

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz



kapitola **3**

KOVOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty

3.1	Odporové platinové snímače teploty	38
3.2	Odporové niklové snímače teploty	43
3.3	Odporové měděné snímače teploty	43
3.4	Měřicí obvody pro kovové odporové snímače teploty	44
3.5	Konstrukce odporových kovových snímačů teploty	50

3 Kovové odporové senzory teploty

Principem odporových kovových čidel teploty je teplotní závislost odporu kovu. Kov si lze představit jako soubor kladných iontů umístěných v mřížkových bodech krystalové mřížky a tzv. elektronového plynu tvořeného souborem chaoticky se pohybujících elektronů. Pro konduktivitu kovu platí

$$\sigma = ne^2 \frac{\tau}{m}, \quad (3.1)$$

kde

- σ je konduktivita,
- n počet elektronů v jednotkovém objemu,
- e elementární náboj,
- τ relaxační čas elektronů,
- m efektivní hmotnost nosiče náboje.

Základní materiálovou konstantou je teplotní součinitel odporu α (K^{-1}), pro který lze napsat rovnici

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\partial(\ln R)}{\partial t} = -\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial t} = \frac{\partial(\ln m)}{\partial t} - \frac{\partial(\ln \tau)}{\partial t} - \frac{\partial(\ln n)}{\partial t}, \quad (3.2)$$

U kovů je jediným teplotně závislým parametrem relaxační čas, jehož hodnota je řádově 10^{-13} s. Pro teploty nižší, než je Debyova charakteristická teplota kovu, platí $\tau \sim 1/T$, kde T (K) je termodynamická teplota kovu. Pro malý rozsah teplot 0°C až 100°C lze používat s určitou nejistotou lineární vztah

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (3.3)$$

kde R_0 je odpor čidla při teplotě 0°C . Lze tak stanovit střední hodnotu teplotního součinitele odporu α

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0}, \quad (3.4)$$

kde R_{100} je odpor čidla při teplotě 100°C .

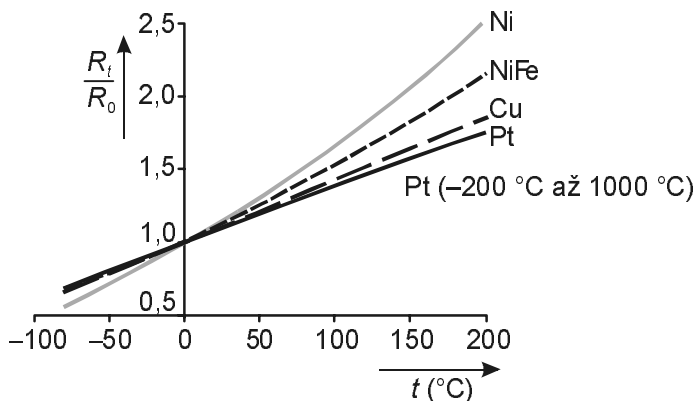
Dalším základním parametrem odporových snímačů teploty je poměr odporů čidla R_{100} při teplotě 100°C a R_0 při teplotě 0°C . Tento poměr se označuje písmenem W dle vztahu

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}, \quad (3.5)$$

Pro větší rozsahy teplot, jak bude dále popsáno, již lineární vztahy nelze použít. Z materiálů vhodných pro realizaci odporových kovových senzorů jsou nejrozšířenější platina, nikl, Balco (Ni-Fe), měď, molybdén a pro extrémně nízké teploty od 0,5 K slitiny Rh-Fe, Pt-Co aj. Teplotní závislost základních materiálů je na obr. 3.1 a vlastnosti v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Materiály používané pro kovové snímače teploty

materiál	$\alpha \cdot 10^2 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	teplotní rozsah (°C)	poměr odporů W_{100}
platina	0,385 až 0,391	-20 až 850	1,3850
nikl	0,617 až 0,675	-70 až +150 (+200)	1,6180
Ni-Fe	0,518 až 0,527	-100 až +200	1,462
měď	0,426 až 0,433	-50 až +150	1,4260

