

# Teplotní kompenzace teplotního součinitele při měření relativní vlhkosti plynů

Kapacitní polymerní senzory relativní vlhkosti jsou z principu teplotně závislé: kapacita senzoru se mění nejen při změně relativní vlhkosti plynného prostředí, ale také při změně jeho teploty. Je to dáno vlastnostmi použitého polymerního dielektrika.

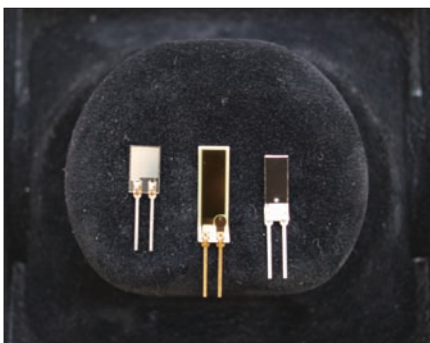
Při kalibraci měřicí sondy je okamžitá kapacita senzoru (v praxi převedené na periodu výstupního signálu hybridního převodníku měřicí sondy) přidělena skutečná relativní vlhkost prostředí. Sonda je kalibrována při určité konstantní teplotě (obvykle +20 až +24 °C). Při měření relativní vlhkosti v prostředí s teplotou rozdílnou od kalibrační neodpovídá naměřená kapacita senzoru skutečné relativní vlhkosti, a proto je nutné zajistit kompenzaci teplotního součinitele použitého senzoru.

Čím větší jsou teplotní odchylky od teploty při kalibraci, tím větší je odchylka výsledku měření od skutečné relativní vlhkosti. Pro přesnou kalibraci je tedy nutné zaznamenat teplotu, při které byla sonda zkalibrována. Součinitel pro kompenzaci vlivu teploty je při této teplotě roven jedné a změřená kapacita senzoru odpovídá skutečné relativní vlhkosti prostředí kalibračního zařízení. Teplotní součinitel ale není konstantní a podle typu použitého senzoru se při změně teploty zvětšuje či zmenšuje.

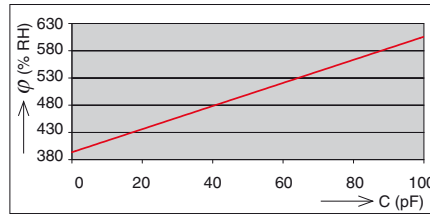
V dalším textu budou popsány senzory relativní vlhkosti použité v měřicích sondách systému Humistar.

## Senzor HC 1000

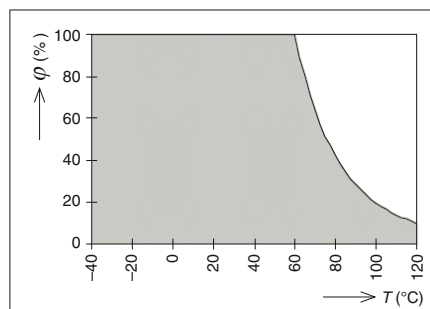
Senzor HC 1000 (obr. 1 vlevo) je stabilní, polymerní kapacitní senzor relativní vlhkosti. Jeho pracovní oblast je -40 až +120 °C (při 100% relativní vlhkosti pouze do 60 °C, viz obr. 2), takže není vhodný pro měření v prostředí s vysokou teplotou. Výhodou senzoru je jeho odolnost proti znečištění. Přibližná změna kapacity v celém rozsahu je 140 pF.



