

Základní pojmy

Definice teploty:

- Fyzikální veličina vyjadřující míru tepelného stavu tělesa

Teplovní 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 Temperature Scale)

- vznik v roce 1927 (Celsiova), postupně upravována (naposledy 1990)
- definována 17 pevnými body (trojné body, body tání, tuhnutí)

• Vzájemná souvislost teplotních stupnic

$$T = \vartheta + 273,15 \quad [K], [^{\circ}C]$$

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:

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

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
- nikel
- měď

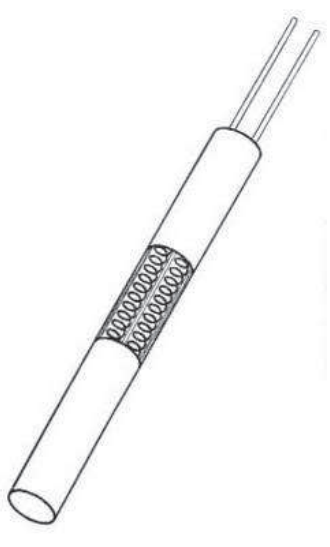
Vlastnosti čidel

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

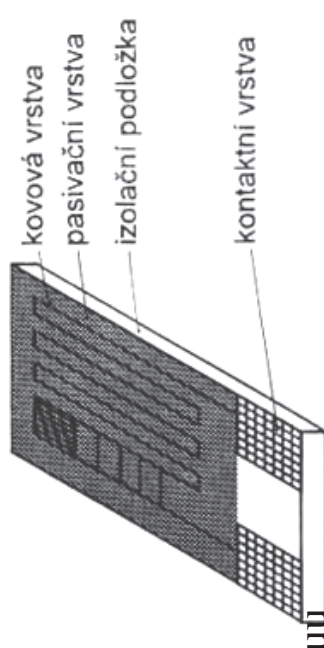
Čidla vinutá

- 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 síťotiskem
 - tepelná stabilizace vrstvy
 - laserové nastavení požadované hodnoty R_0
 - rozřezání na jednotlivá čidla a připevnění vývodů
- tenkovrstvá technologie
 - Pt vrstva se nanáší naprašováním 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

