

Základní pojmy

Definice teploty:

- Fyzikální veličina vyjadřující míru tepelného stavu tělesa

Teplotní stupnice

- **Termodynamická (Kelvinova)**
 - stupnice je určena dvěma pevnými body:
 - absolutní nula (ustává termický pohyb elementárních částic) - **0 K**
 - trojný bod vody (rovnovážný stav mezi skupenstvími) - **273,16K**
 - základní jednotkou je Kelvin [K] - 273,16-tá část termodynamické teploty trojného bodu vody
- **Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90** (International Temperat^ure Scale)
 - vznik v roce 1927 (Celsiova), postupně upravována (naposledy 1990)
 - definována 17 pevnými body (trojné body, body tání, tuhnutí)
- **Vzájemná souvislost teplotních stupnic**
$$T = \vartheta + 273,15 \quad [\text{K}], [^{\circ}\text{C}]$$

Rozdělení snímačů teploty

Snímače pro dotykové měření

- elektrické
 - odporové kovové
 - odporové polovodičové
 - termoelektrické
 - polovodičové s PN přechodem (diodové, tranzistorové)
- dilatační
- tlakové
- speciální

Snímače pro bezdotykové měření

- monochromatické pyrometry
- pásmové pyrometry
- radiační pyrometry

Odporové kovové snímače

Princip

- změna elektrického odporu kovů v závislosti na teplotě

$$\Delta R = R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta \quad [\Omega], [\Omega], [K^{-1}], [K]$$

ΔR změna elektrického odporu

α teplotní koeficient odporu ($\alpha_{Pt} = 0,0039$, $\alpha_{Ni} = 0,0062$, $\alpha_{Cu} = 0,00426$)

$\Delta \vartheta$ změna teploty

- odpor při teplotě ϑ

$$R_{\vartheta} = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta)$$

vztah má platnost jen v malém rozsahu teplot

pro přesná měření a větší rozsahy platí:

$$R_{\vartheta} = R_0 \left[1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta + \beta \cdot \Delta \vartheta^2 + \gamma \cdot \Delta \vartheta^3 \cdot (\vartheta - 100) \right]$$

Základní vlastnosti

Základní parametry

- R_0 - základní odpor - hodnota R čidla při teplotě 0°C , tj. v bodu tání ledu
- R_{100} - hodnota R čidla při teplotě 100°C , tj. v bodu varu vody
- R_9 - hodnota R čidla při teplotě 9°C
- W_{100} - poměr odporů při 100 a 0°C
$$W_{100} = R_{100} / R_0$$
- α - teplotní součinitel odporu odporového materiálu čidla $\alpha = (R_{100} - R_0) / 100 R_0$

Materiál čidla

- platina
- nikl
- měď

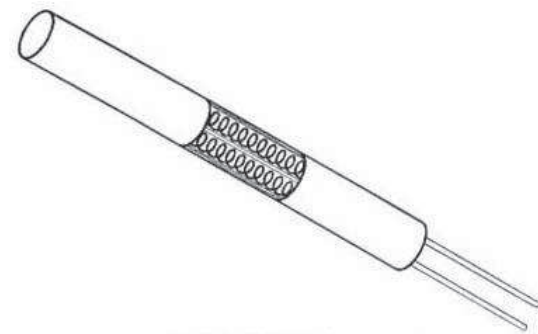
Vlastnosti čidel

Materiál Čidla	Základní odpor R_0 [Ω]	Poměr odporů W_{100}	Měřicí rozsah [$^\circ \text{C}$]
Pt	100	1,3850	-200 až 850
Ni	100	1,6180	-60 až 180 (250)
Cu	100	1,4260	-200 až 200

Provedení odporových čidel

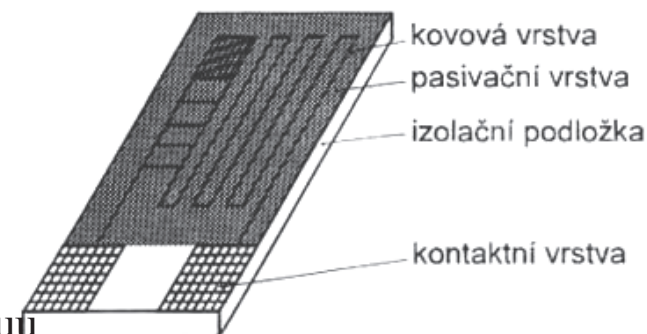
Čidla vinutá

- spirálově stočený odporový drátek $\varnothing$ 0,01 až 0,05mm
- vinutí je
 - uloženo v kapilárách válcových keramických nosných tělísek
 - navinuto na povrchu tělísek a přeskleno keramickým smaltem
 - vyrábí se s odporem $R_0 = 100$ a 500Ω



Čidla vrstevná

- vinutí nahrazeno odporovou vrstvou z Pt, Ni nanesenou na nosné destičce (substrátu) z korundové keramiky
- tlustovrstvá technologie
 - nanášení Pt vrstvy ve formě pasty na substrát sítotiskem
 - tepelná stabilizace vrstvy
 - laserové nastavení požadované hodnoty R_0
 - rozřezání na jednotlivá čidla a připevnění vývodů
- tenkovrstvá technologie
 - Pt vrstva se nanáší napařováním nebo napařováním ve vakuu
 - široký sortiment hodnot $R_0 = 100/200/500/1000/2000, \dots \Omega$
 - vyrábí se také pro technologii SMT



Přesnost kovových snímačů teploty

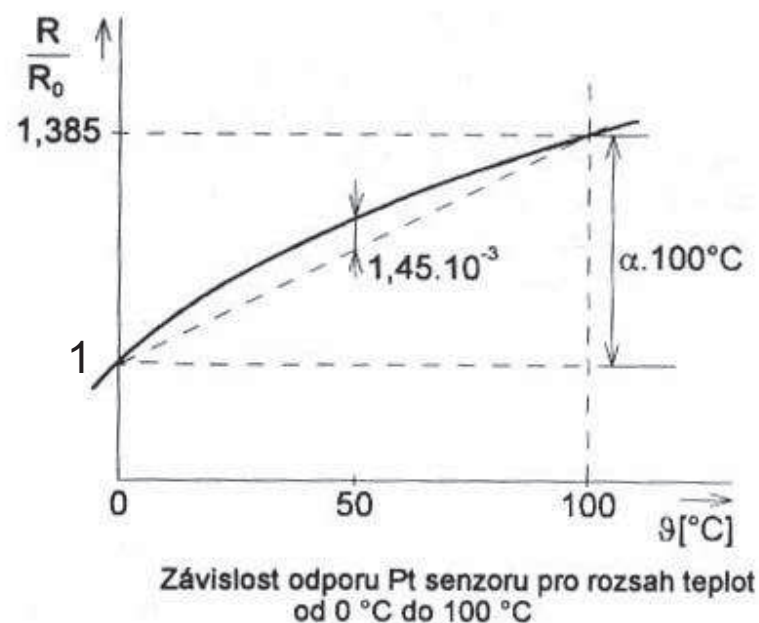
Třídy tolerance

kovové odporové snímače se vyrábějí ve dvou třídách:

- třída A (u Pt pro rozsah -200 až 650 °C)
- třída B (u Pt pro rozsah -200 až 800 °C)
- toleranční pole se obvykle udává grafem

