

Merilni sistem za merjenje lastnosti lamelnih toplotnih prenosnikov

Janez DOLINAR, Vinko BOGATAJ

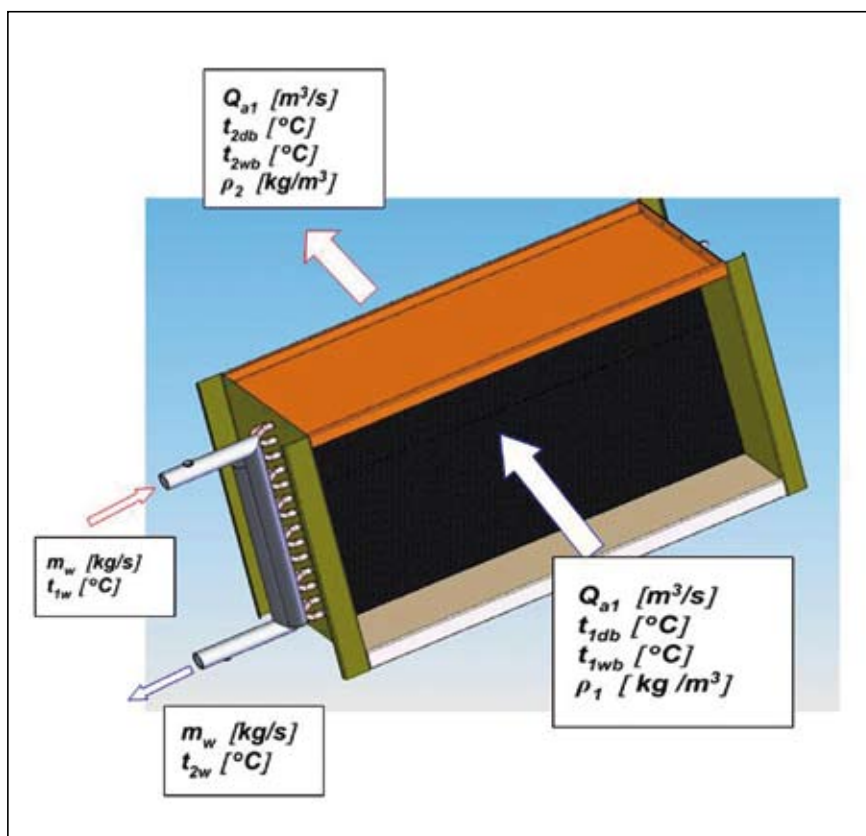
Izveček: Članek opisuje merilni sistem za merjenje lastnosti lamelnih toplotnih prenosnikov, ki je bil postavljen v družbi Hidria IMP klima, PE Ljubljana. Prikazana je struktura merilnega sistema z metodologijo merjenja in s ključnimi merilnimi napravami oz. sistemi. V članku je obdelana tudi metodologija obvladovanja sposobnosti merilnega sistema in analize merilne negotovosti pri merjenju posameznih veličin.

Ključne besede: merilni sistem za merjenje lamelnih toplotnih prenosnikov, obvladovanje merilnega sistema, merilna negotovost

1 Uvod

V okviru projekta »Spodbujanje razvoja inovacijskega okolja slovenske industrije KGH (HVAC)«, ki je bil sofinanciran iz strukturnih skladov EU (ukrep 1.1) in ga je vodila Fakulteta za strojništvo v Ljubljani [1], je bil v družbi Hidria IMP Klima, PE TP Ljubljana, financiran in postavljen Laboratorij za klimatske naprave, ki obsega med drugim tudi merilno progo za lamelne prenosnike toplote. Za merilno progo smo pripravili opis poteka meritev in usposabljanja za doseg zahtev standarda ASHRAE 33 ter izdelali model analize merilne sposobnosti merilnega sistema in verifikacije merilnih postopkov. V razvoj in izdelavo merilne proge je bilo vključenih več strokovnjakov s področja naprav HVAC. Skupno je

Janez Dolinar, univ. dipl. inž.,
mag. Vinko Bogataj, univ. dipl.
inž., oba Hidria IMP Klima,
d. o. o., Godovič



Slika 1. Prikaz merilne naloge pri grelnikih zraka (Pomen posameznih oznak je opisan v poglavju 8 »uporabljene kratice in oznake«)

bilo za izdelavo načrtov in postavitve merilne proge porabljenih 4173 inženirskih ur. Skupna vrednost investicije v merilno progo za merjenje lastnosti lamelnih toplotnih prenosnikov znaša 236.278 €, od tega je bilo 35 % oz. 82.697 € sofinanciranih iz strukturnih skladov EU.

■ 2 Prikaz merilne naloge

2.1. Merjenje grelnikov zraka

Z meritvami grelnikov zraka (slika 1) želimo ugotoviti, kakšna je toplotna moč v odvisnosti pretoka obeh medijev, vstopne in izstopne temperature na vodni strani ter vstopne temperature, pretoka in vlažnosti zraka na zračni strani. Da bi izmerili karakteristiko prenosnika, moramo te meritve opraviti v več točkah oz. pri več različnih temperaturnih režimih in vlažnostih zraka.

2.2 Merjenje hladilnikov zraka

Pri hladilnikih zraka (slika 2) je merilna naloga podobna, le da se zrak na prenosniku hladi. To posledično povzroči dve pomembni razliki, in sicer:

- drugačni temperaturni režimi na vodni in zračni strani,
- pojav kondenzacije zračne vlage, kar dodatno oteži merjenje

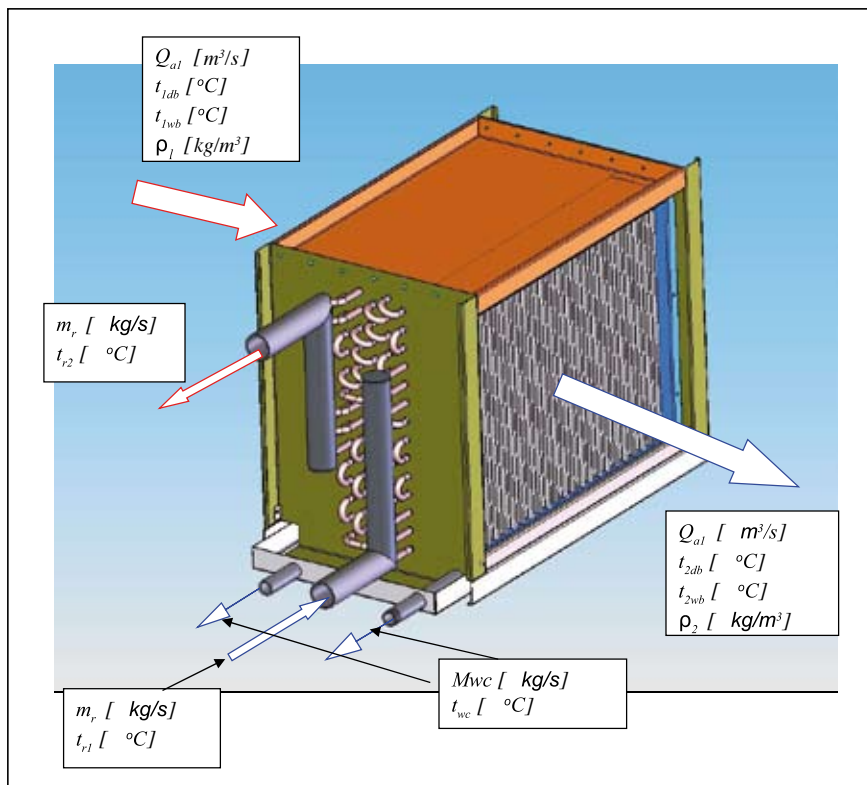
Zaradi pojava kondenzacije zračne vlage je postopek merjenja zahtevnejši. Bistveno večja je zahtevnost merjenja posameznih veličin.