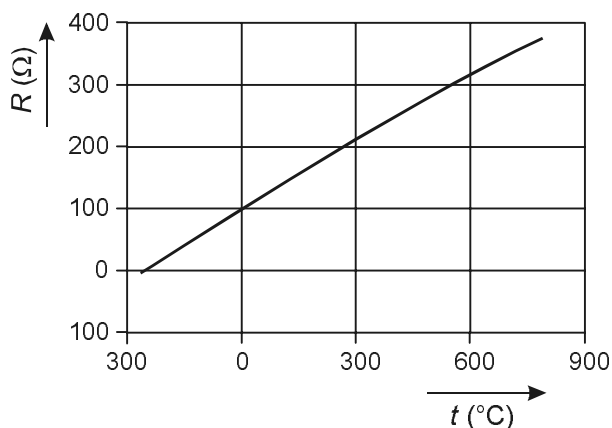


Obr. 3.1 Teplotní závislost odporových kovových snímačů

3.1 Odporové platinové snímače teploty

Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Pro čistotu platiny u provozních snímačů teploty (Pt 100) je normou IEC-751 (IEC-ČSN 751) předepsán poměr elektrického odporu $W_{100} = 1,385$. Závislost odporu čidla na teplotě je na obr. 3.2.

Pro metrologické účely jsou nároky na čistotu platiny vyšší (čistota 99,999 %). Pro posouzení čistoty se vyhodnocuje poměr odporů při bodě tání galia a trojného bodu



Obr. 3.2 Závislost odporu čidla Pt 100 na teplotě

vody. Dle doporučení IEC-751 se platinové měřicí odpory pro průmyslové (provozní) použití dělí do dvou tolerančních tříd dle tab. 3.2 a obr. 3.3. Třída A je stanovena pro rozsah teploty od -200 °C do 650 °C a třída B pro rozsah teploty od -200 °C do 850 °C. Kromě výše uvedených teplotních rozsahů dle IEC-751 se vyrábějí vysokoteplotní snímače až do teploty 1100 °C. Dlouhodobá stabilita je u provozních Pt snímačů kolem $0,05$ %/1000 h. Teplotní závislost měřicího odporu je pro rozsah teploty od -200 °C do 0 °C dána vztahem

$$R_t = R_0 \left[1 + At + Bt^2 + Ct^3 (t - 100) \right] \quad (3.6)$$

a pro rozsah teploty od 0 do 850 °C vztahem

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (3.7)$$

kde

$$\begin{aligned} R_0 &= 100 \, \Omega, \\ A &= 3,90802 \cdot 10^{-3} \, \text{K}^{-1}, \\ B &= -5,80195 \cdot 10^{-7} \, \text{K}^{-2}, \\ C &= -4,27350 \cdot 10^{-12} \, \text{K}^{-4} \quad \text{pro } t < 0 \, ^\circ\text{C}, \\ C &= 0 \quad \text{pro } t > 0 \, ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Pro stanovení teploty na základě změřeného odporu platí pro teplotu nižší než 0 °C vztah

$$t = \frac{(R_t - R_0)}{\alpha R_0} + \delta \left[\left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} \right] + \beta \left[\left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right] \quad (3.8)$$

a pro teplotu vyšší než 0 °C

$$t = \frac{(R_t - R_0)}{\alpha R_0} + \delta \left[\left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} \right], \quad (3.9)$$

kde $\alpha = 3,85055 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$,
 $\beta = -0,108634 \text{ K}^{-3}$,
 $\delta = 1,499786 \text{ K}^{-2}$.

Prostřednictvím koeficientů lze vyjádřit vztahy (3.6) a (3.7)

$$R_t = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} + \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right] \right\}, \quad (3.10)$$

$$R_t = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} \right] \right\}.$$

Tab. 3.2 Dovolené tolerance dle IEC-751

Teplota (°C)	Třída přesnosti A		Třída přesnosti B	
	(Ω)	(°C)	(Ω)	(°C)
-200	±0,24	±0,55	±0,56	±1,3
-100	±0,14	±0,35	±0,32	±0,8
0	±0,06	±0,15	±0,12	±0,3
100	±0,13	±0,55	±0,48	±1,3
200	±0,20	±0,24	±0,24	±0,24
300	±0,27	±0,75	±0,64	±1,8
400	±0,33	±0,95	±0,79	±2,3
500	±0,38	±1,15	±0,93	±2,8
600	±0,43	±1,35	±1,06	±3,3
650	±0,46	±1,45	±1,13	±3,6
700	–	–	±1,17	±3,8
750	–	–	±1,28	±4,3
800	–	–	±1,34	±4,6

