merilnik na levi je vstavljen v radiacijski ščit).

Karakteristike:

relativna vlažnost zraka:	0 % do 100 % (-40 °C do +75 °C)
točnost:	±3,5 %RV (10 %RV do 95 %RV)
ločljivost:	0,1 %RV pri 25 °C
pretvorba A/D:	10 bitov
odzivni čas	5 min (tok zraka 1m/s) z zaščitno kapico
časovna stabilnost:	< 1 %/leto
temperatura zraka:	-40 °C do +75 °C
točnost:	±0,21 °C (0 °C do +50 °C)
ločljivost:	0,02 °C pri 25 °C
pretvorba A/D:	12 bitov
odzivni čas:	5 min (tok zraka 1 m/s)
časovna stabilnost:	< 0,1 °C/leto

2.2.2 HMP155 merilnik za temperaturo in relativno vlažnost zraka

Za vzporedno primerjavo opravimo meritve tudi z merilnikom HMP155 proizvajalca Vaisala na sliki 5, ki se uporablja na ARSO [5]. Merilnik je sestavljen iz podolgovatega ohišja, na vrhu katerega je pod zaščitno kapico pritrjen električni kapacitivni senzor za merjenje relativne vlažnosti zraka in električni uporovni senzor Pt100 za merjenje temperature zraka. Relativno vlažnost zraka merimo preko analognega napetostnega izhoda, temperaturo pa preko upornosti s štiri žilno vezavo. Žice priklopimo na digitalni multimeter, ki je preko RS232 ali GPIB (ang. General Purpose Interface Bus) povezave priključen na osebni računalnik, kjer se izvaja zajem podatkov in preračun v ustrezne količine.



Slika 5: merilnik za temperaturo in relativno vlažnost zraka HMP155 proizvajalca Vaisala [6].

Karakteristike:

relativna vlažnost zraka:	0 % do 100 % (-40 °C do +75 °C)
točnost:	±1,0 % (0 %RV do 90 %RV) ±1,7 % (90 %RV do 100 %RV)
odzivni čas	20 s z zaščitno kapico (mirujoči zrak)
temperatura zraka:	-80 °C do +60 °C
točnost:	±(0,1 + 0,00167 · odčitek) °C
odzivni čas:	< 20 s z dodatnim temp. senzorjem (tok zraka 3m/s)

2.3 Referenčni merilniki in naprave

2.3.1 Generator vlažnega zraka

Za pripravo zraka z ustrezno stopnjo relativne vlažnosti uporabimo generator vlažnega zraka 2500ST-LT proizvajalca Thunder Scientific Corporation na sliki 6 [7].



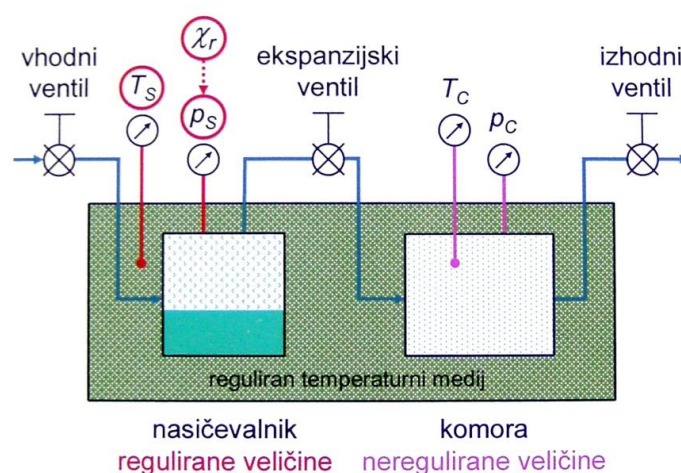
Slika 6: generator vlažnega zraka (medija) 2500ST-LT proizvajalca Thunder Scientific Corporation z vstavljenimi merjenci skozi srednjo odprtino na desni strani. Desno od generatorja se nahaja merilnik temperature rosišča S4000 (Michell).

Karakteristike:

relativna vlažnost plina:	10 % do 95 %
temperaturno območje:	-10 °C do +70 °C
pretok plina:	2 l/min do 20 l/min
plin:	zrak ali dušik
merilni prostor (ŠxVxG):	30.5 cm x 30.5 cm x 25.4 cm
reduciran merilni prostor (Lx ϕ):	25,7 cm x 6.3cm
časovna nestabilnost*:	0,71 %/leto
krajevna nehomogenost*:	0,65 %

*perioda rekaliibracije je 24 mesecev

Generator deluje na principu dveh tlakov, kot je shematično prikazano na sliki 7. Pri tem je pomembno, da vrednost relativne vlažnosti zraka ni odvisna od merilnikov z bistveno merilno negotovostjo kot so: psihrometri, merilniki rosišča, kapacitivni merilniki in podobno, temveč temelji zgolj na zelo dobro izmerjenih količinah tlaka in temperature.



Slika 7: shematski prikaz delovanja generatorja vlažnega zraka [8].

V nasičevalniku pod povečanim tlakom pripravimo zrak nasičen z vodno paro in z ustrezno temperaturo. Da dejansko dobimo 100% navlažen zrak, ima nasičevalnik nekakšno predkomoro oz. prednasičevalnik, v katerem je temperatura zraka nekaj stopinj višja. Ko nato zrak nasičen z vodno paro vodimo skozi nasičevalnik, ki vlažen zrak ohladi na želeno temperaturo, se s kondenzacijo enostavno izloči višek vodne pare. Nasičen zrak nato preko ekspanzijskega ventila izotermno razpnemo na sobni tlak, pri čemer dobimo v merilni komori zrak z ustrezno relativno vlažnostjo, ki je enaka razmerju med tlakom v merilni komori (sobni tlak) in tlakom v nasičevalniku:

$$\%RV \approx \frac{p_k}{p_n} \cdot 100 \quad (2.1)$$

kjer je:

$\%RV$... relativna vlažnost zraka izražena v odstotkih

p_k ... zračni tlak v merilni komori (sobni tlak)

p_n ... zračni tlak v nasičevalniku.

To seveda velja le za idealne pline in razmere. Ker pa se temperaturi zraka v nasičevalniku in v merilni komori malenkost razlikujeta, moramo to pri izračunu dejanske vlažnosti zraka upoštevati:

$$\%RV = \frac{e_w(T_n)}{e_w(T_k)} \cdot \frac{p_k}{p_n} \cdot 100. \quad (2.2)$$

kjer je:

$e_w(T_n)$... nasičen parni tlak pri temperaturi nasičevalnika T_n

$e_w(T_k)$... nasičen parni tlak pri temperaturi merilne komore T_k .

Razmerje $e_w(T_n)/e_w(T_k)$ v zgornji enačbi predstavlja »efektivno« stopnjo nasičenja, ki je temperaturni popravek zaradi super-nasičenega in pod-nasičenega zraka v nasičevalniku s temperaturo T_n glede na temperaturo merilne komore T_k in je posledica majhne razlike med temperaturama. V primeru enakih temperatur je to razmerje seveda enako ena.

Nasičen parni tlak

Za izračun nasičenega parnega tlaka $e_w(T)$ uporabimo formuli, ki ju je uvedel Arnold Wexler (IPTS-68) [9], [10], pri čemer uporabimo novejšje koeficiente prilagojene na novo Mednarodno temperaturno lestvico ITS-90, ki jih je izračunal Bob Hardy [11]:

$$e_w(T > 0^\circ\text{C}) = \exp \left[\sum_{i=0}^6 C_i (T + 273,15)^{i-2} + C_7 \ln(T + 273,15) \right] \quad (2.3)$$

$$e_w(T \leq 0^\circ\text{C}) = \exp \left[\sum_{i=0}^4 K_i (T + 273,15)^{i-1} + K_5 \ln(T + 273,15) \right] \quad (2.4)$$

kjer je:

$e_w(T > 0^\circ\text{C})$... nasičen parni tlak izračunan nad vodo izražen v pascalih

$e_w(T \leq 0^\circ\text{C})$... nasičen parni tlak izračunan nad ledom izražen v pascalih

T ... temperatura v $^\circ\text{C}$

C_i, K_i ... koeficienti (preglednica 2.1).

$T > 0^\circ\text{C}$ (nad vodo)		$T \leq 0^\circ\text{C}$ (nad ledom)	
C0	$-2,8365744 \cdot 10^3$	K0	$-5,8666426 \cdot 10^3$
C1	$-6,028076559 \cdot 10^3$	K1	$2,232870244 \cdot 10^1$
C2	$1,954263612 \cdot 10^1$	K2	$1,39387003 \cdot 10^{-2}$
C3	$-2,737830188 \cdot 10^{-2}$	K3	$-3,4262402 \cdot 10^{-5}$
C4	$1,6261698 \cdot 10^{-5}$	K4	$2,7040955 \cdot 10^{-8}$
C5	$7,0229056 \cdot 10^{-10}$	K5	$6,7063522 \cdot 10^{-1}$
C6	$-1,8680009 \cdot 10^{-13}$		
C7	2,7150305		

Preglednica 2.1: Hardy koeficienti C_i in K_i [11].

Faktor izboljšanja za zrak (enhancement factor for air)

Zrak ni idealni plin in se dejanski nasičeni parni tlak nad vodo oz. ledom v prisotnosti drugih plinov v zraku razlikuje od idealnega, ki ga izračunamo po enačbah 2.3 oz. 2.4. Zato obema enačbama dodamo popravek oz. »faktor izboljšanja« $f_w(p, T)$:

$$e'_w(p, T) = f_w(p, T) \cdot e_w(T) \quad (2.5)$$

kjer je:

e'_w ... dejanski nasičen parni tlak pri zračnem tlaku p in temperaturi T

e_w ... nasičen parni tlak idealnega plina pri zračnem tlaku p in temperaturi T

f_w ... faktor izboljšanja za vlažen zrak pri zračnem tlaku p in temperaturi T

in dobimo končno enačbo za relativno vlažnost zraka, ki je odvisna le od natančno kontroliranega tlaka in temperature:

$$\%RV = \frac{f_w(p_n, T_n)}{f_w(p_k, T_k)} \cdot \frac{e_w(T_n)}{e_w(T_k)} \cdot \frac{p_k}{p_n} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Razmerje $f_w(p_n, T_n)/f_w(p_k, T_k)$ je odvisno od tlaka in temperature. Ker pa so v tem primeru temperaturne razlike zelo majhne, nasprotno pa razlike tlakov zelo velike, bi lahko rekli, da je razmerje v pretežni meri funkcija tlaka. V primeru generatorja vlažnega zraka pomeni, da ta člen v glavnem predstavlja popravek zaradi tlakov. Pri veliki relativni vlažnosti zraka je razlika tlakov med nasičevalnikom in merilno komoro majhna, zato je tudi izboljševalni faktor majhen oz. približno ena. Nasprotno pa je pri majhni relativni vlažnosti zraka razlika tlakov precejšnja (npr. 10x pri 10 %RV), kar doda približno 0,3% popravka k relativni vlažnosti zraka. Že Hyland [12] je uvedel numerične vrednosti in razširjene enačbe za različne pogoje temperature in tlaka. Greenspan [13] je uporabil njegove podatke in enačbe prilagodil bolj enostavni obliki, ki se po Goff in Gratch [14] uporabljajo danes:

$$f_w(p, T) = \exp \left[\alpha \left(1 - \frac{e_w(T)}{p} \right) + \beta \left(\frac{p}{e_w(T)} - 1 \right) \right] \quad (2.7)$$

kjer je:

p ... skupni tlak v pascalih
 T ... temperatura v °C,

pri čemer za α in β velja:

$$\alpha = \sum_{i=0}^3 A_i T^i \quad (2.8)$$

$$\beta = \exp \sum_{i=0}^3 B_i T^i \quad (2.9)$$

kjer je:

A_i, B_i ... koeficienti (preglednica 2.2 za vodo oz. 2.3 za led).

Uporabimo novejšje koeficiente, ki jih je B. Hardy prilagodil na ITS-90, pri čemer je vzel za osnovo Greenspanove koeficiente za IPTS-68.

	Za vodo -50 °C do 0 °C	Za vodo 0 °C do 100 °C
A0	$3,62183 \cdot 10^{-4}$	$3,53624 \cdot 10^{-4}$
A1	$2,6061244 \cdot 10^{-5}$	$2,9328363 \cdot 10^{-5}$
A2	$3,8667770 \cdot 10^{-7}$	$2,6168979 \cdot 10^{-7}$
A3	$3,8268958 \cdot 10^{-9}$	$8,5813609 \cdot 10^{-9}$
B0	$-1,07604 \cdot 10^1$	$-1,07588 \cdot 10^1$
B1	$6,3987441 \cdot 10^{-2}$	$6,3268134 \cdot 10^{-2}$
B2	$-2,6351566 \cdot 10^{-4}$	$-2,5368934 \cdot 10^{-4}$
B3	$1,672508 \cdot 10^{-6}$	$6,3405286 \cdot 10^{-7}$

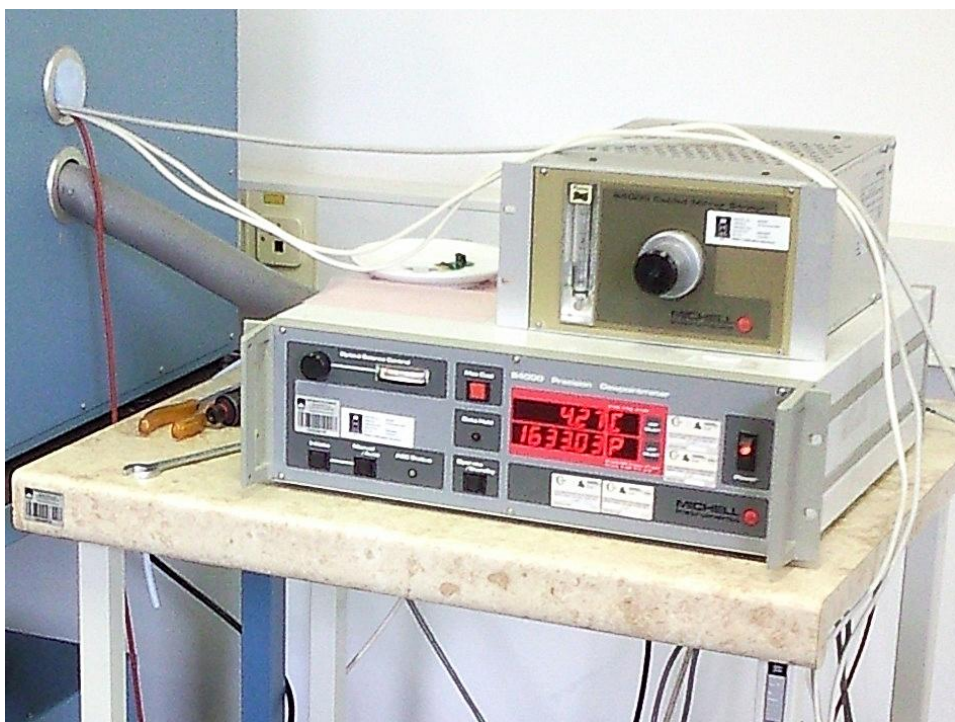
Preglednica 2.2: Hardy koeficienti A_i in B_i za vodo [11].