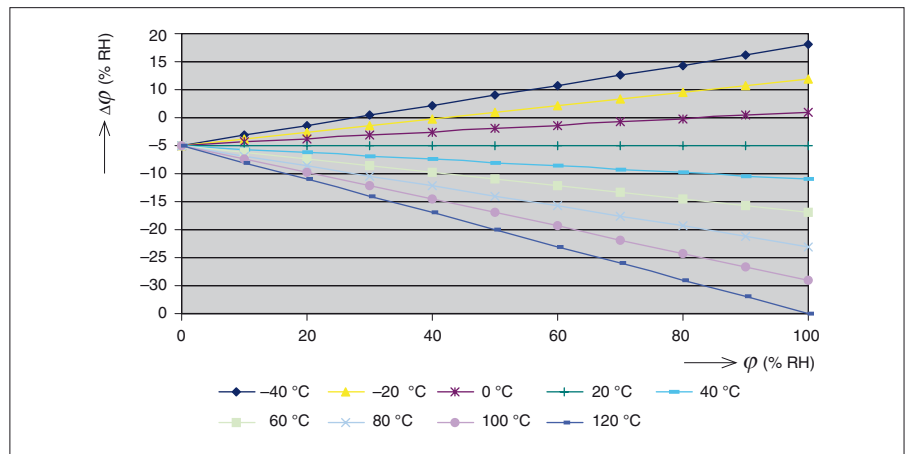
Obr. 1. Senzory relativní vlhkosti – zleva HC 1000, FE 09/1000, MK 3



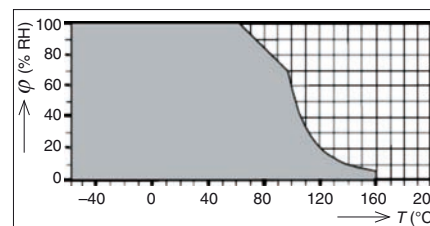
Obr. 2. Závislost kapacity senzoru HC 1000 na relativní vlhkosti



Obr. 3. Pracovní oblast senzoru HC 1000



Obr. 4. Závislost odchylky kompenzované a nekompensované hodnoty relativní vlhkosti na teplotě a relativní vlhkosti pro senzor HC 1000; kalibrační teplota 20 °C



Obr. 5. Pracovní oblast senzoru FE 09/1000

Pro rozsah od 0 do 98 % relativní vlhkosti (RH) je možná lineární aproximace, protože chyba způsobená nelinearitou je menší než 1,5 % RH v celém rozsahu.

Převodní charakteristiku senzoru HC 1000 popisuje vzorec:

$$C_{rh} = C_{76} [1 + h(\varphi - 76) + k] \quad (1)$$

kde

$C_{rh}$  je kapacita při relativní vlhkosti  $\varphi$  (pF),  
 $C_{76}$  kapacita při relativní vlhkosti  $\varphi = 76$  % ( $C_{76} = 500 \pm 50$  pF),  
 $h$  citlivost,  $h = 2\,800 \pm 120$  (ppm/% RH),  
 $\varphi$  relativní vlhkost (% RH),  
 $k$  součinitel daný vztahem

$$k = a_1\varphi + a_2\varphi^{1,5} + a_3\varphi^2 + a_4\varphi^{2,5}$$

kde jednotlivé součinitele jsou

$$\begin{aligned} a_1 &= 2,115\,9 \cdot 10^{-3}, \\ a_2 &= -7,630\,5 \cdot 10^{-4}, \\ a_3 &= 8,947\,0 \cdot 10^{-5}, \\ a_4 &= -3,413\,0 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Technické údaje senzoru HC 1000 jsou v tab. 1, pracovní oblast na obr. 3.

Teplotní závislost je u senzoru HC 1000 vyjádřena vzorcem:

$$\varphi_k = \varphi_m - g\varphi_m(T - T_{kal}) \quad (2)$$

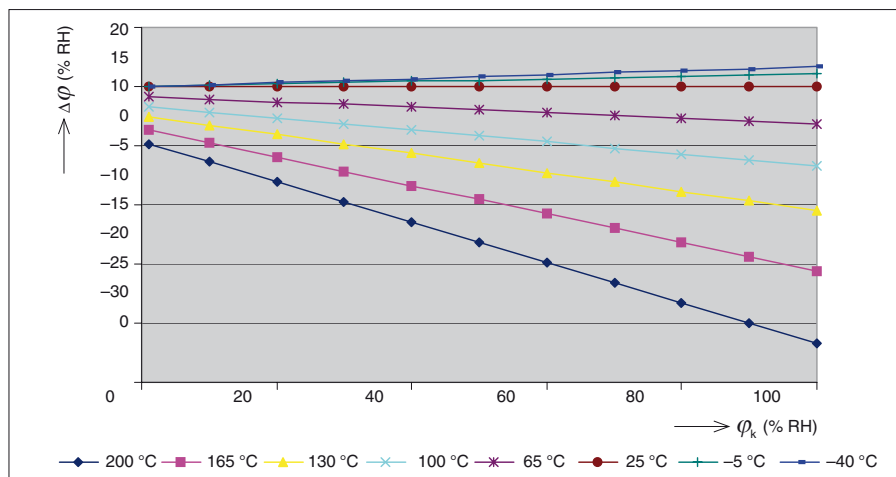
kde

$\varphi_k$  je kompenzovaná relativní vlhkost (% RH),  
 $\varphi_m$  nekompensovaná relativní vlhkost (zjištěná lineárním přepočtem ze signálu senzoru; % RH),

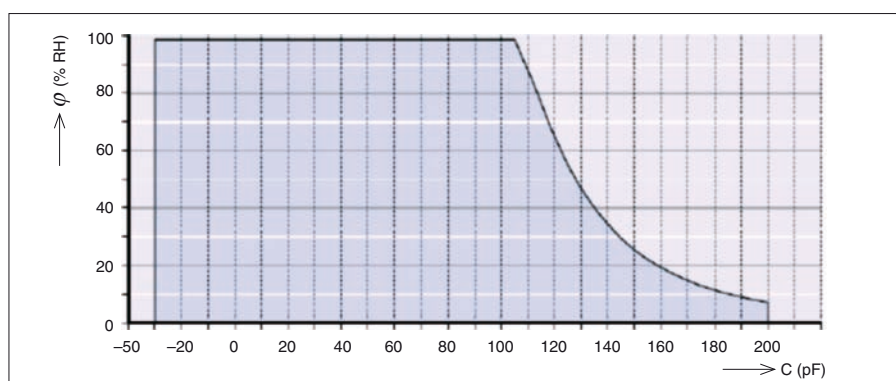
$g$  teplotní součinitel;  $g = (-0,003 \pm \pm 0,000\,3) \text{ K}^{-1}$ ,

$T$  teplota měření (°C),

$T_{kal}$  kalibrační teplota (°C).



Obr. 6. Závislost odchylky kompenzované a nekompenzované hodnoty relativní vlhkosti na teplotě a relativní vlhkosti pro senzor FE 09/1000; kalibrační teplota 25 °C



Obr. 7. Pracovní oblast senzoru MK 33

Je patrné, že rozdíl skutečné a měřené relativní vlhkosti je závislý na teplotě a okamžité relativní vlhkosti. Obě závislosti jsou lineární, takže stačí výstupní signál z měřicí sondy vynásobit příslušným koeficientem závislým na odchylce aktuální teploty od kalibrační. Jelikož je teplotní součinitel  $g$  záporný, kompenzace vlhkosti pro  $T > 20\text{ °C}$  je kladná a pro  $T < 20\text{ °C}$  záporná. Grafické znázornění vztahu je na obr. 4.

Kompenzační koeficient  $K$  je:

$$K = \frac{\varphi_k}{\varphi_m} = \frac{\varphi_m - g\varphi_m(T - T_{kal})}{\varphi_m} = 1 - g(T - T_{kal}) \quad (3)$$

Kompenzační koeficient není závislý na okamžité relativní vlhkosti.

Pro senzor HC 1000 je teplotní kompenzace důležitá i v běžném teplotním rozsahu, jelikož kompenzační koeficient  $K$  je poměrně velký. Například pro teplotu 30 °C je koeficient roven  $K = 1 + 0,003\text{ K}^{-1}(30 - 20)\text{K} = 1,03$  (při kalibrační teplotě 20 °C). Pro relativní vlhkost  $\varphi = 90\%$  je odchylka kompenzované a nekompenzované hodnoty  $\Delta\varphi = 0,003\text{ K}^{-1}\varphi\text{ }90\% \text{ RH} (30 - 20)\text{K} = 2,7\% \text{ RH}$ , což již není zanedbatelné.

