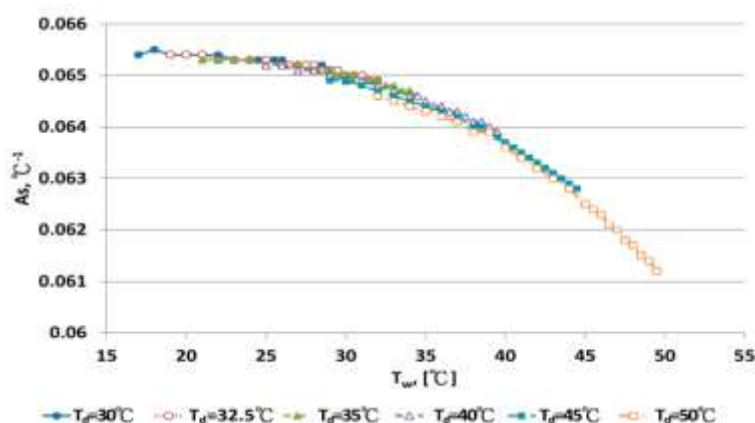
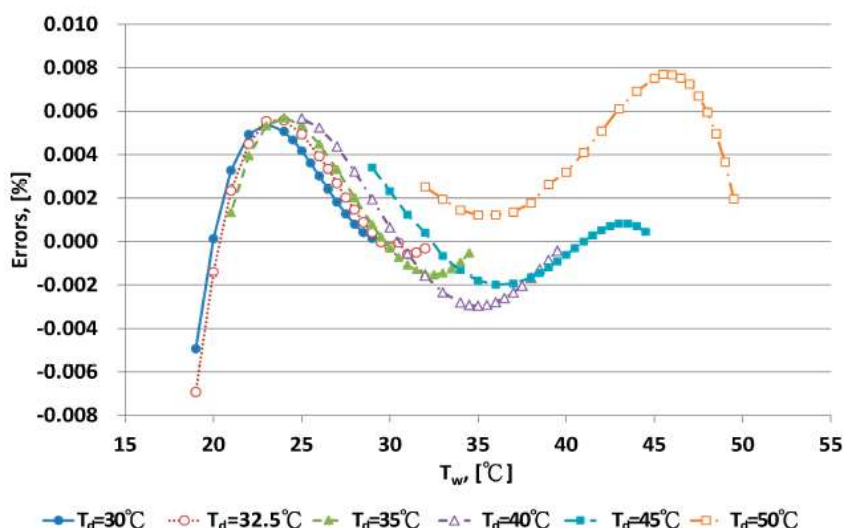


	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

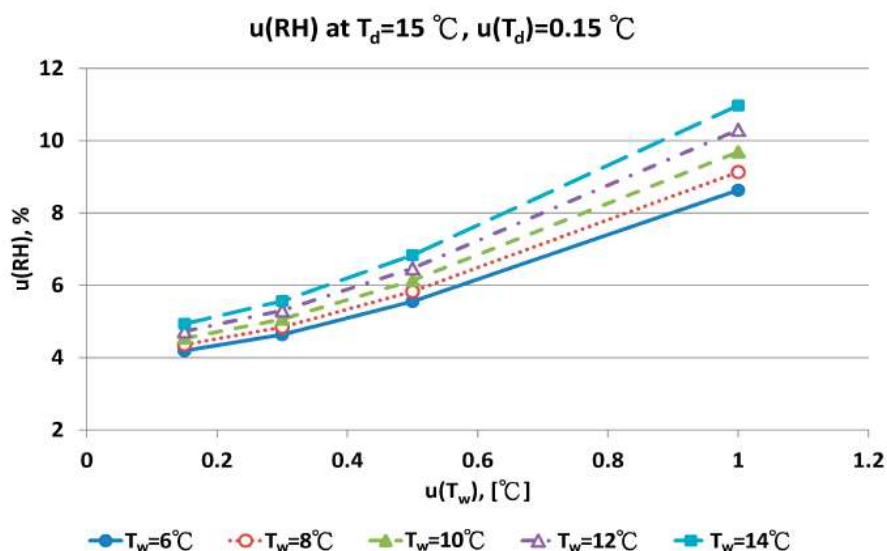
+0,03) % RH, pro vyšší teploty je zpracován graf podle obr. 10. Největší vliv na měření psychrometru má nejistota měření obou teploměrů. L [9] se zabývá také závislostí mezi nejistotou měření suchého i mokrého teploměru a jejich vlivem na nejistotu měření RH jak pro nízké, tak pro vyšší teploty. Pro příklad uvádím dva grafy podle L [9] na obr. 11 a obr. 12. Z výsledků je zřejmé, že výrazně horší nejistotou měření je zatíženo psychmetrické měření RH při nízkých teplotách. Nejistotu měření RH lze významně ovlivnit co nejlepší nejistotou kalibrace obou teploměrů psychrometru. Ve výpočtu nejistot dle L [9] jsou započteny pouze nejistoty měřených veličin a psychmetrická konstanta je uvažována konstantní. Reálný výpočet nejistot musí pracovat i s dalšími zdroji, jako je drift měřidla, homogenita a stabilita prostředí, dynamické vlastnosti měřidel atd.



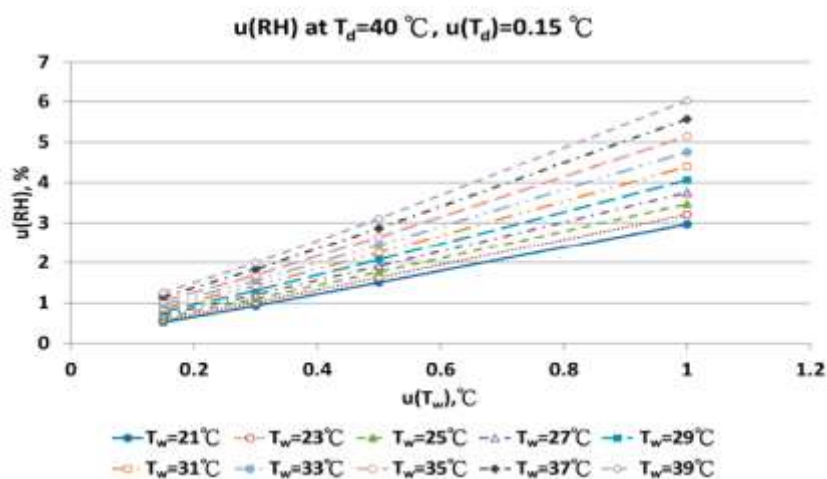
Obr. 9: Závislost mezi A_s a t_w pro teplotu T_d větší než 30 °C podle L [9]



Obr. 10: Chyba výpočtu RH pro konstantu A_s dle rovnice (7) pro T_d větší než 30 °C.

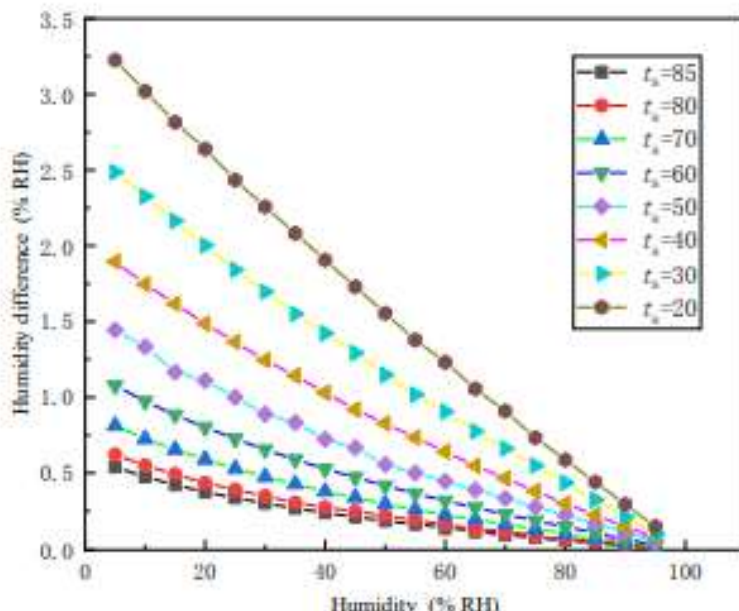


Obr. 11: Nejistoty RH určené pro As dle rovnice (7) pro $T_d = 15\text{ }^\circ\text{C}$ a nejistotu $u_{Td} = 0,15\text{ }^\circ\text{C}$; rozsah nejistoty $u_{Tw} = (0,1 \text{ až } 1,0)\text{ }^\circ\text{C}$



Obr. 12: Nejistoty RH určené pro As dle rovnice (7) pro $T_d = 40\text{ }^\circ\text{C}$ a nejistotu $u_{Td} = 0,15\text{ }^\circ\text{C}$; rozsah nejistoty $u_{Tw} = (0,1 \text{ až } 1,0)\text{ }^\circ\text{C}$

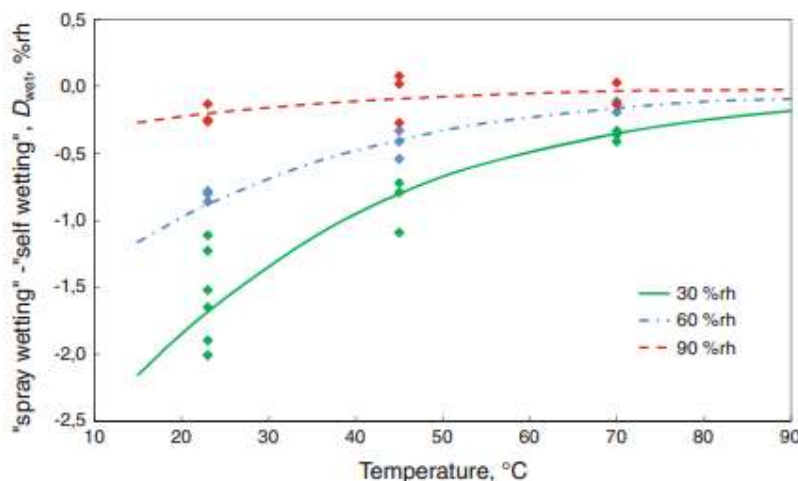
Vlivem rychlosti proudění na psychrometrickou konstantu a přesnost měření RH se zabývá také L [6]. Proměnlivost rozdílů RH vypočtené pomocí různých psychrometrických konstant v závislosti na různých teplotách vzduchu je zobrazena na obr. 13.



Obr. 13: Proměnlivost rozdílů RH vypočtené pomocí různých psychrometrických konstant v závislosti na různých teplotách vzduchu

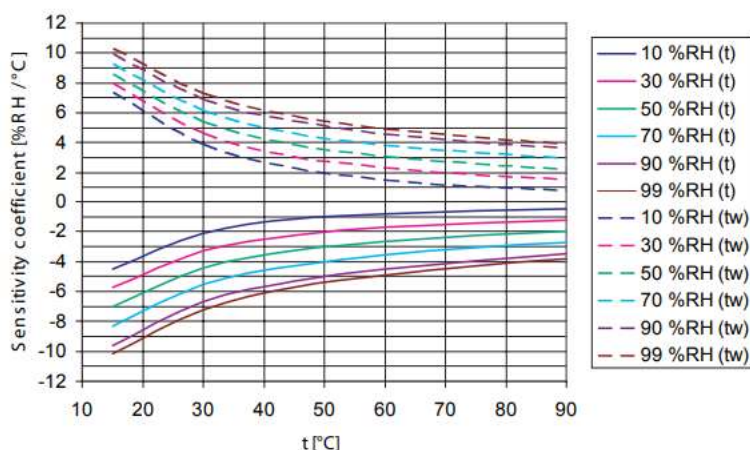
Z obrázku 13 je vidět, že při vysoké teplotě i RH je vlhkost měřená psychrometrem podstatně méně citlivá na rychlost proudění vzduchu. Když je relativní vlhkost 90 % RH a teplota vzduchu 85 °C, rozdíl RH vypočítaný pomocí různých koeficientů psychrometru je 0,03 % RH. S poklesem teploty vzduchu a relativní vlhkosti se zvyšuje vliv proudění na měřenou hodnotu relativní vlhkosti. Když je relativní vlhkost 20 % RH a teplota vzduchu 20 °C, rozdíl RH vypočítaný pomocí různých koeficientů psychrometru je 2,64 % RH.

Rozdílné výsledky měření psychrometrem ovlivní také způsob vlhčení punčošky mokrého teploměru. V L [8] je popsána zkouška, při které bylo provedeno 29 měření při: 23 °C, 45 °C a 70 °C při 30 % RH, 60 % RH a 90 % RH. Každé měření bylo realizováno s novým knotem a psychrometr se nechal stabilizovat na daném kalibračním bodu „samovlhčením“ následovaném „smáčením rozprašováním“. „Smáčení rozprašováním“ mělo za následek nižší hodnotu psychrometru než „samovlhčení“ ve stejném kalibračním bodě. Výsledky jsou znázorněny na obr. 14, kde **Dwet** je rozdíl mezi výsledky získanými „smáčením rozprašováním“ a „samovlhčením“. Obě metody smáčení punčošky produkovaly dlouhodobě stabilní hodnoty s větším rozdílem u nízkých teplot a RH, např. výsledky získané „samovlhčením“ versus „smáčením rozprašováním“ se lišily až o 1,7 % RH při 23 °C a 30 % RH.

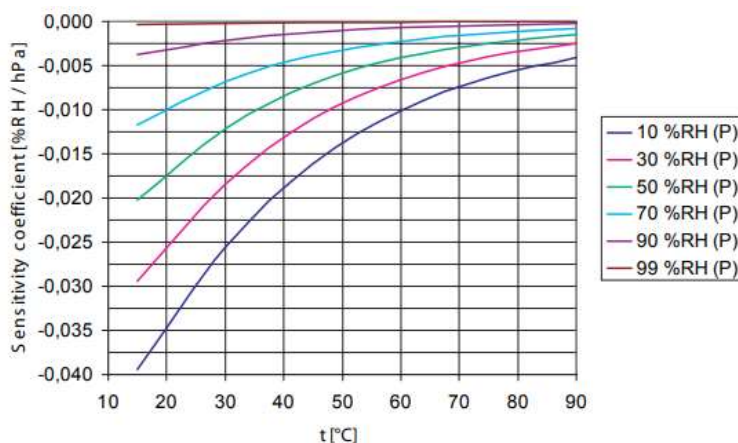


Obr. 14: Diference mezi výsledky kalibrace zjištěnými nástřikem vody na punčošku (rozprašování) a smáčením punčošky ve vodě (samovlhčení)

Shrnutí požadavků pro správné použití psychrometrů je uvedeno v L [12]. Použití psychrometrů je vázáno na dva předpoklady – musíme mít k dispozici dostatečné proudění vzduchu, a protože teplota mokrého teploměru vzniká odparem vody, musíme počítat s možným ovlivněním RH v prostředí, kde měříme. Nejčastější použití psychrometrů dnes najdeme v klimatických komorách, kde běžně pracují v testovacím rozsahu (10 až 98) % RH a (10 až 95) °C. Výsledek měření psychrometru je ovlivněn nejen nejistotou měření obou teplot, jak bylo uvedeno, ale také nejistotou měření barometrického tlaku. Tyto závislosti se obvykle vyjadřují citlivostními koeficienty. V L [12] je zobrazena závislost citlivostních koeficientů všech uvedených parametrů pro celý rozsah měřených teplot (obr. 15 a obr. 16).