	Za led -100 °C do -50 °C	Za led -50 °C do 0 °C	Za led -100 °C do 0 °C
A0	$9,8830022 \cdot 10^{-4}$	$3,61345 \cdot 10^{-4}$	$3,64449 \cdot 10^{-4}$
A1	$5,7429701 \cdot 10^{-5}$	$2,9471685 \cdot 10^{-5}$	$2,9367585 \cdot 10^{-5}$
A2	$8,9023096 \cdot 10^{-7}$	$5,2191167 \cdot 10^{-7}$	$4,8874766 \cdot 10^{-7}$
A3	$6,2038841 \cdot 10^{-9}$	$5,0194210 \cdot 10^{-9}$	$4,3669918 \cdot 10^{-9}$
B0	$-1,0415113 \cdot 10^1$	$-1,07401 \cdot 10^1$	$-1,07271 \cdot 10^1$
B1	$9,1177156 \cdot 10^{-2}$	$7,3698447 \cdot 10^{-2}$	$7,6215115 \cdot 10^{-2}$
B2	$5,1128274 \cdot 10^{-5}$	$-2,6890021 \cdot 10^{-4}$	$-1,7490155 \cdot 10^{-4}$
B3	$3,5499292 \cdot 10^{-6}$	$1,5395086 \cdot 10^{-6}$	$2,4668279 \cdot 10^{-6}$

Preglednica 2.3: Hardy koeficienti A_i in B_i za led (celotno območje je manj natančno kot posamezni podobmočji) [11].

2.3.2 Rosiščni merilnik relativne vlažnosti zraka (referenčni)

Za referenčni inštrument uporabimo merilnik S4000 Climatic proizvajalca Michell (slika 8), ki meri relativno vlažnost zraka z meritvijo temperature rosišča, ki je zelo točna in dolgotrajno stabilna [15]. Tovrstni merilniki optično zaznavajo začetek kondenzacije na določeni refleksijski površini (polirano kovinsko zrcalo), pri čemer vzdržujejo nadzor nad temperaturo kondenzacije na površini ter hkrati merijo njeno temperaturo.



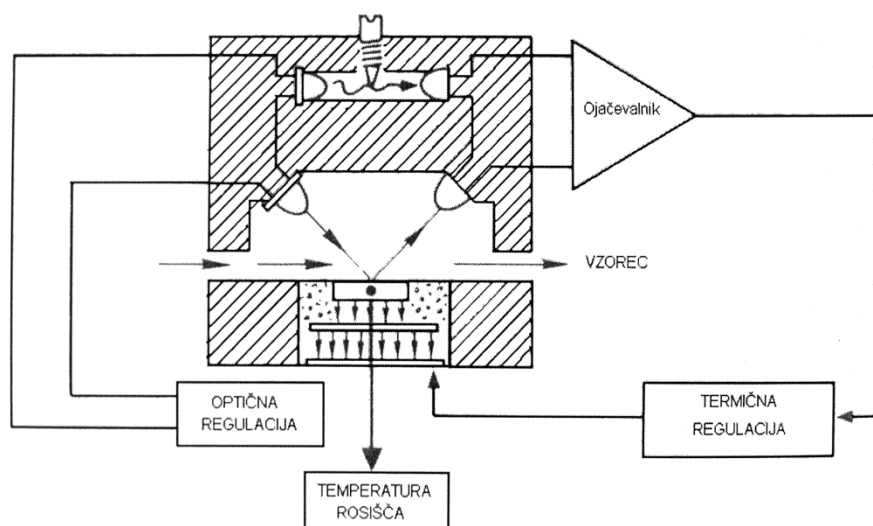
Slika 8: merilnik temperature rosišča S4000 Climatic proizvajalca Michell.

Karakteristike:

relativna vlažnost:	0,5 % do 99,9 %
temperaturno območje rosišča:	-75 °C do +80 °C (klimatizirana merilna glava)
točnost:	0,1 °C (temperatura rosišča) ali 1,0 % RV
ločljivost:	0,01 (za vse enote)
odzivni čas:	0,5 °C/s + stabilizacijski čas
priporočen pretok zraka:	0,1 l/min do 0,7 l/min
negotovost temp. rosišča*:	0,266 K
negotovost temp. okolice*:	0,088 K

*perioda rekaliibracije je 12 mesecev

Merilni sistem je zasnovan na dveh glavnih podsistemih: prvi nadzoruje temperaturo zrcala in jo vzdržuje na rosiščni točki vzorčenega plina, med tem ko drugi meri temperaturo na površini zrcala ter temperaturo in tlak vzorčenega plina, kot je prikazano na sliki 9. Ko temperatura na zrcalu, ki je v stiku s tokom vlažnega zraka, pade pod temperaturo rosišča oz. ledišča, se na njegovi površini pojavi kondenzat oz. srež, kar povzroči zmanjšani odboj svetlobe zaradi razpršitve svetlobe.



Slika 9: shema merilne komponente rosiščnega merilnika relativne vlažnosti zraka [8].

Za zmanjšanje vpliva sistemskih napak se uporablja vgrajeni ločeni par LED diode in fotocelice, ki kompenzira termično povzročene negotovosti optičnih komponent. Ker nečistoče pomembno vplivajo na lastnosti merilne metode, se zrcalo periodično segreje nad temperaturo rosišča oz. ledišča, pri čemer se popolnoma osuši. Nato se izmeri reflektirana svetloba in primerja z vzporednim sistemom ter nastavi ustrezen odmik. Ko je zrcalo preveč kontaminirano in kompenzacija za netopljive nečistoče ni več možna, je potrebno zrcalo očistiti ročno. Topljive nečistoče (soli) ne spremenijo odbojnih lastnosti zrcala, vplivajo pa na znižanje parnega tlaka na površini zrcala in posledično dviga temperature rosišča. Proizvajalci higrometrov so razvili sistem, ki s hitrim ohlajanjem in segrevanjem zrcala povzročijo zmanjševanje koncentracije in distribucije soli na zrcalu, vendar je redno ročno čiščenje zrcala edini učinkovit in zanesljiv postopek.

Iz temperature rosišča oz. ledišča izračunamo relativno vlažnost zraka z naslednjo enačbo, pri čemer efektivni nasičeni parni tlak izračunamo iz enačbe 2.5:

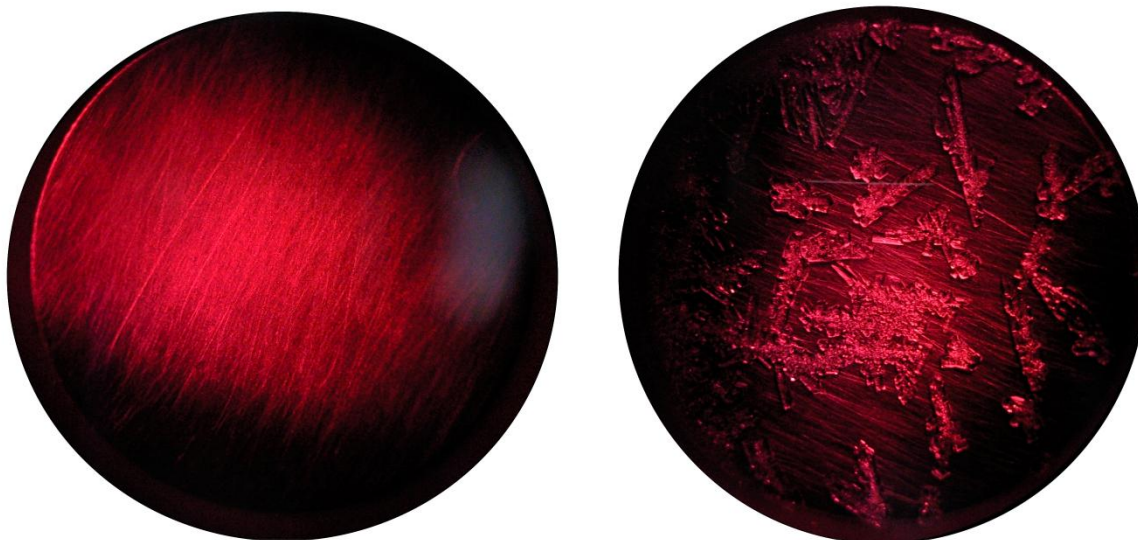
$$\%RV = \frac{e'_w(T_d)}{e'_w(T_a)} \cdot 100 \quad (2.10)$$

kjer je:

$e'_w(T_d)$.. izračunani efektivni nasičeni parni tlak pri temperaturi rosišča/ledišča T_d
v hPa

$e'_w(T_a)$.. izračunani efektivni nasičeni parni tlak pri dejanski temperaturi zraka T_a
v hPa.

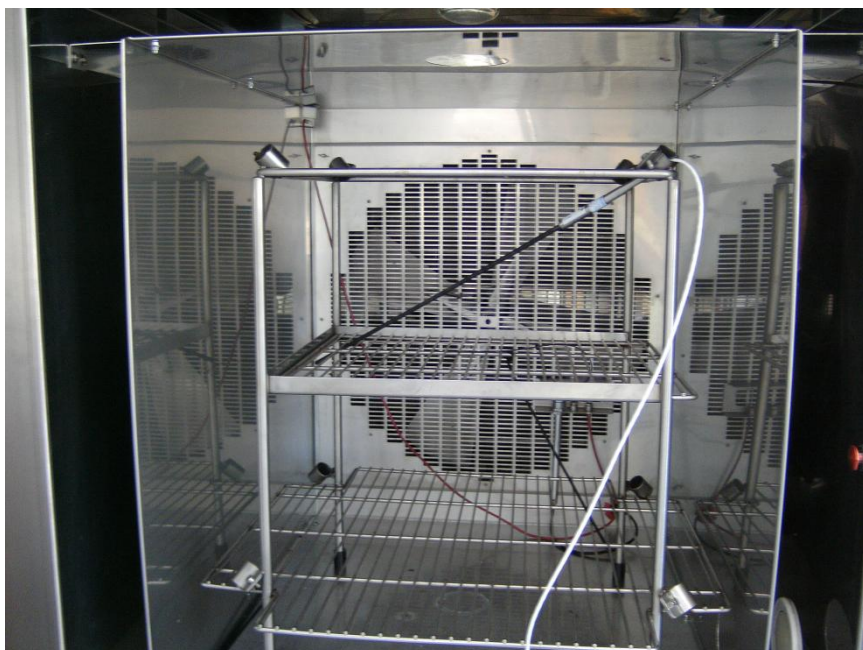
Ker lahko pri temperaturah pod 0 °C voda obstaja tudi v obliki podhlajene kapljevine, je pri delu z rosiščnim merilnikom ključnega pomena, da pri temperaturah rosišča od 0 °C pa vsaj do -20 °C preverimo ali so na zrcalu merilnika podhlajene vodne kapljice (rosa) ali ledeni kristali. Slika 10 prikazuje podhlajeno kapljevino pri temperaturi zrcala -8,71 °C in klasične ledene kristale pri -12,4 °C.



Slika 10: na levi strani je zrcalo rosiščnega merilnika s podhlajenimi vodnimi kapljicami pri temperaturi zrcala -8,71 °C. Na desni strani je posnetek zrcala z ledenimi kristali pri temperaturi zrcala -12,4 °C (zrcalo je bilo predhodno ohlajeno na -18 °C).

2.3.3 Uporovni merilnik temperature (referenčni)

Za referenčni merilnik uporabimo uporovni merilnik temperature 5609 tipa Pt100 proizvajalca Fluke (slika 11). To pomeni, da tipalo predstavlja tanka navita platinska žička, ki ima pri temperaturi 0 °C upornost 100 ohmov. Upornost merilnika temperature merimo z multimetrom s štiri žilno vezavo, da sproti izločimo upornost priključnih žic. Merilni senzor je vstavljen na koncu 51 cm dolge kovinske palice premera 6 mm [16].



Slika 11: uporovni merilnik temperature 5609 proizvajalca Fluke.

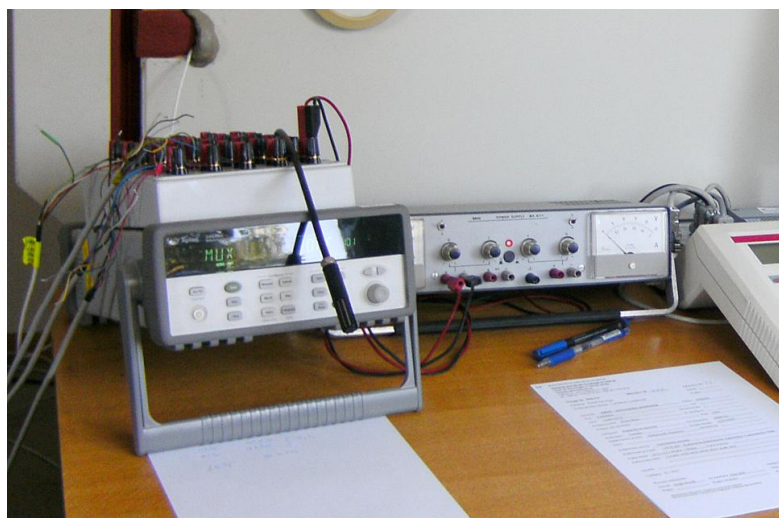
Karakteristike:

merilno območje:	-40 °C do +50°C (akreditirano)
merilna negotovost*:	13 mK
časovna nestabilnost*:	0,003 mK/leto
časovna konstanta:	10 s

*perioda rekaliibracije je 24 mesecev

2.3.4 Multimeter

Za merjenje napetosti in upornosti uporabimo digitalni multimeter 34970A proizvajalca Agilent/HP (slika 12). Izmerke zajemamo s programom Excell in jih sproti preračunamo v ustrezne količine.