Teplotní závislost odporu

- matematický výraz
- tabulka
- grafické vyjádření



Polovodičové odporové snímače

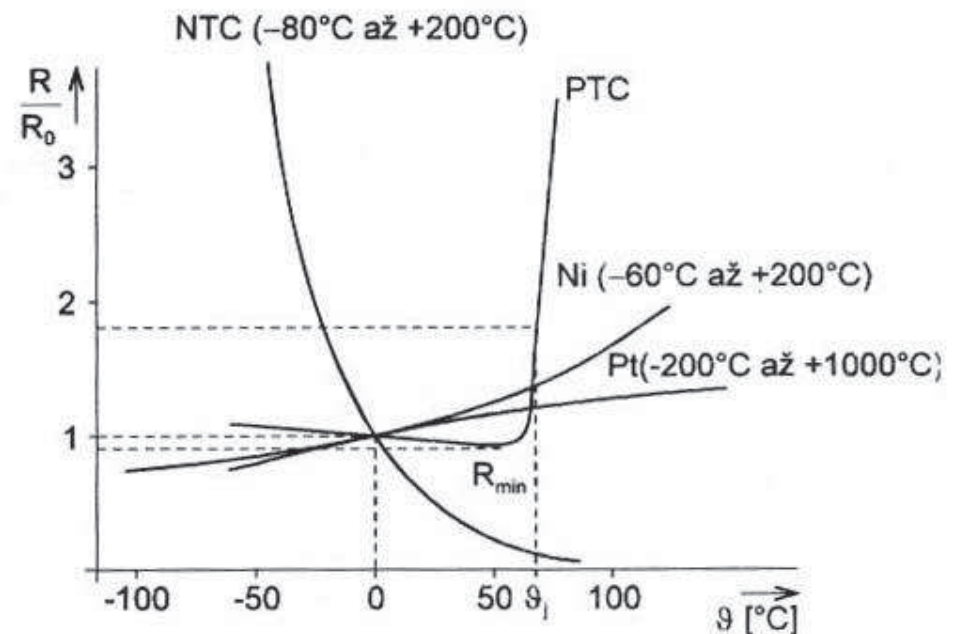
Princip

Změna odporu je způsobena teplotní závislostí koncentrace nosičů náboje

Rozdělení

- termistory
 - negastory (termistor NTC - Negative Temperatur Coefficient)
 - posistory (termistor PTC - Positive Temperatur Coefficient)
- monokrystalické Si snímače

Porovnání charakteristik



Negastory

- záporný teplotní koeficient
- výroba práškovou technologií ze směsi oxidů kovů ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, $\text{MnO} + \text{CoO}$ ), případně karbidů (SiC)
- teplotní rozsah : -50 až 200 °C, speciální typy -250 až 1000 °C
- závislost odporu na teplotě je exponenciální

$$R_1 = R_0 \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

R_1

odpor termistoru při teplotě T_1

R_0

odpor termistoru při referenční teplotě T_0
(obvykle 298,15 K, tj. 25 °C)

rozsah 1Ω - 1MΩ

$B[\text{K}]$

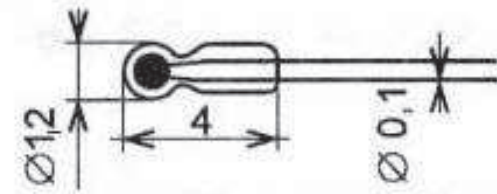
teplotní „konstanta“ ; 1500K < B < 7000K

Teplotní koeficient odporu α :

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta T} = -\frac{B}{T^2}$$

Vlastnosti a použití negastorů

- **teplotní koeficient záporný a o řád vyšší než u kovů**
 - $\alpha = -0,03$ až $-0,06 \text{ K}^{-1}$
- **vhodné pro měření malých změn teploty**
- **malé rozměry (perličkový termistor)**
 - bodové měření
 - malá časová konstanta



- **nelineární závislost odporu na teplotě**
- **menší časová stálost**
- **poškození při přehřátí**
- **použití pro méně náročné aplikace**
 - např. dvoustavová regulace

Pozistory

- **kladný teplotní součinitel odporu**
 - odpor zpočátku mírně klesá
 - od referenční (spínací) teploty ϑ_J prudce (o 3 řády) narůstá [\[obr\]](#)
 - pro vysoké teploty opět klesá
- **vyrábí se z polykrystalické feroelektrické keramiky (BaTiO_3)**
- **závislost odporu na teplotě (v oblasti nárůstu R)**

$$R = R_J \cdot e^{A \cdot \vartheta}$$

R_J	odpor při referenční teplotě ϑ_J
A	materiálová konstanta ($0,16\text{K}^{-1}$)
ϑ	teplota
ϑ_J	referenční teplota (dle chem. složení 60 až 180°C)

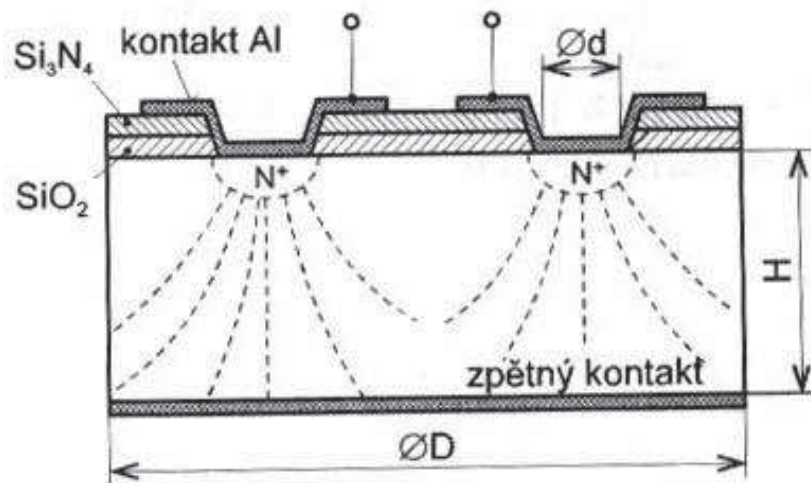
- **použití**
 - měření v úzkém rozsahu teplot
 - dvoustavové snímače (signalizace překročení přípustné teploty)

Polovodičové monokrystalické snímače

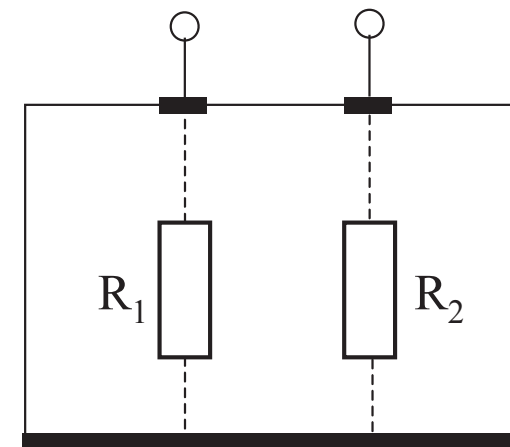
Princip

- **kuželový rozptyl nosičů proudu**
 - rozptyl nosičů je úměrný jejich pohyblivosti
 - pohyblivost nosičů je úměrná teplotě

Struktura snímače



Náhradní schéma



- materiál - nevlastní polovodič N (Si)
- dva sériově řazené kontakty kov-polovodič - nezávislost na směru proudu
- zpětný kontakt na spodní straně spojuje vnitřní odpory R_1 a R_2