Obr. 15: Závislost citlivostního koeficientu pro mokrou (t_w) a suchou (t) teplotu psychrometru



Obr. 16: Závislost citlivostního koeficientu na teplotě pro tlak vzduchu P

Z uvedených příkladů je zřejmé, že dokonalý popis vlastností psychrometrů je oproti rosnobodovým vlhkoměrům výrazně komplikovanější. Jejich vlastnosti při měření vyšších teplot / vlhkostí jsou lepší než při měření nízkých hodnot. Proto se někdy kombinuje měření psychrometrů s kapacitními snímači RH. Nejvýznamnější složky nejistoty při kalibraci psychrometrů jsou:

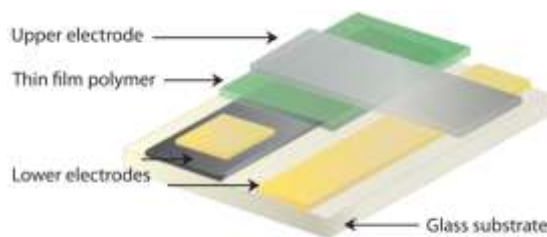
- nejistota měření obou teplot
- nejistota měření rosného bodu při použití rosnobodového vlhkoměru jako etalonu
- rozlišení měřených teplot psychrometru
- krátkodobá stabilita psychrometru
- čtení psychrometru (RH)
- vliv rychlosti proudění vzduchu
- vliv zvoleného výpočtu RH z měřených teplot
- reprodukovatelnost psychrometru (při znečištění knotu mokrého teploměru je hodnota RH obvykle vyšší než reference)
- vliv kalibrační komory (stabilita, homogenita)
- vliv měření barometrického tlaku (změny barometru mohou způsobit zvýšení nejistoty psychrometru až o ± 1 % RH)

Při měření (kalibraci) je třeba dbát na správnou montáž punčošky. Díky nelinearitě psychrometru je stanovení nejistoty měření platné pouze pro předmětný kalibrační bod. Při psychrometrickém měření je nutné k nejistotě kalibrace zahrnout i dlouhodobý drift teploměrů i měřicí elektroniky, změny barometrického tlaku během měření a dbát na správnou montáž a čistotu punčošky mokrého teploměru. Vliv psychrometru při měření lze shrnout následovně:

- zvyšují nejistotu měření referenční teploty a teploty rosného bodu v klimatických komorách (vliv odpařování vody z knotu a tepelnou ztrátou energie ventilátoru psychrometru),
- uvedený vliv psychrometru závisí na velikosti komory, průtoku vzduchu v komoře a umístění referenční teplotní sondy komory,
- ideální je malý psychrometr se stabilním měřením teploty a vysokým rozlišením.

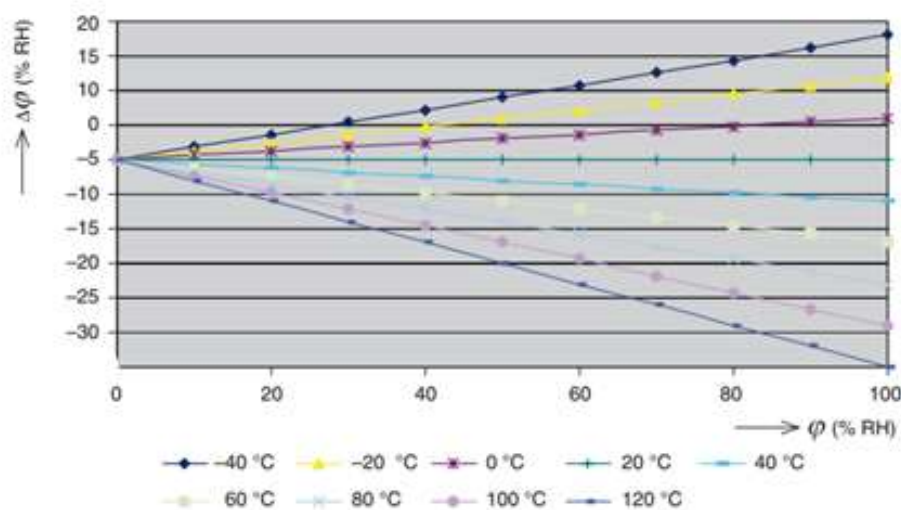
9.4. Kapacitní snímače vlhkosti

Konstrukci a princip kapacitního snímače RH můžeme objasnit na keramickém senzoru fy. Michell (viz L [1]), u kterého je výrobcem deklarována extrémně rychlá odezva, nízká hystereze a vysoká dlouhodobá stabilita (malý drift). Senzor velmi rychle reaguje na změny aplikované vlhkosti, a to jak při sušení, tak při nárůstu vlhkosti. Činnost senzoru závisí na adsorpci vodní páry do porézního nevodivého dielektrika mezi dvěma vodivými deskami kondenzátoru na povrchu základního keramického substrátu. Aktivní vrstva dielektrika je velmi tenká – méně než jeden mikron. Porézní horní deska kondenzátoru, která umožňuje přenos vodní páry do senzoru, je přesně navržena podle standardů nanotechnologií. Její tloušťka je zlomek mikronu, aby bylo zajištěno přesné a opakovatelné měření.



Obr. 17: Konstrukce kapacitního snímače RH dle L [1]

Vlastnosti polymerních senzorů jsou takové, že jejich kapacita se mění nejen při změně relativní vlhkosti, ale také při změně teploty. Kalibrace snímačů je obvykle prováděna při teplotě (20 až 25) °C. Při měření relativní vlhkosti při teplotě rozdílné od kalibrační neodpovídá měřená kapacita skutečné relativní vlhkosti. Musíme tedy nejen stanovit teplotní součinitel senzoru (K^{-1}), ale zajistit i jeho kompenzaci, protože není konstantní. Teplotní součinitel závisí také na konstrukci snímače, takže je pro každý snímač jiný, což může hrát roli při výměně snímače na stejném indikačním měřidle. Kompenzační součinitel je roven jedné pouze při kalibrační teplotě. Příklad závislosti měření RH na teplotě publikoval český výrobce Sensorika pro různé typy jimi vyráběných snímačů (viz L [3]). Obr. 18 demonstruje vlastnosti jednoho z nich.

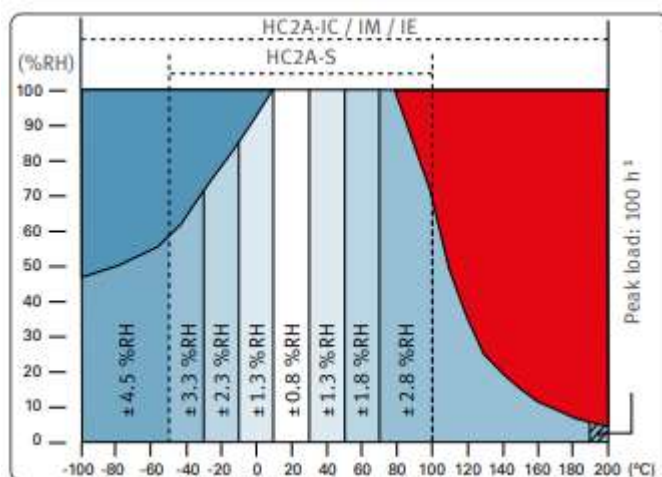


Obr. 18: Závislost odchylky nekompenzované hodnoty RH na teplotě a RH pro senzor HC 1000 SENSORIKA, kalibrační teplota 20 °C dle L [3]

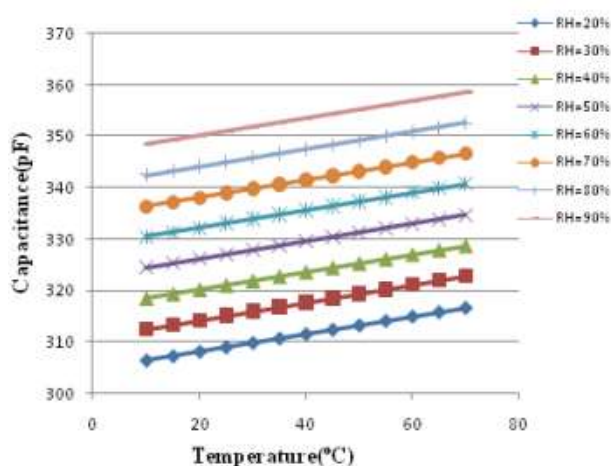
	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

Z obrázku je zřejmé, že pro měření v celém rozsahu RH je kompenzace absolutně nezbytná. Do mikroprocesoru vlhkoměru je nutné vložit program, jehož algoritmus pracuje s okamžitou měřenou teplotou a relativní vlhkostí, typem senzoru a kalibrační teplotou. Teplotní součinitel lze zanedbat pouze v úzkém rozmezí okolo kalibrační teploty nebo v případě, že nepožadujeme přesné měření RH. Někteří výrobci uvádějí závislost přesnosti měření RH na měřeném teplotním rozsahu. Na obr. 19 je ukázka takové závislosti z katalogového listu snímačů HC2 od firmy ROTRONIC. V každém případě se u těchto snímačů neobejdeme bez prověření kvality teplotní kompenzace, což znamená kalibraci RH při více teplotách.

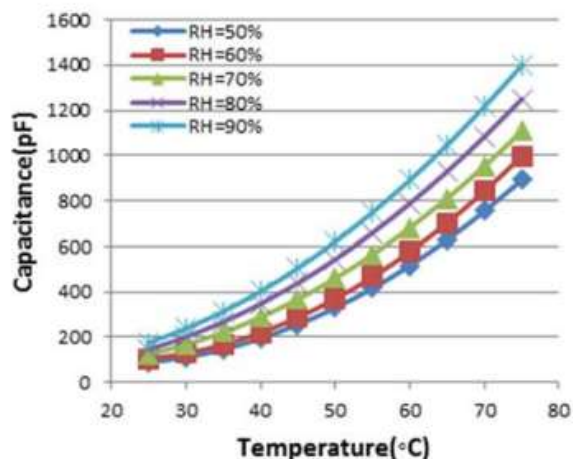
Na katedře elektrotechniky Ústřední university v New Delhi (Indie) zkoumali vlastnosti kapacitních snímačů, jejichž dielektrikum bylo vyrobeno z různých materiálů, viz L [4]. Vliv materiálu dielektrika je patrný z následujících příkladů. Na obr. 20 je zobrazena závislost kapacitního výstupu snímače s tenkým polymerním filmem, která je prakticky lineární. Snímače, které používají např. nanopórezní dielektrický tenký film z kysličníku hlinitého nebo jsou vyrobeny technologií MEMS ale odezvu lineární nemají. (MEMS = Micro-Electro-Mechanical System; technologie používá mechanické komponenty o velikosti nanočástic s téměř nulovou hmotností). Závislost je patrná z obr. 21.



Obr. 19: Závislost přesnosti snímače HC2 ROTRONIC na teplotě a RH

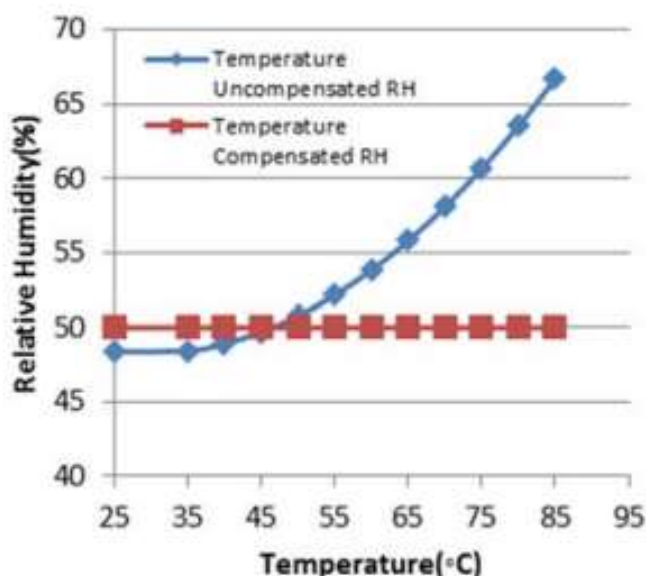


Obr. 20: Kapacitní odezva polymerního snímače na změnu teploty [L4]



Obr. 21: Kapacitní odezva senzoru s nanopórezním filmem L [4]

Jak je uvedeno v L [4], pro lineární i nelineární teplotní kompenzaci snímačů byla použita technika ANN (Artificial Neural Networks – Umělé neuronové sítě náležející do AI). Jde o simulaci chování snímače pomocí výpočetního systému inspirovaného biologickými neuronovými sítěmi, které tvoří lidský mozek. Cílem je zajištění teplotně kompenzované vlhkosti v celém rozsahu měření tak, jak znázorňuje obr. 22 pro 50 % RH. Teplotní kompenzace v celém rozsahu teploty i vlhkosti je zjevně komplikovaná, proto musíme pro použití nastavit kalibraci kapacitních snímačů tak, abychom mohli deklarovat co nejlepší nejistotu měření v celém rozsahu.



Obr. 22: Závislost teplotně nekompenzovaného a kompenzovaného výstupu kapacitního snímače RH při hodnotě 50 % RH

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

Teplotní závislost kapacitních snímačů je ovlivňována mnoha dalšími vlastnosti těchto měřidel. L [5] uvádí např. následující vlastnosti:

- nejen, že odezva snímače na RH v celém rozsahu měření není lineární, ale mezi měřeními při stoupající a klesající RH se projevuje hystereze,
- snímač vychází z předpokladu, že mezi množstvím vody v dielektriku a RH je konstantní závislost, ale u většiny hygroskopických materiálů se tato závislost mění s teplotou,
- dielektrická konstanta (dnes relativní permitivita) vody je při 20 °C okolo 80, při teplotě 0 °C ale stoupá o více než 8 % a při teplotě 100 °C naopak klesá o 30 %,
- dielektrická konstanta většiny dielektrických materiálů klesá s rostoucí teplotou (méně než u vody),
- jakákoliv délka připojovacího kabelu má svoji elektrickou kapacitu a odpor, elektronické obvody nedokáží rozlišit mezi snímačem a jeho kabelem.