Slika 12: multimeter 34970A proizvajalca Agilent/HP.

Karakteristike za 4 žilno merjenje upornosti:

merilno območje:	100 ohm
interval brez temp. vpliva:	$23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
vpliv temperature (od odčitka):	0,0006 %/K
vpliv temperature (od območja):	0,0001 %/K
časovna stabilnost (od odčitka):	0,01 %/leto
časovna stabilnost (od območja):	0,001 %/leto
negotovost sledljivosti (od odčit.):	0,014 %.

Karakteristike za 2 žilno merjenje napetosti:

merilno območje:	1 V
interval brez temp. vpliva:	$23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
vpliv temperature (od odčitka):	$0,0005\text{ \% K}^{-1}$
vpliv temperature (od območja):	$0,0001\text{ \% K}^{-1}$
časovna stabilnost (od odčitka):	0,004 %/leto
časovna stabilnost (od območja):	0,0007 %/leto
negotovost sledljivosti (od odčit.):	0,0014 %.

2.3.5 Klimatska komora

Za pripravo zraka z ustrezno temperaturo uporabimo klimatsko komoro HPC/S 4026 proizvajalca Heraeus Vötsch (slika 13). Komora deluje na principu mešanja suhega in vlažnega toka zraka, ki ju segrejemo ali ohladimo na želeno temperaturo. Suha komponenta se pridobi z ohlajanjem in s kondenzacijo viška vodne pare, med tem ko se vlažna komponenta pridobi s prisilnim tokom zraka preko posode z vodo [17].



Slika 13: klimatska komora HPC/S 4026 proizvajalca Heraeus Vötsch.

Karakteristike:

relativna vlažnost:	10 % do 95 %
temperaturno območje:	-20 °C do +40 °C
merilni prostor:	67 cm x 78 cm x 76 cm
časovna nestabilnost*:	0,1 K/leto
krajevna nehomogenost*:	0,21 K

*perioda rekaliibracije je 24 mesecev.

2.4 Merilni postopki

2.4.1 Kalibracija merilnikov relativne vlažnosti zraka

V Umerjevalnem laboratoriju se kapacitivni merilniki relativne vlažnosti zraka kalibrirajo v generatorju vlažnega zraka s primerjalno meritvijo relativne vlažnosti zraka preko temperature rosišča v območju od 20 %RV do 95 %RV v korakih po 15 %RV pri temperaturi zraka 20 °C. Pretok zraka je nastavljen na 20 l/min. Da lahko izračunamo histerezo, po meritvi pri 95 %RV ponovimo meritev pri 50 %RV. Ker pa želimo dobiti natančnejši vpogled v karakteristike merilnikov, izvedemo dodatne meritve pri 0 °C in pri 35 °C.

2.4.2 Kalibracija merilnikov temperature zraka

Uporovni merilniki temperature zraka se kalibrirajo v klimatski komori s prisilnim tokom zraka s primerjalno meritvijo referenčnega uporovnega merilnika temperature Pt100 v območju od -20 °C do +40 °C v korakih po 10 °C. Po zaključeni meritvi pri 40 °C ponovimo meritev pri +10 °C, da lahko izračunamo histerezo.

2.4.3 Merjenje časovnega odziva senzorjev – časovna konstanta

Temperaturni senzor je v prvem približku sistem prvega reda [18]:

$$dT(t) = -\frac{1}{\tau}(T - T_k)dt \quad (2.11)$$

kjer je:

T ... temperatura

T_k ... končna (ciljna) temperatura

τ ... časovna konstanta senzorja.

Časovni odziv senzorja na skokovito spremembo temperature s T_0 na T_k ob času $t = 0$ lahko opišemo z naslednjo enačbo:

$$T(t) = (T_0 - T_k)e^{-\frac{t}{\tau}} + T_k \quad (2.12)$$

kjer je:

$T(t)$... temperatura senzorja po času t

T_0 ... začetna temperatura senzorja

T_k ... končna temperatura (temperatura senzorja po času $t = \infty$)

τ ... časovna konstanta senzorja.

Če privzamemo, da je tudi senzor za vlažnost zraka v prvem približku sistem prvega reda, lahko zapišemo časovni odziv senzorja na podoben način kot za temperaturo:

$$RV(t) = (RV_0 - RV_k)e^{-\frac{t}{\tau}} + RV_k \quad (2.13)$$

kjer je:

$RV(t)$...odčitek relativne vlažnosti zraka po času t

RV_0 ... odčitek začetne relativne vlažnosti zraka

RV_k ... končna relativna vlažnost zraka (odčitek senzorja po času $t = \infty$)

τ ... časovna konstanta senzorja.

Meritve časovnega odziva senzorjev brez radiacijskega ščita izvedemo s pomočjo dveh generatorjev vlažnega zraka z različnimi nastavitvami temperature in relativne vlažnosti zraka, pri čemer v prvem generatorju vzdržujemo sobne pogoje, v drugem pa nastavimo poljubno temperaturo in relativno vlažnost zraka. Da med meritvijo ni bilo zračnega toka mimo senzorjev (brezvetrije), sta bila generatorja v času meritve izklopljena. Zato je prišlo pri meritvah, kjer je bila temperatura zraka v merilnem prostoru bistveno večja ali manjša od temperature okolice, do odstopanja od nastavljenе temperature za $\pm 0,5$ °C, kar je posledično povzročilo tudi ekvivalentno spremembo relativne vlažnosti zraka v merilnem prostoru.

Zaradi preozkih vhodnih odprtín na generatorju vlažnega zraka, meritve odziva senzorjev z radiacijskim ščitom izvedemo v domačem improviziranem »laboratoriju«. Pri tem uporabimo naslednja priročna sredstva (slika 14):

- delno toplotno izolirana steklena posoda z vodo - za visoko relativno vlažnost zraka pri sobni temperaturi
- škatla iz stiropora - za sobne pogoje
- prenosna hladilna torba - za nižjo temperaturo zraka in približno konstantno specifično vlažnost zraka
- vložki iz gela (približno 3 kg) za kompenzacijo temperaturnega vpliva radiacijskega ščita merilnika na relativno majhen volumen zraka (maso) v merilnem prostoru.



Slika 14: del improviziranega laboratorija za merjenje časovne konstante merilnikov z radiacijskim ščitom (škatla iz stiropora in prenosna hladilna torba).

Odstopanja parametrov okolice med meritvijo so bila pri teh meritvah nekoliko večja zaradi dotoka zunanega suhega oz. vlažnega zraka, saj se je poleg temperature za $\pm 0,5$ °C, spreminjala tudi relativna vlažnost zraka za $\pm 3,6$ %.

Časovne konstante izračunamo iz meritev s prileganjem krivulje s pomočjo programa Origin. Ker pri vsaki kombinaciji parametrov za temperaturo in relativno vlažnost zraka opravimo po tri meritve, ki imajo različno natančnost prileganja krivulj, iz njih izračunamo ponderirano povprečje časovnih konstant [19]:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i \frac{\tau_i}{\sigma_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (2.14)$$

kjer je:

$\bar{\tau}$... ponderirano povprečje časovnih konstant

τ_i, σ_i ... i-ta časovna konstanta in pripadajoča standardna deviacija.

Negotovost ponderiranega povprečja izračunamo po naslednji enačbi [19]:

$$\Delta\tau^2 = \frac{\sum_i \frac{(\tau_i - \bar{\tau})^2 + \sigma_i^2}{\sigma_i^4}}{\left(\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}\right)^2} \quad (2.15)$$

Meritve časovnega odziva senzorjev za relativno vlažnost zraka opravimo z naslednjimi nastavitvami parametrov zraka:

- konstantna temperatura zraka ($T = \text{konst.}$)
- konstantna specifična vlažnost zraka ($q = \text{konst.}$)
- konstantna relativna vlažnost zraka ($\%RV = \text{konst.}$).

Meritve časovnega odziva senzorjev za temperaturo zraka opravimo z naslednjimi nastavitvami parametrov zraka:

- konstantna specifična vlažnost zraka ($q = \text{konst.}$)
- konstantna relativna vlažnost zraka ($\%RV = \text{konst.}$) – brez rad. ščita.

Vse meritve opravimo v pogojih v katerih ne pride do kondenzacije na senzorjih, kar bi bistveno vplivalo na meritve.

V dodatku H je primer prileganja krivulje in izračuna časovne konstante merilnika relativne vlažnosti zraka pri konstantni specifični vlažnosti zraka.

2.4.4 Podajanje merilne negotovosti

V Evropskem združenju za akreditacije (ang. European co-operation for Accreditation) je dogovorjeno, da vsi EA akreditirani laboratoriji podajajo razširjeno merilno negotovost U , pri čemer se standardna merilna negotovost $u(y)$ pomnoži s faktorjem pokritja k [20]:

$$U = k(N_{eff}) \cdot u(y) \quad (2.16)$$

kjer je:

U ... razširjena merilna negotovost

$k(N_{eff})$... faktor pokritja odvisen od števila efektivnih prostostnih stopenj

$u(y)$... standardna merilna negotovost.

Število efektivnih prostostnih stopenj za standardno merilno negotovost izračunamo s pomočjo vseh komponent, ki prispevajo k skupni merilni negotovosti [20]:

$$N_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_i^M \frac{u_i^4}{N_i}} \quad (2.16)$$

kjer je:

N_{eff} ... število efektivnih prostostnih stopenj

u_c ... skupna merilna negotovost

u_i ... merilna negotovost i -te komponente ki prispeva k merilni negotovosti

N_i ... število prostostnih stopenj i -te komponente ki prispeva k merilni negotovosti

M ... število vseh komponent ki prispevajo k merilni negotovosti.

Za meritve s številom efektivnih prostostnih stopenj večjim od 50 in z normalno (Gaussovo) porazdelitvijo izmerkov uporabimo $k = 2$. Faktor pokritja je izračunan na osnovi Studentove porazdelitve za stopnjo zaupanja 95,45 %. Za efektivne prostostne stopnje manjše od 50 pogledamo v tabelo [20].

3 Rezultati

3.1 Relativna vlažnost zraka

3.1.1 Kalibracija merilnikov relativne vlažnosti zraka pri temperaturi 0 °C

Izvedba meritev: od 29.09.2014 do 02.10.2014

Relativna vlažnost zraka okolice: 47,0 % do 56,0 %

Temperatura zraka okolice: 22,3 °C do 23,1 °C.

onset S-THB-M002

10034358

RV_s	RV_x	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
19,6	26,1	-6,5	1,1
34,4	40,2	-5,8	1,3
49,2	54,1	-4,9	1,4
64,8	68,0	-3,2	1,6
79,7	80,7	-1,0	1,8
94,5	93,1	1,4	2,0

onset S-THB-M008

10037716

RV_s	RV_x	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
19,6	26,3	-6,7	1,2
34,4	40,6	-6,2	1,3
49,2	54,9	-5,7	1,4
64,8	68,8	-4,0	1,6
79,7	81,5	-1,8	1,8
94,5	93,3	1,2	2,0

Preglednici 3.1 in 3.2: rezultati meritev relativne vlažnosti zraka merilnikov S-THB-M00x pri temperaturi zraka 0 °C.

Vaisala HMP155

440/14

RV_s	RV_x	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
19,6	20,3	-0,7	1,8
34,4	35,0	-0,6	1,8
49,2	49,7	-0,5	1,8
64,8	64,4	0,4	1,8
79,7	79,0	0,7	1,8
94,5	93,8	0,7	2,0

kjer je:

RV_s ... referenčni merilnik

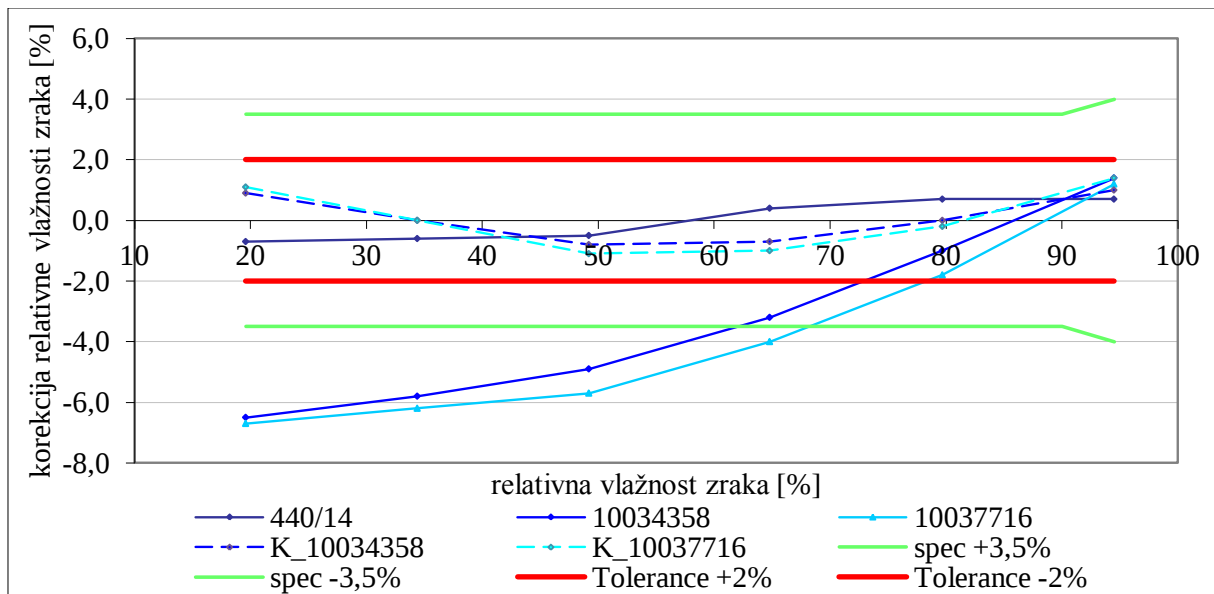
RV_x ... merjenec

RV_k ... korekcija

RV_{cor} ... aplicirani korekcijski koef.

U ... razširjena merilna negotovost

Preglednica 3.3: rezultati vzporedne meritve relativne vlažnosti zraka merilnika HMP155 pri temperaturi zraka 0 °C.



Slika 15: grafični prikaz odstopanj merilnikov RV zraka pri temperaturi zraka 0 °C z vrisanimi linearnimi popravki (črtkano). Zaradi preglednosti so posamezne meritve povezane s črto.

kjer je:

tolerance $\pm 2\%$... kriterij sprejemljivosti odstopanj v mreži merilnih mest ARSO
spec $\pm 3,5\%$... podatki proizvajalca o največjem odstopanju vključno s histerezo.