Prikazana merjenja lahko z zadovoljivo natančnostjo izvedemo le na namenski laboratorijski merilni progi.

■ 3 Opis merilne proge in merilnega sistema

3.1 Splošno o merilni progi

Merilna proga je izdelana po zahtevah standardov ASHRAE, predvsem ASHRAE 33-2000, in standardov EN, zlasti EN 17025, EN 1216 in EN 306. Sestavljena je iz kanalskega dela, kjer je vgrajen merjeni prenosnik (leva stran z vstopno in izstopno mrežo tipal), na sredini tega dela je merjeni prenosnik



Slika 2. Prikaz merilne naloge pri hladilnikih zraka (Pomen posameznih oznak je opisan v poglavju 8 »uporabljene kratice in oznake«)

toplote s cevni priključki za medij, in iz merilne pretočne komore s šobami (na desni strani). Smer pretoka zraka je od leve proti desni – slika 3b. Na sliki 3a je smer zraka od desne proti levi (obratno kot na shemi 3b).

V merilno progo so vgrajena tipala za temperaturo, vlago (vlažnostna ali mokra temperaturna tipala), tlak (zračni, vodni, diferenčni) in pretok vode. V merilno pretočno komoro so vgrajena tlačna tipala pred šobami in za njimi. Tipala so preko konektorskih blokov in 96-pinskih kablov vezana na merilni sistem.

3.1.1 Pregled vgrajenih tipal

Tabela 1 prikazuje v merilno progo vgrajena tipala in instrumente. Podatkov o merilnem sistemu z računalnikom in programom za vodenje meritev LabView ni v tabeli. Oznake veličin v rubriki »Merilno mesto« so bile vzete po ASHRAE 33-2000.

Na sliki 4a so prikazani detajli kanalskega dela merilne proge. Na sliki 4b pa je prikazana merilna pretočna komora za merjenje pre-



Slika 3a. Pogled na osnovni del merilne proge, smer zraka od desne proti levi (obratno, kot na shemi 3b)

Tabela 1. Pregled vgrajenih tipal v merilno progo za lamelne prenosnike toplote

št.	Fizikalna veličina	Merilno mesto	Naziv tipala	Zahtevano MO	Območje	Natančnost	Zahtevana natančnost	Izhod	Napajanje
1	Relativni zračni tlak	$p_{Ni}(1), p_{a1}(1), p_{Ni}(1), p_{aNi}(1), p_{Ni}(1), p_{aNi}(1), p_{Ni}(1), p_{aNi}(1)$	zračni kanal	LPG 3040-030-13-11	0-15 mbar	0-15 mbar	$\pm 0,25\%$ območja	$\pm 1\%$	4-20 mA 12-55 VDC
2	Relativni zračni tlak	$p_{N2}(4), p_{N2}(4)$	zračni kanal	HD4V8T-10MBD3	0-8 mbar	-10-10 mbar	$\pm 0,5\%$ območja	$\pm 1\%$	0-10 VDC 16-40 VDC
3	Zračni tlačni padec	$\Delta p_{N1}(1), \Delta p_{N1}(1), \Delta p_{N2}(1), \Delta p_{N2}(1), \Delta p_{N3}(1), \Delta p_{N3}(1)$	zračni kanal	PD 3000-030-13-11	0-8 mbar	0-15 mbar	$\pm 0,25\%$ območja	$\pm 1\%$	4-20 mA 12-55 VDC
4	Temperatura suhega termometra zraka	$t_{3db}(4), t_{3wb}(4), t_{4db}(4), t_{4wb}(4), t_{N1db}(1), t_{N1wb}(1), t_{N2db}(1), t_{N2wb}(1), t_{N3db}(1), t_{N3wb}(1)$	zračni kanal	Pt100 1/3B ; L=300 mm, fi 6mm	-20 ÷ 60 °C	do 120 °C	$\pm 0,1$ K	$\pm 0,06$ K hlad. $\pm 0,3$ K grel..	Pt 100 1/3B Pt 100 1/3B
5	Temperatura suhega in (vlažnega) termometra zraka	$(t_{3db}, t_{3wb}(1), t_{4db}, t_{4wb}(1), T_{N1db}, T_{N1wb}(1), T_{N2db}, T_{N2wb}(1), T_{N3db}, T_{N3wb}(1))$	zračni kanal	FNA846	-20 ÷ 60 °C (10 ÷ 90 %RH)	-20 ÷ 125 °C (10 ÷ 100% RH t>0°C)	$\pm 0,1$ K $\pm 1\%$ RH	$\pm 0,06$ K hlad. $\pm 0,3$ K grel	2xNTC tip N 9 VDC (ventilator) + 2xNTC tip N
6	Vlaga pri temp. pod 0°C	$t_{3wb}(1), t_{4wb}(1), T_{N1wb}(1), T_{N2wb}(1)$	zračni kanal	MT8716K2R4 + kalibracija	(10 ÷ 90 %RH)	5 ÷ 98 % RH	$\pm 2\%$ RH	$\pm 0,06$ K	4-20mA 15-24VDC
7	Zračni tlačni padec	$\Delta p_a(4), \Delta p_{ca}(1)$	zračni kanal	HD4V8T-10MBG3	0 ÷ 7 mbar	0-10 mbar	$\pm 0,5\%$ območja	$\pm 1\%$	0-10VDC 16-40 VDC
8	Relativni zračni tlak	$p_{ca1}(1)$	zračni kanal	HD4V8T-20MBD3	0 ÷ 18 mbar	-20-20 mbar	$\pm 0,5\%$ območja	$\pm 1\%$	0-10VDC 16-40 VDC
9	Absolutni tlak okolice	$P_b(1)$	zrak okolica	LPA 3040-400-13-11	0,9 ÷ 1,1 bar	0-1,1bar	$\pm 0,25\%$	$\pm 2\%$ absolut. tlaka	4-20mA 12-55V DC
10	Temperatura suhega termometra okolice	$t_{5db}(2)$	zrak okolica	Pt100, FW1, L=300 mm, fi 3mm	10 ÷ 35°C	-30 do +400 °C	$\pm 0,13$ °C 1/2 DIN	$\pm 0,3$ K	Pt 100 Pt 100
11	Masni pretok kapljevine	$m_o(1), m_w, m_v$	voda, para, freoni	F100S129CCAMEZZZZ + ločena elektronika: 1500D3AABMEZZZ	0,04 ÷ 4,11 kg/s 0,04kg/s	Zahtevana natančnost v območju 0,06 ÷ 9,06 kg/s	$\pm 1,52\%$ pri min pretoku 0,04kg/s	$\pm 1\%$ (freoni $\pm 2\%$)	4-20 mA 19,2-28,2VDC
12	Temperatura tekočine	$t_{z1}(1), t_{z0}(1), t_{w1}, t_{w2}, t_{v1}, t_{v2}$	voda, para, freoni	Pt100 1/3B, L=200 mm, fi 4mm + 10m kabla	-10 ÷ 200 °C		$\pm 0,1$ K	$\pm 0,06$ K hlad. $\pm 0,3$ K grel..	Pt 100 1/3B Pt 100 1/3B
13	Tlačni padec tekočine	$\Delta p_{vc}(1), \Delta p_r(1), \Delta p_{vcf}, \Delta p_{vcf}, \Delta p_{vc}$	voda, para, freoni	PD 3000-400-13-11	0-1 bar	0-1,0 bar	$\pm 0,25\%$ območja	$\pm 1\%$	4-20mA 12-55 VDC
14	Tlačni padec tekočine	$\Delta p_{vt}(1), \Delta p_{rt}(1), \Delta p_{vt}(1)$	voda, para, freoni	PD 3000-400-13-11	0-5 bar	0-1,0 bar	$\pm 0,25\%$ območja	$\pm 1\%$	4-20mA 12-55 VDC