### Senzor FE 09/1000

FE 09/1000 (na obr. 1 uprostřed) je kapacitní polymerní senzor, který je využíván pro

nedbatelná jen při pohybu v teplotním intervalu mezi 10 až 40 °C (při kalibrační teplotě 25 °C). Pro teploty mimo tento interval lze kompenzovat vliv teploty podle vzorce:

$$\varphi_k = [\varphi_m + b(T - T_{kal})](c_0 + c_1T + c_2T^2) \quad (4)$$

kde

$b$  je teplotní součinitel;  $b = 0,04$  pro  $T \geq T_{kal}$  a  $b = 0$  pro  $T < T_{kal}$ ,  
 $c_0, c_1, c_2$  jsou koeficienty s hodnotou  $c_0 = 0,98125, c_1 = 6 \cdot 10^{-4}, c_2 = 6 \cdot 10^{-6}$ .

Na obr. 6 je odchylka kompenzované a nekompenzované relativní vlhkosti v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti.

Je zřejmé, že zde při kompenzaci hodnoty při dané teplotě se nevystačí s pouhým násobením kompenzačním koeficientem, protože ten závisí i na relativní vlhkosti.

### Senzor MK 33

Senzor MK 33 patří do skupiny robustních kapacitních polymerních senzorů relativní vlhkosti. Jeho nominální kapacita je přibližně 300 pF a celý vlhkostní rozsah představuje změnu pouze přibližně 50 pF. Jeho hlavními výhodami jsou velká vlhkostně-teplotní pracovní oblast, krátká doba ustálení, odolnost k horké vodě a určitým agresivním plynům a malá hystereze. Nevýhodou je malá citlivost (0,45 pF/% RH). Tento senzor je proto využíván hlavně sondami pracujícími při vysokých teplotách a velkém chemickém zatížení. Technické údaje senzoru jsou v tab. 3, pracovní oblast na obr. 7.

Tab. 1. Technické údaje senzoru HC 1000

Nominální kapacita při 76 % RH	(500 ± 50) pF
Citlivost	1,40 pF/%
Stabilita senzoru (max. odchylka za rok)	do 1 % RH
Doba ustálení $t_{90}$	do 6 s
Odchylka linearity (v rozsahu 0 až 98 % RH)	do 1,5 % RH
Hystereze při 70 % RH	(1,7 ± 0,15) % RH

Tab. 2. Technické údaje senzoru FE 09/1000

Nominální kapacita při 11 % RH	(1 050 ± 50) pF
Citlivost	(2,5 ± 0,5) pF/%
Doba ustálení $t_{90}$	do 10 s
Odchylka linearity (v rozsahu 0 až 95 % RH)	do 1,5 % RH
Hystereze (v rozsahu 0 až 95 % RH)	do 1,5 % RH

Tab. 3. Technické údaje senzoru MK 33

Nominální kapacita při 30 % RH	300 ± 40 pF
Citlivost (v rozsahu 20 až 95 % RH)	0,45 pF/% RH
Doba ustálení $t_{90}$	do 10 s
Odchylka linearity (v rozsahu 20 až 95 % RH)	2 % RH
Hystereze	do 2 % RH

měření relativní vlhkosti vzduchu a jiných neagresivních plynů. Mezi jeho hlavními výhodami patří téměř lineární charakteristika, dobré dynamické chování a zejména velká citlivost, která jej předurčuje k přesnému výpočtu dalších hygrometrických veličin (v kombinaci se senzorem teploty). Technické údaje jsou v tab. 2, pracovní oblast na obr. 5. Teplotní závislost senzoru vlhkosti FE 09/1000 je menší než 0,1 % RH/K. Odchylka je za-

Vztah pro kompenzaci měřené hodnoty je stejně jako u senzoru FE 09/1000 nelineární. Kompenzaci lze vypočítat podle vzorce:

$$\varphi_k = \varphi_m + (d_1\varphi_m + d_2)T + d_3\varphi_m + d_4 \quad (5)$$

kde  $d_1$  až  $d_4$  jsou koeficienty s těmito hodnotami:  $d_1 = 0,001\text{ }1; d_2 = 0,089\text{ }2; d_3 = -0,026\text{ }8; d_4 = -2,079$ .

Vztah (5) platí pro kalibrační teplotu 24 °C.

Závislost odchylky kompenzované a měřené hodnoty na teplotě a relativní vlhkosti pro senzor MK 33 je na obr. 8.