V Umerjevalnem laboratoriju se pri podatkovnih zapisovalnikih, ki preveč odstopajo, uporablja linearna korekcija, ki jo bomo zaradi primerljivosti uporabili tudi tukaj. Seveda bi s polinomom višje stopnje dobili boljši rezultat, vendar kot bomo videli v nadaljevanju, že z linearno korekcijo zadostimo meroslovnim zahtevam merilnikov, ki se uporabljajo na mreži merilnih mest ARSO oz. WMO.

Z metodo najmanjših kvadratov izračunamo koeficiente linearne korekcije:

onset S-THB-M002, 10034358

$k = 1,11731616$
 $n = -10,4898065$
 $\sigma = 0,8969543$

onset S-THB-M008, 10037716

$k = 1,11287785$
 $n = -10,7780239$
 $\sigma = 1,17815447$

kjer je:

$$RH_{cor} = k \cdot RH_x + n \quad (3.1)$$

Korekcijo apliciramo na izmerjene vrednosti (na sliki 15 izrisano s prekinjeno črto).

onset S-THB-M002

10034358

RV_s	RV_{cor}	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
19,6	18,7	0,9	2,2
34,4	34,4	0,0	2,3
49,2	50,0	-0,8	2,3
64,8	65,5	-0,7	2,5
79,7	79,7	0,0	2,6
94,5	93,5	1,0	2,7

onset S-THB-M008

10037716

RV_s	RV_{cor}	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
19,6	18,5	1,1	2,7
34,4	34,4	0,0	2,7
49,2	50,3	-1,1	2,8
64,8	65,8	-1,0	2,9
79,7	79,9	-0,2	3,0
94,5	93,1	1,4	3,1

Preglednici 3.4 in 3.5: rezultati linearne korekcije meritev relativne vlažnosti zraka merilnikov S-THB-M00x pri temperaturi zraka 0 °C.

V dodatku A so podani posamezni prispevki merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri kalibraciji merilnikov relativne vlažnosti zraka S-THB-M00x pri 0 °C.

3.1.2 Kalibracija merilnikov relativne vlažnosti zraka pri temperaturi 20 °C

Izvedba meritev: od 24.09.2014 do 25.09.2014

Relativna vlažnost zraka okolice: 42,0 % do 52,0 %

Temperatura zraka okolice: 23,0 °C do 25,5 °C

onset S-THB-M002

10034358

RV_s	RV_x	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
20,0	25,8	-5,8	1,9
35,0	40,1	-5,1	2,0
49,9	54,3	-4,4	2,1
64,5	68,6	-4,1	2,2
79,5	81,1	-1,6	2,3
94,1	94,4	-0,3	2,5

onset S-THB-M008

10037716

RV_s	RV_x	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
20,0	26,0	-6,0	2,0
35,0	40,8	-5,8	2,1
49,9	55,3	-5,4	2,2
64,5	69,7	-5,2	2,3
79,5	82,1	-2,6	2,4
94,1	94,7	-0,6	2,6

Preglednici 3.6 in 3.7: rezultati meritev relativne vlažnosti zraka merilnikov S-THB-M00x pri temperaturi zraka 20 °C.

Vaisala HMP155

426/14

RV_s	RV_x	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
20,0	20,3	-0,3	1,8
35,0	35,2	-0,2	1,8
49,9	49,9	0,0	1,8
64,5	65,2	-0,7	2,0
79,5	79,1	0,4	2,1
94,1	93,8	0,3	2,3

kjer je:

RV_s ... referenčni merilnik

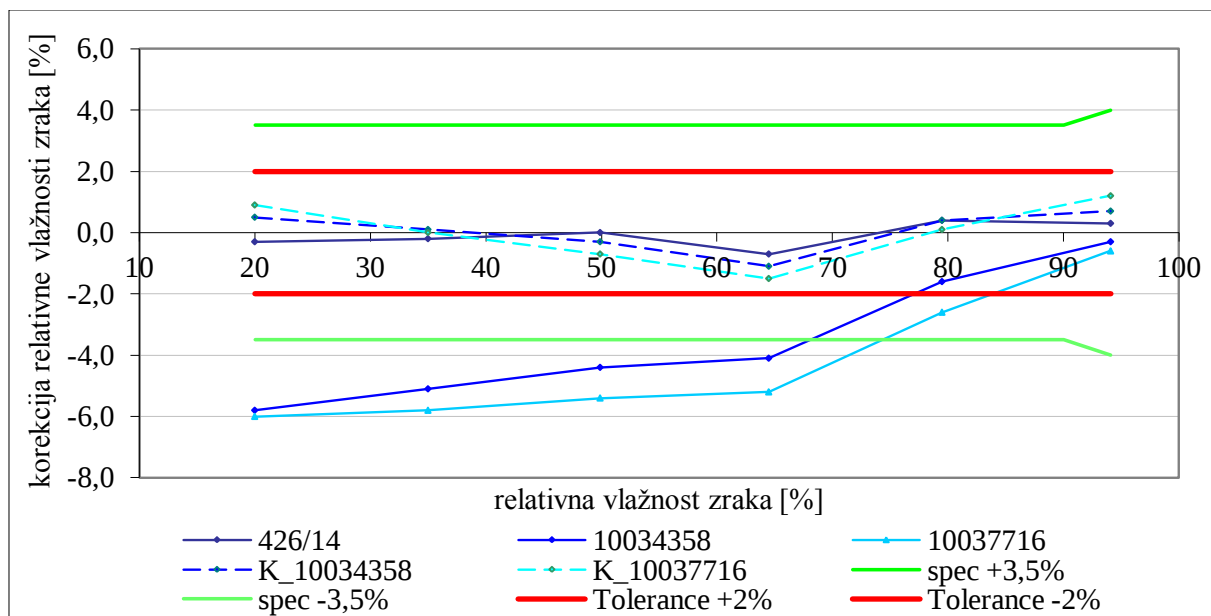
RV_x ... merjenec

RV_k ... korekcija

RV_{cor} ... aplicirani korekcijski koef.

U ... razširjena merilna negotovost

Preglednica 3.8: rezultati vzporedne meritve relativne vlažnosti zraka merilnika HMP155 pri temperaturi zraka 20 °C.



Slika 16: grafični prikaz odstopanj merilnikov RV zraka s temperaturo 20 °C z vrisanimi linearnimi popravki (črtkano). Zaradi preglednosti so posamezne meritve povezane s črto.

Z metodo najmanjših kvadratov izračunamo koeficiente linearne korekcije:

onset S-THB-M002, 10034358

$$k = 1,077746089$$

$$n = -8,342333104$$

$$\sigma = 0,752689036$$

onset S-THB-M008, 10037716

$$k = 1,074574399$$

$$n = -8,865930157$$

$$\sigma = 1,167252742$$

Korekcijo apliciramo na izmerjene vrednosti (na sliki 16 izrisano s prekinjeno črto).

onset S-THB-M002

10034358

RV_s	RV_{cor}	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
20,0	19,5	0,5	2,5
35,0	34,9	0,1	2,6
49,9	50,2	-0,3	2,6
64,5	65,6	-1,1	2,7
79,5	79,1	0,4	2,8
94,1	93,4	0,7	3,0

onset S-THB-M008

10037716

RV_s	RV_{cor}	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
20,0	19,1	0,9	3,1
35,0	35,0	0,0	3,2
49,9	50,6	-0,7	3,3
64,5	66,0	-1,5	3,3
79,5	79,4	0,1	3,4
94,1	92,9	1,2	3,5

Preglednici 3.9 in 3.10: rezultati linearne korekcije meritev relativne vlažnosti zraka merilnikov S-THB-M00x pri temperaturi zraka 20 °C.

V dodatku B so podani posamezni prispevki merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri kalibraciji merilnikov relativne vlažnosti zraka S-THB-M00x pri 20 °C.

3.1.3 Kalibracija merilnikov relativne vlažnosti zraka pri temperaturi 35 °C

Izvedba meritev: od 03.10.2014 do 07.10.2014

Relativna vlažnost zraka okolice: 29,0 % do 51,0 %

Temperatura zraka okolice: 22,5 °C do 23,7 °C

onset S-THB-M002

10034358

RV_s	RV_x	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
20,0	24,9	-4,9	1,5
34,9	39,2	-4,3	1,6
49,8	53,4	-3,6	1,7
64,6	67,1	-2,5	1,9
79,5	80,6	-1,1	2,0
94,2	95,4	-1,2	2,2

onset S-THB-M008

10037716

RV_s	RV_x	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
20,0	25,0	-5,0	1,5
34,9	39,7	-4,8	1,6
49,8	54,4	-4,6	1,7
64,6	68,1	-3,5	1,8
79,5	81,7	-2,2	2,0
94,2	95,6	-1,4	2,2

Preglednici 3.11 in 3.12: rezultati meritev relativne vlažnosti zraka merilnikov S-THB-M00x pri temperaturi zraka 35 °C.

Vaisala HMP155

467/14

RV_s	RV_x	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
20,0	20,6	-0,6	1,8
34,9	35,6	-0,7	1,8
49,8	50,3	-0,5	1,8
64,6	64,9	-0,3	1,8
79,5	79,6	-0,1	1,8
94,2	94,2	0,0	2,0

kjer je:

RV_s ... referenčni merilnik

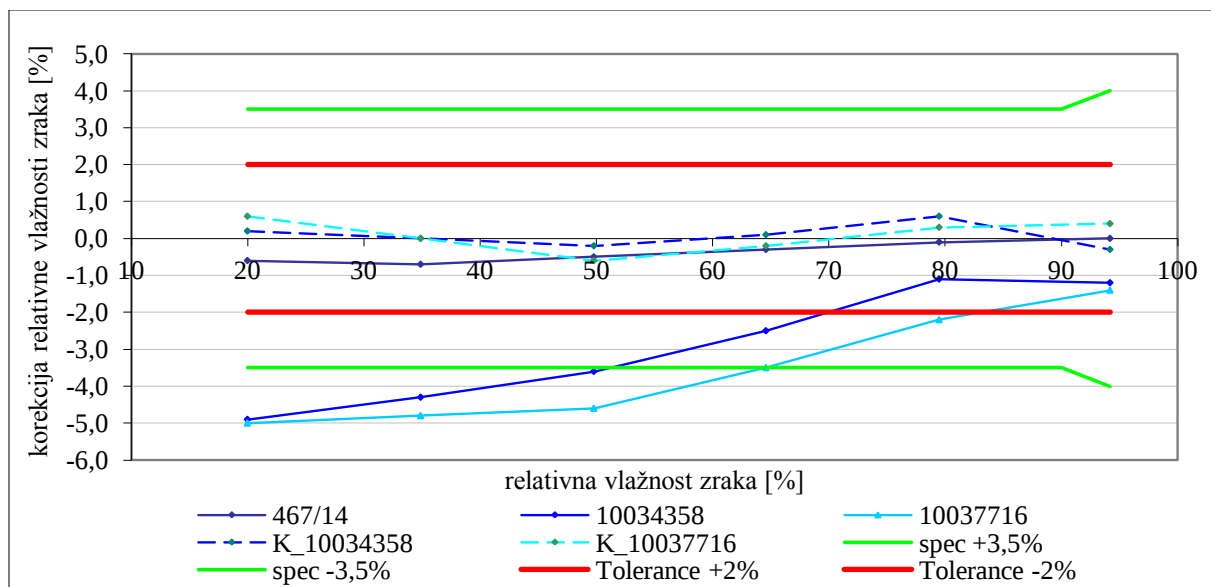
RV_x ... merjenec

RV_k ... korekcija

RV_{cor} ... aplicirani korekcijski koef.

U ... razširjena merilna negotovost

Preglednica 3.13: rezultati vzporedne meritve relativne vlažnosti zraka merilnika HMP155 pri temperaturi zraka 35 °C.



Slika 17: grafični prikaz odstopanj merilnikov RV zraka s temperaturo 35 °C z vrisanimi linearnimi popravki (črtkano). Zaradi preglednosti so posamezne meritve povezane s črto.

Z metodo najmanjših kvadratov izračunamo koeficiente linearne korekcije:

onset S-THB-M002, 10034358

$$k = 1,060500587$$

$$n = -6,622443636$$

$$\sigma = 0,352556405$$

onset S-THB-M008, 10037716

$$k = 1,053495131$$

$$n = -6,903395571$$

$$\sigma = 0,456105091.$$

Korekcijo apliciramo na izmerjene vrednosti (na sliki 17 izrisano s prekinjeno črto).

onset S-THB-M002

10034358

RV_s	RV_{cor}	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
20,0	19,8	0,2	1,7
34,9	34,9	0,0	1,8
49,8	50,0	-0,2	1,9
64,6	64,5	0,1	2,1
79,5	78,9	0,6	2,2
94,2	94,5	-0,3	2,4

onset S-THB-M008

10037716

RV_s	RV_{cor}	RV_k	U
[%]	[%]	[%]	[%]
20,0	19,4	0,6	1,8
34,9	34,9	0,0	1,9
49,8	50,4	-0,6	2,0
64,6	64,8	-0,2	2,1
79,5	79,2	0,3	2,2
94,2	93,8	0,4	2,4

Preglednici 3.14 in 3.15: rezultati linearne korekcije meritev relativne vlažnosti zraka merilnikov S-THB-M00x pri temperaturi zraka 35 °C.