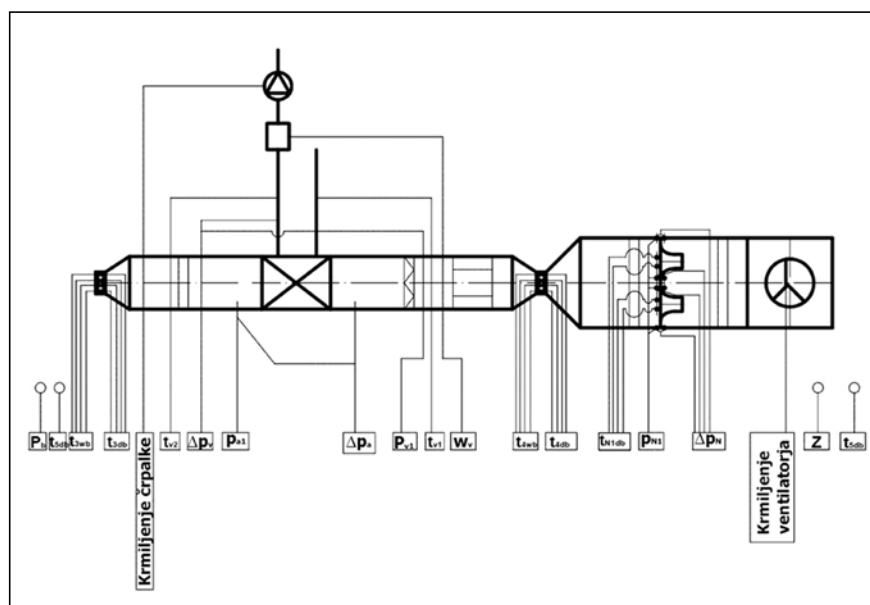
toka zraka z vgrajenimi šobami po ASHRAE 33-2000. Merilni sistem je sestavljen iz merilnih kanalnikov, ki vsebujejo funkcijo merjenja napetosti, tokov, upornosti ipd. in

funkcijo napajanja tipal (npr. pri temperaturnih tipalih napajanje in odčitavanje po 4-žilni uporovni metodi) ter računalnika, ki s pomočjo programa LabVIEW vodi meritve po

programirani proceduri. Območje pretokov zraka merilne proge je od 500 do 6000 m³/h, razpoložljiva moč pri grelnikih je do 70 kW in pri hladilnikih do 40 kW.

3.2 Sistem za pripravo zraka

Sistem za pripravo zraka je enak klasičnemu centralnemu HVAC-sistemu – klimatska naprava za gretje, hlajenje, vlaženje, filtriranje, sistem za pripravo tople in hladne vode. Dodane so bile še dodatne oz. posebne funkcije zaradi zahteve po veliki natančnosti in stabilnosti, kot so: fina regulacija temperature zraka in temperature vode na vstopu v merjeni prenosnik, zalogovnika tople in hladne vode ter zvezno regulirana kotel za toplo in agregat za hladno vodo. Sistem je koncipiran tako, da je možen hiter preklap med različnimi merilnimi programi, regulacija pa tako, da optimira najugodnejšo nastavitvev pri zahtevanih parametrih.



Slika 3b. Shema osnovnega dela merilne proge po ASHRAE 33-2000 z označenimi merilnimi veličinami



Slika 4a. Merilna proga LPT – detajli kanalskega dela: izstopna mreža tipal, merjeni PT in vstopna mreža tipal (smer zraka je iz desne proti levi)



Slika 4b. Merilna proga LPT: merilna pretočna komora za merjenje pretoka zraka z vgrajenimi šobami

3.3 Merilna procedura

Pred meritvijo je treba doseči stacionarno stanje toplotnih in drugih veličin. Odstopanje posamičnih odčitkov merilnih točk zračnih temperatur ne sme presegati $0,6\text{ °C}$ pri hladilniku in $1,1\text{ °C}$ pri grelniku, pri temperaturah mokrega termometra pa $0,3\text{ °C}$. Podobno velja na strani medija (vode). Pri hladilniku mora biti natančnost tipala boljša od $0,1\text{ °C}$, pri grelnikih pa boljša od $0,6\text{ °C}$, pretok medija pa ne sme variirati več kot 1% . Stacionarno stanje mora trajati najmanj pol ure, v tem času pa morajo biti opravljeni najmanj 4 zaporedni odčitki vseh merilnih točk, iz katerih se potem vzame povprečje. Meritev je veljavna, če se toplotna bilanca zračnega in vodnega dela prenosnika ne razlikuje za več kot 5% .

3.4 Meritve

Pri meritvah se odčitki (temperature, tlaki, pretoki) zapišejo v merilno datoteko vsaki 2 sekundi in program LabView sproti preračunava tudi vse izvedene veličine, kot so pretoki, hitrosti,

toplotne moči na strani medija (voda) in zračni strani, vključno z bilanco.

Pri prvih meritvah je bilo precej dela, da smo merilno progo usposobili do take mere, da smo dobili prve verodostojne rezultate. Pri sistemu za pripravo zraka in medija je bilo treba zagotoviti dovolj natančno vzdrževanje parametrov (temperatur, pretokov), da je dobil merjeni prenosnik parametre s predpisano natančnostjo in stabilnostjo.