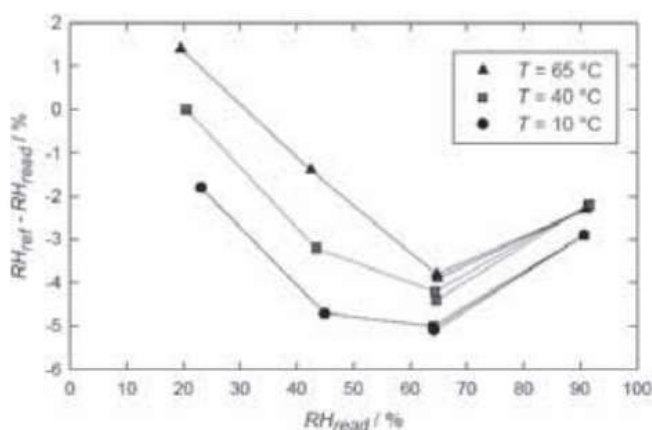
Vlastnosti snímače, především jeho hysterezi (kritérium opakovatelnosti) ovlivňují typy používaných měřicích cyklů, doba expozice snímače při jednotlivých nastavených RH a současně vliv teplotní zátěže, celková historie snímače apod. Hystereze se zvyšuje po časté zátěži snímače vysokou teplotou a vysokou RH, příp. častým střídáním podmínek. Proto je obtížné uvádět hysterezi výrobcem ve specifikaci snímače. V každém případě by měla být měřena. Do výpočtu nejistoty měření se uvažuje polovina maximální zjištěné hodnoty, nicméně opakovatelnost by neměla být uvažována menší než zjištěná max. hodnota hystereze.

Vlastnostmi kapacitních snímačů a zdroji nejistot při jejich použití se detailně zabývá L [12]. Jak bylo uvedeno, závisí jejich charakteristika do značné míry na historii použití, kdy kromě uvedeného hrají významnou roli také mechanické nebo chemické znečištění. Jakmile vnikne molekula vody do polymeru, mění se jeho impedance díky polární povaze molekul. Vazba vodních molekul v polymeru a tím i jejich pohyblivost závisí na struktuře polymeru, obsahu proniklých molekul jiných plynů, teplotě atd. Povrchové jevy v polymeru mohou být pomalé a nevratné, což vyvolává dlouhodobou nestabilitu těchto snímačů zejména v případě, že je snímač vystaven velmi proměnlivým teplotám a dlouhodobé vysoké vlhkosti.

Zdroje chyb kapacitních snímačů lze popsat následovně:

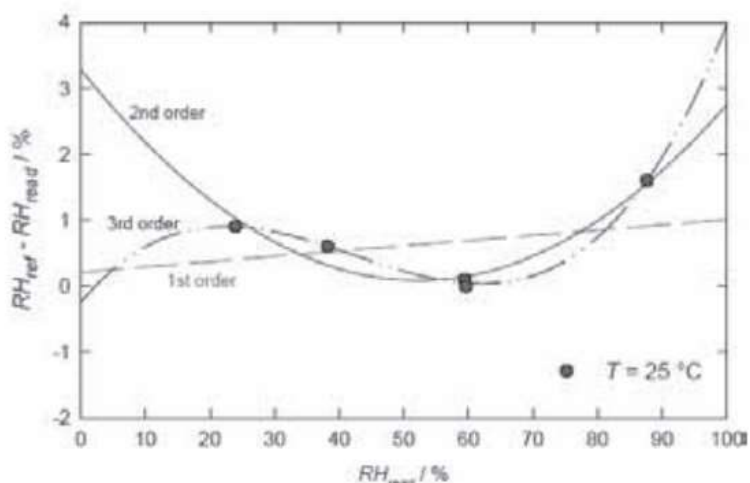
- opakovatelnost,
- rozlišení údaje,
- krátkodobá stabilita,
- hystereze,
- **teplotní závislost,**
- nelinearita výstupu (interpolace mezikalibračních bodů),
- vliv teploty tělesa vlastního snímače, samoohřev snímače,
- vliv okolní teploty na indikační jednotku (pokud je významný),
- znečištění snímače,
- směr a rychlost proudění vzduchu (obvykle se neuvažuje),
- dlouhodobá stabilita (musí respektovat uživatel měřidla).

L [12] popisuje závislosti některých zdrojů chyb, které autoři testovali (obrázky originálu nejsou příliš kvalitní). Příklad teplotní závislosti spolu s linearitou a hystezí kapacitního snímače je uveden na obr. 23.



Obr. 23: Teplotní závislost, linearita a hystereze kapacitního snímače

Následující obrázek 24 demonstruje obtíže při interpretaci výsledků měření kapacitního snímače, resp. problém určení chyby linearity. Přesto, že byla kalibrace provedena ve čtyřech bodech, ani dostatečný počet opakování v těchto bodech nám nepomůže při stanovení skutečné charakteristiky. Na obrázku je znázorněno proložení bodů polynomy 1. až 3. řádu. Je patrné, že ani zvýšení stupně polynomu není stoprocentní pro predikci křivky odchylek. Extrapolace hodnot u těchto snímačů je krajně nevhodná.

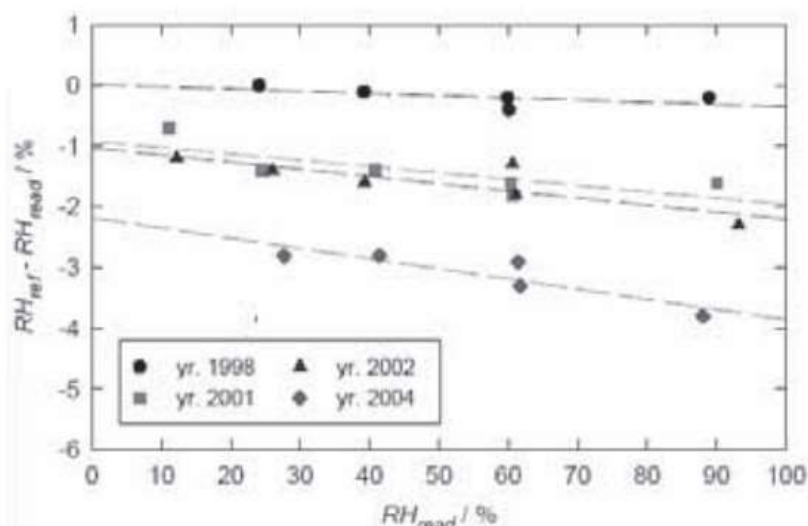


Obr. 24: Polynomické zpracování výsledků kalibrace

Kapacitní snímače, speciálně snímače zatěžované vysokou nebo střídavou teplotou i vlhkostí, mají významný dlouhodobý drift. Nejběžnější snímače používané v ČR (typ HC2 v různých variantách od firmy Rotronic) mají např. základní přesnost deklarovanou jako $\pm 0,8 \%$ RH a dlouhodobý drift až do $\pm 1,0 \%$ RH za rok, tedy větší než deklaraci přesnosti. Drift je pochopitelně ovlivněn způsobem použití a opět se váže k předmětu příspěvku –

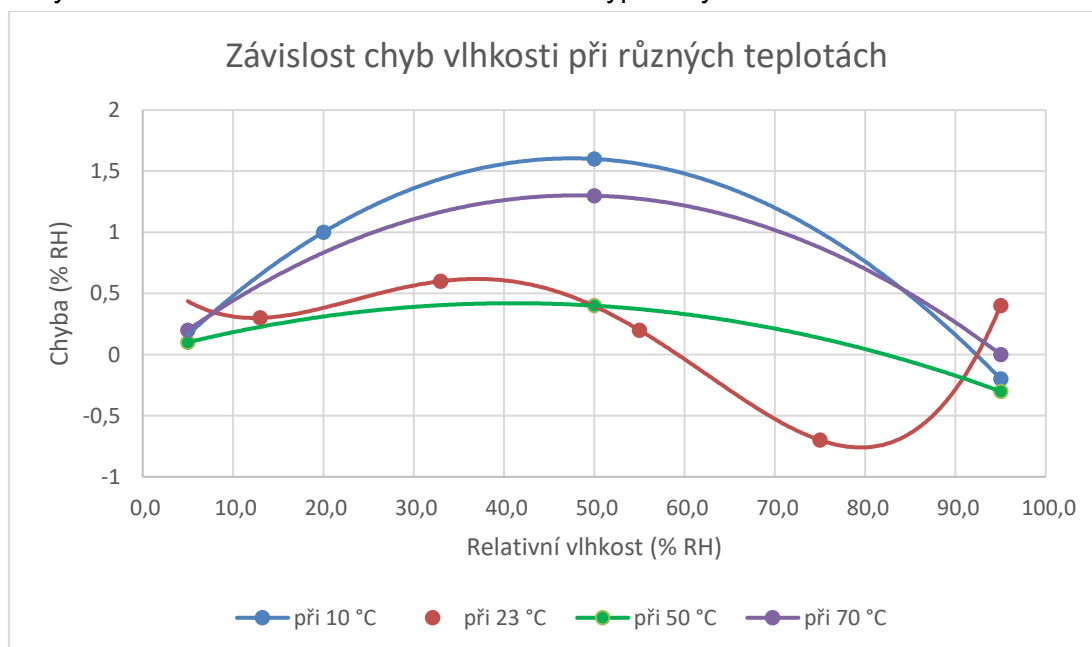
	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

použití vysokých teplot a střídání vlhkostí drift zhoršuje. Příklad průběhu driftu podle L [12] je na obr. 25.

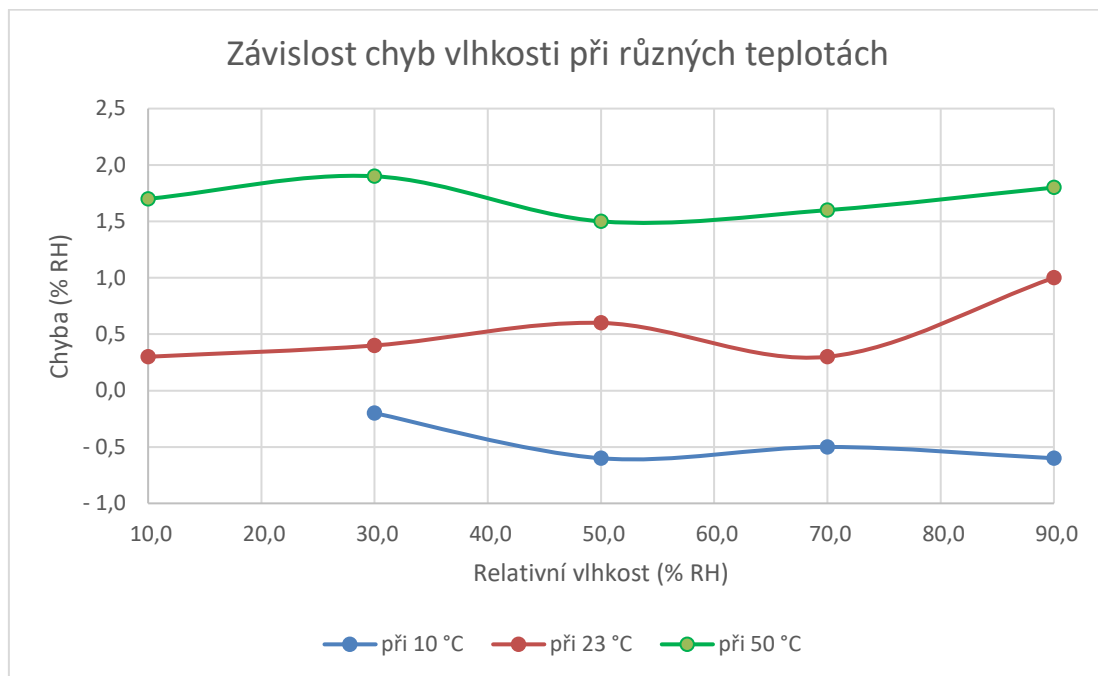


Obr. 25: Průběh driftu kapacitního snímače RH v období šesti let

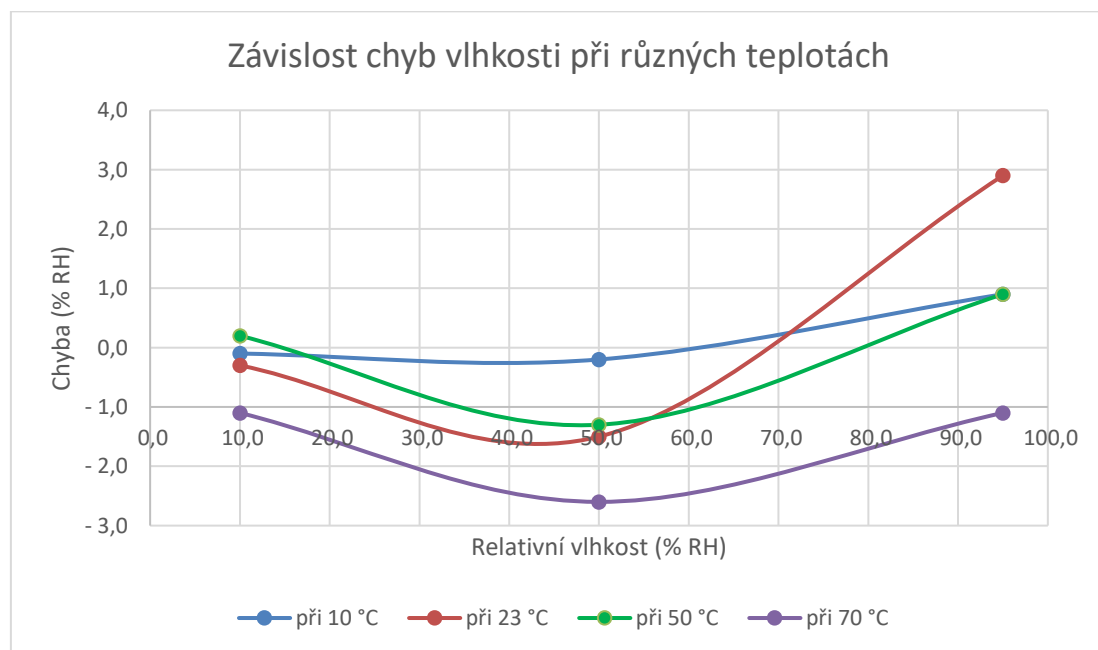
Následují závislosti chyb vlhkosti při různých teplotách pro různé kapacitní vlhkoměry prakticky změřené ve ČMI záměrně uvedené bez typu a výrobce vlhkoměru.