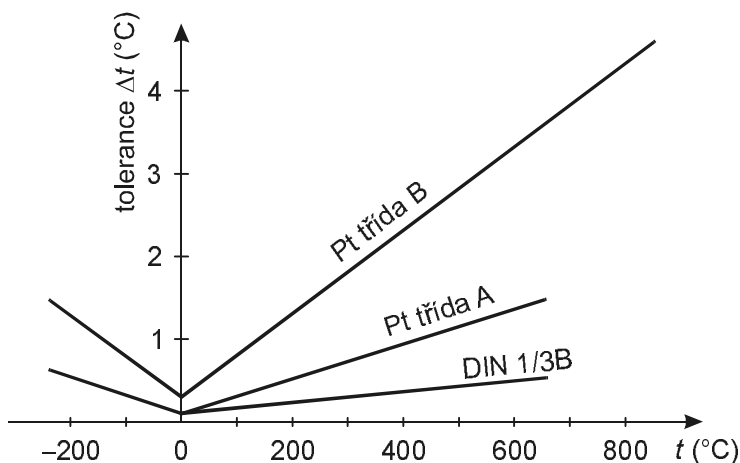
Pro výpočet hodnot odporů R_t z rovnic (3.10) je nutné použít iterační metodu, a to nejméně pětinasobně.

Pro dovolené tolerance (odchylky) Pt měřicích odporů dle IEC 751 platí podmínky:

$$\begin{aligned} \text{třída přesnosti A: } \Delta t &= \pm(0,150 + 0,002 \cdot |t|) \text{ (}^\circ\text{C)}, \\ \text{třída přesnosti B: } \Delta t &= \pm(0,300 + 0,005 \cdot |t|) \text{ (}^\circ\text{C)}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Kromě doporučení IEC 751 je používáno přesnější kritérium označované DIN 1/3 B, pro které platí

$$\Delta t = \pm(0,100 + 0,0017 \cdot |t|) \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (3.12)$$

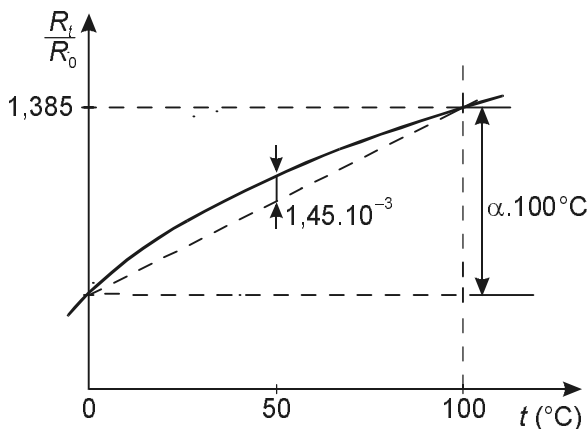


Obr. 3.3 Dovolené tolerance průmyslových Pt měřicích odporů dle IEC 751

Kromě základní hodnoty odporu $R_0 = 100 \Omega$ se vyrábějí snímače se základní hodnotou odporu 50, 200, 500, 1000 a 2000 Ω . Tabulka hodnot měřicího odporu Pt100 třídy A dle IEC-751 je v příloze. U platinových čidel, u nichž je $W_0 = 1,3850$, ale jejichž základní hodnota $R_0 \neq 100 \Omega$, získáme hodnoty měřicího odporu vynásobením koeficientem $R_0 \cdot 10^{-2}$. Ve světě se používá vedle IEC-751 U.S. Industrial Standard s čistší platinou ($W_{100} = 1,391$). Dovolené tolerance se liší od doporučení IEC. Nejvyšší nároky na čistotu platiny jsou pro mezinárodní stupnici ITS-90 (tab. 3.3).