### Kompence naměřené hodnoty

Bez jakékoliv kompenzace vlivu teploty může při velkých teplotách chyba senzorů s polymerním dielektrikem dosáhnout až 25 % RH. Na obr. 9 je na ose  $x$  nekompenzovaná hodnota relativní vlhkosti, vzniklá lineárním přepočtem výstupního signálu senzoru, na ose  $y$  kompenzovaná hodnota relativní vlhkosti. Červená přímka se směrnici 1 jsou hodnoty bez kompenzace, modrá křivka jsou hodnoty po přesné kompenzaci pomocí vzorce a zelená křivka zobrazuje hodnoty po jednoduché kompenzaci s použitím tabulky koeficientů. U tabulkové kompenzace je zřejmé, že relativní vlhkost je správně kompenzována právě při 50 % RH. Graf ukazuje, že i jednoduchý způsob kompenzace pomocí tabulky koeficientů má význam a výrazně zmenšuje chybu měření.

Pro měření relativní vlhkosti při vysokých teplotách a malé relativní vlhkosti je kompenzace absolutně nezbytná. K dosažení velmi vysoké přesnosti měření relativní vlhkosti je třeba použít takový program v mikroprocesoru vlhkoměru, který nepoužívá výpočet kompenzace pomocí kompenzační tabulky, ale za použití algoritmu vycházejícího z matematického vzorce udávaného výrobcem senzoru. Ve výpočetním algoritmu koeficientu musí být zahrnuta nejen okamžitá měřená teplota okolí senzoru relativní vlhkosti, ale i okamžitá měřená relativní vlhkost.

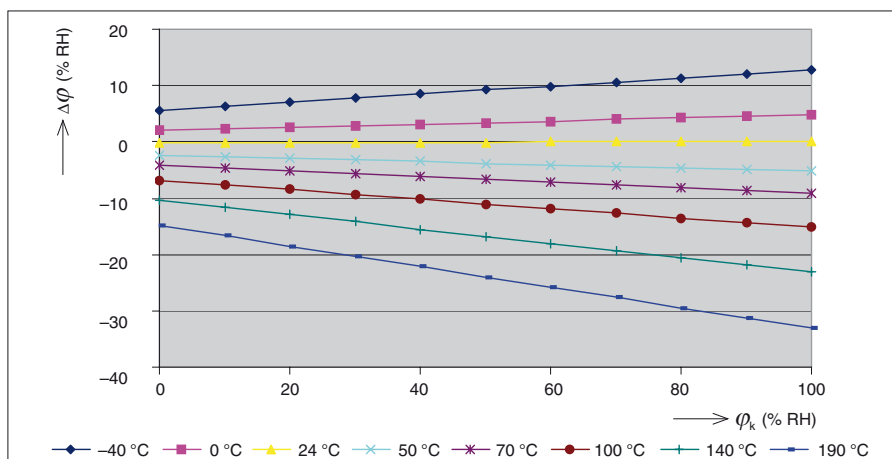
Vzhledem k tomu, že u jednoho vlhkoměru je možné použít různé typy senzorů, je třeba do jeho paměti ukládat dvě nové informace: typ použitého senzoru a kalibrační teplotu měřicí sondy. Teplotu kalibrace je nutné zaznamenat a vložit přímo do výpočetního vzorce.

Ve firmwaru inteligentních vlhkoměrů Humistar jsou uloženy tyto přepočtové vzorce:

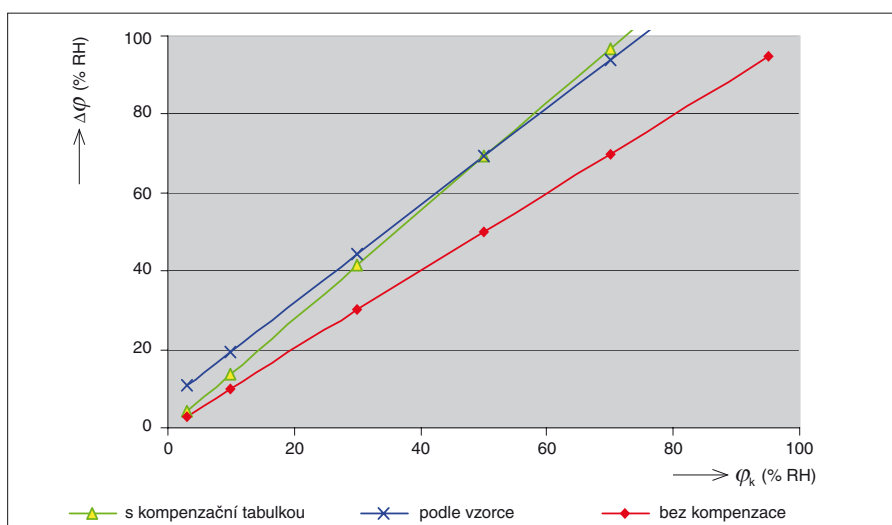
- pro senzor HC 1000 vztah (2),
- pro senzor FE 09/1000 vztah (4),
- pro senzor MK 33 vztah (5).

### Závěr

Při konstrukci elektronických vlhkoměrů a jejich použití je nutné brát v úvahu reálné vlastnosti kapacitních senzorů relativní vlhkosti s polymerním dielektrikem a podmínky měření. Teplotní součinitel senzoru relativní vlhkosti lze zanedbat pouze v úzkém rozmezí okolo kalibrační teploty nebo tam, kde není třeba znát přesnou hodnotu relativní vlhkosti. Obzvláště za vysokých teplot nebo při velmi malých hodnotách relativní vlhkosti je nutné naměřenou hodnotu korigovat. U vlhkoměrů, které nemají automatickou kompenzaci, se použije graf nebo vzorec udávaný výrobcem senzoru.



Obr. 8. Závislost odchylky kompenzované a nekompenzované hodnoty relativní vlhkosti na teplotě a relativní vlhkosti pro senzor MK 33; kalibrační teplota 24 °C



Obr. 9. Kompensovaná a nekompenzovaná relativní vlhkost u senzoru FE 09/1000 při +165 °C

U technologických zařízení, kde velmi záleží na přesnosti měření, je lépe použít vlhkoměrná zařízení s prokazatelnou automatickou kompenzací teplotního součinitele senzoru měřicí sondy. To se vyplatí zejména u hygrometrických veličin, které jsou vypočítávány na základě výsledků měření relativní vlhkosti a teploty, jako jsou např. teplota rosného bodu, absolutní vlhkost, směšovací poměr nebo „vlhká“ teplota.



Obr. 10. Sonda k měření relativní vlhkosti a teploty HTP-7712... se senzory FE 09/1000 a Pt10000

### Literatura:

- [1] KLASNA, M.: *Měření stopové vlhkosti plynů – 1. část*. Automa, FCC Public, Praha, roč. 2006, č. 3, s. 34–35.
  - [2] KLASNA, M.: *Měření stopové vlhkosti plynů – 2. část*. Automa, FCC Public, Praha, roč. 2006, č. 4, s. 20–22.
  - [3] KLASNA, M.: *Technika měření vlhkosti plynů – měření v prostředí s nebezpečím výbuchu*. Automa, FCC Public, Praha, roč. 2007, č. 3, s. 60–61.
  - [4] KLASNA, M.: *Měření vlhkosti plynů v extrémních podmínkách – 1. část*. Automa, FCC Public, Praha, roč. 2007, č. 12, s. 56–57.
  - [5] KLASNA, M.: *Měření vlhkosti plynů v extrémních podmínkách – 2. část*. Automa, FCC Public, Praha, roč. 2008, č. 3, s. 58–60.
  - [6] KLASNA, M.: *Měření vlhkosti stlačeného vzduchu*. Automa, FCC Public, Praha, roč. 2008, č. 11, s. 44–45.
  - [7] BLAŽEK, J.: *Procesní hygrometr*. [Diplomová práce.] ČVUT FEL, Praha, 2008.
- Autoři dále vycházeli z technické dokumentace společností E+E, MELA Sensortechnik a IST.

Ing. Miloš Klasna, CSc., Ing. Jan Blažek,  
SENSORIKA, s. r. o., Praha