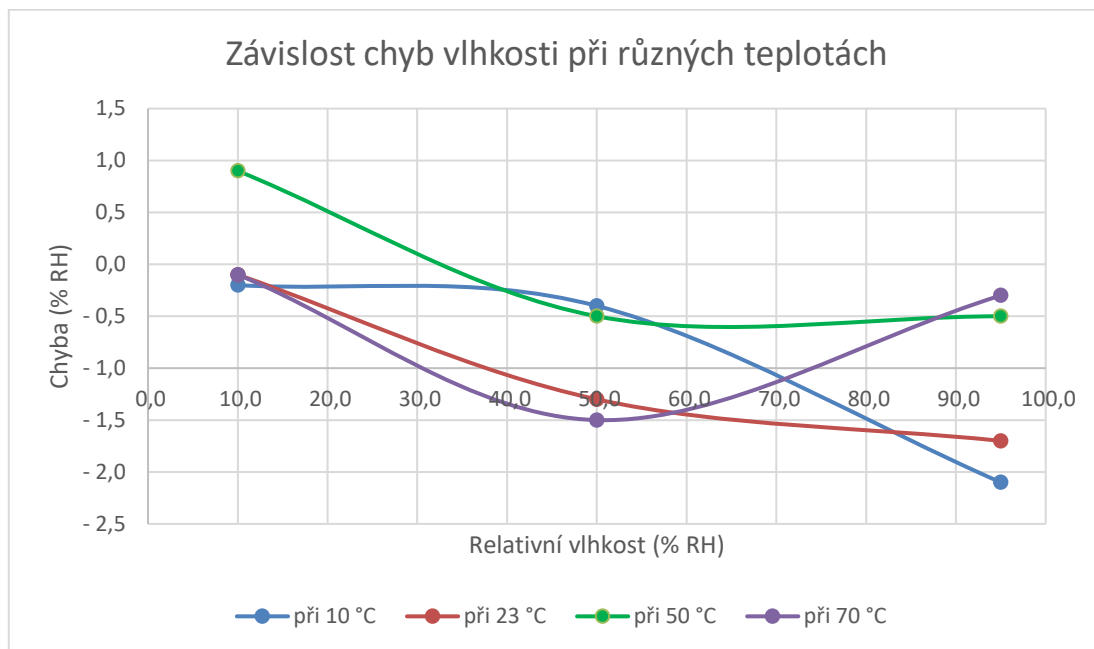
Obr. 26: Závislost chyb vlhkosti při různých teplotách



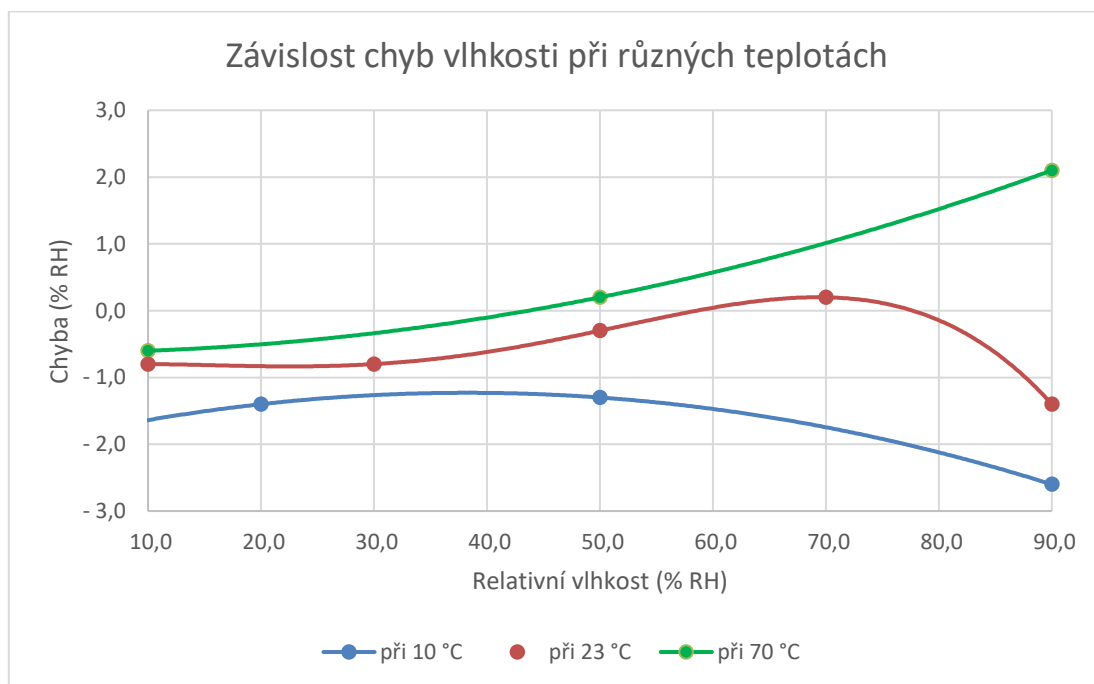
Obr. 27: Závislost chyb vlhkosti při různých teplotách



Obr. 28: Závislost chyb vlhkosti při různých teplotách



Obr. 29: Závislost chyb vlhkosti při různých teplotách



Obr. 30: Závislost chyb vlhkosti při různých teplotách

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

9.5. SHRNU TÍ

Z uvedeného přehledu je zřejmé, že stanovení nejistoty měření RH vzduchu není jednoduché, a když k tomu přidáme proměnné teploty a vlastnosti použitých snímačů, těžko se dostáváme na malé hodnoty nejistot. RH vzduchu je komplikovanou veličinou a stejně komplikované je její správné měření spolu s konstatováním mezí, ve kterých správná hodnota leží. Nejlepších výsledků lze dosáhnout při použití rosnobodového vlhkoměru, u kterého využíváme kalibraci teploty a teploty rosného bodu. Úskalí jednotlivých snímačů jsou popsána v textu a necháváme na čtenáři, aby posoudil, jaký způsob měření je pro něj nejvhodnější. V každém případě nesmíme při měření zapomínat, že kromě snímače se na nejistotě měření podílí i prostředí, ve kterém RH a teplotu generujeme. Změnou teploty se také mění podmínky v klimatické komoře. Na stabilitu prostředí obvykle významný vliv teploty není, ale zásadně se může měnit homogenita prostoru. Změny homogenity v závislosti na kalibrační teplotě jsou uvedeny jako příklad podle L [12] v tabulce 3:

Temp:	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	70 °C
RH:								
10 %rh	0.46	0.28	0.18	0.09	0.07	0.13	0.20	0.32
50 %rh	2.49	1.35	0.87	0.48	0.29	1.20	0.76	1.15
95 %rh (84%rh, 90%rh)	4.23	2.40	1.65	0.91	0.57	0.94	0.84	0.85
$U_{max, k=2}$	4.3	2.4	1.7	1.0	0.6	1.2	0.9	1.2

Tabulka 3: Příklad změn homogenity klimakomory v závislosti na měřené RH a teplotě

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

10. Podmínky používání a způsoby zajištění návaznosti různých typů etalonových vlhkoměrů při různých teplotách

10.1. Rosnobodové vlhkoměry

U těchto měřidel je možná kalibrace rosnobodového snímače, teplotního snímače anebo kalibrace přímo v relativní vlhkosti.

Při kalibraci přímo v relativní vlhkosti je nutné daný vlhkoměr používat pouze v rozsahu kalibrované relativní vlhkosti při kalibrované teplotě, kde se může teplota lišit maximálně o ± 10 °C. Při použití pro měření relativní vlhkosti při různých teplotách, je nutné mít ho zkalibrován na relativní vlhkost při minimální teplotě, střední teplotě (obvykle 23 °C) a maximální teplotě a počítat s lineárním šířením chyby relativní vlhkosti mezi jednotlivými kalibrovanými teplotami.

Při kalibraci teploty rosného bodu (bodu ojínění) a teploty okolí je možné používat daný vlhkoměr pro různé relativní vlhkosti při různých teplotách, ale nesmí dojít k překročení kalibrovaného rozsahu teploty rosného bodu (bodu ojínění) a teploty okolí. Relativní vlhkost je následně vhodné počítat z korigovaných hodnot teploty rosného bodu (bodu ojínění) a teploty okolí pomocí vlhkovostního kalkulatoru a mít patřičným způsobem zpracován výpočet nejistoty měření. U nejistot měření je nutné dávat si pozor na různou citlivost změny teploty rosného bodu (bodu ojínění) nebo teploty okolí na relativní vlhkosti.

V následujících tabulkách je uvedena závislost teploty rosného bodu (bodu ojínění) a teploty okolí na relativní vlhkosti a přibližná citlivost teploty rosného bodu (bodu ojínění) na relativní vlhkosti.

Teplota	Relativní vlhkost [% RH]										
[°C]	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
0	-32,08	-25,35	-18,23	-13,87	-10,68	-8,16	-6,06	-4,26	-2,68	-1,27	-0,62
10	-25,30	-18,18	-10,64	-6,01	-2,63	0,06	2,60	4,79	6,71	8,44	9,24
20	-18,69	-11,18	-3,21	1,92	6,01	9,28	12,01	14,37	16,45	18,31	19,17
23	-16,75	-9,11	-1,01	4,52	8,69	12,03	14,83	17,24	19,37	21,27	22,16
30	-12,25	-4,35	4,62	10,55	14,94	18,45	21,39	23,93	26,17	28,18	29,11
40	-5,97	2,64	12,79	19,14	23,83	27,59	30,75	33,47	35,88	38,04	39,04
50	0,16	10,11	20,90	27,66	32,68	36,69	40,08	42,99	45,58	47,89	48,97
60	6,96	17,48	28,94	36,13	41,48	45,77	49,38	52,50	55,26	57,74	58,90
70	13,65	24,77	36,90	44,54	50,22	54,80	58,64	61,98	64,93	67,58	68,82
80	20,24	31,95	44,78	52,88	58,91	63,77	67,87	71,43	74,58	77,41	78,74
90	26,71	39,03	52,57	61,13	67,53	72,69	77,05	80,84	84,20	87,23	88,65
100	33,04	45,97	60,23	69,27	76,04	81,52	86,15	90,19	93,78	97,03	98,55
Teplota rosného bodu (bodu ojínění v podnulových hodnotách) [°C]											

Tabulka 4: Závislost teploty rosného bodu (bodu ojínění) a teploty okolí na relativní vlhkosti

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

Teplota [°C]	Relativní vlhkost [% RH]										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
0	1,73	0,99	0,52	0,36	0,27	0,22	0,19	0,16	0,15	0,13	0,13
10	1,83	1,01	0,55	0,38	0,30	0,28	0,23	0,20	0,18	0,16	0,15
20	1,93	1,07	0,58	0,46	0,36	0,29	0,25	0,22	0,19	0,18	0,17
23	1,97	1,08	0,59	0,46	0,37	0,30	0,25	0,22	0,20	0,18	0,17
30	2,03	1,13	0,70	0,50	0,39	0,32	0,27	0,24	0,21	0,19	0,18
40	2,13	1,35	0,75	0,52	0,41	0,34	0,29	0,26	0,23	0,20	0,20
50	2,54	1,43	0,80	0,57	0,44	0,37	0,31	0,28	0,24	0,22	0,21
60	2,68	1,52	0,85	0,60	0,46	0,39	0,33	0,29	0,26	0,24	0,22
70	2,84	1,60	0,90	0,64	0,50	0,41	0,36	0,31	0,28	0,26	0,24
80	2,98	1,70	0,95	0,67	0,53	0,44	0,38	0,33	0,29	0,27	0,25
90	3,13	1,79	1,00	0,71	0,56	0,47	0,40	0,35	0,32	0,29	0,27
100	3,28	1,88	1,06	0,76	0,60	0,50	0,43	0,38	0,34	0,31	0,29
Citlivost teploty rosného bodu (bodu ojínění) na relativní vlhkosti [°C / % RH]											

Tabulka 5: Přibližná citlivost teploty rosného bodu (bodu ojínění) na relativní vlhkosti

Při samotném měření je nutné dávat si pozor na čistotu zrcátka a na podchlazenou vodu v rozsahu (-20 až 0) °C. Některé rosnobodové vlhkoměry mají integrovanou automatickou funkci pro zamezení tvorby podchlazené vody, u některých je nutný ruční zásah a u některých se tomu jevu bohužel nedá zabránit. Ruční zásah spočívá v tom, že se aktivuje funkce podchlazování, najede se na minimálně -25 °C (pokud je to možné na -30 °C), čímž se na zrcátku vytvoří silná vrstva ojínění a tato funkce se následně opakovaně aktivuje, pokud se teplota bodu ojínění opět blíží k 0 °C tak, aby nedošlo k překročení teploty bodu ojínění do kladných hodnot, čímž by se z ojínění stala opět rosa. Zvláště v rozsahu (-10 až 0) °C je toto ruční zamezení tvorby podchlazené vody náročné. Z praktického hlediska se u některých typů rosnobodových vlhkoměrů díky tomuto efektu při měření vlhkosti 10 % RH při teplotě 23 °C, kdy je teplota bodu ojínění -9,1 °C vyskytuje chyba cca 1 % RH, protože daný vlhkoměr bez ručního zásahu vytvoří podchlazenou vodu. V tomto případě je lepší i při kalibraci nechat na zrcátku podchlazenou vodu a pracovat s touto hodnotou. Problém ale následně vzniká při interpolaci dané chyby pro mezilehlé hodnoty z důvodu této velké přidané systematické chyby.