Teplotní závislost odporu

Závislost odporu na rozměrech snímače

za předpokladu, že: $d \ll D$ a $d \ll H$ (viz struktura) platí:

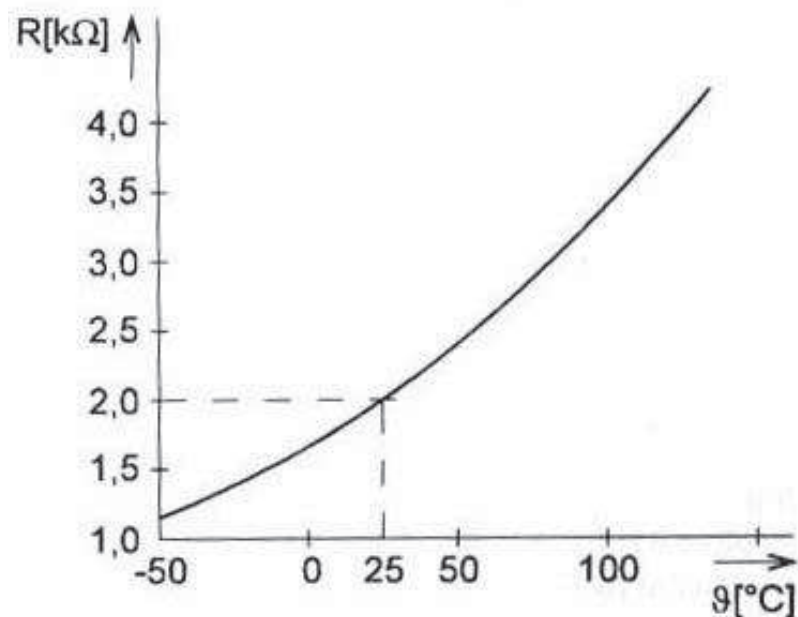
$$R = \frac{\rho}{d}$$

d průměr kontaktu
 ρ měrný odpor

Odpor nezávisí na vnějších rozměrech snímače

Závislost odporu na teplotě

přibližně platí: $R = R_0 + k(\vartheta - \vartheta_0)^2$



- teplotní rozsah: **-50 až 150 $^{\circ}C$**
- jmenovité hodnoty R_{25} **1; 2 $k\Omega$**
- α (řádově) **$10^{-2} K^{-1}$**
- příklad **KTY10**

Měřicí obvody odporových snímačů

Požadavky kladené na vyhodnocovací obvody

- minimalizace vlivu proudu snímačem
- minimalizace vlivu odporu přívodů k senzoru
- analogová nebo číslicová linearizace
- **Vliv měřicího proudu**
 - průchodem proudu dochází k oteplení senzoru
 - chybu lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{D} \quad D \text{ [W.K}^{-1}\text{]} \quad \begin{array}{l} \text{zatěžovací konstanta - příkon} \\ \text{potřebný k ohřátí senzoru o 1K} \end{array}$$

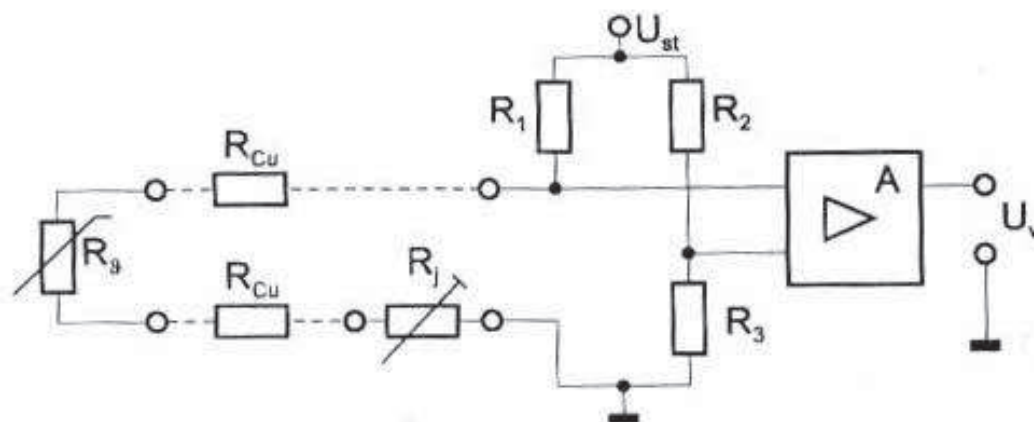
- maximální měřicí proud

$$I_{\text{dov}} = \sqrt{\frac{\Delta\vartheta \cdot D}{R}} \quad \begin{array}{l} \Delta\vartheta \quad \text{maximální dovolená chyba} \\ R \quad \text{maximální odpor senzoru v daném rozsahu} \end{array}$$

- u senzoru Pt100 s max. povolenou chybou 0,1°C - $I_{\text{dov}} < 1\text{mA}$
- u termistorů (R řádově kΩ - I_{dov} řádově mikroampéry)

Můstkové metody měření

- Dvou vodičové připojení čidla**



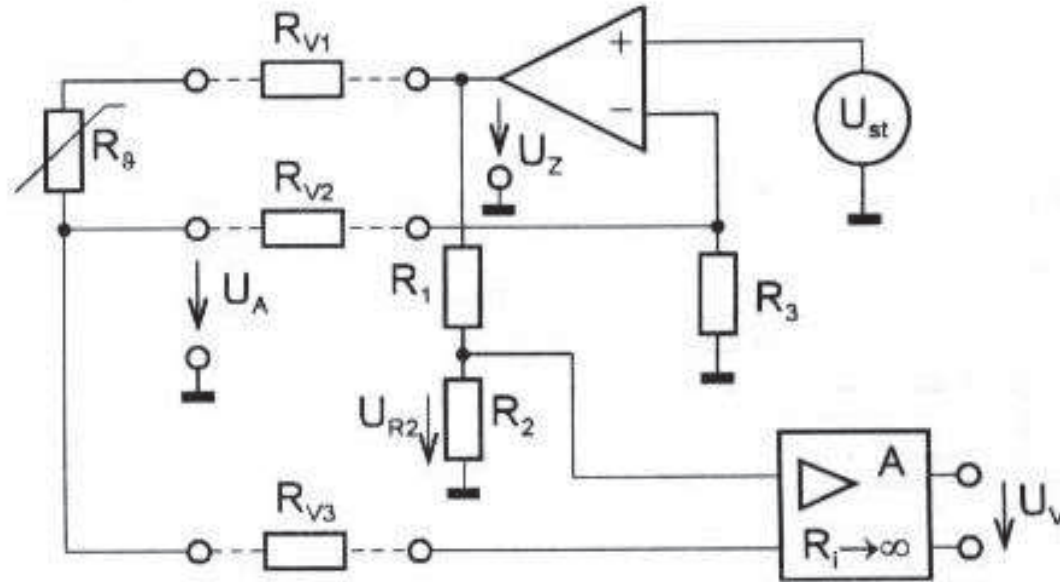
R_g čidlo
 R_{Cu} odpor přívodů
 R_J justační odpor

Obr. 3.11 Dvou vodičové můstkové připojení odporového senzoru teploty

- vliv odporu přívodů je kompenzován justačním odporem
- justační odpor slouží k přesnému doladění rozsahu měření
- odpory přívodů R_{cu} závisí zpravidla na teplotě - chyba měření
- kompenzace vlivu teploty na přívodní vodiče- 3 nebo 4 vodičové zapojení