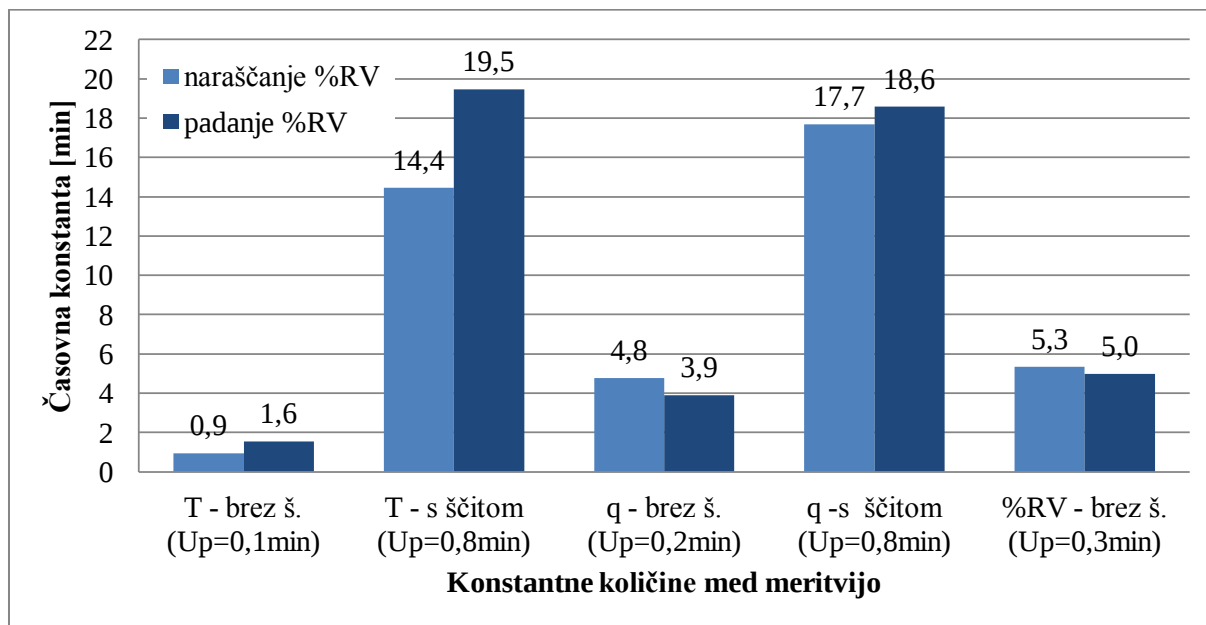
V dodatku C so podani posamezni prispevki merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri kalibraciji merilnikov relativne vlažnosti zraka S-THB-M00x pri 35 °C.

3.1.4 Meritve časovnega odziva senzorjev za relativno vlažnost zraka

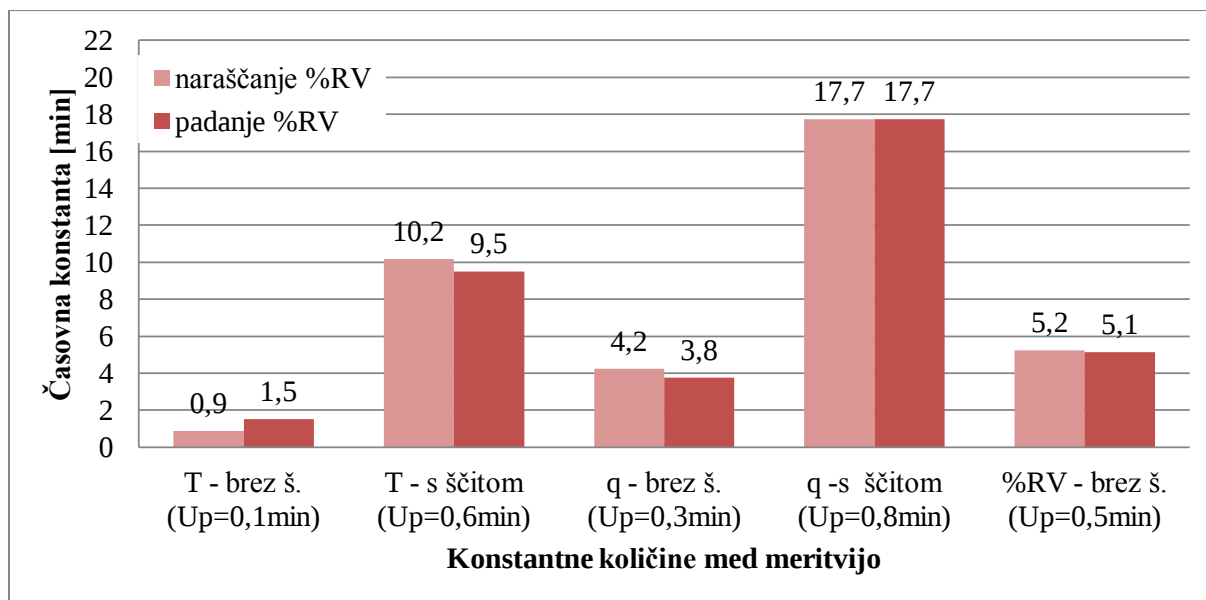
Izvedba meritev: od 15.10.2014 do 09.11.2014

Relativna vlažnost zraka okolice: 54,1 % do 67,2 %

Temperatura zraka okolice: 19,0 °C do 22,5 °C



Slika 18: časovne konstante merilnika S-THB-M00x ser.št. 4358 za relativno vlažnost zraka z navedeno povprečno merilno negotovostjo u_p za naraščajoče in padajoče meritve.



Slika 19: časovne konstante merilnika S-THB-M00x ser.št. 7716 za relativno vlažnost zraka z navedeno povprečno merilno negotovostjo u_p za naraščajoče in padajoče meritve.

V dodatkih E in F so rezultati meritev in izračuni standardne merilne negotovosti časovne konstante merilnikov relativne vlažnosti zraka brez/z radiacijskim ščitom.

3.2 Temperatura zraka

3.2.1 Kalibracija merilnikov temperature zraka

Izvedba meritev: od 08.10.2014 do 10.10.2014

Relativna vlažnost zraka okolice: 49,0 % do 59,0 %

Temperatura zraka okolice: 21,3 °C do 24,3 °C

Relativna vlažnost zraka v klimatski komori: 10 % do 50 %

onset S-THB-M002

10034358

T_s	T_x	T_k	U
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
-18,34	-18,60	0,26	0,69
-9,83	-10,05	0,22	0,42
0,09	-0,04	0,13	0,25
10,04	9,97	0,07	0,25
20,17	20,13	0,04	0,24
30,17	30,15	0,02	0,25
40,20	40,17	0,03	0,25

onset S-THB-M008

10037716

T_s	T_x	T_k	U
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
-18,34	-18,43	0,09	0,69
-9,83	-9,89	0,06	0,42
0,09	0,12	-0,03	0,25
10,04	10,12	-0,08	0,25
20,17	20,27	-0,10	0,24
30,17	30,27	-0,10	0,24
40,20	40,28	-0,08	0,25

Preglednici 3.16 in 3.17: rezultati meritev temperature zraka merilnikov S-THB-M00x.

Vaisala HMP155

470/14

T_s	T_x	T_k	U
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
-18,34	-18,34	0,00	0,32
-9,83	-9,80	-0,03	0,28
0,09	0,16	-0,07	0,25
10,04	10,14	-0,10	0,25
20,17	20,29	-0,12	0,25
30,17	30,31	-0,14	0,25
40,20	40,34	-0,14	0,25

kjer je:

T_s ... referenčni merilnik

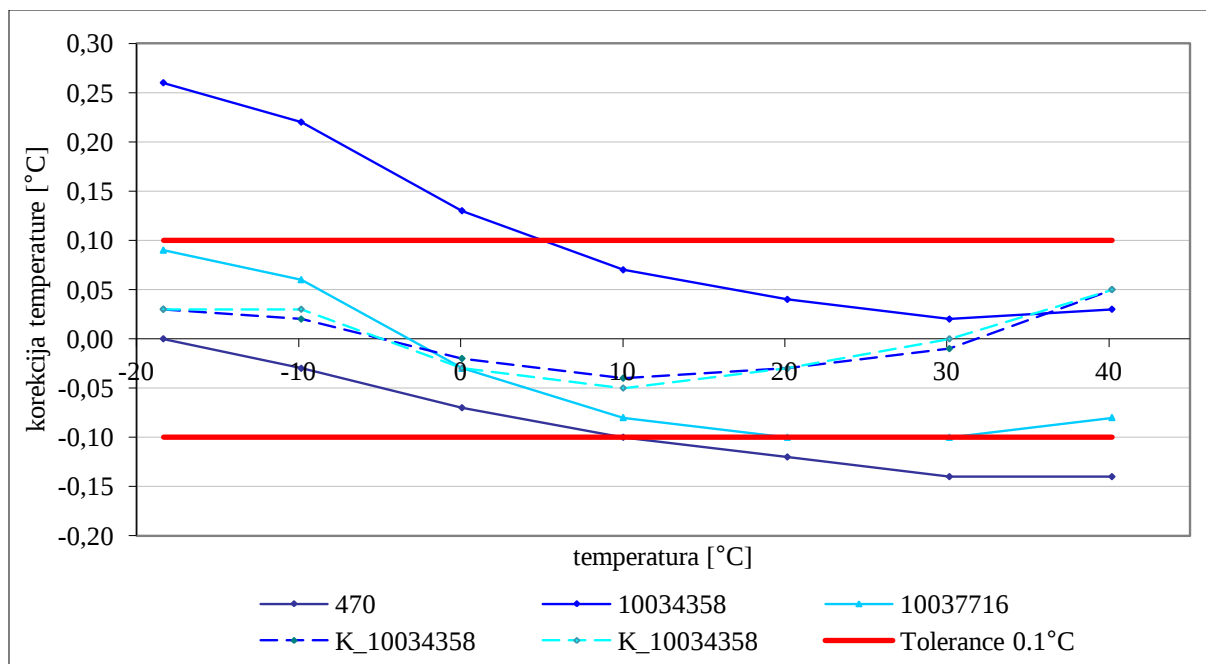
T_x ... merjenec

T_k ... korekcija

T_{cor} ... aplicirani korekcijski koef.

U ... razširjena merilna negotovost

Preglednica 3.18: rezultati vzporedne meritve temperature zraka merilnika HMP155.



Slika 20: grafični prikaz odstopanj merilnikov temperature zraka z vrisanimi linearnimi popravki (črtkano). Zaradi preglednosti so posamezne meritve povezane s črto,

kjer je:

tolerance $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$... kriterij sprejemljivosti odstopanj v mreži merilnih mest ARSO.

Z metodo najmanjših kvadratov izračunamo koeficiente linearne korekcije:

onset S-THB-M002, 10034358

$k = 0,995753769$

$n = 0,153511734$

$\sigma = 0,036361559$

onset S-THB-M008, 10037716

$k = 0,9967634$

$n = -0,000652812$

$\sigma = 0,041315308$.

$$T_{cor} = k \cdot T_x + n \quad (3.2)$$

Korekcijo apliciramo na izmerjene vrednosti (na sliki 20 izrisano s prekinjeno črto).

onset S-THB-M002

10034358

T_s [°C]	T_{cor} [°C]	T_k [°C]	U [°C]
-18,34	-18,37	0,03	0,70
-9,83	-9,85	0,02	0,43
0,09	0,11	-0,02	0,27
10,04	10,08	-0,04	0,27
20,17	20,20	-0,03	0,26
30,17	30,18	-0,01	0,27
40,20	40,15	0,05	0,27

onset S-THB-M008

10037716

T_s [°C]	T_{cor} [°C]	T_k [°C]	U [°C]
-18,34	-18,37	0,03	0,70
-9,83	-9,86	0,03	0,43
0,09	0,12	-0,03	0,27
10,04	10,09	-0,05	0,27
20,17	20,20	-0,03	0,26
30,17	30,17	0,00	0,26
40,20	40,15	0,05	0,27

Preglednici 3.19 in 3.20: rezultati linearne korekcije meritev temperature zraka merilnikov S-THB-M00x.

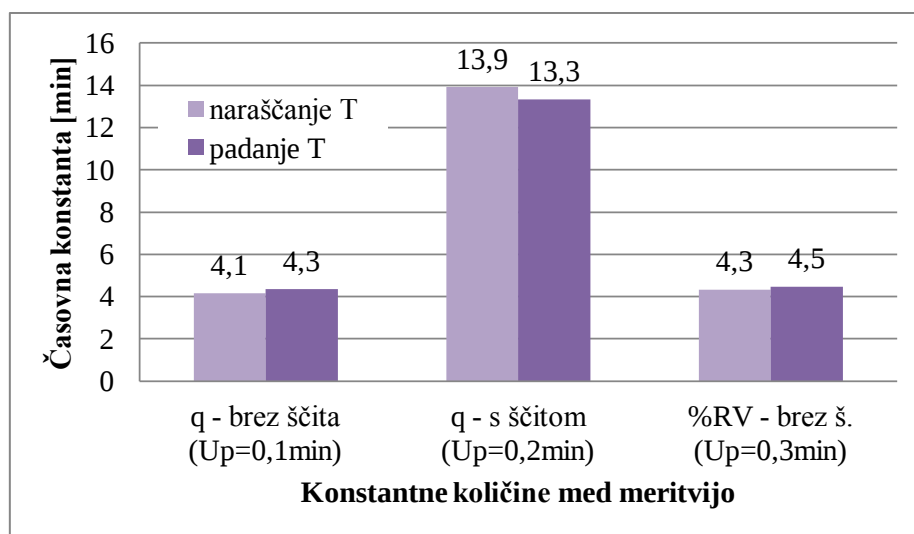
V dodatku D so podani posamezni prispevki merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri kalibraciji merilnikov temperature zraka S-THB-M00x.

3.2.2 Meritve časovnega odziva senzorjev temperature zraka

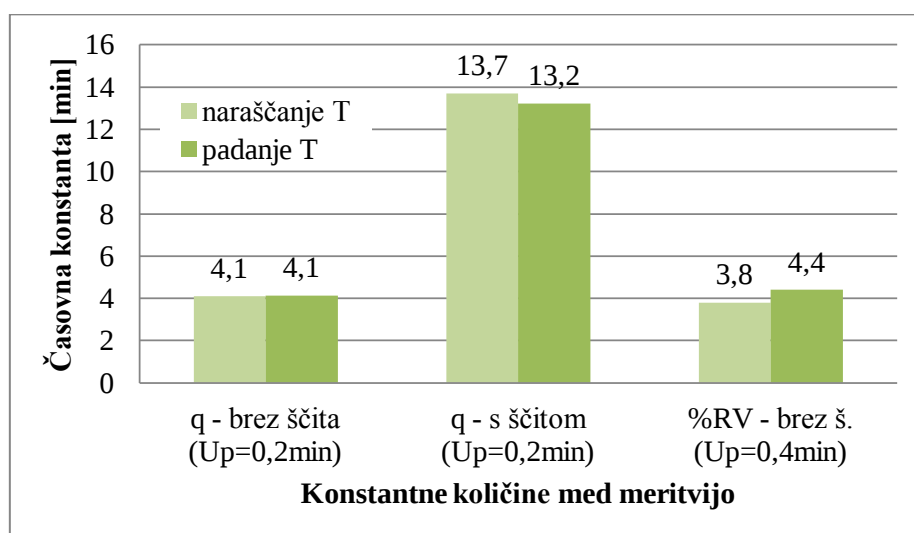
Izvedba meritev: od 15.10.2014 do 09.11.2014

Relativna vlažnost zraka okolice: 54,1 % do 67,2 %

Temperatura zraka okolice: 19,0 °C do 22,5 °C



Slika 21: časovne konstante merilnika S-THB-M00x ser.št. 4358 za temperaturo zraka z navedeno povprečno merilno negotovostjo u_p naraščajočih in padajočih meritev.