10.1.1. Příklad výpočtu nejistoty měření rosnobodovým vlhkoměrem

Při použití rosnobodového vlhkoměru jako etalonu potřebujeme obvykle vypočítat relativní vlhkost z teploty a z teploty rosného bodu. Buď můžeme využít nějaký vlhkovní kalkulátor nebo rovnice dle Sontaga:

Relativní vlhkost se vypočítá z tlaku nasycených par

$$RH = e^{\ln(P_{TRB}) - \ln(P_T)} \cdot 100 \quad (8)$$

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

tlak nasycených par nad vodou je

$$\ln P_w(T) = -6096,9385 \cdot T^{-1} + 21,2409642 - 2,711193 \cdot 10^{-2} T + 1,673952 \cdot 10^{-5} T^2 + 2,433502 \ln T \quad (9)$$

tlak nasycených par nad ledem je

$$\ln P_i(T) = -6024,5282 \cdot T^{-1} + 29,32707 + 1,0613868 \cdot 10^{-2} T - 1,3198825 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,49382577 \ln T \quad (10)$$

kde T je teplota (teplota rosného bodu) v K,

$\ln(P_{\text{TRB}})$ se vypočítá z rovnice (9) pro teplotu rosného bodu nad nulou nebo z rovnice (10) pro teplotu rosného bodu pod nulou, T je v tomto případě teplota rosného bodu v K,

$\ln(P_T)$ se vypočítá z rovnice (9), T je v tomto případě teplota v K (pohybujeme se pouze v nadnulových teplotách).

Zdroje nejistoty měření, které vstupují do výpočtu, si předvedeme na konkrétním příkladu. Příklad výpočtu nejistoty měření pro kalibraci digitálního vlhkoměru s rozlišením 0,1 % RH ve vlhkostrním generátoru pro relativní vlhkost 30 % RH při 30 °C za použití etalonového rosnobodového vlhkoměru.

V tabulce 6 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

	Etalon		Měřidlo
	t_{RB}	t	H
	°C	°C	% RH
	10,45	30,03	30,8
	10,45	30,03	30,7
	10,46	30,03	30,8
	10,46	30,02	30,8
	10,45	30,02	30,9
	10,45	30,03	30,8
	10,45	30,03	30,8
	10,45	30,03	30,9
	10,44	30,02	30,8
	10,45	30,03	30,8
průměr	10,451	30,027	30,81
u_A	0,00180	0,00153	0,0180

Tabulka 6: Naměřené hodnoty

Standardní nejistoty typu A se určí jako výběrová směrodatná odchylka podle vztahu:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (11)$$

kde n je počet měření.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

Citlivost relativní vlhkosti na teplotě (teplotě rosného bodu) si určíme pomocí vlhkostního kalkulátoru HumiCalc (<https://www.thunderscientific.com/humicalc/>) následujícím způsobem.

Z teploty rosného bodu t_{RB} , teploty t a tlaku P vypočítáme relativní vlhkost H . Poté o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ zvýšíme teplotu rosného bodu, vypočítáme relativní vlhkost, resp. zjistíme, o jakou hodnotu se zvýšila relativní vlhkost. Poté o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ snížíme teplotu rosného bodu, vypočítáme relativní vlhkost, resp. zjistíme, o jakou hodnotu se snížila relativní vlhkost. Jelikož je při zvýšení a snížení teploty rosného bodu jiná změna relativní vlhkosti, zprůměrujeme tyto dvě hodnoty a dostaneme citlivost relativní vlhkosti na teplotě rosného bodu, která je v tomto příkladu $1,99\text{ \% RH / }^{\circ}\text{C}$.

Obdobným způsobem určíme citlivost relativní vlhkosti na teplotě, která je v tomto příkladu $1,71\text{ \% RH / }^{\circ}\text{C}$.

teplota RB	t_{RB}	10,451	11,451	9,451	10,451	10,451	$^{\circ}\text{C}$
teplota	t	30,027	30,027	30,027	31,027	29,027	$^{\circ}\text{C}$
tlak	P	1013	1013	1013	1013	1013	miliBar
rel. vlhkost	H	29,75	31,79	27,82	28,09	31,51	% RH
rozdíl rel. vlhkosti			2,04	1,93	1,66	1,76	% RH / $^{\circ}\text{C}$
průměrná citlivost t_{RB}			1,99				% RH / $^{\circ}\text{C}$
průměrná citlivost t					1,71		% RH / $^{\circ}\text{C}$

Tabulka 7: Výpočet citlivosti

Nyní si sestavíme jednotlivé zdroje pro výpočet nejistoty měření a přiřadíme k nim rozdělení pravděpodobnosti.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

Zdroj nejistoty	Hodnota	Rozdělení pravděpod.	Koef.	Citl. koef.	Standardní nejistota
nejistota et. snímače teploty RB	0,09 °C	normální	2	1,99	0,0896 % RH
drift et. snímače teploty RB	0,03 °C	bimod. - tr.	1,414	1,99	0,0422 % RH
rozlišení et. snímače teploty RB / 2	0,005 °C	rovnoměrné	1,732	1,99	0,0057 % RH
chyba dopočtu et. snímače teploty RB v mezil. bodech	0,018 °C	rovnoměrné	1,732	1,99	0,0207 % RH
nejistota et. snímače teploty	0,06 °C	normální	2	1,71	0,0513 % RH
drift et. snímače teploty	0,02 °C	bimod. - tr.	1,414	1,71	0,0242 % RH
rozlišení et. snímače teploty / 2	0,005 °C	rovnoměrné	1,732	1,71	0,0049 % RH
chyba dopočtu et. snímače teploty v mezil. bodech	0,012 °C	rovnoměrné	1,732	1,71	0,0118 % RH
homogenita vlhkosti	0,5 % RH	rovnoměrné	1,732	1	0,2887 % RH
stabilita vlhkosti	0,1 % RH	rovnoměrné	1,732	1	0,0577 % RH
rozlišení kal. vlhkoměru / 2	0,05 % RH	rovnoměrné	1,732	1	0,0289 % RH
rozdílná dynamika etalonu a kal. vlhkoměru	0,2 % RH	rovnoměrné	1,732	1	0,1155 % RH
ostatní vlivy	0,2 % RH	rovnoměrné	1,732	1	0,1155 % RH
nejistota typu A etalonu teploty RB	0,0018 °C			1,99	0,0036 % RH
nejistota typu A etalonu teploty	0,0015 °C			1,71	0,0026 % RH
nejistota typu A kal. vlhkoměru	0,018 % RH			1	0,0180 % RH
standardní nejistota					0,3580 % RH
rozšířená nejistota					0,7160 % RH
rozšířená nejistota (zaokrouhl.)					0,8 % RH

Tabulka 8: Přehled zdrojů nejistot

Daná hodnota se vydělí koeficientem dle rozdělení pravděpodobnosti a následně se vynásobí citlivostním koeficientem. Standardní nejistota je dána odmocninou součtu čtverců jednotlivých zdrojů a výsledná rozšířená nejistota je rozšířena koeficientem rozšíření 2.

Popis jednotlivých zdrojů nejistoty:

- Nejistota etalonového snímače teploty rosného bodu se určí z kalibračního listu.
- Drift etalonového snímače teploty rosného bodu je vlastně dlouhodobou stabilitou etalonu a určí se z historie kalibrací.
- Rozlišení etalonového snímače teploty rosného bodu se obvykle dělí dvěma.
- Chyba dopočtu etalonového snímače teploty rosného bodu v mezilehlých bodech se aplikuje u hodnot, které nejsou v kalibračním listu, a obvykle je to 20 % z hodnoty vyšší nejistoty v okolních kalibrovaných bodech. Kalibrována je $t_{RB} = 0\text{ °C}$ s nejistotou 0,09 °C a $t_{RB} = 20\text{ °C}$ s nejistotou 0,08 °C. V tomto příkladu měříme $t_{RB} = 10,45\text{ °C}$, což znamená, že nejistotou uvažujeme 0,09 °C a chybu dopočtu 20 % z 0,09 °C.
- Nejistota etalonového snímače teploty se určí z kalibračního listu.
- Drift etalonového snímače teploty je vlastně dlouhodobou stabilitou etalonu a určí se z historie kalibrací.
- Rozlišení etalonového snímače teploty se obvykle dělí dvěma.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

- Chyba dopočtu etalonového snímače teploty v mezilehlých bodech se aplikuje u hodnot, které nejsou v kalibračním listu a obvykle je to 20 % z hodnoty vyšší nejistoty v okolních kalibrovaných bodech. Kalibrována je $t = 20\text{ °C}$ s nejistotou $0,05\text{ °C}$ a $t = 40\text{ °C}$ s nejistotou $0,06\text{ °C}$. V tomto příkladu měříme $t = 30,03\text{ °C}$, což znamená, že nejistotou uvažujeme $0,06\text{ °C}$ a chybu dopočtu 20 % z $0,06\text{ °C}$.
- Homogenita vlhkosti je dána proměřením rozložení vlhkosti ve vnitřním prostoru vlhkostního generátoru.
- Stabilita vlhkosti je dána proměřením stability vlhkostního generátoru.
- Rozlišení kalibrovaného vlhkoměru se obvykle dělí dvěma.
- Rozdílná dynamika etalonu a kalibrovaného vlhkoměru je dána rozdílnými principy měření a určí se kvalifikovaným odhadem.
- Ostatní vlivy zahrnují gradienty tlaku vodní páry, adsorpci a desorpci při měření teploty rosného bodu etalonem, samoohřev a teplotní gradienty při měření teploty etalonem, vliv tepelného záření uvnitř vlhkostního generátoru a chybu způsobenou vlhkostními přepočty.

Výsledek kalibrace vlhkoměru v tomto příkladu je následující. Vypočítaná etalonová relativní vlhkost je 29,75 % RH, zprůměrovaná naměřená hodnota kalibrovaného vlhkoměru je 30,81 % RH, z čehož vychází chyba měřidla 1,06 % RH a vypočítaná nejistota měření je 0,72 % RH. Z praktického hlediska uvádění výsledků je vhodné provést dopočet na rovných 30 % RH, a protože je rozlišení kalibrovaného měřidla 0,1 % RH, doporučuje se provést zaokrouhlení na 0,1 % RH. Naměřená hodnota kalibrovaného měřidla při etalonových 30,0 % RH tedy je **31,1 % RH** s nejistotou **0,8 % RH**.

10.2. Psychrometrické vlhkoměry

U psychrometrů je možná kalibrace jednotlivých teplotních snímačů (suchý a mokrá) anebo kalibrace přímo v relativní vlhkosti.

Při kalibraci přímo v relativní vlhkosti je nutné daný vlhkoměr používat pouze v rozsahu kalibrované relativní vlhkosti při kalibrované teplotě, kde se může teplota lišit maximálně o $\pm 10\text{ °C}$. Při použití pro měření relativní vlhkosti při různých teplotách, je nutné mít ho zkalibrován na relativní vlhkost při minimální teplotě, střední teplotě (obvykle 23 °C) a maximální teplotě a počítat s lineárním šířením chyby relativní vlhkosti mezi jednotlivými kalibrovanými teplotami.

Při kalibraci mokré a suché teploty je možné používat daný vlhkoměr pro různé relativní vlhkosti při různých teplotách, ale nesmí dojít k překročení kalibrovaného rozsahu mokré a suché teploty. Relativní vlhkost je následně vhodné počítat z korigovaných hodnot mokré a suché teploty pomocí vlhkostního kalkulátoru a mít patřičným způsobem zpracován výpočet nejistoty měření. U nejistot měření je nutné dávat si pozor na různou citlivost změny mokré a suché teploty na relativní vlhkosti. Dále je nutné pravidelně kontrolovat stav punčošky mokrého teploměru a funkčnost ventilátoru. Samozřejmostí je používání destilované vody při smáčení mokrého teploměru. Při nízkých vlhkostech, resp. při nízkých teplotách je také nutné dávat si pozor na zamrznutí nádoby s vodou, a naopak při vysokých teplotách nesmí dojít k varu vody. Vzhledem k závislosti mokré a suché teploty na barometrickém tlaku, je nezbytné při této kalibraci tento tlak měřit a počítat s ním při přepočtu na relativní vlhkost. Vzhledem k dalším nevhodným vlastnostem tohoto měření popsanych v jiných kapitolách, je nutné mít zkalibrovány alespoň dvě hodnoty relativní vlhkosti pro kontrolu, že je psychrometr jako celek v pořádku a že je výpočet ze suché a mokré teploty v pořádku. Jako

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

kontrolní body je vhodné mít nižší vlhkost při nižší teplotě a vyšší vlhkost při vyšší teplotě (např. 23 °C / 30 % RH a 80 °C / 90 % RH).

V následujících tabulkách je uvedena závislost mokré a suché teploty na relativní vlhkosti a přibližná citlivost mokré teploty na relativní vlhkosti.

Teplota	Relativní vlhkost [% RH]										
[°C]	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
10	0,86	1,41	2,49	3,53	4,54	5,52	6,47	7,39	8,29	9,16	9,58
20	6,69	7,57	9,25	10,84	12,35	13,78	15,15	16,44	17,68	18,87	19,44
23	8,31	9,31	11,21	13,00	14,67	16,25	17,75	19,16	20,51	21,78	22,40
30	11,91	13,24	15,72	18,00	20,09	22,03	23,84	25,52	27,11	28,59	29,31
40	16,69	18,62	22,09	25,16	27,90	30,36	32,61	34,67	36,58	38,35	39,19
50	21,20	23,88	28,53	32,45	35,83	38,82	41,48	43,89	46,09	48,12	49,08
60	25,58	29,17	35,11	39,90	43,92	47,39	50,44	53,17	55,65	57,91	58,98
70	29,94	34,57	41,85	47,50	52,12	56,04	59,46	62,49	65,22	67,71	68,88
80	34,35	40,12	48,76	55,21	60,39	64,74	68,50	71,82	74,81	77,51	78,78
90	38,86	45,81	55,77	62,99	68,70	73,46	77,55	81,15	84,38	87,31	88,68
	Teplota mokrého teploměru [°C]										

Tabulka 9: Závislost mokré a suché teploty na relativní vlhkosti

Teplota	Relativní vlhkost [% RH]										
[°C]	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
10	0,12	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,09
20	0,18	0,17	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,11
23	0,19	0,20	0,19	0,17	0,17	0,16	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12
30	0,27	0,26	0,24	0,21	0,20	0,19	0,17	0,17	0,15	0,15	0,14
40	0,40	0,37	0,33	0,29	0,25	0,24	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16
50	0,56	0,51	0,42	0,36	0,32	0,28	0,25	0,23	0,21	0,20	0,18
60	0,76	0,67	0,52	0,43	0,37	0,32	0,29	0,26	0,23	0,22	0,20
70	1,00	0,83	0,63	0,50	0,41	0,36	0,31	0,29	0,26	0,24	0,23
80	1,26	1,01	0,72	0,57	0,47	0,40	0,35	0,32	0,28	0,26	0,25
90	1,55	1,19	0,82	0,63	0,51	0,43	0,38	0,34	0,30	0,28	0,27
	Citlivost mokrého teploměru na relativní vlhkosti [°C / % RH]										