Aktivní můstky

- **Můstek zapojený v síti OZ**
 - příklad zapojení

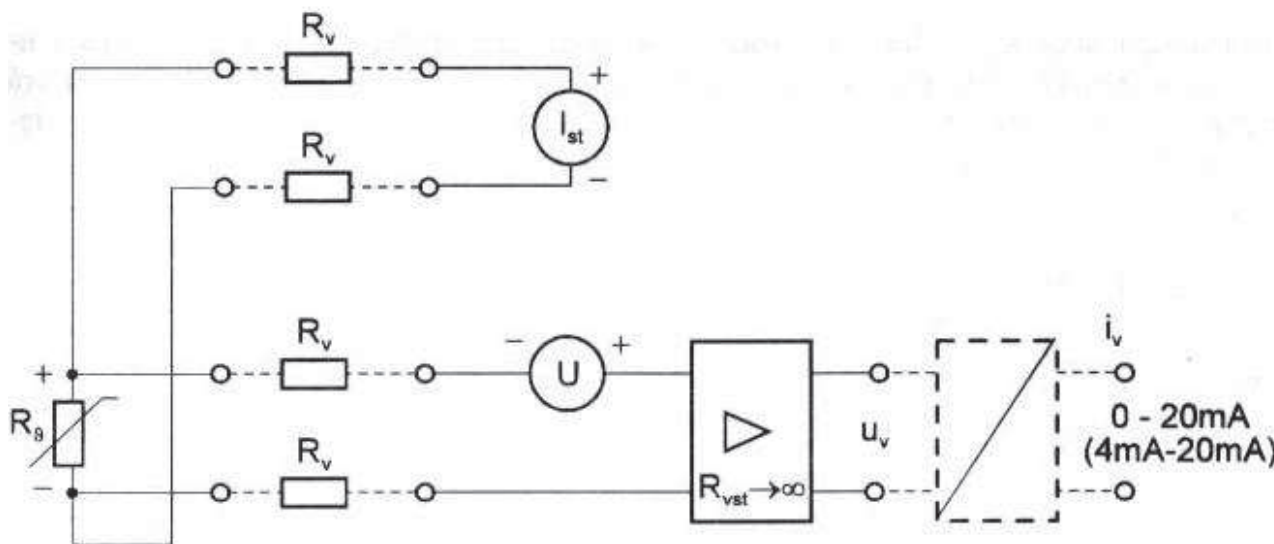


- zvolíme-li $R_1=R_2=R$, $R_3=R$, $R_3=R_{9Z}$
- vyjádříme-li $R_9= R_{9Z} + \Delta R_9$
- pak platí:

$$U_V = A \cdot U_{st} \cdot \frac{\Delta R_{\vartheta}}{2 \cdot R_{\vartheta Z}}$$

Čtyřvodičové zapojení s proud. zdrojem

- eliminace vlivu odporu přívodních vodičů
- zesilovač s velkým R_i
- eliminace napětí na počátku rozsahu $U = I_{st} \cdot R_{\vartheta Z}$



$$U_v = A \cdot (I_{st} \cdot R_{\vartheta} - U)$$

$$= A \cdot I_{st} \cdot \Delta R_{\vartheta}$$

Obr. 3.13 Čtyřvodičový měřicí obvod se zdrojem proudu I_{st} a pomocným zdrojem napětí U
($R_v = R_{cu}$)

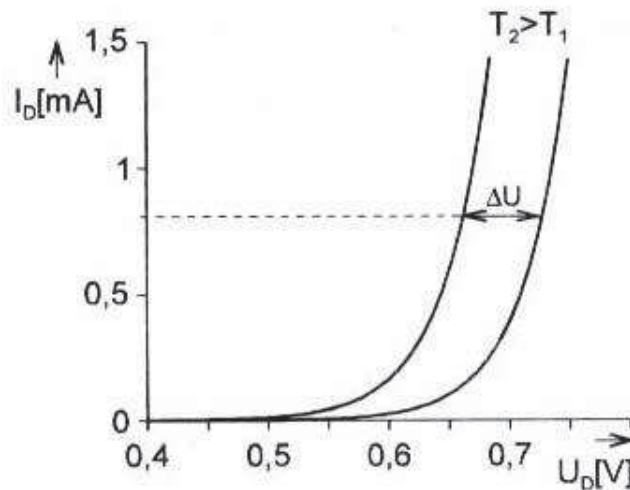
Provedení odporových kovových snímačů

- Provedení jímkové, prostorové
- Měřicí vložky odporových snímačů teploty
 - snímače jsou vybaveny výměnnými měřicími vložkami
 - vložky obsahují jedno, dvě, výjimečně i tři čidla
 - příruba a keramická svorkovnice
 - dvouvodičový převodník do hlavičky snímače teploty
- Měřicí vložky se obvykle vyrábějí ve variantách:
 - konstrukce s (neohebným) stonkem
 - vnitřní vedení je zasunuté v keramické čtyřkapiláře
 - čidlo je volně uloženo v kovové stonkové trubce
 - měřicí vložka se zvýšenou mechanickou odolností
 - odolnější čidlo
 - volný prostor uvnitř stonkových trubek vyplněn keramickým práškem
 - měřicí vložka s vysokou mechanickou odolností
 - odolné čidlo s ohebným stonkem
 - stonek zhotoven ze zvlášť odolného plášťového kabelu

Monokrystalické PN snímače teploty

- **Princip**

- teplotní závislost napětí PN přechodu v propustném směru
- lze odvodit, že změna napětí $\Delta U_D / \Delta T = -(2,0 \text{ až } 2,5) \text{ mV/K}$
- teplotní závislost PN diody:



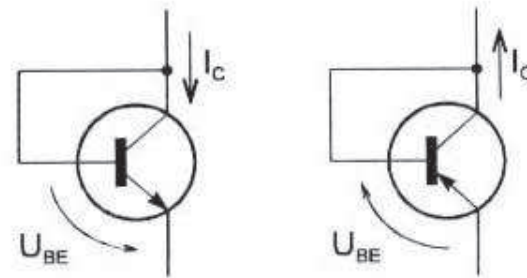
Teplotní závislost napětí $\Delta U_D = f(T)$ PN-diody

- **Materiál**

- křemík
- galiumarsenid

Tranzistorové PN senzory

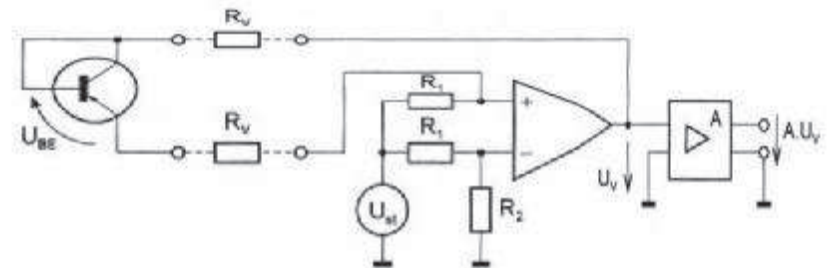
- **princip**
 - teplotní závislost přechodu BE v propustném směru