Pri hladilni vodi smo tako z različnimi ukrepi (dodatna tipala, sprememba softvera regulatorja in nastavitvev območij) pri hladilnem agregatu uspeli vzpostaviti zadovoljivo zvezno regulacijo od 0 do 100% , tako da so nihanja temperature v zalogovniku v mejah $\pm 0,2\text{ K}$.

Pri ogrevni vodi so kljub zvezni regulaciji plamena plinskega kotla in primernejši prestavitvi tipala nihanja v zalogovniku še vedno bistveno večja ($\pm 2,5\text{ K}$), vendar smo problem rešili z regulacijskim ventilom, ki zagotavlja dovodno temperaturo v predpisanih mejah $\pm 0,3\text{ K}$ (slika 5).

Izvedli smo serijo meritev hladilnika in grelnika. Med posameznimi meritvami smo izvajali analize rezultatov. V nekaterih primerih smo dosegali v toplotni bilanci razlike, manjše od dopustnih ($< 5\%$), v nekaterih primerih pa je bilanca »ušla«.

Pri tem smo ugotavljali in odpravljali razna odstopanja v merilnih rezultatih in vzdrževanju stacionarnega stanja. Tako smo opazili, da toplotne bilance ni mogoče držati v dopustnih mejah pri vseh obratovalnih točkah. Ker smo domnevali, da bi bil lahko vzrok v merjenju vlage, smo opravili kalibriranje temperaturnih tipal za suho in mokro temperaturo. Po tem posegu se je obratovalno območje z zadovoljivo bilanco povečalo.

Nadalje smo se posvetili medsebojnemu odstopanju merilnih odčitkov zračnega tlaka po preseku merilne proge – relativni in diferenčni tlak čez merjeni prenosnik. S kalibrirnim Betzovim merilnikom smo ugotovili, da tlačni pretvorniki različno kažejo isti tlak. Prav tako smo v merilni pretočni komori preverjali tlačna tipala po dveh poteh: z Betzovim merilnikom tlak v vseh točkah in posredno s preciznim merilnikom s Pitotovo cevjo hitrost na šobah. Po izvedeni kalibraciji in primerjavi obeh hitrosti (izmerjene in preračunane iz tlakov) smo dosegli zadovoljiv rezultat: medsebojna odstopanja merilnih odčitkov zračnega tlaka po preseku merilne proge pri prenosniku in pri šobah so bila v dopustnih mejah (razlike $< 5\%$), prav tako je bilo s primerjavo hitrosti.

Preverjali smo tudi izgube oz. dobitke skozi zračni kanal in cev medija med merjenim prenosnikom toplote in ti-



Slika 5. Umirjanje temperature vode v merjenem prenosniku toplote po začetnem zanihanju (regulacijski ventil)

Tabela 2. Pregled meritev hladilnikov pri običajnih parametrih zraka na merilni progi LPT

Merjenec/ vrsta/ fi /RL/ vrst	qw STD	5tw1	5tw2	5Dpwt	qw	Hi- trost vode	Qa STD	va	t1db	t2db	Fi1	Fi2	qt	Top- lot. bilan- ca	Dpa
	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[kPa]	[kW]	[m/s]	[m ³ /h]	[m/s]	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[kW]	[%]	[kPa]
HV16IV20/4	1,52	6,77	11,94	10,36	9,14	0,73	2924	3,23	27,0	17,5	49,1	83,1	8,5	3,5	0,052
HV16IV20/4	1,42	6,95	11,66	8,50	7,78	0,68	2420	2,68	25,9	16,2	53,9	88,8	7,3	2,9	0,037
HV16IV20/4	2,20	6,37	10,94	21,00	11,68	1,05	2886	3,19	30,2	18,3	36,6	71,7	11,0	0,5	0,042
HV16IV20/4	2,20	6,82	10,80	19,76	10,17	1,05	2490	2,75	29,5	17,2	37,6	74,2	9,6	2,8	0,026
HV16IV20/4	2,21	6,60	11,49	21,18	12,56	1,06	3581	3,96	29,8	19,7	38,5	68,7	11,8	-1,4	0,066
HV16IV20/4	2,22	6,81	10,65	19,96	9,90	1,06	2295	2,54	29,8	16,7	35,7	73,8	9,3	3,4	0,023
HV16IV20/4	2,23	6,76	10,23	21,12	9,00	1,07	2892	3,20	25,0	16,2	48,9	79,5	7,9	-3,6	0,038

pali, ki se v merilnem programu pri izračunu moči sproti izračunavajo.

Ti ukrepi so bili uspešni, tako da smo lahko merili v dovolj širokem območju stanj zraka, kjer smo dosegali rezultate z bilanco obeh tokov v predpisanih mejah. Na tak način smo izvedli več serij meritev grelnikov in hladilnikov zraka.

V nadaljevanju je za ilustracijo pokazanih nekaj izbranih merilnih točk meritve hladilnika. Oznake veličin

so vzete po standardu ASHRAE 33-2000. Tako označevanje smo uporabili zaradi lažje izdelave programa LabView, saj ta standard predpisuje celotno proceduro preračuna rezultatov.

Vendar pa nam kljub vsem posegom ni uspelo doseči predpisane bilance < 5 % med toplotnima tokovima na vodni in zračni strani v vseh obratovalnih območjih. To so območja ekstremno visoke zračne vlage. Tu nam

je uspelo doseči razlike v bilancah okoli 15 % oz. malo čez.

V spodnji tabeli je za ilustracijo pokazanih nekaj izbranih merilnih točk meritve hladilnika z visoko vlago vstopnega zraka.

Pri sistemu za pripravo zraka se je pri meritvah pokazala še ena pomanjkljivost. Pri regulaciji klimatske naprave, ki je v običajnih aplikacijah zelo kvalitetna, je vgrajena tudi protizmr-

Tabela 3. Pregled meritev hladilnikov pri visoki vlagi zraka na merilni progi LPT