Slika 22: časovne konstante merilnika S-THB-M00x ser.št. 7716 za temperaturo zraka z navedeno povprečno merilno negotovostjo u_p naraščajočih in padajočih meritev.

V dodatku G so rezultati meritev in izračuni standardne merilne negotovosti časovne konstante merilnikov temperature zraka brez/z radiacijskim ščitom.

4 Diskusija

Za oba onset merilnika relativne vlažnosti in temperature zraka lahko žal le potrdimo, da »vzeta iz škatle« bolj ali manj odstopata od specifikacij proizvajalca. Senzorja relativne vlažnosti zraka namerita do 6,0 %RV več od dejanske relativne vlažnosti zraka (pri 20 °C), med tem ko senzorja temperature zraka namerita do 0,26 °C manj od dejanske temperature zraka. Žal se je tudi v tem primeru pokazalo, da proizvajalci merilnike, ki niso individualno testirani, opremijo zgolj s splošnimi specifikacijami, na katere se pri natančnejših meritvah nikakor ne moremo zanesti.

Po opravljeni linearni korekciji meritev (polinom prve stopnje) dobimo bistveno boljše rezultate. Merilnika relativne vlažnosti zraka pri tem odstopata le še za največ 1,5 %RV od dejanske relativne vlažnosti zraka, pri čemer znaša povprečna razširjena merilna negotovost 3,3 %RV. Merilnika temperature zraka odstopata za največ 0,05 °C od dejanske temperature zraka, pri čemer znaša povprečna razširjena merilna negotovost 0,36 °C. Tako že po enostavni korekciji izmerkov praktično oba merilnika izpolnjujeta zahteve WMO za natančnost meritev, ki znaša ± 1 %RV za visoko relativno vlažnost zraka oz. ± 2 %RV za srednjo relativno vlažnost zraka in $\pm 0,1$ °C za temperaturo.

Opazna je tudi temperaturna občutljivost merilnikov relativne vlažnosti zraka, ker rezultati pri nižjih temperaturah bolj odstopajo od referenčnih vrednosti kot pri višjih temperaturah.

Žal merilnika sama niti podatkovni zapisovalnik na katerega sta priključena, ne omogočata izvedbo korekcij na samem merilniku oz. podatkovnem zapisovalniku, ki se pri konkurenčnih merilnikih izvede bodisi analogno s potenciometri kot npr. pri HMP45D (Vaisala), bodisi digitalno z vnosom koeficientov korekcijske premice v podatkovni zapisovalnik kot npr. pri podatkovnem zapisovalniku QL20TU (Vaisala). Ker sta merilnika v osnovi namenjena sporočanju podatkov v podatkovni zapisovalnik, to ne predstavlja bistvene ovire, nikakor pa ju ne bi mogli priporočiti za »on-line« sistem krmiljenja procesov ali naprav.

Kot je razvidno iz vzporedne meritve merilnika HMP155 proizvajalca Vaisala, sta onsetova merilnika S-THB-M00x po opravljeni korekciji povsem konkurenčna, pri čemer moramo vzeti v zakup nekoliko večjo merilno negotovost.

Če so kalibracije merilnikov za temperaturo in relativno vlažnost zraka že dobro utečene, pa je bila pri meritvah časovne konstante senzorjev potrebna precejšnja improvizacija z namenom zagotovitve čim boljših merilnih pogojev. To se seveda odraža na relativno veliki merilni negotovosti rezultatov. So pa za razliko od prejšnjih meritev, rezultati meritev časovne konstante v skladu s pričakovanji glede na specifikacije proizvajalca. Povprečna časovna konstanta merilnikov relativne vlažnosti zraka znaša 3,6 min brez in 17,6 min z rad. ščitom s standardno merilno negotovostjo 0,2 min oz. 0,8. Za merilnika temperature zraka le ta znaša 4,3 min brez in 13,6 min z rad. ščitom s standardno merilno negotovostjo 0,2 min (v obeh primerih). Ker so bile meritve izvedene v mirujočem zraku, so rezultati pri merjenjih z radiacijskim ščitom bistveno večji kot brez ščita in sicer za faktor 5 pri meritvi relativne vlažnosti zraka oz. za faktor 3 pri meritvi temperature. V proizvajalčevem opisu je navedeno, da je to počasnejši tip senzorja (merilnika) namenjen dolgotrajnejšim meritvam, na katere ne vplivajo kratkotrajne spremembe relativne vlažnosti zraka.

Merilnik HMP155 proizvajalca Vaisala ima senzorja nameščena na vrhu nosilca pod zaščitno kapico z membrano, kar omogoča boljši pretok merjenega zraka in posledično manjšo časovno konstanto, ki znaša 20 s (podatki proizvajalca).

Omenimo še dva pojava, ki posredno vplivata na časovno konstanto merilnikov. Prvi pojav (dodatek I, slika 23) je opažen pri meritvi časovnega odziva merilnika za relativno vlažnost zraka na nenadno spremembo temperature zraka pri čemer je bila relativna vlažnost zraka

konstantna. Prestavitev merilnika iz hladne v toplo komoro je povzročila začasno povišane meritve relativne vlažnosti zraka, vse dokler se senzor ni ogrel. Pri spremembi temperature zraka za 6 °C je kazal merilnik relativne vlažnosti zraka za približno 13 %RV višjo vrednost od dejanske. Pri tem je treba poudariti, da so bili parametri nastavljeni tako, da ni bila dosežena temperatura rosišča, ker bi to vplivalo na meritev. Obratno pa je merilnik začasno prikazoval nižjo stopnjo relativne vlažnosti zraka od dejanske, ko je bil prestavljen iz tople v hladno komoro. Predvidevam, da kapacitivni merilnik hitro odreagira na spremembo absolutne vlažnosti zraka, med tem ko potrebuje več časa za prilagoditev na novo temperaturo.

Naslednji pojav (dodatek I, slika 24) je opažen pri meritvi časovnega odziva merilnika za temperaturo na spremembo relativne vlažnosti zraka pri konstantni temperaturi (senzor se nahaja v vodotesnem ohišju). Prestavitev merilnika iz komore z nižjo v komoro z višjo relativno vlažnostjo zraka je povzročila, da je merilnik začasno prikazoval višjo temperaturo od dejanske. Obratno pa je merilnik začasno prikazoval nižjo temperaturo zraka od dejanske, ko je bil prestavljen iz komore z višjo v komoro z nižjo relativno vlažnostjo zraka. Ker so te spremembe relativno majhne (± 0.25 °C), za njih ni smiselno določati časovne konstante.

V dodatku J na sliki 25 je prikazan tipičen časovni odziv senzorjev pri konstantni specifični vlažnosti zraka – sprememba relativne vlažnosti zraka je zgolj posledica spremembe temperature zraka.

Kot sem že omenil, so kalibracije merilnikov temperature in relativne vlažnosti zraka na ARSO dobro utečena in ne vidim nobenih možnosti za izboljšave razen s posodobitvijo opreme. Na ARSO so že pripravljene nove komore, kopeli in merilniki za nov kalibracijski laboratorij, ki bodo omogočili bistveno zmanjšanje sistemskega prispevka k skupni merilni negotovosti merjenja (tudi do 50 %).

So pa zato pri merjenju časovne konstante zagotovo možne izboljšave. Morda bi se dalo bolje izolirati merilne komore, da bi tako zmanjšali vplive nihanj parametrov okolice. Verjetno bi prav prišla meritev časovne konstante merilnika relativne vlažnosti zraka z radiacijskim ščitom pri različnih hitrostih vetra. Podobna meritev za temperaturni senzor v klimatski komori žal ni možna, ker ne omogoča spreminjanja pretoka zraka. V omejenem temperaturnem obsegu bi se meritev lahko izvedla le v generatorju vlažnega zraka.

5 Zaključek

Cilj naloge je evalvirati merilno negotovost onset S-THB-M00x merilnikov za temperaturo in relativno vlažnost zraka in določiti njihove časovne konstante.

Po izvedeni linearni korekciji izmerkov merilnika za relativno vlažnost zraka od pravih vrednosti odstopata za največ 1,5 %RV na območju od 20 %RV do 95 %RV. Pri tem je povprečna razširjena merilna negotovost 3,3 %RV. Časovna konstanta znaša v povprečju 3,6 min brez in 17,6 min z radiacijskim ščitom s povprečno merilno negotovostjo 0,2 min oz. 0,8 min.

Po izvedeni linearni korekciji izmerkov merilnika za temperaturo zraka odstopata za največ 0,05 °C na območju od -20 °C do +40 °C. Pri tem je povprečna razširjena merilna negotovost 0,36 °C. Časovna konstanta znaša v povprečju 4,3 min brez in 13,6 min z radiacijskim ščitom s povprečno merilno negotovostjo 0,2 min (v obeh primerih).

Prepričan sem, da sem v nalogi evalvacijo merilnikov uspešno izvedel in s tem ponudil možnost kvalitetnejših meritev okoljskih parametrov. Upam, da bodo uporabniki to priložnost uspešno izkoristili.

Literatura

- [1] ARSO, ogled 20.09.2014, <http://www.arso.gov.si>
- [2] J Rakovec, T. Vrhovec, Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike (DMFA – založništvo, Ljubljana, 2000)
- [3] onset, Temperature/RH Smart Sensor (S-THB-M00x), ogled 20.09.2014, http://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/11427-I-MAN-S-THB.pdf
- [4] Onset Computer Corporation, ogled 20.09.2014, <http://www.onsetcomp.com>
- [5] HMP155 Humidity and Temperature Probe (Vaisala, 2012), ogled 20.09.2014, <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/HMP155-Datasheet-B210752EN-E-LoRes.pdf>
- [6] Vaisala, ogled 20.09.2014, <http://www.vaisala.com>
- [7] Series 2500 benchtop two-pressure humidity generator, Operation and maintenance manual (Thunder Scientific Corporation, Albuquerque, 2003)
- [8] D. Groselj, Zajemanje in ovrednotenje podatkov v mreži avtomatskih meteoroloških postaj, magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana (2003)
- [9] A. Wexler, »Vapor Pressure Formulation for Water in Range 0 to 100 °C. A Revision«, Journal of Research of the NBS – A. Physics and Chemistry, Vol. 80A No. 5-6, 775 (1976)
- [10] A. Wexler, »Vapor Pressure Formulation for Ice«, Journal of Research of the NBS – A. Physics and Chemistry, Vol. 81A No. 1, 5 (1977)
- [11] B. Hardy, ITS-90 Formulations for vapor pressure, frostpoint temperature, dewpoint temperature and enhancement factors in the range -100 °C to +100 °C (Thunder Scientific Corporation, Albuquerque, USA, april 1998)
- [12] R. W. Hyland, »A correlation for the second interaction virial coefficients and enhancement factors for CO₂-free moist air from -50 to +90 °C«, Journal of Research of the NBS – A. Physics and Chemistry, Vol. 79A No. 4, 551 (1975)
- [13] L. Greenspan, »Functional Equations for the Enhancement Factors for CO₂-free Moist Air«, Journal of Research of the NBS – A. Physics and Chemistry, Vol. 80A No. 1, 41 (1976)
- [14] J. A. Goff, »Standardization of Thermodynamic Properties of Moist Air«, Heating, Piping and Air Conditioning, Vol. 21, 118 (1949)
- [15] S4000 Remote Precision Dew-point Hygrometer (Michell Instruments Ltd, Cambridgeshire, 2011), ogled 20.09.2014, http://www.michell.com/uk/documents/S4000_97145_UK_Datasheet.pdf
- [16] FLUKE Calibration, ogled 20.09.2014, <http://eu.flukecal.com/products/temperature-calibration/probessensors>
- [17] Service Manual, Prazisions-Klimaschrank HPC/S 4026, 07063080 (Heraeus, 01.95)
- [18] A. Likar, Osnove fizikalnih merenj in merilnih sistemov (DMFA – založništvo, Ljubljana, 2011)
- [19] A. Mohorič, Uvod v meritve (Ljubljana, 2004), ogled 30.01.2015, http://ucilnica1314.fmf.uni-lj.si/pluginfile.php/3441/mod_page/content/5/o_meritvah.pdf
- [20] Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration - EA-4/02 M (European co-operation for Accreditation, 2013), ogled 10.02.2015, <http://www.european-accreditation.org/publication/ea-4-02-m>

Dodatek A

Merilne negotovosti merilnikov in naprav – kalibracija merilnikov RV zraka pri 0 °C

RH_ref		10034358			Korelacija	Medij	Referenca	Multimeter	Umerjanec	Histereza	Standardna u	Razširjena U
Povprečje	StDev	Povprečje	StDev	Korekcija		RH0025	RH0021	HP34970		Umerjanca	u	U
%	%	%	%	%	-1<r<1	%	%	%	%	%	%	%
19,5714	0,0240	26,0920	0,0273	-6,5206	0,2009	0,4813	0,2316	0,0004	0,0577	0,0951	0,5465	1,0931
34,3978	0,0398	40,2120	0,0498	-5,8142	0,1463	0,4813	0,3502	0,0004	0,0577		0,6084	1,2168
49,2218	0,0542	54,1480	0,0502	-4,9262	-0,3092	0,4813	0,4688	0,0004	0,0577		0,6862	1,3725
64,8415	0,0679	68,0160	0,0487	-3,1745	-0,1304	0,4813	0,5937	0,0004	0,0577		0,7774	1,5548
79,6856	0,0832	80,7040	0,0197	-1,0184	-0,1142	0,4813	0,7125	0,0004	0,0577		0,8714	1,7428
94,4836	0,0411	93,0580	0,0572	1,4256	-0,2265	0,4813	0,8309	0,0004	0,0577		0,9697	1,9395

Preglednica A.1: pregled posameznih prispevkov merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri testiranju merilnika relativne vlažnosti zraka onset S-THB-M00x ser.št. 10034358 pri temperaturi zraka 0 °C.