Tabulka 10: Přibližná citlivost mokré teploty na relativní vlhkosti

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

10.2.1. Příklad výpočtu nejistoty měření psychrometrem

Rychlost odpařování punčošky vlhkého teploměru nesouvisí pouze s relativní vlhkostí vzduchu, ale souvisí také s rychlostí proudění vzduchu. Výpočtový vzorec relativní vlhkosti měřené suchým a mokřým teploměrem je teoreticky odvozen jako:

$$U = \frac{e}{e_s} \times 100\% = \frac{e_w - AP(t_s - t_w)}{e_s} \times 100\% \quad (12)$$

kde U je relativní vlhkost, e je tlak par vody ve vlhkém vzduchu (kPa), e_s je tlak nasycené vodní páry při teplotě suchého teploměru t_s nad čistou kapalnou vodou (kPa), e_w je tlak nasycené vodní páry při teplotě vlhkého teploměru t_w nad čistou kapalnou vodou (kPa), t_s je teplota suchého teploměru ($^{\circ}\text{C}$), t_w je teplota vlhkého teploměru ($^{\circ}\text{C}$), A je psychrometrický koeficient ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), P je atmosférický tlak (kPa). Zvyšující se rychlost proudění vzduchu urychlí odpařování vody mokré punčošky, která obaluje vlhký teploměr. Rychlost proudění má tedy velký vliv na teplotu vlhkého teploměru a tím ovlivňuje výsledky měření relativní vlhkosti. Vliv rychlosti proudění na psychrometrický koeficient znázorňuje následující tabulka 11:

Rychlost proudění (m/s)	Psychrometrický koeficient ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
0,4	$0,819 \times 10^{-3}$
0,8	$0,734 \times 10^{-3}$
1,5	$0,695 \times 10^{-3}$
3,0	$0,673 \times 10^{-3}$

Tabulka 11: Závislost koeficientu A na rychlosti proudění

Obr. 13 v kapitole 9.3 ukazuje závislost rozdílu relativní vlhkosti vypočítané pomocí různých psychrometrických koeficientů na relativní vlhkosti při různých teplotách vzduchu. Jak je uvedeno ve zmíněné kapitole, při vysoké teplotě a relativní vlhkosti není RH měřená psychrometrem citlivá na rychlost proudění. Při reálném použití je vhodné spojené měření pomocí kapacitního vlhkoměru a psychrometru. Kapacitní vlhkoměr lze použít pro měření při nízké teplotě a nízké vlhkosti, při plném využití pohodlí a vysoké přesnosti čidla vlhkosti.

Polovodičové senzory mají obvykle omezený teplotní rozsah, proto jsou vhodnější pro měření při nižších teplotách. Vyšší teploty a RH pak lépe reprezentuje psychrometrické měření.

Pro stanovení nejistoty měření RH pomocí psychrometru vycházíme z následujících předpokladů:

- (1) Měření je provedeno v klimatické komoře s rozsahem (5 až 95) % RH, stabilita RH $\pm 0,8$ % RH, homogenita RH je $\pm 1,0$ % RH.
- (2) Psychrometr představují dva platinové odporové teploměry s maximální dovolenou chybou měření teploty $\pm 0,15$ $^{\circ}\text{C}$.
- (3) Tlakoměr měří barometrický tlak s rozsahem měření (0 až 130) kPa a přesností 0,1 % FS, maximální dovolená chyba je tedy $\pm 0,13$ kPa.
- (4) Anemometr měřící rychlost proudění má deklarovanou nejistotu měření $U = 0,16$ m/s (pro $k=2$).

Psychrometr umístíme do geometrického středu testovacího boxu s konstantní teplotou a vlhkostí a vedle psychrometru umístíme tlakoměr a anemometr pro měření tlaku a rychlosti proudění. Po dosažení konstantních hodnot nastavené teploty a RH zaznamenáváme desetkrát v intervalu 1 minuty teplotu suchého teploměru, teplotu vlhkého teploměru,

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

hodnotu tlaku a hodnotu rychlosti proudění. Příklad je vypočten pro konstantní teplotu komory 20 °C a teplotu vlhkého teploměru 15 °C. Průměrné hodnoty měření jsou následující:

TLAK 101,0 kPa; směrodatná odchylka 0,05 kPa,
RYCHLOST PROUDĚNÍ 3,0 m/s; směrodatná odchylka 0,07 m/s,
TEPLOTA SUCHÉHO TEPLoměRU 20,1 °C; směrodatná odchylka 0,07 °C,
TEPLOTA VLHKÉHO TEPLoměRU 15,0 °C; směrodatná odchylka 0,05 °C.

Měřené hodnoty odpovídají RH = cca 57,8 %.

10.2.2. Matematický model a koeficient citlivosti

Matematický model měření je znázorněn vzorcem (12) v předchozí kapitole. Při vyhodnocení nejistoty jsou jmenovité hodnoty teploty suchého teploměru 20 °C, teploty vlhkého teploměru 15 °C, atmosférického tlaku 101,0 kPa a rychlosti proudění 3,0 m/s. Nejistota empirického vzorce je zanedbána, uvažovány jsou pouze nejistoty způsobené psychrometrickým koeficientem, atmosférickým tlakem, teplotou suchého teploměru a teplotou vlhkého teploměru. Citlivostní koeficienty každého vlivu jsou:

$$c_1 = \frac{\partial U}{\partial A} = -\frac{P(t_s - t_w)}{e_s} \quad (13)$$

$$c_2 = \frac{\partial U}{\partial P} = -\frac{A(t_s - t_w)}{e_s} \quad (14)$$

$$c_3 = \frac{\partial \delta}{\partial t_s} = -\frac{AP}{e_s} \quad (15)$$

$$c_4 = \frac{\partial U}{\partial t_w} = \frac{AP}{e_s} \quad (16)$$

kde c_1 , c_2 , c_3 a c_4 jsou citlivostní koeficienty psychrometrického koeficientu, barometrického tlaku, teploty suchého a vlhkého teploměru. Měření uvedených veličin není korelované, kombinovaná standardní nejistota je tedy:

$$u_c^2 = c_1^2 u^2(A) + c_2^2 u^2(P) + c_3^2 u^2(t_s) + c_4^2 u^2(t_w) \quad (17)$$

kde $u(A)$, $u(P)$, $u(t_s)$ a $u(t_w)$ jsou standardní nejistoty uvedených veličin.

Tlak nasycené vodní páry při teplotě suchého teploměru e_s vypočteme z Magnusova vztahu:

$$e_s = e_0 * 10^{(7,45 * t_s) / (235 + t_s)} = 6,1 * 10^{(7,45 * 20,1) / (235 + 20,1)} = 23,57 \text{ hPa} \quad (18)$$

kde e_0 je tlak nasycené vodní páry při teplotě 0 °C.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

10.2.3. Standardní nejistota psychrometrického koeficientu

Při měření rychlosti proudění vzduchu byla z naměřených hodnot stanovena směrodatná odchylka (nejistota typu A) o velikosti $u_1(v) = s(v) = 0,07 \text{ m/s}$. Rozšířená nejistota hodnoty rychlosti proudění $3,0 \text{ m/s}$ měřená anemometrem je $0,16 \text{ m/s}$ (pro $k = 2$), takže standardní nejistota měření rychlosti proudění $u_2(v) = 0,08 \text{ m/s}$. Celková standardní nejistota měření rychlosti je tedy

$$u(v) = \sqrt{u_1(v)^2 + u_2(v)^2} = 0.11 \text{ m/s} \quad (19)$$

Nejistota psychrometrického koeficientu je závislá na nejistotě rychlosti proudění. Experimentálně bylo zjištěno, že psychrometrický koeficient je nepřímo úměrný rychlosti proudění a vztah mezi nimi je následující:

$$A = \left(65 + \frac{6.75}{v} \right) \times 10^{-5} \quad (20)$$

Podle vzorce (20) lze standardní nejistotu psychrometrického koeficientu vypočítat jako:

$$u_1 = \left| \frac{\partial A}{\partial v} \right| u(v) = 0,825 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1} \quad (21)$$

kde u_1 je standardní nejistota psychrometrického koeficientu.

10.2.4. Standardní nejistota barometrického tlaku

Směrodatná odchylka (nejistota typu A) při měření barometru byla $u_1(P) = s(P) = 0,05 \text{ kPa}$.

Barometrický tlak je měřen barometrem, jehož přesnost je deklarována jako $0,1 \text{ \% FS}$ a max. nejistota měřidla je $\pm 0,13 \text{ kPa}$ ($k = 2$). Standardní nejistota měřidla je tedy:

$$u_2(P) = \frac{0.13}{2} \text{ kPa} = 0.05 \text{ kPa} \quad (22)$$

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

Standardní nejistota měření tlaku je tedy:

$$u_2 = \sqrt{u_1(P)^2 + u_2(P)^2} = 0.07 \text{ kPa} \quad (23)$$

10.2.5. Standardní nejistota suchého teploměru

Směrodatná odchylka měřených hodnot teploty byla určena jako $u_1(t_s) = s(t_s) = 0,07 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota suchého teploměru se měří teploměrem s maximální dovolenou chybou $\pm 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$. Předpokládáme rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti, takže standardní nejistotu teploty při barometrickém tlaku lze vypočítat jako:

$$u_2(t_s) = \frac{0.15}{\sqrt{3}} \text{ }^\circ\text{C} = 0.0867 \text{ }^\circ\text{C} \quad (24)$$

Standardní nejistota teploty suchého teploměru je tedy:

$$u_3 = \sqrt{u_1(t_s)^2 + u_2(t_s)^2} = 0.11 \text{ }^\circ\text{C} \quad (25)$$

10.2.6. Standardní nejistota vlhkého teploměru

Směrodatná odchylka měřených hodnot teploty byla určena jako $u_1(t_w) = s(t_w) = 0,07 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota vlhkého teploměru se měří teploměrem s maximální dovolenou chybou $\pm 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$. Předpokládáme rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti, takže standardní nejistotu teploty při barometrickém tlaku lze vypočítat jako:

$$u_2(t_w) = \frac{0.15}{\sqrt{3}} \text{ }^\circ\text{C} = 0.0867 \text{ }^\circ\text{C} \quad (26)$$

Standardní nejistota teploty vlhkého teploměru je tedy:

$$u_4 = \sqrt{u_1(t_w)^2 + u_2(t_w)^2} = 0.11 \text{ }^\circ\text{C} \quad (27)$$

Jednotlivé složky uvedeme v přehledné tabulce včetně citlivostních koeficientů:

Zdroj nejistoty	Složka standardní nejistoty u_i	Citlivostní koeficient c_i	Přepočtená složka standardní nejistoty $ c_i \cdot u_i$
Psychrometrická konstanta	$0,825 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$-218,541 \text{ }^\circ\text{C}$	$1,803 \times 10^{-4}$
Barometrický tlak	$0,07 \text{ kPa}$	$-0,00146 \text{ kPa}^{-1}$	$1,022 \times 10^{-4}$
Suchý teploměr	$0,11 \text{ }^\circ\text{C}$	$-0,02884 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$3,172 \times 10^{-3}$
Vlhký teploměr	$0,11 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,02884 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$3,172 \times 10^{-3}$

Tabulka 12: Výpočet nejistoty měření psychrometru

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

Z tabulky je vidět, že při dostatečné rychlosti proudění vzduchu jsou hlavní složkou nejistoty relativní vlhkosti měřené psychrometrem nejistoty měření teploty. Kdybychom provedli rozbor nejistoty pro hodnoty psychrometrické konstanty dle tabulky 11, zjistíme, že u malých rychlostí se nejistota konstanty A zvyšuje až o dva řády a stává se dominantní složkou nejistoty RH.

Kombinovaná nejistota relativní vlhkosti je tedy:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (c_i u_i)^2} \quad (28)$$

Do výpočtu nejistoty je třeba ještě zahrnout stabilitu a homogenitu použité komory, která je uvedena v úvodu příkladu. Jestliže u obou veličin uvažujeme rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti, vychází standardní kombinovaná nejistota měření spolu s nejistotou dle vzorce (28) $u = 0,87 \%$ RH, rozšířená nejistota pro $k = 2$ pak $U = 1,7 \%$ RH.

10.2.7. Shrnutí

Nejčastěji vyjadřovanými parametry vlhkosti vzduchu jsou teplota rosného bodu a relativní vlhkost. Vzhledem k tomu, že psychrometry mají nízké náklady na pořízení, jednoduchou údržbu, vysokou teplotní odolnost, nemusíme se obávat kondenzace a není snadné je poškodit, jsou široce používány při měření relativní vlhkosti v průmyslové a zemědělské výrobě, měření vlhkosti plynů, ochraně životního prostředí a dalších oblastech. Při měření vlhkosti psychrometrem musíme analyzovat vliv rychlosti proudění na nejistotu výsledků měření. Podle L [17] ukazují výsledky analýzy, že:

- (1) Při vysoké teplotě a RH není RH měřená psychrometrem citlivá na rychlost proudění. S poklesem teploty vzduchu a relativní vlhkosti se vliv rychlosti na měřenou RH zvyšuje.
- (2) Nejistota rychlosti proudění má důležitý vliv na kombinovanou nejistotu RH měřenou psychrometrem. Nejistota způsobená barometrickým tlakem je relativně malá.
- (3) Nejistota výsledků měření klesá s rostoucí relativní vlhkostí a rostoucí rychlosti proudění za podmínek konstantní teploty suchého teploměru.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

10.3. Kapacitní vlhkoměry

U kapacitních měřidel je možná pouze kalibrace přímo v relativní vlhkosti při dané teplotě. Při kalibraci relativní vlhkosti pouze při jedné teplotě je možné použití pouze v rozsahu kalibrované relativní vlhkosti při kalibrované teplotě, kde se může teplota lišit maximálně o ± 10 °C. Pokud chceme tento vlhkoměr používat pro měření relativní vlhkosti při různých teplotách, je nutné mít ho zkalibrován na relativní vlhkost při minimální teplotě, střední teplotě (obvykle 23 °C) a maximální teplotě a počítat s lineárním šířením chyby relativní vlhkosti mezi jednotlivými kalibrovanými teplotami.

Např. u 50 % RH při 23 °C je naměřená chyba 1,0 % RH a u 50 % RH při 75 °C je naměřená chyba 2,0 % RH. Pokud pak použijeme vlhkoměr pro 50 % RH při 50 °C je vypočítaná chyba 1,5 % RH a je nutné doplnit do zdrojů nejistoty měření odhad chyby tohoto výpočtu.