Merjenec/ vrsta/ fi /RL/ vrst	qw STD	5tw1	5tw2	5Dpwt	qw	Hi- trost vode	Qa STD	t1db	va	t2db	Fi1	Fi2	qt	Top- lot. bilan- ca	Dpa
	m ³ /h	[°C]	[°C]	[kPa]	[kW]	[m/s]	[m ³ /h]	[°C]	[m/s]	[°C]	[%]	[%]	[kW]	[%]	[kPa]
HV16IV20/4	2,58	7,64	13,95	17,38	18,91	1,23	2.426	31,40	2,68	21,60	68,35	97,32	17,49	-16,28	0,079
HV16IV20/4	2,58	7,45	13,77	17,60	18,99	1,24	2.955	30,46	3,27	21,43	66,80	96,06	17,43	-17,93	0,119
HV16IV20/4	2,57	7,60	13,88	17,87	18,79	1,23	3.727	30,52	4,12	21,87	62,41	93,81	17,43	-15,66	0,187
HV16IV20/4	2,60	7,47	13,82	17,29	19,19	1,24	2.180	32,00	2,41	21,40	68,53	97,20	17,87	-14,78	0,061
HV16IV20/4	2,05	7,35	10,72	11,67	8,05	0,98	2.206	19,41	2,44	13,67	88,66	98,44	7,32	-19,89	0,062
HV16IV20/4	2,06	7,41	12,93	10,47	13,24	0,98	2.273	25,30	2,51	18,11	82,39	98,19	12,23	-16,46	0,066
HV16IV20/4	2,58	7,54	13,33	16,74	17,39	1,23	1.969	33,86	2,18	20,74	57,14	96,83	16,21	-14,52	0,052
HV16IV20/4	2,59	7,55	14,21	16,57	20,07	1,24	2.730	34,49	3,02	22,83	55,98	94,33	18,65	-15,19	0,101
HV16IV20/4	2,59	7,63	15,29	16,66	23,05	1,24	3.617	34,82	4,00	25,02	60,06	94,04	21,47	-14,75	0,186

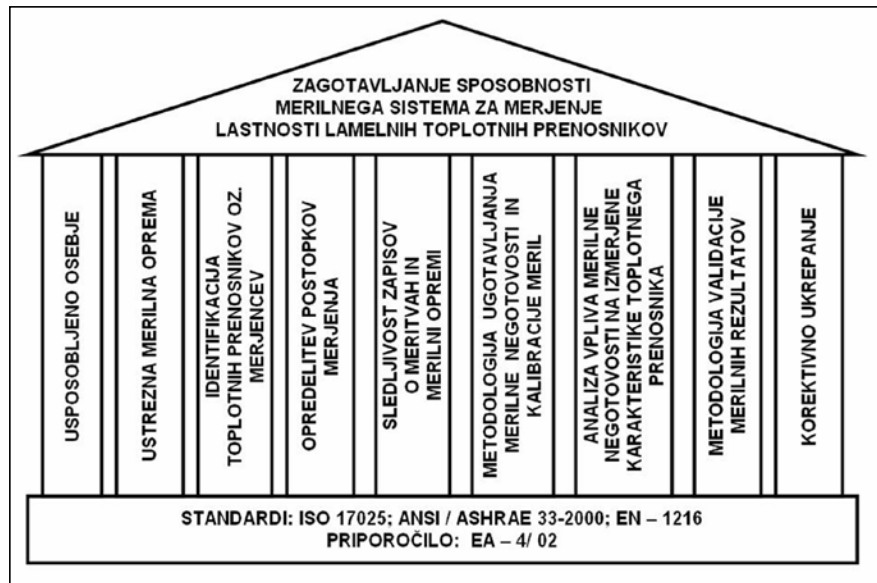
zovalna zaščita grelnika. Ta pa je pri nižjih vstopnih temperaturah lahko tudi ovira, saj zaradi zanesljive varnosti reagira nekoliko prehitro, tako da je pri temperaturah zraka blizu 5 °C težko doseči stacionarno stanje.

Prav tako je pri visokih vlagah težje zagotoviti stacionarno stanje zaradi vlažilnika, ki je za običajne aplikacije tudi zelo kvaliteten, saj je naloga regulacije držati zahtevano vlago v prostoru, pri meritvah pa gre za zahtevane parametre vpiha laboratorijskih toleranc, kar je mnogo težje. To smo pri načrtovanju merilne proge deloma že tudi predvidevali, tako da je bilo taka stanja mogoče obvladati s precizno ročno nastavitvijo.

Tako nam je z vsemi ukrepi le uspelo vzpostaviti uporabno industrijsko laboratorijsko merilno progo za lamelne toplotne prenosnike, ki daje dovolj realne rezultate ob upoštevanju procedure in vseh pridobljenih izkušenj. Za bolj »udobne« meritve pa bo treba še marsikaj postoriti, to pa je itak stalnica dobrega razvoja.

■ 4 Model zagotavljanja sposobnosti merilnega sistema za merjenje toplotnih prenosnikov

Za merjenje lastnosti lamelnih toplotnih prenosnikov smo oblikovali sistem zagotavljanja kakovosti in ugotavljanja sposobnosti merilnega sistema. Sistem je dokumentiran v poslovniku kakovosti laboratorija za klimatske naprave in toplotne prenosnike in je osredotočen na izpolnjevanje zahtev standardov ISO 9001, ISO 17025 in Priporočila EA – 4/02, izpolnjuje pa tudi zahteve relevantnih tehničnih standardov. Model (slika 6) zagotavljanja sposobnosti merilnega sistema za merjenje lamelnih toplotnih prenosnikov temelji na: usposobljenem osebju, sposobni merilni opremi, sistemu identifikacije toplotnih prenosnikov oz. merjencev, sistemu identifikacije primernih postopkov merjenja, sledljivosti zapisov o meritvah in merilni opremi, metodologiji ugotavljanja merilne negotovosti in kalibracije meril, analizi vpliva merilne negotovosti na izmerjene karakteristike toplotnega prenosnika,



Slika 6. Struktura sistema zagotavljanja sposobnosti merilnega sistema za merjenje lastnosti lamelnih toplotnih prenosnikov

metodologiji validacije merilnih rezultatov in na sistemu korektivnega ukrepanja.

■ 5 Ocena merilne negotovosti merilnega sistema za merjenje lamelnih toplotnih prenosnikov

Negotovost meritve je parameter, ki je povezan z merilnim rezultatom in označuje raztros vrednosti, ki jih je mogoče upravičeno pripisati merjeni veličini. Merilno negotovost povzročajo naključni pogoški in nepopolna korekcija rezultata zaradi sistematičnih pogoškov (slika 7).

Merilna negotovost je lastnost merilnega rezultata in veličina, ki predstavlja kakovost meritev, saj označuje razpršenost vrednosti, ki jih je mogoče z določeno verjetnostjo pripisati merjeni veličini. Vsaka negotovost je povezana s standardnim odklonom, zato jo imenujemo tudi standardna negotovost. Kakovost merilnega rezultata se po [2] praviloma podaja s standardno negotovostjo u , če pa želimo imeti večjo ver-

jetnost, to je večje zaupanje v to, da prava vrednost leži v območju, ki ga podaja negotovost, uporabimo razširjeno negotovost U .

Na podlagi dokumenta Evropske akreditacije EA-4/02 [2] ločimo 2 tipa merilnih negotovosti:

- *negotovosti tipa A*, ki so določene s pomočjo statistične obdelave merilnih rezultatov,
- *negotovosti tipa B*, ki so določene s pomočjo drugih (nestatističnih metod).

Razlika med obema tipoma je določena na osnovi praktičnih postopkov ugotavljanja in izračuna negotovosti.