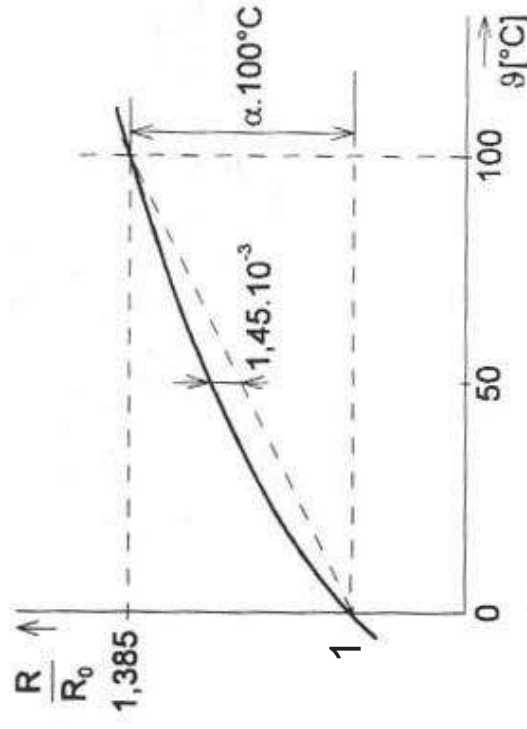
Třídy tolerance

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



Závislost odporu Pt senzoru pro rozsah teplot od 0 °C do 100 °C

Polovodičové odporové snímače

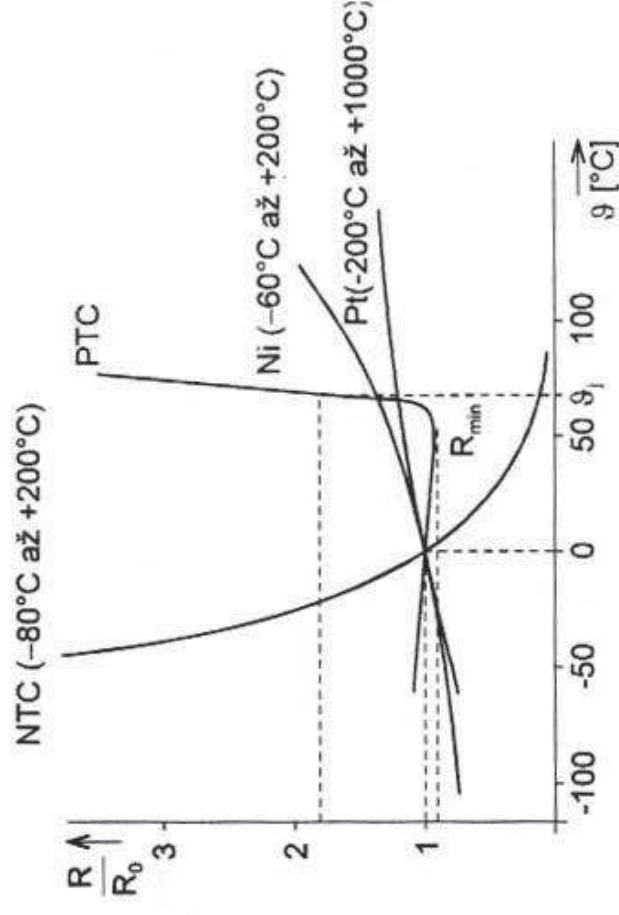
Princip

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[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

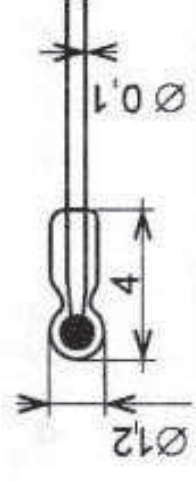
- $\alpha = -0,03$ až $-0,06 \text{ K}^{-1}$

- 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 (BaTiO₃)**
- **závislost odporu na teplotě (v oblasti nárůstu R)**

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

R_J

A

ϑ

ϑ_J

odpor při referenční teplotě ϑ_J

materiálová konstanta (0,16K⁻¹)

teplota

referenční teplota (dle chem. složení 60 až 180°C)

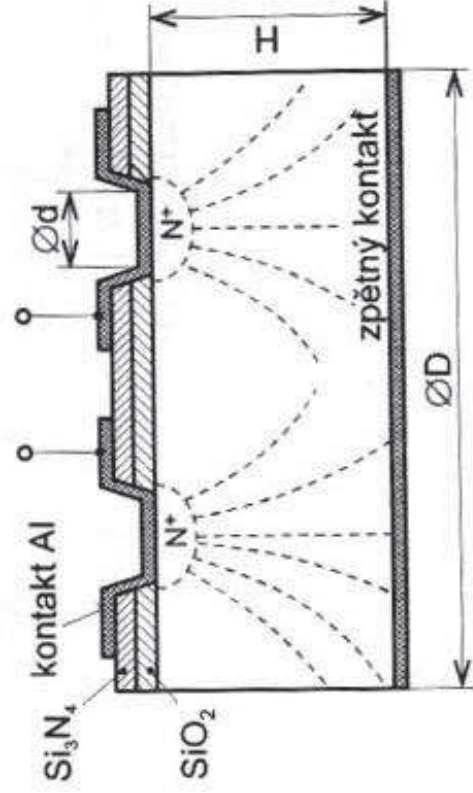
- **použití**
 - měření v úzkém rozsahu teplot
 - dvoustavové snímač (signalizace překročení přípustné teploty)