Musíme si dávat pozor na čistotu měřicího čidla daného vlhkoměru, což se týká hlavně externích výkonů při měření ve znečištěných prostorech. Kapacitní vlhkoměry jsou náchylné na hysterezi, tj. po kalibraci vysoké vlhkosti je nutné vlhkoměr před dalším použitím vysušit nebo ho pro další měření použít až následující den. Další nepříjemnou vlastností těchto vlhkoměrů je drift hodnot, který se zvětšuje s častým měřením extrémních hodnot, tj. vysokých vlhkostí, vysokých teplot a podnulových teplot (pokud se vlhkoměr nechá v klimakomoře při kalibraci podnulových teplot).

10.3.1. Příklad výpočtu nejistoty měření kapacitním snímačem

V tabulce 13 je příklad výpočtu nejistoty měření kapacitním snímačem (etalonem) v klimatické komoře dle doporučení výrobce Rotronic. Jde o měření následujících parametrů: 23 °C a 80 % RH. Vliv teplotního pole v komoře je zřejmý z poslední složky nejistoty. Vliv teploty vychází z normy ČSN EN 60068-3-11, která se zabývá výpočtem nejistoty měření v klimatických komorách. Homogenita a stabilita jsou parametry, které současně ovlivňují teplotní i vlhkostní pole. Uvedená norma ale respektuje skutečnost, že i měření teploty je zatíženo nejistotou měření a její velikost ovlivňuje i měření RH komory. Do nejistoty měření teploty jsou přitom min. zařazeny nejistota kalibrace snímače teploty, jeho drift a směrodatná odchylka průměrné hodnoty odečtené teploty a rozlišení údaje teploty. Citlivostní koeficient lze bez složitých výpočtů stanovit následovně:

V kalkulátoru vlhkosti (např. <https://www.processsensing.com/en-us/humidity-calculator/rotronic/>) si vypočteme absolutní vlhkost pro vstupní parametry 23 °C / 80 % RH. Absolutní vlhkost je v uzavřeném prostoru konstantní, do kalkulátoru zadáme místo relativní vlhkosti vlhkost absolutní a teplotu 22 °C resp. 24 °C. Rozdíl vypočtených relativních vlhkostí pro tyto teploty oproti 80 % RH definuje citlivostní koeficient v jednotce % RH / °C. Rozdíly obou teplot se mohou nepatrně lišit, pro přepočet můžeme uvažovat průměrnou hodnotu.

Jestliže by měřený bod nebyl současně kalibračním bodem snímače, bylo by vhodné uvažovat možnou chybu dopočtu v mezilehlých bodech, která bývá v řádu nízkých desetin % RH. Obdobně je tomu v případě použití měřidla v celém provozním rozsahu měření komory. Kalibrace snímače RH nikdy spojitá nebude a bude zahrnovat pouze vhodně zvolené body teploty / RH tak, abychom mohli odhadnout nejistotu měření v libovolném bodě. Jestliže měřený bod nebude současně bodem kalibračním, musíme zvažovat chybu dopočtu obdobně jako v úvodu odstavce.

Při kalibraci bychom museli zahrnout do rozpočtu i vlivy kalibrovaného měřidla, kterými obvykle jsou opakovatelnost měření, rozlišení měřidla a při rozdílné konstrukci se může

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

projevit rozdílná dynamika obou měřidel (lze ji odhadnout z chování měřidel při ustalování měřených hodnot).

Zdroj nejistoty	Hodnota	Jednotka	Rozdělení pravděpod.	Koeficient	Standardní nejistota	Citlivostní koeficient	Standardní nejistota (% RH)
Nejistota kalibrace	1,10	% RH	normální	2	0,550	1	0,550
Drift snímače	1,00	% RH	rovnoměrné	1,732	0,577	1	0,577
Rozlišení snímače	0,10	% RH	rovnoměrné	2x1,732	0,029	1	0,029
Opakovatelnost měření RH	0,10	% RH	normální	1	0,100	1	0,100
Homogenita vlhkosti	0,20	% RH	rovnoměrné	1,732	0,115	1	0,115
Stabilita vlhkosti	0,10	% RH	rovnoměrné	1,732	0,058	1	0,058
Nejistota měření teploty	0,20	°C	normální	2	0,100	4,96	0,496
Standardní nejistota							0,953
Rozšířená nejistota měření							1,9

Tabulka 13: Příklad měření kapacitním snímačem v klimatické komoře

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

11. Společná pravidla pro všechny typy vlhkoměrů

Maximální rozsah AKL v České republice je (5 až 95) % RH při (10 až 95) °C, pouze některé zahraniční laboratoře dosahují nižších i vyšších vlhkostí, ale u nižších vlhkostí je obvyklé provádět měření v teplotě rosného bodu (bodu ojinění) a ne v relativní vlhkosti. Ohledně rozsahu teploty (jako parametru k relativní vlhkosti) budeme uvažovat maximální přípustný rozsah (0 až 100) °C, i když některé zahraniční laboratoře měří relativní vlhkost i v podnulových teplotách.

Obvyklý krok kalibrace etalonu relativní vlhkosti je 20 % RH. Proto při kalibraci rozsahu (10 až 90) % RH není přípustná třibodová kalibrace (10, 50, 90) % RH, ale musí být provedena kalibrace minimálně pětibodová (10, 30, 50, 70, 90) % RH. Obdobně obvyklý krok kalibrace teploty, mokré teploty a teploty rosného bodu (bodu ojinění) je 20 °C. Maximální přípustný krok je 25 % RH nebo 25 °C. Při kalibraci relativní vlhkosti při různých teplotách platí toto pravidlo pouze pro relativní vlhkost při střední teplotě (obvykle 23 °C), pro relativní vlhkost při minimální teplotě, maximální teplotě a při případných dalších teplotách je dostatečná třibodová kalibrace, tj. minimální vlhkost, střední vlhkost a maximální vlhkost. Dále je přípustné provádět kalibraci vlhkosti při minimální a maximální teplotě každý druhý cyklus kalibrace vlhkosti při střední teplotě (obvykle 23 °C), tj. např. u kalibrace kapacitního etalonu vlhkosti každý rok kalibrujeme (10, 30, 50, 70, 90) % RH při 23 °C a jednou za dva roky (10, 50, 90) % RH při 10 °C a při 90 °C. V tomto případě je ale pak nutné zvýšit nejistotu měření, protože neznáme aktuální chyby vlhkosti při minimální a maximální teplotě.

Návod pro stanovení akceptovatelných hodnot nejistot v oboru vlhkosti vzduchu nabízí Mezinárodní úřad pro míry a váhy BIPM v rámci dvou svých dokumentů:

prvním je „**Review Protocol for Humidity CMC's**“

(<https://www.bipm.org/documents/20126/30131925/CMC+Review+Protocol+-+Humidity/0dcad2df-4a6c-8cd4-2575-522c5dc47b94>)

a druhým „**Review Protocol for Relative Humidity CMC's**“

(<https://www.bipm.org/documents/20126/30131958/CMC+Review+Protocol+-+Relative+humidity/f422431b-c083-3e31-4082-77eade4b6b73>).

Dokumenty jsou sice určeny pro národní metrologické orgány, ale využitelné jsou např. návrhy reálných dosažitelných hodnot nejistot. V prvním citovaném dokumentu je mj. uvedena tabulka, které uvádí vazbu mezi absolvovaným zkoušením způsobilosti a rozsahem měření laboratoře. V určitém rozsahu teploty rosného bodu (bodu ojinění) je možné, aby laboratoř pracovala v lehce rozšířeném rozsahu měření oproti rozsahu měření pokrytém zkoušením způsobilosti. Možné zvětšení rozsahu je patrné z tabulky 14 (na další straně).

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

Teplotní rozsah rosného bodu (bodu ojinění) pokrytý zkoušením způsobilosti	Akceptovatelné rozšíření rozsahu měření
$-35\text{ °C} \leq t_{dL}, t_{dH} \leq +45\text{ °C}$	$t_{dMIN} = t_{dL} - 10\text{ °C}$ nebo $t_{dMIN} = -40\text{ °C}$ (platí vyšší hodnota) $t_{dMAX} = t_{dH} + 10\text{ °C}$ nebo $t_{dMAX} = +50\text{ °C}$ (platí nižší hodnota)
$-75\text{ °C} \leq t_{dL}, t_{dH} \leq -35\text{ °C}$ a $+45\text{ °C} \leq t_{dL}, t_{dH} \leq +75\text{ °C}$	$t_{dMIN} = t_{dL} - 5\text{ °C}$ nebo $t_{dMIN} = -75\text{ °C}$ (platí vyšší hodnota) $t_{dMAX} = t_{dH} + 5\text{ °C}$ nebo $t_{dMAX} = +75\text{ °C}$ (platí nižší hodnota)
$t_{dL}, t_{dH} < -75\text{ °C}$ a $t_{dL}, t_{dH} > +75\text{ °C}$	Rozšíření nepovoleno

Tabulka 14: Možné vazby rozsahu měření laboratoří a zajištěním zkoušení způsobilosti

Obdobnou vazbu by bylo možné vytvořit i pro relativní vlhkost, ale bylo by nutné respektovat i teplotu vzduchu. Na základě takto vytvořeného doporučení je možné posuzovat i rozsah měření laboratoře při účasti v PT. Důležitý je také vhodný interval účasti v PT. Při respektování teplotní závislosti měřidel a s ohledem na ekonomické aspekty doporučujeme min. 1x za dva roky účast v PT při základní teplotě (20 až 25) °C a jednou v rámci akreditačního cyklu účast v PT při jiných teplotách. Kalibrace kapacitních snímačů by měla být prováděna 1x ročně při základní teplotě a jednou za dva roky ve zbývajících teplotách dle úvodu této kapitoly. Kalibrace psychrických a rosnobodových vlhkoměrů by měla být prováděna v závislosti na driftu snímačů. U nových měřidel by byla vhodná obdobná kalibrace jako u kapacitních snímačů obzvláště v případě kalibrace pouze relativní vlhkosti.

V prvním dokumentu je také uvedena tabulka tzv. „nepodkročitelné“ hodnoty nejistoty teploty rosného bodu, viz tabulka 15. Uvedené hodnoty nejistot byly stanoveny na základě výsledků mezinárodních zkoušení způsobilosti EUROMET P511 a APMP K6. Nejistoty byly určeny jako dvojnásobek 75. percentilu vypočteného z nejistot deklarovaných v rámci uvedených porovnání.

t_D (°C)	-60	-50	-40	-30	-20	-10	5	15	30	45	60	75
U_{min} (°C)	0,32	0,26	0,22	0,18	0,16	0,16	0,16	0,18	0,20	0,20	0,20	0,20

Tabulka 15: Doporučené minimální (low limit based) hodnoty nejistot t_D .

Druhý dokument se zabývá speciálně relativní vlhkostí a obdobně jako v prvním případě obsahuje tabulku „nepodkročitelných“ hodnot nejistot RH ve vazbě na velikost měřené teploty a RH. Text dokumentu uvádí, že pokud je údaj o nejistotě větší než odpovídající hodnota v tabulce 16 a je poskytnut odpovídající rozpočet nejistot, pak lze nejistotu považovat za přijatelnou. Tabulka platí pro psychrometry a snímače RH. Hodnoty jsou uvedeny v % RH, pro teploty nižší než 0 °C je RH vztažena k povrchu ledu.

V roce 1996 publikoval anglický NMI NPL encyklopedii „A Guide to the Measurement of Humidity“, ve které uveřejnil také tabulku 17 vlivu teplotní změny 1 °C na RH při různé teplotě a velikosti RH. Tabulka měla především demonstrovat nesymetričnost účinků takové změny. Hodnoty v tabulce jsou v % RH.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

t (°C) RH (%)	-60	-50	-40	-30	-20	-10	5	15	30	45	60	75	90
98	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,8	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0
90	5,0	4,5	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	1,9	1,9	1,8	1,7	1,7	1,7
70	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,7	1,7	1,7
50	3,0	2,5	2,0	2,0	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4
30	2,0	2,0	1,5	1,5	1,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
10	---	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
2	---	---	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Tabulka 16: Doporučené min. hodnoty nejistot pro měření relativní vlhkosti

Relativní vlhkost (% RH)	Teplota (°C)				
	10	20	30	50	70
10	±0,7	±0,6	±0,6	±0,5	±0,5
50	±3,5	±3,2	±3,0	±2,6	±2,3
90	±6,3	±5,7	±5,4	±4,6	±4,1

Tabulka 17: Vliv teplotní změny 1 °C na změnu RH dle NPL

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

12. Doporučení pro tvorbu přílohy osvědčení o akreditaci v oboru vlhkost vzduchu

Doporučení je koncipováno tak, aby byla příloha osvědčení o akreditaci pokud možno co nejjednodušší a obsahovala stejně jako v jiných oborech parametry pro dosažení nejmenší nejistoty měření. Při samotném dozoru je pak nutné zkontrolovat, jak laboratoř přistupuje k různým typům měřidel, parametrům měřené veličiny (vlhkost vzduchu při různých teplotách) a principům kalibrace (pokud má laboratoř více vlhkosních generátorů nebo více etalonů). Doplněním k této části jsou i kap. 8.1 a příslušné části kap. 8.2.

12.1. Kalibrovaná veličina / Předmět kalibrace

Jako kalibrovaná veličina by se měla uvádět relativní vlhkost, nebo teplota rosného bodu (ta je v ČR akreditovaně kalibrována pouze na ČMI).

Do předmětu kalibrace patří typy kalibrovaných vlhkoměrů, tj. absorpčně-deformační (mechanický) vlhkoměr, rosnobodový vlhkoměr, psychrometrický vlhkoměr a kapacitní vlhkoměr. Dále je možné kalibrovat vlhkosní generátor a klimatickou komoru s možností charakterizace (měření homogenity a stability). Poslední možností jsou měřicí řetězce vlhkosti (měřidla vlhkosti ve skladech, výrobních linkách, muzeích apod.).

12.2. Jmenovitý rozsah

Rozsahy hodnot vlhkosti je nutné uvádět ve vazbě na společnou nejistotu měření. Jednotkou v relativní vlhkosti je % RH a v teplotě rosného bodu °C.