Slika 7. Prikaz merilnih pogoškov [11]

5.1 Ugotavljanje merilne negotovosti

5.1.1. Ugotavljanje merilne negotovosti tipa A

Vrednotenje merilne negotovosti tipa A lahko uporabimo, če smo ob enakih merilnih pogojih opravili več neodvisnih opazovanj – meritev vhodne veličine. Če je zaznavnost merilnega procesa zadovoljiva, bomo opazili raztros merjene veličine.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (5.1)$$

Standardna negotovost $u(\bar{q})$ približka vhodne veličine je eksperimentalna standardna deviacija povprečja približka vhodne veličine \bar{q}

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (5.2)$$

Če so meritve zanesljive in pod statistično kontrolo, lahko uporabimo kombinirano oceno variance S_p^2 , ki v tem primeru predstavlja boljše oceno raztrosa kot standardni odklon, dobljen iz manjšega števila meritev. V tem primeru je varianca aritmetične srednje vrednosti enaka

$$s^2(\bar{q}) = \frac{S_p^2}{n} \quad (5.3)$$

5.1.2 Ugotavljanje merilne negotovosti tipa B

Tip B ugotavljanja standardne merilne negotovosti je ugotavljanje negotovosti, povezane s približkom vhodne veličine x_i , merilne veličine X_i , drugače kot s statistično analizo serij opazovanj. Standardno negotovost $u(x_i)$ ugotavljamo na osnovi znanstvene ocene vseh razpoložljivih informacij o variabilnosti X_i . Vrednosti, ki spadajo v to kategorijo, so:

- podatki o prejšnjih meritvah,
- izkušnje in splošno znanje o obnašanju in lastnostih relevantnih materialov in instrumentov,
- specifikacije proizvajalcev,
- podatki, pridobljeni pri kalibraciji in ostali certifikati,
- negotovosti, dodane referenčnim podatkom, vzetih iz literature (priročnikov).

Dobro utemeljeno ugotavljanje standardne merilne negotovosti tipa B je lahko bolj zanesljivo od ugotavljanja negotovosti tipa A, še posebej če ugotavljanje merilne negotovosti tipa A temelji na majhnem številu neodvisnih statističnih opazovanj. Razlikovati je potrebno naslednje primere:

a) Ko je za vhodno veličino X_i poznana samo posamezna vrednost (posamezna izmerjena vrednost, rezultat predhodnih meritev, referenčna vrednost iz literature ali vrednost korekcije), bomo to vrednost uporabili za x_i . Standardna negotovost $u(x_i)$, povezana z x_i , naj bo prevzeta, če je podana. Drugače jo je potrebno izračunati iz nedvoumnih podatkov o negotovosti. Če tovrstni podatki niso razpoložljivi, je potrebno negotovost določiti na osnovi izkušenj.

b) Ko verjetnostno porazdelitev veličine X_i predpostavimo na osnovi teorije ali izkušenj, bomo pričakovane vrednosti upoštevali kot približek x_i oz. kot standardno negotovost $u(x_i)$.

c) Če za vrednost veličine X_i lahko ocenimo samo zgornjo in spodnjo mejo a_+ in a_- (specifikacije proizvajalcev merilnih instrumentov, temperaturna območja, zaokroževanja pri avtomatski redukciji podatkov, distribucije s konstantno gostoto med mejami), je potrebno predpostaviti možne variabilnosti vhodne veličine X_i . Glede na točko (b) dobimo

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \quad (5.4)$$

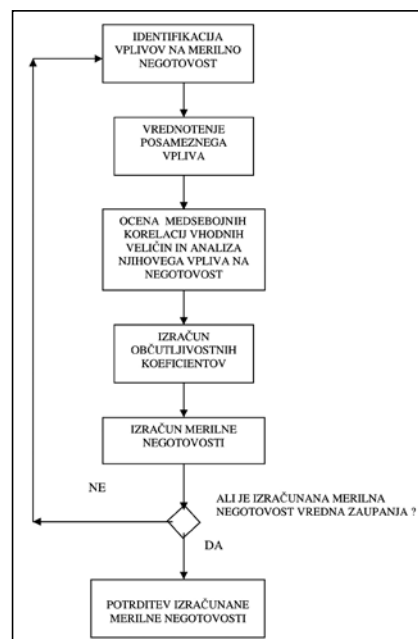
za ocenjeno vrednost in

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12}(a_+ - a_-)^2 \quad (5.5)$$

za standardno negotovost. Če razliko med mejami označimo z $2a$, dobimo enačbo

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3}a^2 \quad (5.6)$$

Pravokotna porazdelitev je logičen verjetnostni opis nezadostnega znanja o vhodni veličini X_i in odsotnosti informacij o variabilnosti, razen mej variabilnosti. Če je znano, da veličina pogosteje zavzame vrednosti blizu centra kot blizu mej, je bolj primerena trikotna porazdelitev. V primerih, ko je poznano, da veličina pogosteje zavzame vrednosti blizu mej, je bolj primerena porazdelitev U-.



Slika 8. Postopek ugotavljanja merilne negotovosti

5.2 Izvedba analize merilne negotovosti posameznih veličin

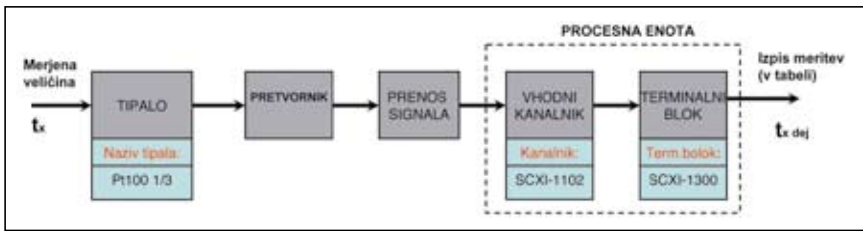
Pri izvedbi analize merilne negotovosti posameznih merjenih veličin smo postopali po enotni metodologiji (slika 8). Analizo merilne negotovosti smo izvedli za vse relevantne merilne sisteme.

5.3 Primer izračun merilne negotovosti pri meritvi temperature suhega termometra na zračni strani

Kalibracijo merilnega seta za merjenje temperature suhega termometra na zračni strani (slika 9) izvajamo pred začetkom meritev v 3 (treh) merilnih točkah znotraj pričakovanega območja merjenja. V vsaki točki opravimo 5 meritev. Primerjamo razliko povprečnih vrednosti izmerjenih temperatur glede na referenčni termometer. Standardni odklon izmerjenih vrednosti upoštevamo pri izračunu merilne negotovosti, pri tem upoštevamo tisto skupino meritev, pri katerih je raztros največji.