Tranzistorová dioda

- **vyhodnocovací obvod**
 - ze schématu lze odvodit vztah:

$$U_V = -U_{BE} - U_{st} \frac{2R_V}{R_1}$$



Aktivní můstek s tranzistorovou diodou

Termoelektrické snímače teploty

- **Princip**

- vznik termoelektrického napětí (Seebeckův jev)
- materiál kovy (různé), polovodiče
- výpočet napětí pro malý rozdíl teplot:

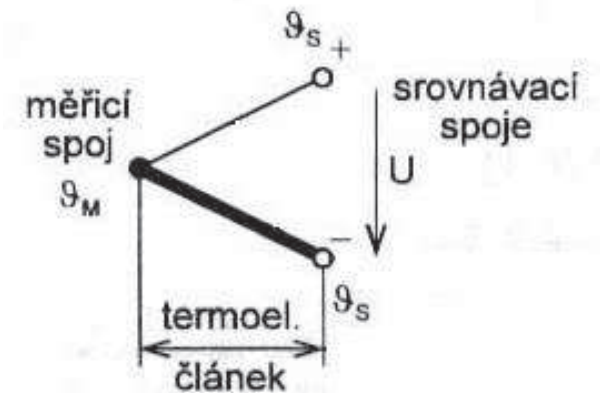
$$U = \alpha_{12} (\vartheta_m - \vartheta_s) \text{ [mV, mV/K, K]}$$

α_{12} termoelektrický koeficient

- Kovy řádově $10^1 \mu\text{V/K}$
- Polovodiče více než $100 \mu\text{V/K}$

- **Materiál termočlánků**

- páry materiálů jsou ve světě normalizovány
- termočlánky se značí dle IEC velkými písmeny
- statické charakteristiky vybraných termočlánků
- příklad konstrukčního uspořádání



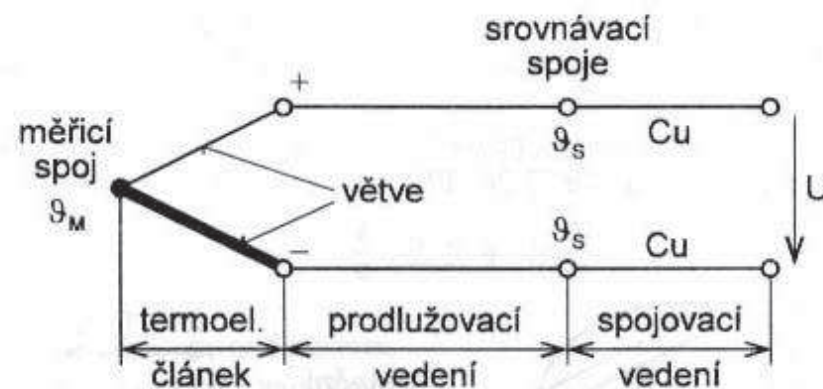
Kompenzace teploty srovnávacího konce

Druhy kompenzací

- kompenzační vedení
- kompenzační krabice
- kompenzace termostatem
- izotermická svorkovnice

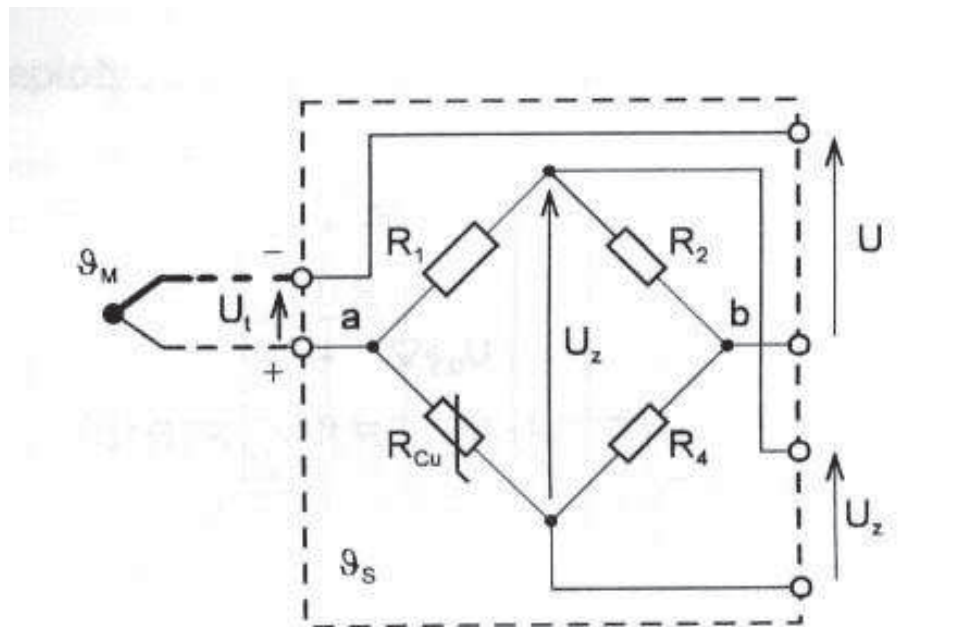
Kompenzační vedení

- prodloužení termočlánku
- umístění srovnávacího konce do prostředí s malými změnami teploty
- prodlužovací vedení ze stejného materiálu jako termočlánek
- použití na menší vzdálenosti



Kompenzační krabice

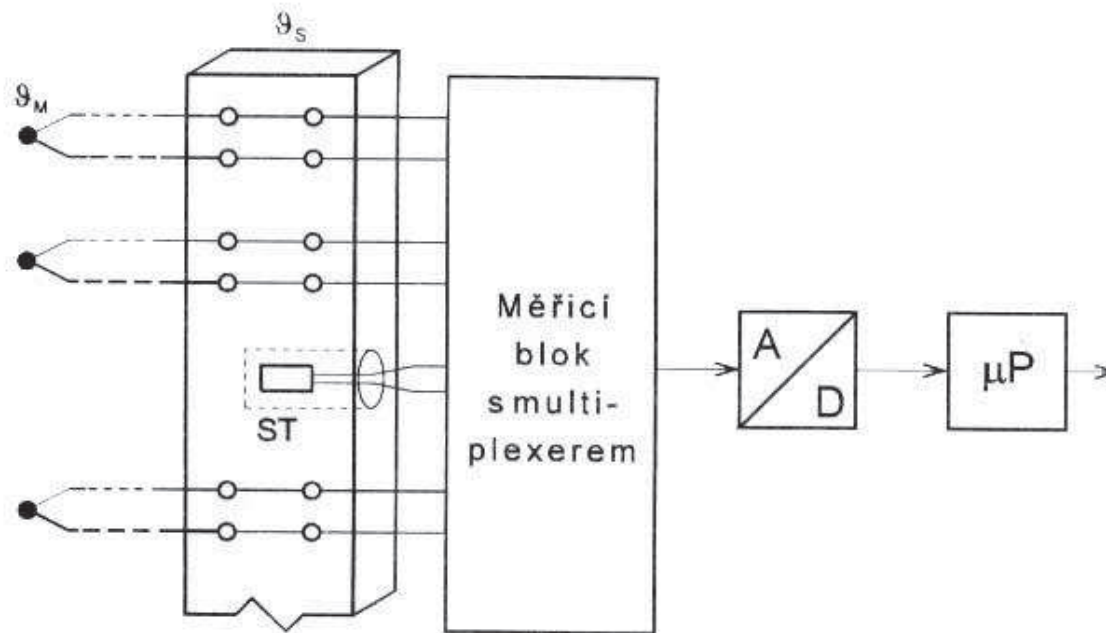
- do série s termočlánkem umístěn odporový můstek
- v jedné větvi můstku je teplotně závislý odpor (R_{Cu})
- výstupní napětí můstku se superponuje k napětí termočlánku