Polovodičové monokrystalické snímače

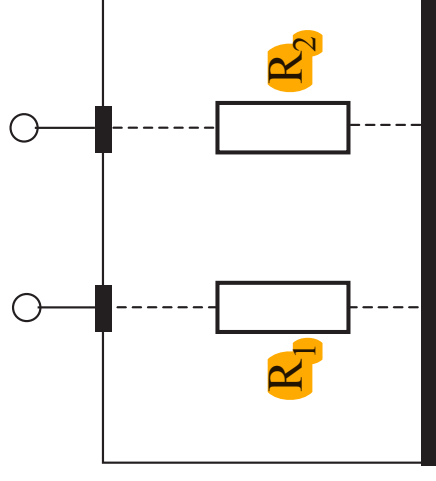
Princip

- 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 R₁ a R₂

Teplotní závislost odporu

Závislost odporu na rozměrech snímače

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

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

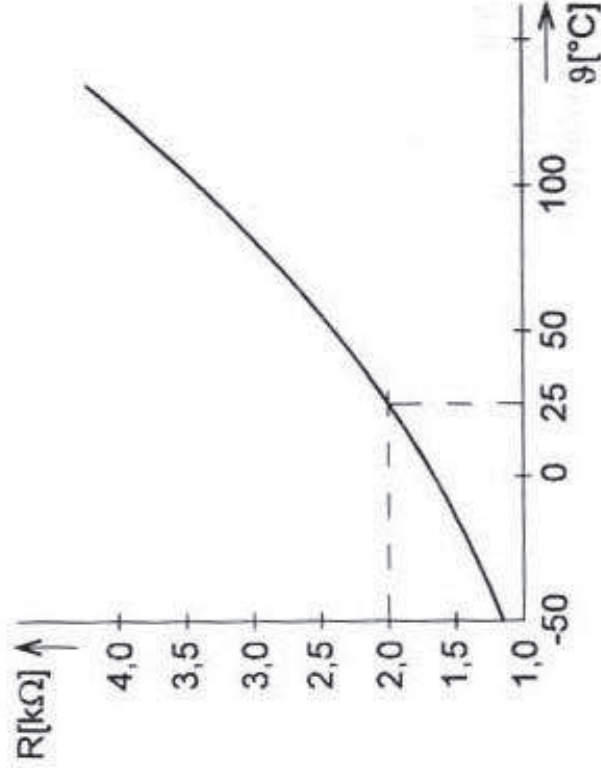
d průměr kontaktu

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:**

• **jmenovité hodnoty R_{25}**

• **α (řádově)**

• **příklad KTY10**

-50 až 150 °C

1; 2 kΩ

10^{-2} K^{-1}

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:

$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{D}$$

D [W.K⁻¹] zatěžovací konstanta - příkon
potřebný k ohřátí senzoru o 1K

- maximální měřicí proud

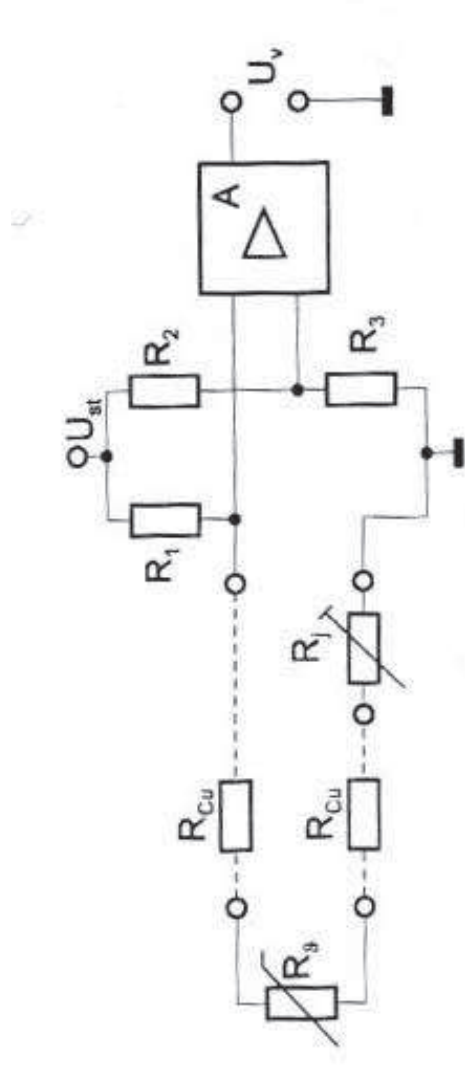
$$I_{\text{dov}} = \sqrt{\frac{\Delta\vartheta \cdot D}{R}}$$

$\Delta\vartheta$ maximální dovolená chyba
 R maximální odpor senzoru v daném rozsahu