Dejansko temperaturo zraka lahko, na osnovi identificiranih virov merilne negotovosti napišemo v obliki enačbe :

$$t_x = t_m + (t_s - t_m) + \delta t_s + \delta t_{DS} + \delta t_{ix} + \delta t_R + \delta t_A + \delta t_H + \delta t_V$$



Slika 9- Merilna veriga pri merjenju temperature suhega termometra na zračni strani

Kjer je:

t_x – dejanska temperatura

t_m – temperatura merilnega termometra

t_s – temperatura referenčnega termometra

δt_s – temperaturna korekcija zaradi merilne negotovosti referenčnega termometra

δt_{DS} – temperaturna korekcija zaradi »drifta« referenčnega termometra

δt_{DX} – temperaturna korekcija zaradi »drifta« merilnega termometra

δt_{ix} – temperaturna korekcija zaradi omejene natančnosti merilno - kalibracijskega seta

δt_R – temperaturna korekcija zaradi radialne nelinearnosti temperaturnega profila

δt_A – temperaturna korekcija zaradi aksialne nelinearnosti temperaturnega profila

δt_H – temperaturna korekcija zaradi histereznega učinka

δt_v – temperaturna korekcija zaradi temperaturne nestabilnosti merilno - kalibracijskega seta

Pri meritvi temperature suhega termometra na zračni strani nismo identificirali korelacij vhodnih veličin. Kalibracijo smo izvedli pri treh temperaturnih režimih, in sicer pri 18, 25 in 32 °C. Največji raztros smo dobili pri temperaturnem režimu 25 °C. Dobili smo naslednje vrednosti:

Tabela 4. Tabela izmerjenih vrednosti pri meritvi raztrosa temperatur suhega termometra

št	t_s [°C]	t_m [°C]	$t_s - t_m$ [°C]
1	25,11	25,1	0,01
2	25,05	25,0	0,05
3	25,01	25,0	0,01
4	24,97	25,0	-0,03
5	24,93	24,9	0,03

Aritmetična sredina: $\bar{\delta t} = 0,0140$ [°C]

Standardni odklon: $s(\delta t) =$

$$0,0296 \text{ [°C]} ; u = \frac{s}{\sqrt{5}} = \frac{0,0296}{\sqrt{5}} = 0,0132 \text{ [°C]}$$

Na osnovi dosedaj narejenih analiz in izkušenj smo prišli do naslednjih odstopanj :

δt_s - iz kalibracijskega certifikata izhaja vrednost razširjene merilne negotovosti $U = 0,03$ [°C]; $\delta t_{DS} = 0,01$ [°C]; $\delta t_{ix} = 0,01$ [°C]; $\delta t_R = 0,03$ [°C]; $\delta t_A = 0,02$ [°C]; $\delta t_H = 0,01$ [°C]; $\delta t_v = 0,01$ [°C]. Viri merilne negotovosti so podani v tabeli 5:

Tabela 5. Viri merilne negotovosti pri meritvi temperatur suhega termometra

Veličina X_i	Ocenjena vrednost x_i [°C]	Standardna merilna negotovost $u(x_i)$ [°C]	Porazdelitev	Koeficient občutljivosti c_i	Prispevek k negotovosti $u_i(y)$ [°C]
δt_s	0,0150	0,015	normalna	1,0	0,015
δt_{DS}	0,01	0,0057	pravokotna	1,0	0,0057
δt_{ix}	0,01	0,0057	pravokotna	1,0	0,0057
δt_R	0,03	0,0173	pravokotna	1,0	0,0173
δt_A	0,02	0,0115	pravokotna	1,0	0,0115
δt_H	0,01	0,0057	pravokotna	1,0	0,0057
δt_v	0,01	0,0057	pravokotna	1,0	0,0057
$s(\delta t)$	0,0132	0,0132	normalna	1,0	0,0132
t_x	°C				0,0309

Aritmetično sredino in standardni odklon merjenih veličin smo izračunali na 4 decimalke natančno, čeprav je odčitek instrumentov v stotinkah. Na ta način smo se izognili vplivu računskih netočnosti.

Standardno merilno negotovost pri merjenju temperatur suhega termometra smo izračunali tako, da smo posamezne prispevke sešteli po enačbi:

$$u(y) = \left(\sum_{i=1}^N u_i^2(y) \right)^{1/2} \quad (5.7)$$

Standardno merilno negotovost pri merjenju temperatur suhega termo-

metra bomo zaokrožili na tri decimalke in znaša **0,031 [°C]** oz. **0,031 [K]**. Zgoraj prikazano metodologijo izračuna merilne negotovosti smo naredili za vse merjene veličine. V tabeli 6 so prikazane dobljene vrednosti merilnih negotovosti za posamezne veličine.

6 Vpliv natančnosti izmerjenih veličin na odstopanja lastnosti lamelnih toplotnih prenosnikov

Merilna negotovost izmerjene veličine se v karakteristiki toplotnega prenosnika ne odraža vedno v linearnem deležu glede na izmerjeno vrednost, saj povezava med izmerjeno vrednostjo in karakteristiko ni linearna, ampak je odvisna od funkcijske relacije. To funkcijsko relacijo imenujemo tudi modelna funkcija. Merilne negotovosti izhodnih veličin $u(y)$, npr. izmerjenih temperatur, vstopajo v enačbo

za izračun določene karakteristike toplotnega prenosnika, npr. toplotne moči, kot merilne negotovosti vhodnih veličin. Merilna negotovost izmerjene karakteristike, npr. toplotne moči $u_{q'}$ bo podana z enačbo

$$u_{q'} = c_i u(y) \quad (6.1)$$

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (6.2)$$

kjer je c_i koeficient občutljivosti izhodne veličine y_i . Matematično je to parcialni odvod modelne funkcije f po izhodni veličini Y_i v točkah izhodnih približkov y

Tabela 6. Tabela merilnih negotovosti merilne proge za merjenje lastnosti lamelnih toplotnih prenosnikov

Merjena veličina	Zahteve standarda ASHRAE 33/ EN 1216		Ugotovljena standardna merilna negotovost merilne proge
	Zahtevana merilna točnost	Dopustna standardna merilna negotovost	
Meritve temperatur na zračni strani (grelniki)	±0,3 K (ASHRAE 33)	±0,3 K/√3 = 0,173 K	0,031 K
Meritve temperatur na zračni strani (Hladilniki)	±0,06 K (ASHRAE 33)	±0,06 K/√3 = 0,035 K	0,031 K
Meritve temperatur vlažnega termometra na zračni strani (Grelniki)	±0,3 K (ASHRAE 33)	±0,3 K/√3 = 0,173 K	0,041 K
Meritve temperatur vlažnega termometra na zračni strani (Hladilniki)	±0,06 K (ASHRAE 33)	±0,06 K/√3 = 0,035 K	0,041 K
Meritev temperatur kapljev	±0,3 K (ASHRAE 33)	±0,3 K/√3 = 0,173 K	0,027 K
Meritev relativnih tlakov na zračni strani	±5 Pa. (ASHRAE 33)	± 5 Pa /√3 = 2,88 Pa	1,493 [Pa]
Meritev pretokov na zračni strani	±2 % nominalnega pretoka (EN 1216)	± 2% /√3 = 1,154 % nominalnega pretoka	0,574 % nominalnega pretoka
Meritev pretokov na vodni strani	±1 % nominalnega pretoka (EN 1216)	± 1 % /√3 = 0,577% nominalnega pretoka.	0,096% nominalnega pretoka

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{Y_1=y_1 \dots Y_N=y_N} \quad (6.3)$$

Navedeni koeficient občutljivosti moramo pri vsaki veličini karakteristike izračunati za vse merjene veličine, ki jih vsebuje modelna funkcija.