Obr. 3.30 Zapojení kompenzační krabice

Izotermická svorkovnice

- ve svorkovnici je umístěn teplotně závislý odpor
- teplotní kompenzace je řešena softwarově
- používá se u číslicových měřicích a řídicích systémů



Obr. 3.33 Izotermická svorkovnice

Dilatační snímače teploty

- **Princip**
 - změna délky nebo objemu látky v reakci na měřenou teplotu
- **Rozdělení**
 - kovové
 - tyčové
 - bimetalové
 - kapalinové

Kovové snímače teploty

Tyčový teploměr

Princip

Délková roztažnost kovové tyčinky (trubičky):

$$l_g = l_0 \cdot [1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)]$$

l_g

délka při měřené teplotě

l_0

délka při vztažné teplotě

α

součinitel délkové roztažnosti

Provedení:

trubice - velký součinitel α (mosaz)

tyč - malé α (invar, křemen)

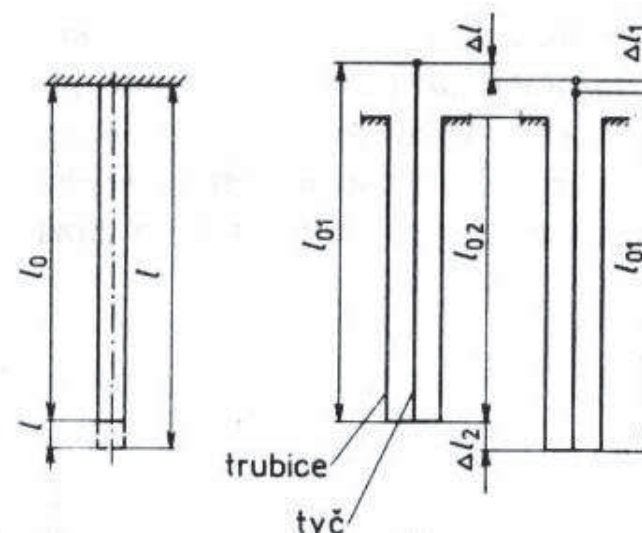
Vlastnosti

malá citlivost (převody)

měří průměrnou teplotu (po celé délce)

Použití

jednoduché obvody dvupoloh. regulace

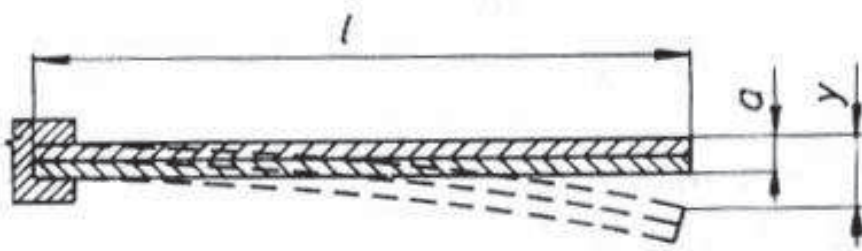


Kovové snímače teploty

Bimetalový teploměr

Princip

- nestejná teplotní roztažnost dvou různých kovů
- je tvořen dvěma pásky po celé délce spojenými (naplátování, svaření)
- výchylka volného konce závisí na teplotě:



$$y = k \cdot \frac{l^2}{a} \cdot \Delta\vartheta$$

k	součinitel prohnutí bimetalu [K ⁻¹]
l	délka [mm]
a	tloušťka [mm]

Vlastnosti

- citlivost čidla je dána jeho délkou a tloušťkou
- často se stáčí do spirály nebo do šroubovice
- použití cca do 400 °C

Kapalinové snímače teploty

- **Princip**

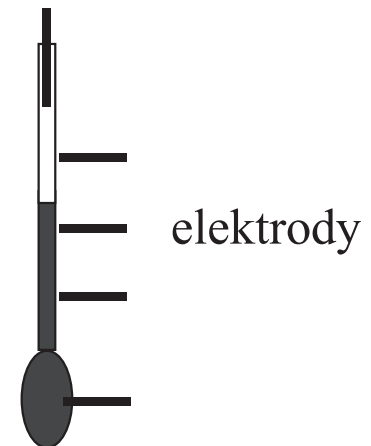
- teplotní závislost objemové roztažnosti kapalin

$$V_{\vartheta} = V_0 \cdot [1 + \beta(\vartheta - \vartheta_0)]$$

V_{ϑ}	objem při měřené teplotě
V_0	objem při vztažné teplotě
β	součinitel objemové roztažnosti

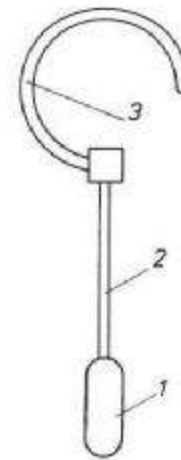
- **Provedení**

- jímka s měrnou kapalinou
 - rtuť (-38 až 365 °C)
 - etylalkohol (-100 až 60 °C)
 - pentan (-190 až 15 °C)
- cejchovaná kapilára
- kontakty pro automatické vyhodnocení teploty



Tlakové snímače teploty

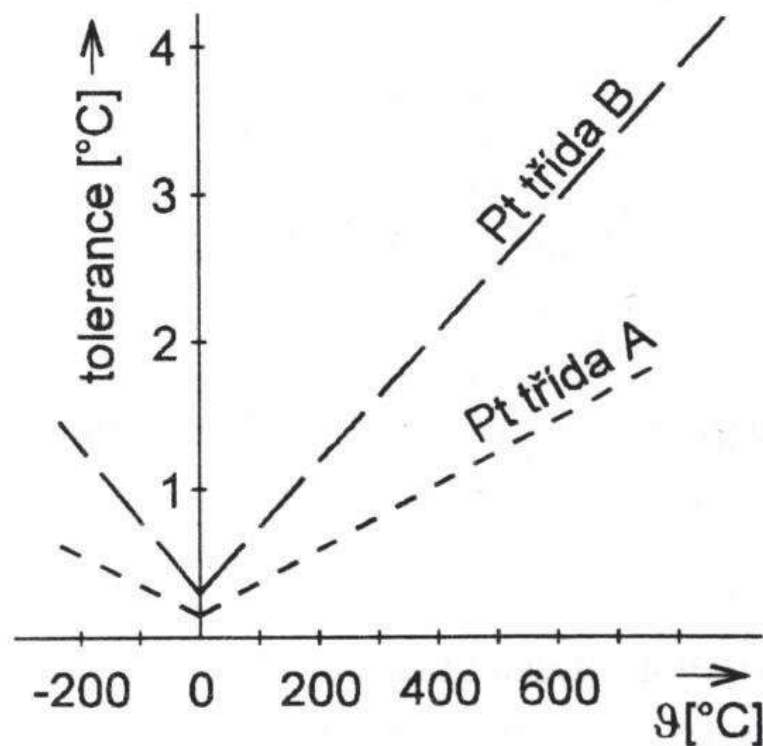
- **Princip**
 - teplotní závislost změny tlaku měrné látky v uzavřeném prostoru
- **Složení snímače**
 - 1 stonek
 - nádobka s měrnou látkou
 - 2 kapilára
 - tenká trubička spojující stonek s vyhodnocovacím zařízením
 - 3 tlakoměrný člen
 - membrána, vlnovec, Bourdonova trubice