Tab. 3.3 Porovnání zaokrouhlených hodnot koeficientů rovnic (3.6), (3.7)

standard	teplotní součinitel odporu α (K ⁻¹)	A (K ⁻¹)	B (K ⁻²)	C (K ⁻⁴)
IEC-751	0,003850	$3,9080 \cdot 10^{-3}$	$-5,8020 \cdot 10^{-7}$	$-4,2735 \cdot 10^{-12}$
U.S. Industrial	0,003911	$3,9692 \cdot 10^{-3}$	$-5,8495 \cdot 10^{-7}$	$-4,2325 \cdot 10^{-12}$
ITS-90	0,003926	$3,9848 \cdot 10^{-3}$	$-5,87000 \cdot 10^{-7}$	$-4,0000 \cdot 10^{-12}$



Obr. 3.4 Nelinearita Pt100

Na obr. 3.4 je nakreslena statická charakteristika Pt odporového snímače pro rozsah teplot od 0 do 100 °C. Pro tento rozsah se obvykle zanedbává nejistota měření způsobená nelinearitou dle obr. 3.4:

$$(\Delta t)_{\max} = \frac{\Delta \left(\frac{R_t}{R_0} \right)_{\max}}{\frac{R_{100} - R_0}{R_0}} \cdot 100 = \frac{1,45 \cdot 10^{-3}}{0,385} \cdot 100 = 0,38 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.13)$$

3.2 Odporové niklové snímače teploty

Niklová čidla teploty jsou většinou vyráběny tenkovrstvou technologií (viz 3.5). Výhodou niklových snímačů je velká citlivost, rychlá odezva tj. malá časová konstanta a malé rozměry. Nevýhodou je omezený teplotní rozsah a vůči platině značná nelinearita, horší dlouhodobá stabilita a odolnost vůči působení prostředí. Podobně jako platinová čidla se kromě základní hodnoty odporu $R_{100} = 100 \Omega$ vyrábějí snímače se základní hodnotou odporu 200, 500, 1000 a 2000 Ω . Teplotní závislost odporu niklového čidla lze opět vyjádřit polynomem (3.14) dle (DIN 43760). Pro přesnější vyjádření lze polynomy členit do užších teplotních rozsahů.

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + Ct^4 + Dt^6), \quad (3.14)$$

kde

$$A = 5,485 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1},$$

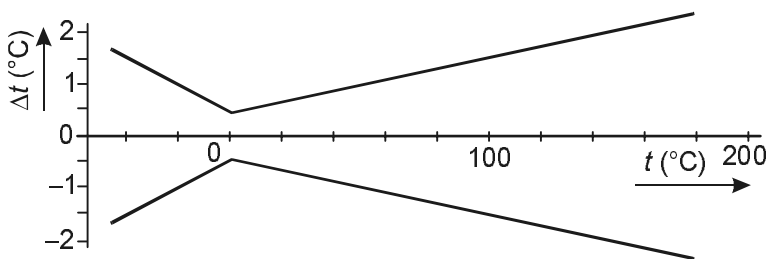
$$B = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2},$$

$$C = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ K}^{-4},$$

$$D = 2,0 \cdot 10^{-17} \text{ K}^{-6},$$

Dovolené tolerance odporu Ni čidla dle DIN 43760 jsou na obr. 3.5. Platí

$$\begin{aligned} \Delta t &= \pm(0,4 + 0,007 \cdot |t|) (\text{°C}) \quad \text{pro } > 0 \text{ °C}, \\ \Delta t &= \pm(0,4 + 0,028 \cdot |t|) (\text{°C}) \quad \text{pro } < 0 \text{ °C}. \end{aligned} \quad (3.15)$$



Obr. 3.5 Tolerance Ni měřicího odporu

3.3 Odporové měděné snímače teploty

Měď se používá v teplotním rozsahu od -200 °C do $+200 \text{ °C}$. Pro závislost odporu měděného čidla na teplotě lze v rozsahu teplot od -50 °C do $+150 \text{ °C}$ použít lineární

vztah (3.3), kde $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Pro rozsahy vyšší nebo nižší lze pak tuto závislost vyjádřit dle [6] vztahy

$$\begin{aligned} \text{pro } t \text{ od } -200 \text{ }^\circ\text{C do } -50 \text{ }^\circ\text{C: } R_t &= A_1 R_0 \left[1 + A_2 (t + 200) + A_3 (t + 200)^2 \right], \\ \text{pro } t \text{ od } -50 \text{ }^\circ\text{C do } +150 \text{ }^\circ\text{C: } R_t &= R_0 (1 + A_4 t), \\ \text{pro } t \text{ od } +150 \text{ }^\circ\text{C do } +260 \text{ }^\circ\text{C: } R_t &= A_5 R_0 \left[1 + A_6 (t - 150) + A_7 (t - 150)^2 \right]. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Vzhledem k malé rezistivitě mědi (6krát menší než u platiny) a snadné oxidaci mědi se měděné snímače teploty běžně nevyrábějí. Výhodnou aplikací teplotní závislosti mědi je např. přímé měření teploty měděného vinutí elektrických strojů prostřednictvím měření odporu vinutí (samozřejmě při vypnutém napájení motoru).