RH_ref		10037716			Korelacija	Medij	Referenca	Multimeter	Umerjanec	Histereza	Standardna u	Razširjena U
Povprečje	StDev	Povprečje	StDev	Korekcija		RH0025	RH0021	HP34970		Umerjanca	u	U
%	%	%	%	%	-1<r<1	%	%	%	%	%	%	%
19,5714	0,0240	26,3000	0,0000	-6,7286	0,0000	0,4813	0,2316	0,0004	0,0577	0,1459	0,5572	1,1144
34,3978	0,0398	40,6000	0,0201	-6,2022	0,1716	0,4813	0,3502	0,0004	0,0577		0,6169	1,2339
49,2218	0,0542	54,9440	0,0499	-5,7222	0,1155	0,4813	0,4688	0,0004	0,0577		0,6934	1,3868
64,8415	0,0679	68,7620	0,0488	-3,9205	-0,1457	0,4813	0,5937	0,0004	0,0577		0,7853	1,5706
79,6856	0,0832	81,4540	0,0501	-1,7684	-0,0582	0,4813	0,7125	0,0004	0,0577		0,8797	1,7593
94,4836	0,0411	93,3080	0,0849	1,1756	-0,0293	0,4813	0,8309	0,0004	0,0577		0,9776	1,9552

Preglednica A.2: pregled posameznih prispevkov merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri testiranju merilnika relativne vlažnosti zraka onset S-THB-M00x ser.št. 10037716 pri temperaturi zraka 0 °C.

Pojasnila k preglednicam v dodatkih A,B, C in D:

- merilna negotovost za »Medij« (generator vlažnega zraka oz. klimatska komora) je privzeto največja vrednost za vse meritve
- merilna negotovost za »Multimeter« je privzeto največja vrednost za vse meritve (upoštevana le pri izračunu skupne merilne negotovosti merilnika HMP155)
- merilna negotovost »Umerjanec« predstavlja prispevek negotovosti zaradi ločljivosti merjenja
- pri kalibraciji se izmeri maksimalna histereza merjenja na celotnem merilnem območju
- pri nižjih temperaturah zraka(0 °C in manj) je klimatska komora manj stabilna, zato predstavlja bistven prispevek k skupni merilni negotovosti merjenja (Dodatek D).

Oznake merilnikov in naprav v preglednicah:

Medij RH0025 ... generator vlažnega zraka 2500ST-LT (Thunder Scientific Corporation)

Referenca RH0021 ... rosiščni merilnik relativne vlažnosti zraka S4000 (Michell)

Medij RH005 ... klimatska komora HPC/S 4026 (Heraeus Vötsch)

Pt100 T0037 ...uporovni merilnik temperature 5609 (Fluke).

Dodatek B

Merilne negotovosti merilnikov in naprav – kalibracija merilnikov RV zraka pri 20 °C

RH_ref		10034358 onset			Korelacija	Medij	Referenca	Multimeter	Umerjanec	Histereza	Standardna u	Razširjena U
Povprečje	StDev	Povprečje	StDev	Korekcija		RH0025	RH0021	HP34970		Umerjanca	u	U
%	%	%	%	%	-1<r<1	%	%	%	%	%	%	%
20.0142	0.0123	25.7990	0.0100	-5.7848	0.2253	0.4813	0.2351	0.0004	0.0577	0.7372	0,9132	1,8263
34.9839	0.0229	40.1080	0.0273	-5.1241	-0.0871	0.4813	0.3549	0.0004	0.0577		0,9517	1,9034
49.8509	0.0343	54.2970	0.0171	-4.4461	0.0711	0.4813	0.4738	0.0004	0.0577		1,0021	2,0043
64.5431	0.0322	68.6410	0.0494	-4.0979	-0.0904	0.4813	0.5913	0.0004	0.0577		1,0639	2,1278
79.5101	0.0353	81.1050	0.0687	-1.5949	-0.0250	0.4813	0.7111	0.0004	0.0577		1,1358	2,2717
94.1053	0.0444	94.4400	0.0682	-0.3347	-0.3513	0.4813	0.8278	0.0004	0.0577		1,2135	2,4269

Preglednica B.1: pregled posameznih prispevkov merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri testiranju merilnika relativne vlažnosti zraka onset S-THB-M00x ser.št. 10034358 pri temperaturi zraka 20 °C.

RH_ref		10037716 onset			Korelacija	Medij	Referenca	Multimeter	Umerjanec	Histereza	Standardna u	Razširjena U
Povprečje	StDev	Povprečje	StDev	Korekcija		RH0025	RH0021	HP34970		Umerjanca	u	U
%	%	%	%	%	-1<r<1	%	%	%	%	%	%	%
20.0142	0.0123	25.9850	0.0386	-5.9708	-0.1654	0.4813	0.2351	0.0004	0.0577	0.8076	0,9717	1,9435
34.9839	0.0229	40.7930	0.0256	-5.8091	0.1472	0.4813	0.3549	0.0004	0.0577		1,0070	2,0141
49.8509	0.0343	55.2540	0.0501	-5.4031	-0.1670	0.4813	0.4738	0.0004	0.0577		1,0564	2,1128
64.5431	0.0322	69.7340	0.0476	-5.1909	-0.1763	0.4813	0.5913	0.0004	0.0577		1,1139	2,2278
79.5101	0.0353	82.0520	0.0502	-2.5419	-0.0832	0.4813	0.7111	0.0004	0.0577		1,1819	2,3638
94.1053	0.0444	94.6770	0.0723	-0.5717	-0.4752	0.4813	0.8278	0.0004	0.0577		1,2581	2,5162

Preglednica B.2: pregled posameznih prispevkov merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri testiranju merilnika relativne vlažnosti zraka onset S-THB-M00x ser.št. 10037716 pri temperaturi zraka 20 °C.

Dodatek C

Merilne negotovosti merilnikov in naprav – kalibracija merilnikov RV zraka pri 35 °C

RH_ref		10034358			Korelacija	Medij	Referenca	Multimeter	Umerjanec	Histereza	Standardna u	Razširjena U
Povprečje	StDev	Povprečje	StDev	Korekcija		RH0025	RH0021	HP34970		Umerjanca	u	U
%	%	%	%	%	-1<r<1	%	%	%	%	%	%	%
19,9860	0,0160	24,9360	0,0482	-4,9500	-0,0720	0,4813	0,2349	0,0004	0,0577	0,4898	0,7299	1,4598
34,9364	0,0376	39,2280	0,0451	-4,2916	0,1299	0,4813	0,3545	0,0004	0,0577		0,7769	1,5538
49,8262	0,0343	53,3990	0,0100	-3,5728	0,1832	0,4813	0,4736	0,0004	0,0577		0,8369	1,6738
64,6357	0,0397	67,0940	0,0239	-2,4583	0,0604	0,4813	0,5921	0,0004	0,0577		0,9097	1,8194
79,5053	0,0412	80,6020	0,0200	-1,0967	-0,0625	0,4813	0,7110	0,0004	0,0577		0,9913	1,9826
94,1551	0,0556	95,3980	0,0619	-1,2429	-0,0625	0,4813	0,8282	0,0004	0,0577		1,0809	2,1617

Preglednica C.1: pregled posameznih prispevkov merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri testiranju merilnika relativne vlažnosti zraka onset S-THB-M00x ser.št. 10034358 pri temperaturi zraka 35 °C.

RH_ref		10037716			Korelacija	Medij	Referenca	Multimeter	Umerjanec	Histereza	Standardna u	Razširjena U
Povprečje	StDev	Povprečje	StDev	Korekcija		RH0025	RH0021	HP34970		Umerjanca	u	U
%	%	%	%	%	-1<r<1	%	%	%	%	%	%	%
19,9860	0,0160	25,0030	0,0223	-5,0170	-0,0421	0,4813	0,2349	0,0004	0,0577	0,4506	0,7028	1,4056
34,9364	0,0376	39,7000	0,0000	-4,7636	0,0000	0,4813	0,3545	0,0004	0,0577		0,7517	1,5034
49,8262	0,0343	54,4000	0,0000	-4,5738	0,0000	0,4813	0,4736	0,0004	0,0577		0,8145	1,6291
64,6357	0,0397	68,1380	0,0488	-3,5023	0,0242	0,4813	0,5921	0,0004	0,0577		0,8902	1,7804
79,5053	0,0412	81,7210	0,0409	-2,2157	0,0845	0,4813	0,7110	0,0004	0,0577		0,9730	1,9459
94,1551	0,0556	95,6350	0,0500	-1,4799	-0,0994	0,4813	0,8282	0,0004	0,0577		1,0631	2,1261

Preglednica C.2: pregled posameznih prispevkov merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri testiranju merilnika relativne vlažnosti zraka onset S-THB-M00x ser.št. 10037716 pri temperaturi zraka 35 °C.

Dodatek D

Merilne negotovosti merilnikov in naprav – kalibracija merilnikov temperature zraka

T_ref		10034358 onset			Korelacija	Medij	Pt100	Multimeter REF	Umerjanec	Histereza	Standardna u	Razširjena U
Povprečje	StDev	Povprečje	StDev	Korekcija		RH0005	T0037	E0016		Umerjanca	u	U
°C	°C	°C	°C	°C	-1<r<1	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
-18.3406	0.2467	-18.6038	0.2266	0.2632	0.0934	0.1163	0.0072	0.0221	0.0115	-0.0036	0,3405	0,6811
-9.8314	0.1403	-10.0458	0.1213	0.2144	0.1699	0.1163	0.0072	0.0227	0.0115		0,2070	0,4140
0.0850	0.0117	-0.0390	0.0122	0.1240	0.2016	0.1163	0.0072	0.0233	0.0115		0,1204	0,2408
10.0380	0.0099	9.9740	0.0089	0.0641	-0.1070	0.1163	0.0072	0.0240	0.0115		0,1204	0,2408
20.1695	0.0061	20.1277	0.0062	0.0418	0.3227	0.1163	0.0072	0.0247	0.0115		0,1199	0,2398
30.1743	0.0028	30.1458	0.0090	0.0285	-0.2854	0.1163	0.0072	0.0253	0.0115		0,1203	0,2406
40.1967	0.0024	40.1695	0.0064	0.0272	0.0091	0.1163	0.0072	0.0260	0.0115		0,1202	0,2404

Preglednica D.1: pregled posameznih prispevkov merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri testiranju merilnika temperature zraka onset S-THB-M00x ser.št. 10034358.

T_ref		10037716 onset			Korelacija	Medij	Pt100	Multimeter REF	Umerjanec	Histereza	Standardna u	Razširjena U
Povprečje	StDev	Povprečje	StDev	Korekcija		RH0025	T0037	E0016		Umerjanca	u	U
°C	°C	°C	°C	°C	-1<r<1	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
-18.3406	0.2467	-18.4346	0.2311	0.0939	0.0977	0.1163	0.0072	0.0221	0.0115	-0.0038	0,3425	0,6850
-9.8314	0.1403	-9.8859	0.1218	0.0544	0.1739	0.1163	0.0072	0.0227	0.0115		0,2069	0,4139
0.0850	0.0117	0.1165	0.0133	-0.0315	0.2857	0.1163	0.0072	0.0233	0.0115		0,1204	0,2408
10.0380	0.0099	10.1202	0.0095	-0.0821	-0.0231	0.1163	0.0072	0.0240	0.0115		0,1204	0,2408
20.1695	0.0061	20.2674	0.0059	-0.0979	0.2223	0.1163	0.0072	0.0247	0.0115		0,1200	0,2399
30.1743	0.0028	30.2675	0.0035	-0.0932	-0.3293	0.1163	0.0072	0.0253	0.0115		0,1200	0,2399
40.1967	0.0024	40.2788	0.0126	-0.0820	0.0269	0.1163	0.0072	0.0260	0.0115		0,1207	0,2414

Preglednica D.2: pregled posameznih prispevkov merilnih negotovosti merilnikov in naprav uporabljenih pri testiranju merilnika temperature zraka onset S-THB-M00x ser.št. 10037716.

Dodatek E

Izračun časovne konstante merilnikov RV zraka - brez radiacijskega ščita

		Origin					
		čas. konst.	1	2	3	pond. povp.	
<i>T</i> = konst			[s]	[s]	[s]	[s]	[min]
RH_4358	nar RV	τ	54,74964	57,97961	58,57634	56,83218	0,9
	pad RV	τ	91,68709	93,75233	94,22944	93,28289	1,6
RH_7716	nar RV	τ	50,13915	49,01392	60,55181	52,39499	0,9
	pad RV	τ	92,24111	88,88183	90,73139	90,48246	1,5

standardna napaka prileganja krivulje

mer. negoto.	1	2	3	pond. povp. u	
	[s]	[s]	[s]	[s]	[min]
u	0,82492	1,05871	0,92541	1,20512	0,1
u	1,19002	1,09893	1,13240	0,89401	0,1
u	0,77895	0,84709	0,98368	2,58719	0,1
u	1,25851	1,11116	1,15679	1,03557	0,1

Preglednica E.1: časovna konstanta in merilna negotovost merilnikov za RV zraka brez rad. ščita pri konstantni temperaturi zraka.

		<i>q</i> = konst					
RH_4358	nar RV	τ	275,81657	304,66647	301,21566	286,46923	4,8
	pad RV	τ	239,24848	229,88023	235,27792	234,23768	3,9
RH_7716	nar RV	τ	232,68071	300,77824	311,79290	254,48993	4,2
	pad RV	τ	192,89326	237,15913	231,33483	225,30897	3,8

u	0,37817	0,79063	0,57007	7,88515	0,2
u	0,57690	0,48654	0,55711	2,31865	0,1
u	0,37523	0,78829	0,84419	18,76279	0,4
u	0,64366	0,51451	0,42426	8,19105	0,2

Preglednica E.2: časovna konstanta in merilna negotovost merilnikov za RV zraka brez rad. ščita pri konstantni specifični vlažnosti zraka.