Tlakové snímače teploty

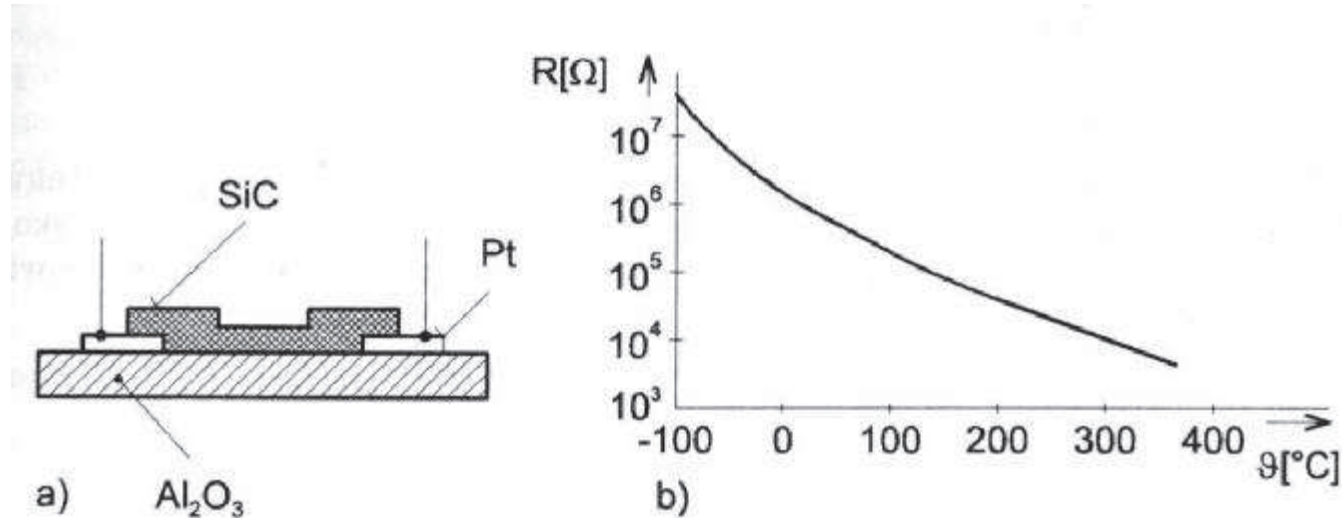
- **Náplň stonku**
 - **kapalinové snímače**
 - glycerín (-20 až 290 °C), xylen (-40 až 400 °C), metylalkohol (-20 až 290 °C)
 - kompenzace teploty kapiláry
 - bimetal do vyhodnocovacího zařízení
 - kompenzační kapilára
 - **plynové snímače**
 - N₂, H₂, CO₂
 - nevyžadují teplotní kompenzaci
 - **parotlačné snímače**
 - část stonku je vyplněna těkavou látkou
 - měří se tlak par
 - metylchlorid (-18 až 75 °C), etyléter (35 až 190 °C), toluen (120 až 300 °C)
 - velká citlivost a přesnost

Toleranční třídy odporových teploměrů



Tolerance Pt standardních
měřicích odporů dle IEC

Struktura a teplotní závislost termistoru SiC



Senzor SiC (a - struktura, b - charakteristika)

Výroba

- vysokofrekvenční napařování na substrát Al_2O_3

Konstanta B

- dle teploty rozsah 1600 K až 3400 K

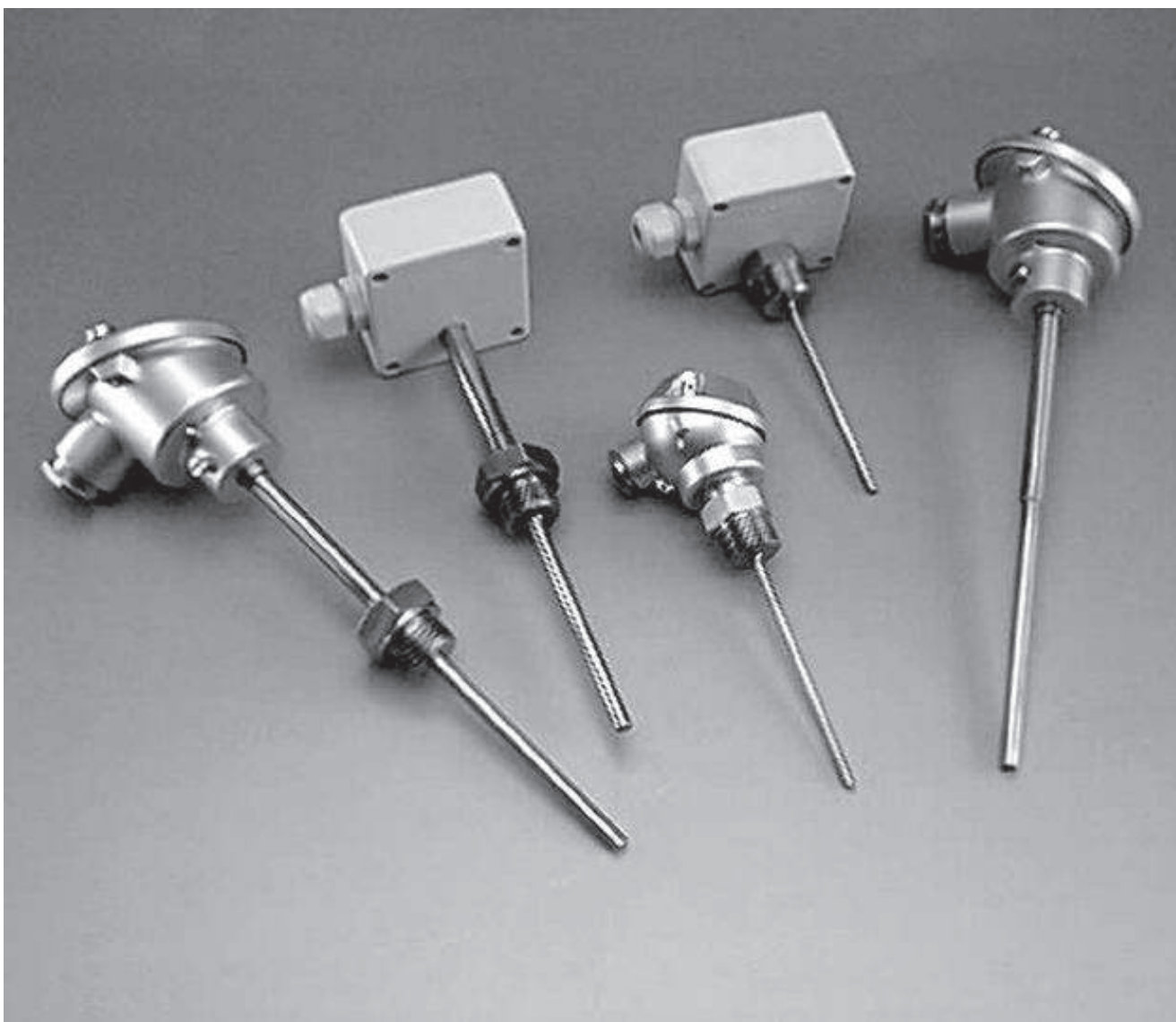
Základní hodnota R (při 25 °C)