3.4 Měřicí obvody pro kovové odporové snímače teploty

Na měřicí obvody jsou kladeny tyto požadavky:

- minimalizace vlivu měřicího proudu procházejícího čidlem,
- minimální časová konstanta,
- minimální vliv odporu vedení k měřicímu odporu,
- linearizace (analogová nebo číslicová) závislosti odporu snímače na teplotě.

3.4.1 Vliv měřicího proudu

Elektrický ztrátový výkon P na měřicím odporu je dán součinem

$$P = R_t I^2, \quad (3.17)$$

kde I je měřicí proud, který ohřívá měřicí odpor. Takto ohříváný snímač indikuje vyšší teplotu než je měřená hodnota, přičemž nejistota měření způsobená ohřevem čidla je dána rovnicí

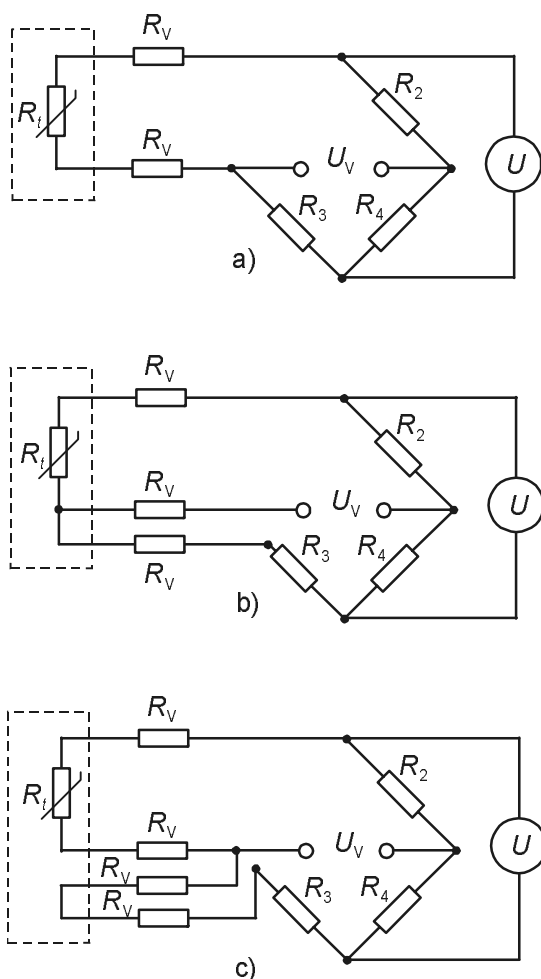
$$\Delta t = \frac{P}{D} = \frac{R_t I^2}{D}, \quad (3.18)$$

Pro výpočet nejistoty měření je nutné znát zatěžovací konstantu D (4.23, 4.24). Hodnota konstanty D je dle provedení v klidném vzduchu od $4 \text{ mW} \cdot \text{K}^{-1}$ do $10 \text{ mW} \cdot \text{K}^{-1}$ v neproudící vodě od $40 \text{ mW} \cdot \text{K}^{-1}$ do $150 \text{ mW} \cdot \text{K}^{-1}$. Čím větší je hodnota konstanty D tím menší bude nejistota měření teploty. Hodnotu zatěžovací konstanty lze ovlivnit

minimalizováním tepelného odporu mezi čidlem a měřeným prostředím. Tuto vlastnost je nutno zvláště respektovat u destičkových odporových senzorů vyráběných tenkovrstvou technologií. Běžná hodnota měřicího proudu je od 0,3 mA do 1 mA.

3.4.2 Vliv odporu vedení

Klasickým obvodem pro vyhodnocení odporových snímačů teploty je Wheatstoneův můstek. Podívejme se jaký vliv má odpor přívodů měřicího odporu u dvouvodičového zapojení obr. 3.6a.



Obr. 3.6 Zapojení měřicích obvodů
(a – dvouvodičové, b – třívodičové, c – s volnou smyčkou)