		%RV = konst					
RH_4358	nar RV	τ	300,49443	328,47367	373,12897	319,62805	5,3
	pad RV	τ	354,60058	317,85063	283,76077	299,64822	5,0
RH_7716	nar RV	τ	279,88484	300,09314	334,77034	314,69035	5,2
	pad RV	τ	348,73900	277,92901	211,28800	308,02715	5,1

u	0,42968	0,48637	0,89870	11,81761	0,2
u	0,60223	0,82065	0,29830	15,22962	0,3
u	0,93374	0,57752	0,48984	12,33886	0,3
u	0,48724	0,89440	0,85010	32,25122	0,6

Preglednica E.3: časovna konstanta in merilna negotovost merilnikov za RV zraka brez rad. ščita pri konstantni relativni vlažnosti zraka

Dodatek F

Izračun časovne konstante merilnikov *RV* zraka - z radiacijskim ščitom

		Origin					
<i>T</i> = konst		čas. konst.	1	2	3	pond. povp.	
			[s]	[s]	[s]	[s]	[min]
RH_4358	nar RV	τ	865,02477	875,68666	860,14391	866,59278	14,4
	pad RV	τ	1261,68399	949,75847	1264,03432	1168,03883	19,5
RH_7716	nar RV	τ	666,80597	555,24908	612,66791	610,79416	10,2
	pad RV	τ	610,00123	488,50120	633,68370	570,79746	9,5

standardna napaka prileganja krivulje

mer. negoto.	1	2	3	pond. povp.	
	[s]	[s]	[s]	[s]	[min]
u	3,58144	3,93918	3,72883	4,14136	0,1
u	2,88605	3,43581	3,63930	81,44991	1,4
u	3,27445	3,20587	3,22210	26,27443	0,5
u	4,15749	3,95242	4,57845	38,24826	0,7

Preglednica F.1: časovna konstanta in merilna negotovost merilnikov za *RV* zraka z rad. ščitom pri konstantni temperaturi zraka.

<i>q</i> = konst							
RH_4358	nar RV	τ	979,29868	1274,57723	1171,32902	1060,62681	17,7
	pad RV	τ	1206,47103	1078,53083	1102,74447	1114,57787	18,6
RH_7716	nar RV	τ	978,75416	1249,75916	1104,71734	1064,08539	17,7
	pad RV	τ	1113,96204	1011,81013	1104,49506	1064,20877	17,7

u	0,70912	1,53797	1,24620	64,98586	1,1
u	1,58934	1,08297	1,44802	27,80466	0,5
u	0,96871	1,65049	1,33573	58,15205	1,0
u	1,47701	1,06939	1,32310	29,48125	0,5

Preglednica F.2: časovna konstanta in merilna negotovost merilnikov za *RV* zraka z rad. ščitom pri konstantni specifični vlažnosti zraka.

Dodatek G

Izračun časovne konstante merilnikov temperature zraka brez/z rad. ščitom

		Origin	brez r.ščita				
		čas. konst.	1	2	3	pond. povp.	
<i>q</i> = konst			[s]	[s]	[s]	[s]	[min]
RH_4358	nar T	τ	267,52091	242,57961	244,70662	248,91734	4,1
	pad T	τ	262,50713	253,26695	266,30932	260,49238	4,3
RH_7716	nar T	τ	244,36269	247,90927	245,64673	245,89172	4,1
	pad T	τ	226,94902	256,97489	268,03508	247,76041	4,1

standardna napaka prileganja krivulje					
mer. negoto.	1	2	3	pond. povp.	
	[s]	[s]	[s]	[s]	[min]
u	0,57448	0,42837	0,43917	5,10221	0,1
u	0,30901	0,40059	0,49307	2,65979	0,1
u	0,36530	0,39417	0,40051	0,89048	0,1
u	0,41454	0,44260	0,52319	10,26253	0,2

Preglednica G.1: časovna konstanta in merilna negotovost merilnikov za temperaturo zraka brez rad. ščita pri konstantni specifični vlažnosti zraka.

%RV = konst		brez r.ščita					
RH_4358	nar T	τ	309,49619	270,35514	245,24689	260,10498	4,3
	pad T	τ	260,49902	263,43701	274,13353	268,77446	4,5
RH_7716	nar T	τ	299,53983	269,22395	201,05621	227,76969	3,8
	pad T	τ	244,82858	299,49479	284,96186	263,93649	4,4

u	0,35711	0,14640	0,13102	9,41948	0,2
u	0,28839	0,27019	0,17620	3,66582	0,1
u	0,17326	0,27441	0,09530	24,44326	0,5
u	0,33106	0,61317	0,51341	13,72595	0,3

Preglednica G.2: časovna konstanta in merilna negotovost merilnikov za temperaturo zraka brez rad. ščita pri konstantni RV zraka.

<i>q</i> = konst		rad. ščit					
RH_4358	nar T	τ	830,91197	840,51114	832,47993	834,61417	13,9
	pad T	τ	808,74178	774,07406	829,93320	799,73213	13,3
RH_7716	nar T	τ	803,61400	849,20957	825,46894	821,42327	13,7
	pad T	τ	795,78849	805,19683	777,18969	793,43307	13,2

u	0,75359	0,78125	0,82411	2,51896	0,1
u	0,38968	0,51251	0,88741	10,34108	0,2
u	0,65559	0,94489	0,62629	8,82152	0,2
u	0,65268	0,71676	0,75591	6,12184	0,2

Preglednica G.3: časovna konstanta in merilna negotovost merilnikov za temperaturo zraka z rad. ščitom pri konstantni specifični vlažnosti zraka.

Dodatek H

Primer izračuna časovne konstante s programom Origin ($q = \text{konst.}$, $RV_0 < RV_k$)

Nonlinear Curve Fit (RH_casovna_konst (User)) (17.11.2014 01:29:58)

Parameters

		Value	Standard Error
	RHzac	40	0
D	RHkon	61,99718	0,01481
	tau	301,21566	0,57007

Reduced Chi-sqr = 0,0270843090718

COD(R^2) = 0,99918356077575

Iterations Performed = 3

Total Iterations in Session = 3

Fit converged. Chi-Sqr tolerance value of 1E-9 was reached.

Some parameter values were fixed.

Statistics

	D
Number of Points	1001
Degrees of Freedom	999
Reduced Chi-Sqr	0,02708
Residual Sum of Squares	27,05722
Adj. R-Square	0,99918
Fit Status	Succeeded(100)

Fit Status Code :

100 : Fit converged. Chi-Sqr tolerance value of 1E-9 was reached

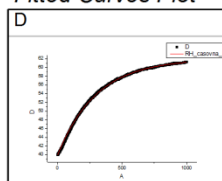
Summary

	RHzac		RHkon		tau		Statistics	
	Value	Standard Error	Value	Standard Error	Value	Standard Error	Reduced Chi-Sqr	Adj. R-Square
D	40	0	61,99718	0,01481	301,21566	0,57007	0,02708	0,99918

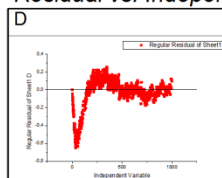
ANOVA

		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
D	Regression	2	3,12472E6	1,56236E6	5,7685E7	0
	Residual	999	27,05722	0,02708		
	Uncorrected Total	1001	3,12475E6			
	Corrected Total	1000	33140,52529			

Fitted Curves Plot

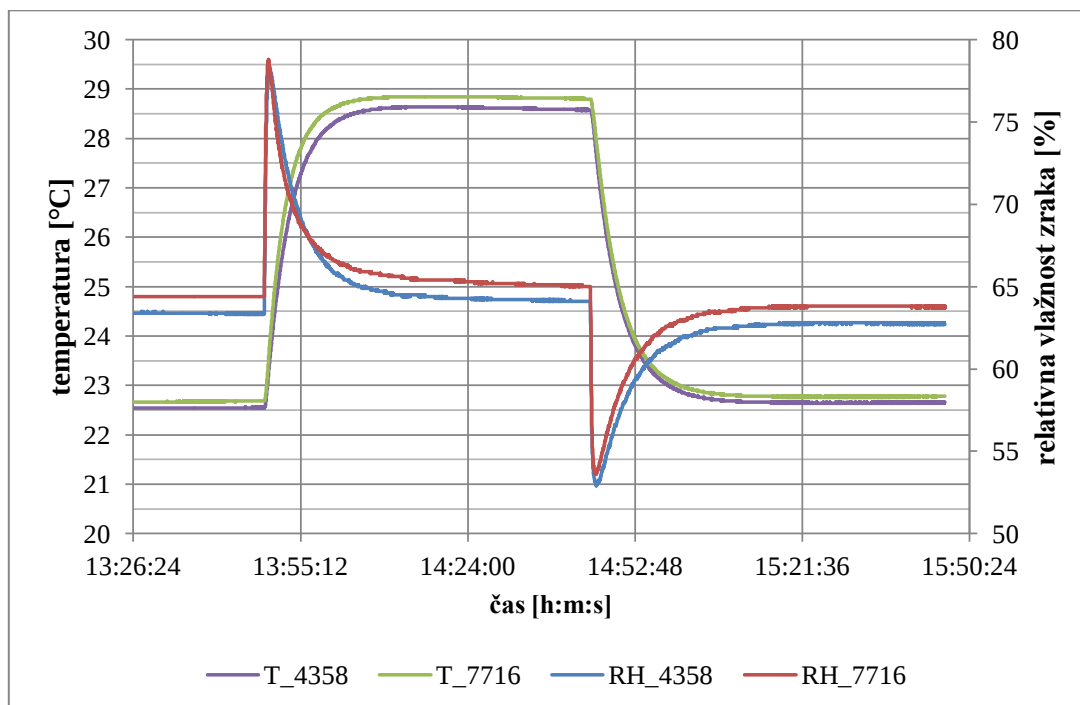


Residual vs. Independent Plot

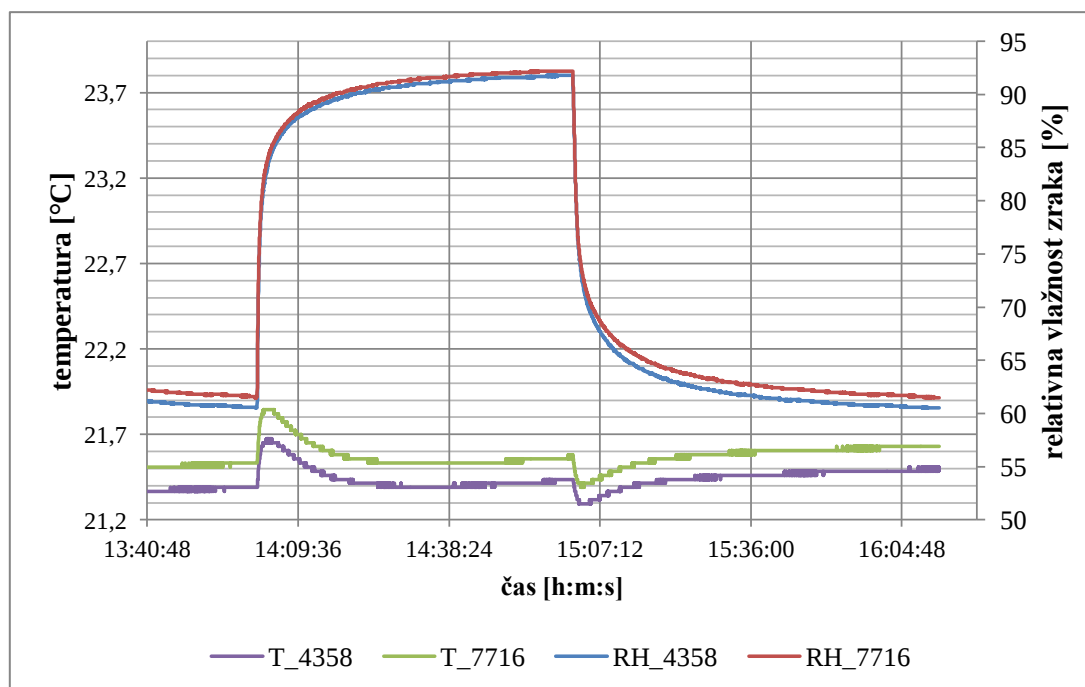


Dodatek I

Časovni odziv senzorjev ($RH = \text{konst.}$ ali $T = \text{konst.}$)



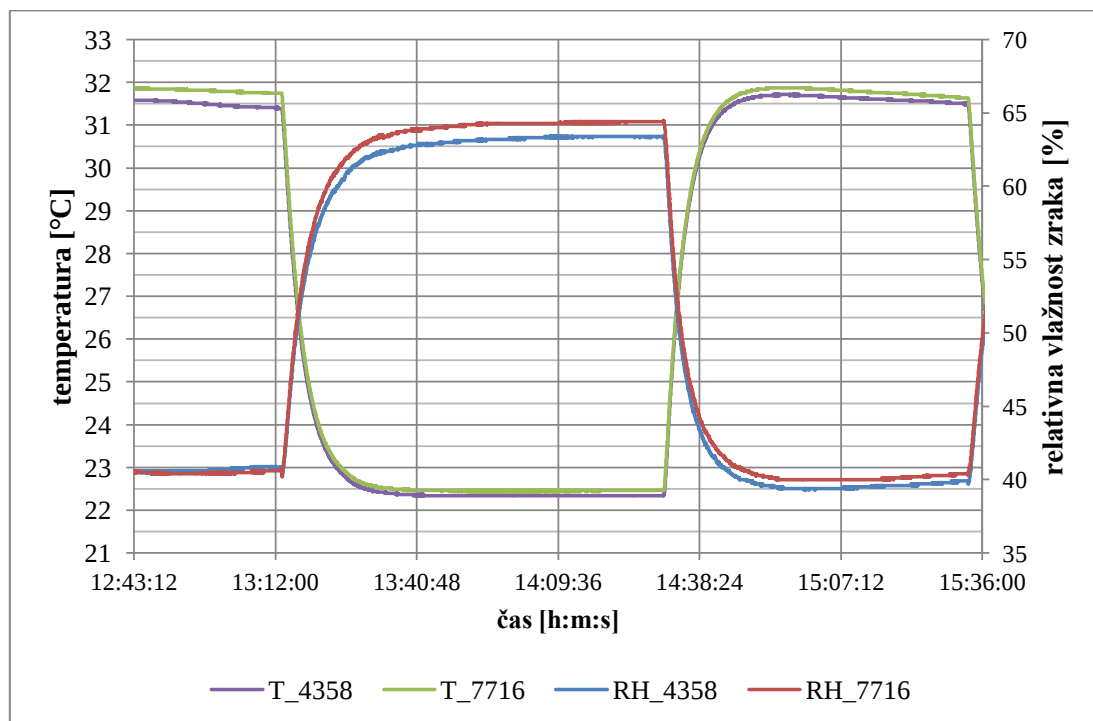
Slika 23: odziv senzorjev na spremembo temperature zraka pri konstantni relativni vlažnosti zraka.



Slika 24: odziv senzorjev na spremembo relativne vlažnosti zraka pri konstantni temperaturi zraka.

Dodatek J

Časovni odziv senzorjev ($q = \text{konst.}$)



Slika 25: odziv senzorjev na spremembo temperature in relativne vlažnosti zraka pri konstantni specifični vlažnosti zraka.