12.3. Parametry měřené veličiny

Do parametrů patří teplotní rozsah měření relativní vlhkosti. Jak je uvedeno v kap. 10, přístup ke specifikaci teplotního rozsahu závisí na způsobu kalibrace etalonového měřidla RH. Pro všechny typy uvažovaných měřidel platí v souladu s uvedenou kapitolou:

- Při kalibraci relativní vlhkosti pouze při jedné teplotě je možné použití měřidla v celém rozsahu kalibrované relativní vlhkosti při teplotě, kde se může teplota lišit maximálně o ± 10 °C od teploty kalibrace.
- Při kalibraci vlhkoměru v relativní vlhkosti a použití vlhkoměru pro měření relativní vlhkosti při různých teplotách je nutné mít ho zkalibrován na relativní vlhkost při minimální teplotě, střední teplotě (obvykle 23 °C) a maximální teplotě a počítat s lineárním šířením chyby relativní vlhkosti mezi jednotlivými kalibrovanými teplotami. V tom případě je nutné uvádět v POA příslušná teplotní rozmezí platnosti nejistoty RH, která budou odpovídat uvedené kalibraci, doplněné o výpočet nejistoty CMC dle uvedených příkladů.
- U rosnobodových vlhkoměrů je možná (je preferována) kalibrace teploty rosného bodu (bodů ojiňení) a teploty okolí. Při této kalibraci je možné používat daný vlhkoměr pro různé relativní vlhkosti při různých teplotách, ale nesmí dojít k překročení kalibrovaného rozsahu teploty rosného bodu (bodů ojiňení) a teploty okolí. Vzhledem k tomu, že nejistota v POA musí být uvedena v % RH, je nutné provést přepočty pomocí citlivostních koeficientů z nejistoty teploty rosného bodu

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

(bodu ojiňení) a z nejistoty teploty okolí (návod je uveden v kapitole 10.1.1). Pokud pak pro stejnou hodnotu RH při různých teplotách okolí vychází různá nejistota měření, je nutné dané teplotní rozmezí, pro které platí stejná nejistota měření uvést v parametrech měřené veličiny.

- U psychrometrů je také možnost kalibrace samostatných teploměrů. Při kalibraci mokré a suché teploty je možné používat daný vlhkoměr pro různé relativní vlhkosti při různých teplotách, ale nesmí dojít k překročení kalibrovaného rozsahu mokré a suché teploty. Vzhledem k dalším nevhodným vlastnostem tohoto měření popsanych v jiných kapitolách zprávy, je nutné mít zkalibrované alespoň dvě hodnoty relativní vlhkosti pro kontrolu, že je psychrometr jako celek v pořádku a že je výpočet ze suché a mokré teploty odpovídá údajům měřidla (doporučení viz kap. 10.2 zprávy). Vzhledem k tomu, že nejistota psychrometrů je uváděna v % RH, musí být v POA nejistota přepočtena v závislosti na nejistotě kalibrace teploměrů a kontrolního měření RH. Teplotní rozmezí, pro které platí uvedený výpočet, jsou pak uvedena v parametrech měřené veličiny. Návod na přepočet nejistoty měření teploty na nejistotu RH je uveden v kapitole 10.2.1.

V případě kalibrace teploty rosného bodu je nejistota vyjádřena ve °C a parametry měřené veličiny se neuvádí.

12.4. Nejnížší udávaná rozšířená nejistota měření

Může se jednat o absolutní vyjádření nejistoty měření, tj. hodnoty v % RH u relativní vlhkosti a ve °C u teploty rosného bodu, nebo může být nejistota uvedena rovnicí. Jedná se o hodnoty při použití nejlepšího vybavení laboratoře (generátoru vlhkosti a etalonu) obvykle v definovaném rozsahu teploty okolo 23 °C a v dalších teplotních rozsazích dle kapitoly 11.

12.5. Princip kalibrace

Do principu kalibrace patří jednak způsob generování vlhkosti (nasycené solné roztoky, vlhkosťní generátor, klimatická komora) a jednak druh použitého etalonu (rosnobodový vlhkoměr, psychrometrický vlhkoměr, kapacitní vlhkoměr) pro dosažení nejnížší nejistoty měření. Pokud má laboratoř více generátorů a etalonů, zde se neuvádí, ale je nutné zkontrolovat přístup laboratoře k nejistotě měření při použití jiného generátoru nebo etalonu.

12.6. Identifikace kalibračního postupu

Do identifikace kalibračního postupu patří interní označení postupu dle řízené dokumentace laboratoře. Z postupu musí být zřejmé zdrojové dokumenty použité při jeho vytvoření.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

13. Další výstupy z řešení úkolu

Autoři předpokládají, že kromě zprávy budou využity již tradiční výstupy, tj. nabídnutí článku do časopisu Metrologie a uspořádání semináře pro odbornou veřejnost. V průběhu řešení nebyly identifikovány potřeby ani příležitosti pro další formu výstupu.

13.1. Článek pro časopis Metrologie

Obsahem článku bude jako již obvykle upravený a zkrácený obsah zprávy s vypuštěnými pasážemi, které jsou určeny pouze pro ÚNMZ. Rozsah textu bude respektovat potřeby vydavatele a proti zprávě bude zkrácen a zjednodušen. Osnova článku bude v základu respektovat členění vlastní zprávy.

13.2. Seminář pro odbornou veřejnost

Základem otevřeného semináře bude prezentace dosažených výsledků pro širší odbornou veřejnost. Přednášejícími budou řešitelé, účastníci dostanou podkladové materiály vytvořené řešiteli při přípravě prezentací.

13.3. Koncepce prezentace

Předpokládá se, že řešitelé si rozdělí témata, k nimž zpracují grafickou podobu zprávy, kterou při prezentacích doplní ústním komentářem. Přednášející se budou střídat podle potřeby s přihlédnutím k autorství příslušných částí.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

14. Shrnutí

Předkládaná zpráva popisuje řešení úkolu, který navazuje na předcházející úkoly PRM, které ČIA zpracovával od roku 2017. Ty se v různých oborech věnovaly především sjednocování principů kalibrace a jimi dosahovaných nejistot. V posledních letech na důležitosti získaly principy (metody, postupy) kalibrací jako podstatná informace o kalibračních laboratořích a jejich CMC, především jako kritérium pro rychlý odhad, zda jsou uváděné nejistoty reálné. Informace z POA mají zákazníkům sloužit jako podklad k odhadu, zda je daná kalibrační laboratoř vhodná pro potřeby zákazníků. Dlouhodobým cílem ČIA je tyto informace sjednotit tak, aby nevznikaly pochybnosti při interpretaci informací v POA uvedených. Rozdílná informace na obdobném místě POA by měla znamenat rozdílnost laboratoří v tomto konkrétním bodě, pokud jsou v daném oboru a postupu laboratoře srovnatelné, měla by i uvedená informace být shodná nebo alespoň dostatečně blízká. Jednotnost také v budoucnu usnadní případný přechod na jinou platformu pro vydávání a zveřejňování POA.

Nejdůležitějším výstupem tohoto úkolu je na tato zpráva, která podrobně popisuje celé řešení zadaného úkolu a poskytuje čtenáři vodítka, jak číst a chápat rozsah akreditace jako takový a jeho převedení do jednotné formy, přístupné v podobě přílohy osvědčení o akreditaci. Zpráva je pro akreditované kalibrační laboratoře i odborné posuzovatele ČIA v oboru vlhkost vzduchu souhrnem všech podstatných informací z oboru a jak je aplikovat do POA. Součástí řešeného úkolu byl kritický pohled na platné rozsahy akreditace v oboru nejen českých a zahraničních kalibračních laboratoří, do přehledu jsou zahrnuty i informace o databázi KCDB v oboru vlhkost vzduchu.

Práce se zabývá nejen principy kalibrace, ale všemi poli přílohy pro obor vlhkosti vzduchu. Zásadní doporučení ze zprávy vyplývající je, že kalibrace v oboru vlhkosti vzduchu má stát samostatně mimo doposud definovaný obor fyzikálně-chemických veličin, ale jako termodynamická veličina by měla mít svou samostatnou tabulku v těsném sousedství oboru teplota.

V textu se čtenář dozví, jak uvádět princip kalibrace a jak spočítat nejistoty při kalibraci a hlavně pro nejnižší udávané nejistoty, na jaké parametry je nutné brát zřetel a které lze za určitých okolností zanedbat. Podkročení uváděných hodnot CMC nejistot by kalibrační laboratoř měla obhájit odborně na vysoké úrovni svými teoretickými výpočty nejistot a reálně podložit úspěšnou účastí ve vhodném a přiměřeně náročném programu zkoušení způsobilosti, volnější než doporučovaný přístup k účasti v PT (nebo náhradních aktivitách) také žádá ze strany kalibrační laboratoře významně vyšší riziko neúspěchu při prokazování svých schopností.

Vzhledem k výrazné závislosti RH na teplotě je ve zprávě navržen způsob respektování této závislosti jak při reálném měření, tak v rámci POA s tím, že je ve zprávě řešen teplotní rozsah měření RH v klimatických komorách, tj. max. (0 až 100) °C.

Již tradičně se předpokládá, že kromě zde předkládaného výsledku řešení úkolu Programu rozvoje metrologie na rok 2024 bude časopisu Metrologie nabídnut článek shrnující výsledky řešení a v neposlední řadě bude odborné veřejnosti nabídnuta účast na semináři, na němž autoři kromě prezentace výsledků řešení budou schopni zájemcům podat i další informace k tématu. Zvána bude široká odborná veřejnost, seminář poslouží i jako vzdělávací akce pro pracovníky AKL a odborné posuzovatele ČIA.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

15. Závěr

Autoři předpokládají, že zpracované informace o nejistotách a postupech (principech) kalibrace pomohou sjednotit informace kalibračních laboratoří v oboru vlhkost vzduchu. Kromě prezentace výsledků úkolu široké odborné veřejnosti formou semináře a článkem pro časopis Metrologie, poslouží předkládané řešení úkolu jako základ školení odborných posuzovatelů ČIA. Ti se tak podrobně seznámí s výsledky řešení tohoto úkolu, aby je pak uplatňovali ve své posuzovatelské praxi a rozdíly v informacích o kalibračních laboratořích byly minimalizovány v co možná nejkratší době. Článek v časopisu Metrologie má za cíl stručně seznámit nejširší odbornou veřejnost s výsledkem řešení úkolu a podpořit její zájem o seznámení se s plným rozsahem této zprávy.

Jako podstatná součást výsledku řešení dojde v souladu s interními procesy ČIA také k úpravě formuláře POA a návodu k vyplnění

Řešení tohoto úkolu rozšiřuje počet oborů, kde jsou definována pravidla pro sjednocování veřejně dostupných informací o akreditaci a především rozsahu akreditace kalibračních laboratoří, což zákazníkům a odborné veřejnosti zjednodušuje proces rozhodování, která kalibrační laboratoř může nabízet ty nejvhodnější služby.

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

16. Literatura

- L [1]: Relative Humidity Measurement and Calibration; katalog měřidel a základní teorie verze 3.0, Michell Instruments (www.michell.com).
- L [2]: Sergio A. CARVAJAL, Ciro A. SÁNCHEZ: Temperature effect in the calibration of capacitive humidity sensors; International Journal of Metrology and Quality Engineering 9/2018.
- L [3]: Ing. Miloš KLASNA, Ing. Jan BLAŽEK: Teplotní kompenzace teplotního součinitele při měření relativní vlhkosti plynů; AUTOMA 3/2009.
- L [4]: Tarikul ISLAM, Zaheer UDDIN, Amit GANGOPADHYAY: Temperature Effect on Capacitive Humidity Sensors and its Compensation Using Artificial Neural Networks; Sensors & Transducers, Vol. 191, Issue 8, August 2015, pp. 126-134.
- L [5]: The Capacitive Humidity Sensor – How it Works & Attributes of the Uncertainty Budget; Rotronic Technical Note (ROTRONIC Measurement Solutions – www.rotronic.com).
- L [6]: YING Liu, HONGBO Mo and XIAOLIN Wang: Influence Factors and Uncertainty Analysis of Relative Humidity Measured by Psychrometer; Journal of Physics ICFST-2022.
- L [7]: Mark STEVENS, Tracey COLLIER, Ralph HARRIS: Comparison of Instruments for Measuring Relative Humidity; NPL Report. CBTL6 6.
- L [8]: Anders Bonde KENTVED, Martti HEINONEN, Domen HUDOKLIN: Practical Study of Psychrometer Calibrations; Int J Thermophys (2012) 33:1408–1421.
- L [9]: JIUNYUAN Chen and CHIACHUNG Chen: Uncertainty Analysis in Humidity Measurements by the Psychrometer Method; Sensors 2017, 17, 368, www.mdpi.com/journal/sensors.
- L [10]: H. W. Loescher, C. V. Hanson, T. W. Ocheltree: The Psychrometric Constant Is Not Constant: A Novel Approach to Enhance the Accuracy and Precision of Latent Energy Fluxes through Automated Water Vapor Calibrations; American Meteorological Society, Journal of Hydrometeorology October 2009.
- L [11]: Jarkko RUONALA: Humidity Theory: Understanding Humidity; prezentace fy. VAISALA www.vaisala.com.
- L [12]: Martti HEINONEN: Uncertainty in Humidity Measurements; Publication J4/2006 of the EUROMET Workshop P758.
- L [13]: Mark G. LAWRENCE: The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air, A Simple Conversion and Applications; American Meteorological Society, BAMS February 2005.
- L [14]: Vaisala Oyj: Calculation formulas for humidity; B210973EN-F © Vaisala 2013 [https://web.archive.org/web/20200212215746im/https://www.vaisala.com/en/system/files?file=documents/Humidity Conversion Formulas B210973EN.pdf](https://web.archive.org/web/20200212215746im/https://www.vaisala.com/en/system/files?file=documents/Humidity%20Conversion%20Formulas%20B210973EN.pdf)
- L [15]: Earth Science: How to calculate relative humidity from temperature, dew point, and pressure? <https://earthscience.stackexchange.com/questions/16570/how-to-calculate-relative-humidity-from-temperature-dew-point-and-pressure>

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

- L [16]: Hans LIEBERG: Uncertainty of Measurement: Relative Humidity via Dew Point and Air Temperature; Metrology Rules 2014, [Uncertainty of measurement: relative humidity via dew point and air temperature | Metrology Rules](#).
- L [17] „Review Protocol for Humidity CMC’s“
(<https://www.bipm.org/documents/20126/30131925/CMC+Review+Protocol+-+Humidity/0dcad2df-4a6c-8cd4-2575-522c5dc47b94>)
- L [18] „Review Protocol for Relative Humidity CMC’s“
(<https://www.bipm.org/documents/20126/30131958/CMC+Review+Protocol+-+Relative+humidity/f422431b-c083-3e31-4082-77eade4b6b73>)

	Český institut pro akreditaci, o.p.s. Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3	Celkem 119 stran
		Zpracoval: Ing. Martin Valenta
		Datum zpracování: 22.10.2024

17. Přílohy

1. Plánovací list úkolu programu rozvoje metrologie PRM VII/05/24