■ 7 Zaključek

Prikazana industrijska laboratorijska merilna proga za merjenje lamelnih prenosnikov toplote je ob upoštevanju merilne procedure in vseh pridobljenih izkušenj primerna za ugotavljanje lastnosti toplotnih prenosnikov in izboljšavo njihovih tehničnih lastnosti na osnovi rezultatov izvedenih meritev.

S prikazanim modelom analize sposobnosti merilne proge za merjenje lamelnih toplotnih prenosnikov smo merilno negotovost merilnega sistema analizirali kot merilno negotovost tipa A, kadar je bilo možno prispevek k merilni negotovosti ugotoviti s statistično obdelavo meritev. Če pa prispevka k merilni negotovosti ni bilo možno dobiti iz statistične obdelave meritev, smo ga

obravnavali kot merilno negotovost tipa B [2].

Ugotovili smo, da merilna sposobnost pri vseh veličinah ustreza zahtevam standarda ASHRAE 33-2000 in EN1216, le pri meritvi temperatur vlažnega termometra na zračni strani hladilnika je standardna merilna negotovost merilne proge malenkost višja, kot jo zahtevata navedena standarda (namesto zahtevanih 0,035 K znaša standardna merilna negotovost 0,041 K).

Pri merilni progi bo treba odpraviti še nekatere pomanjkljivosti, predvsem pri korekciji regulacije za lažje in hitrejše doseganje stacionarnega stanja nasploh, še posebej pa v območju vstopnih temperatur pod 8 °C, in izboljšati doseganje toplotne bilance pri visokih vlažnostih vstopnega zraka (nad 15 g/kg).

Stranski »produkt« pri usposabljanju merilne proge za doseganje zahtev standarda ASHRAE 33 je agregat hladilne vode z zvezno regulacijo hladilne moči od 0–100 % z doseganjem stabilnega stanja temperature v zalogovniku v mejah ±0,2 K pri napajanju

porabnika (merjeni prenosnik toplote) po celem območju moči.

Viri

- [1] POREDOŠ, Alojz, DOLINAR, Janez., Razvoj inovacijskega okolja slovenske industrije KGH: projekt. Podprojekt/aktivnost 3, Razvoj elementov energetske varčnosti in okolju prijaznih KGH-sistemov: zaključno poročilo RR_Z11/08. Ljubljana: IMP Klimat, d. d., 2008, 98 f.
- [2] EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. European co-operation for Accreditation.
- [3] BOGATAJ, Vinko, DOLINAR, Janez. Zagotavljanje merilne sposobnosti pri merjenju lastnosti lamelnih toplotnih prenosnikov = Providing measuring capability in measuring the characteristics of fin heat exchangers. V: TUŠEK, Jaka (ur.), REMEC, Janko (ur.). *Klimatske spremembe – izzivi hlajenju: zbornik prispevkov*. Ljubljana: SDHK, 2008, str. 91–102.
- [4] DOLINAR, Janez, BOGATAJ, Vinko. Merilna negotovost pri meritvi lamelnih toplotnih prenosnikov. V: *Slovene Klima forum, Godovič, Slovenija, 28. september 2006*.
- [5] ANSI/ASHRAE Standard 33 – 2000. Method of Testing Forced Circulation Air Cooling and Air Heating Coils, Atlanta 2000.
- [6] ASHRAE Standard 41.1 – 1986. Standard Measurements Guide – Section on temperature measurements, Atlanta 1991.
- [7] ASHRAE Standard 41.2 – 1987. Standard Methods for Laboratory Airflow Measurement, Atlanta 1991.
- [8] ASHRAE Standard 41.3 – 1989. Standard Method for Pressure Measurement, Atlanta 1991.
- [9] EN 1216, 1998. Heat Exchangers – Forced Circulation Air-Cooling and Air-Heating Coils – Test Procedures for Establishing the Performance.
- [10] SIST EN ISO / IEC 17025: 2005. Splošne zahteve za usposobljenost preizkuševalnih in kalibracijskih laboratorijev.

[11] DRNOVŠEK, Janko, BOJKOVSKI, Jovan, GERŠAK, Gregor, PUŠNIK, Igor. Metrologija Študijska skripta, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2005.

[12] Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja, Urad za standardizacijo in meroslovje, Ljubljana 1999.



Measuring System for Measuring the Characteristics of Fin Heat Exchangers

Abstract: The following article describes a measuring system for measuring the characteristics of fin heat exchangers, that was introduced in the company IMP Klima BU Ljubljana. It presents a measuring system structure by the use of a measuring methodology and key measuring devices or systems. The article also discusses a methodology of a control capability of a measuring system and analysis of measuring uncertainty in measuring of individual sizes.

Keywords: measuring system for measuring fin heat exchangers, control of measuring system, measuring uncertainty

Uporabljene kratice in oznake

Oznake merjenih veličin

Q_{a1} – volumski pretok zraka preko toplotnega prenosnika
 t_{1db} – temperatura suhega termometra zraka pred prenosnikom
 t_{2db} – temperatura suhega termometra zraka za prenosnikom
 t_{1wb} – temperatura mokrega termometra zraka pred prenosnikom
 t_{2wb} – temperatura mokrega termometra zraka za prenosnikom
 ρ_1 – gostota zraka pred prenosnikom
 ρ_2 – gostota zraka za prenosnikom
 m_w – pretok medija na vodni strani grelnika
 m_r – pretok medija na vodni strani hladilnika

t_{1w} – temperatura medija na vodni strani pred vstopom v grelnik
 t_{2w} – temperatura medija na vodni strani ob izstopu iz grelnika
 t_{r1} – temperatura medija na vodni strani pred vstopom v hladilnik
 t_{r2} – temperatura medija na vodni strani ob izstopu iz hladilnika
 M_{wc} – pretok (izločanje) kondenza
 t_{wc} – temperatura kondenza
 Δp_w – padec tlaka na vodni strani prenosnika
 Δp_N – padec tlaka na zračni strani
 Δp_a – padec tlaka na zračni strani prenosnika
 P_N – relativni zračni tlak
 t_{db} – temperatura suhega termometra
 twb – temperatura vlažnega termometra

Ostale oznake

Y – ocena (približek) izhodne merjene veličine
 X – ocena (približek) vhodne veličine
 P, Q – opazovani veličini
 q – aritmetično povprečje individualnih opazovanj veličine q_i
 s^2 – varianca
 u – standardana merilna negotovost
 k – faktor pokritja
 U – razširjena merilna negotovost
 w – relativna merilna negotovost
 $u(x_i)$ – merilna negotovost vhodne veličine
 $u(y_i)$ – merilna negotovost izhodne veličine
 c_i – koeficient občutljivosti