- 10 k Ω až 1 M Ω

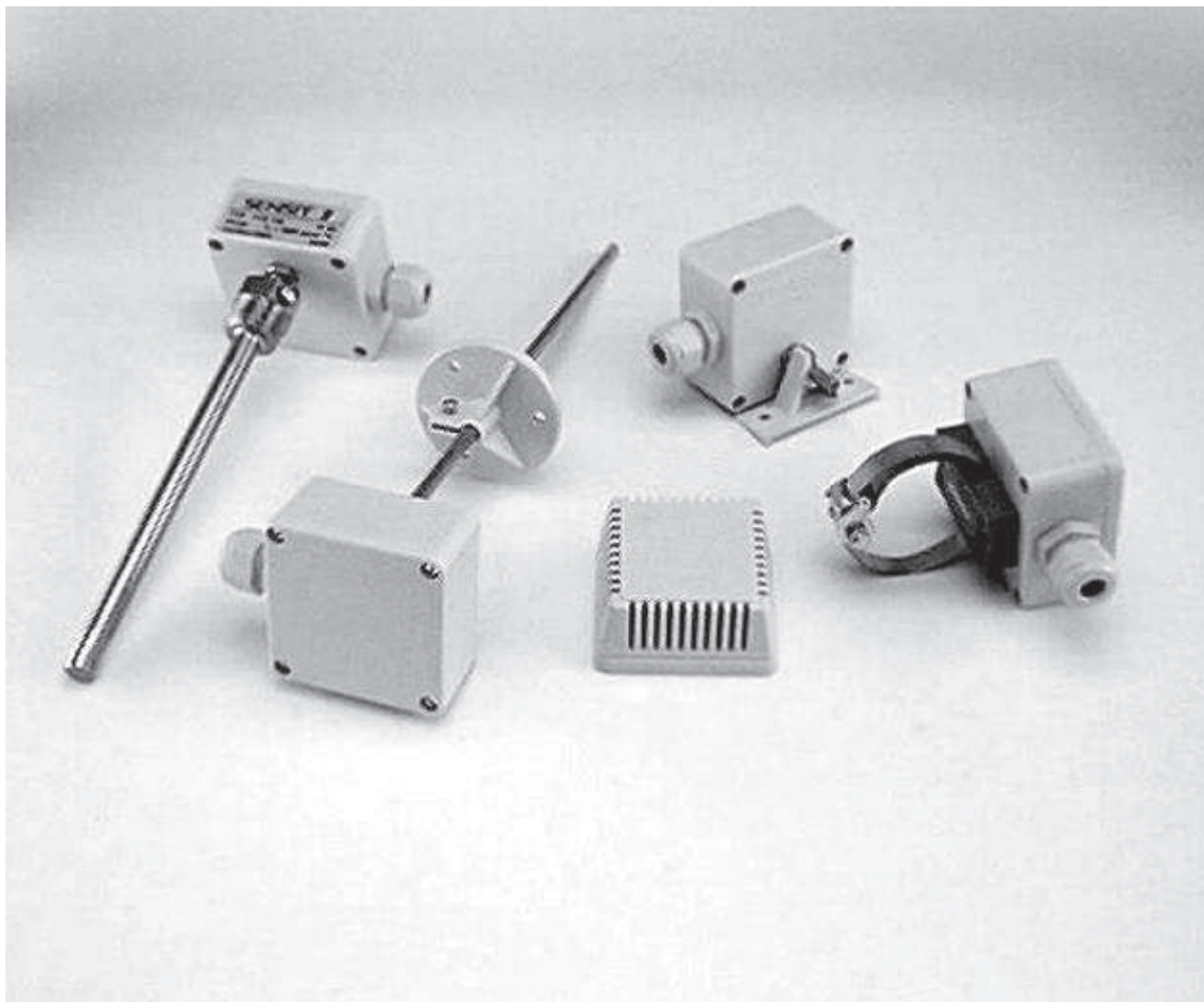
Dvojvodičové převodníky pro Pt100



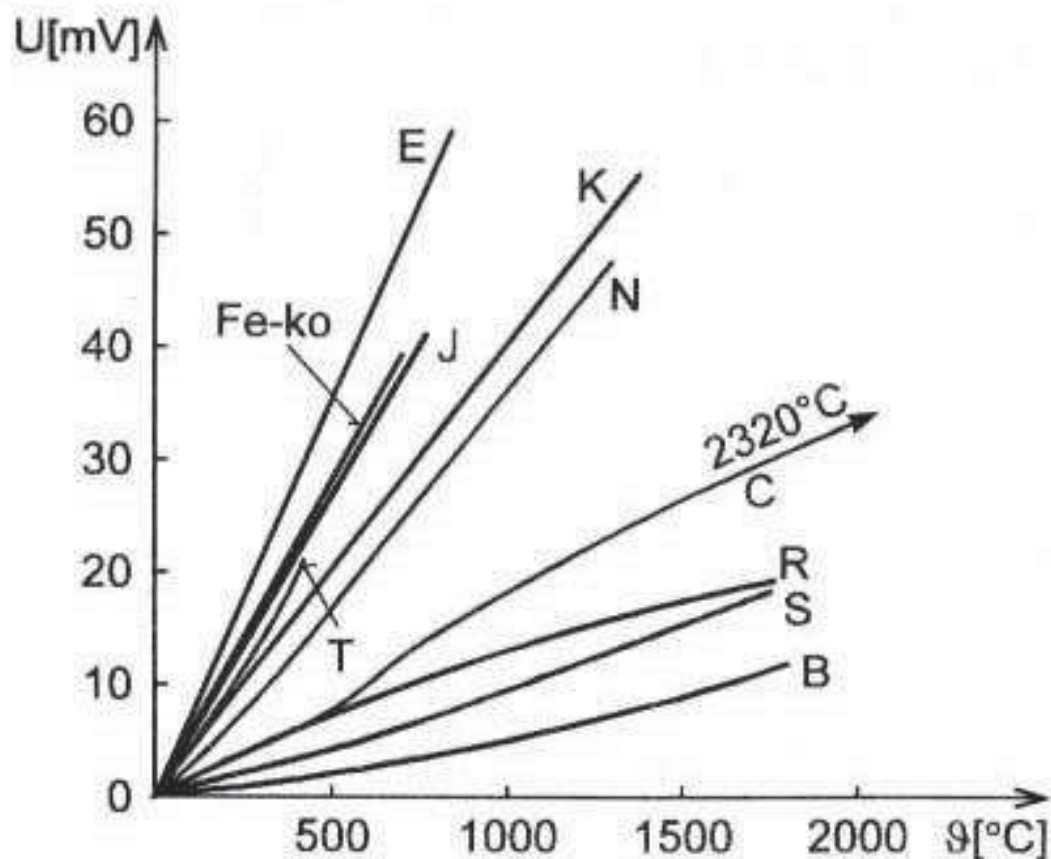
Jímkové odporové teploměry



Prostorové odporové teploměry



Statické charakteristiky termočlánků



Označení: E: NiCr-CuNi
Fe-ko
J: Fe-CuNi
T: Cu-CuNi
K: NiCr-NiAl

N: NiCrSi-NiSi
C: WRe5-WRe26
R: PtRh13-Pt
S: PtRh10-Pt
B: PtRh30-PtRh6

Konstrukční uspořádání termočlánků