- 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

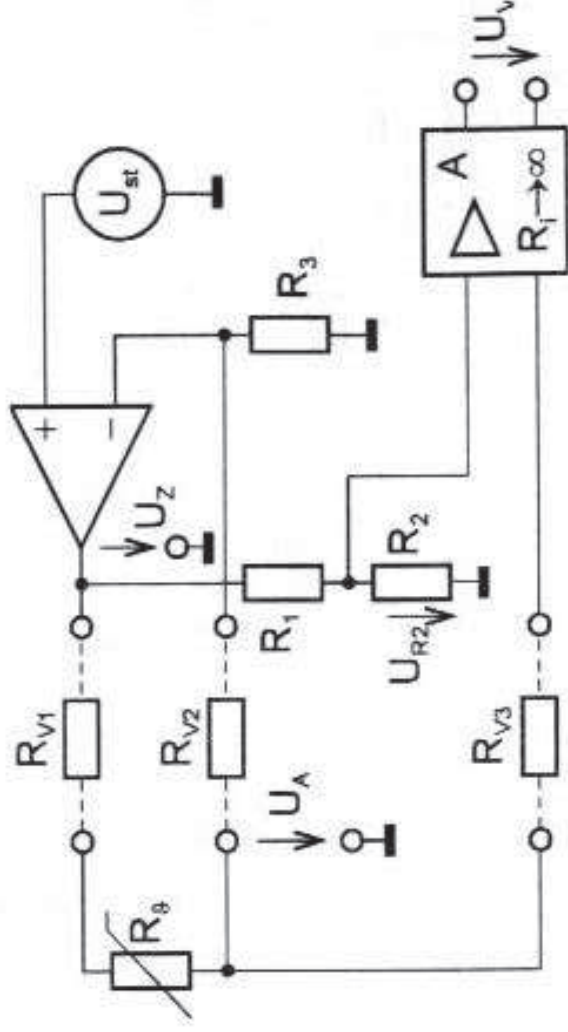


Obr. 3.11 Dvou vodičové můstkové připojení odporového senzoru teploty

- 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



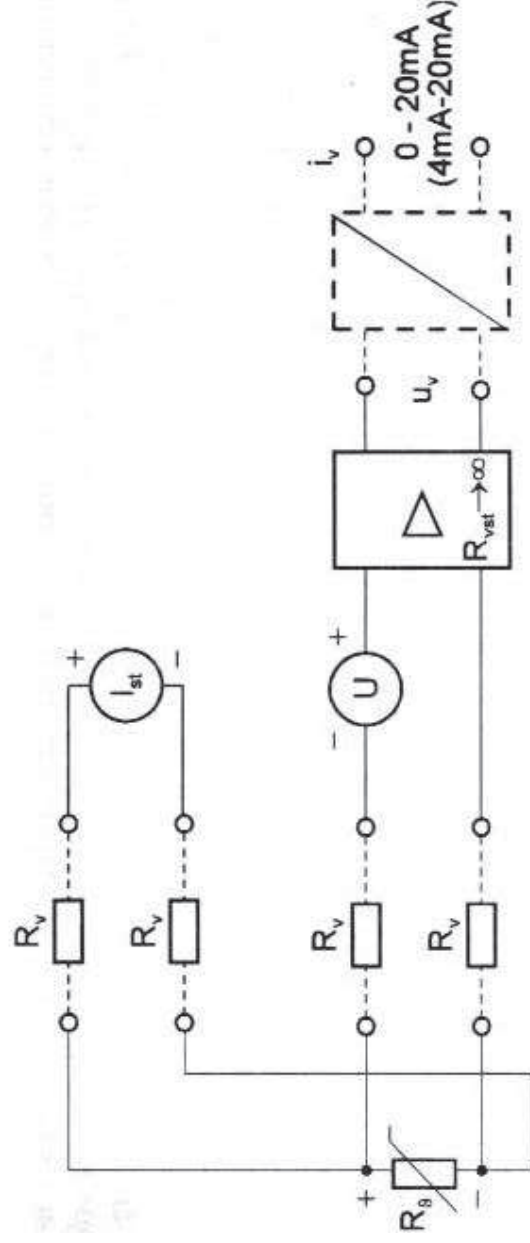
- zvolíme-li $R_1=R_2=R$, $R_3=R$, $R_3=R_{gZ}$
- vyjádříme-li $R_g = R_{gZ} + \Delta R_g$
- pak platí:

$$U_v = A \cdot U_{st} \cdot \frac{\Delta R_g}{2 \cdot R_{gZ}}$$

Čtyřvodičové zapojení s proud. zdrojem

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

$$U_V = A \cdot (I_{st} \cdot R_{\partial Z} - U)$$
$$= A \cdot I_{st} \cdot \Delta R_{\partial Z}$$



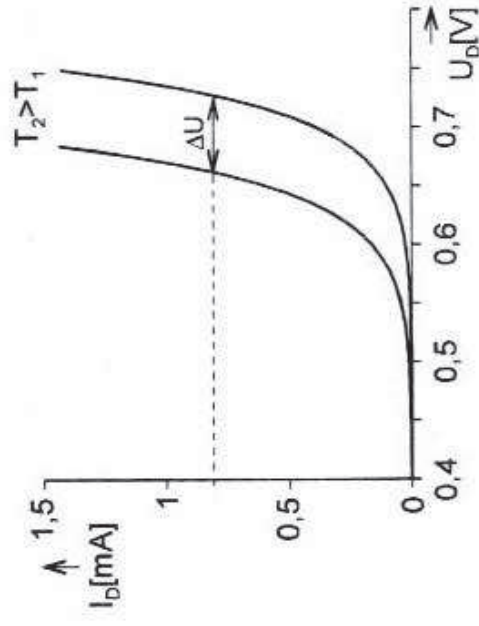
Obr. 3.13 Čtyřvodičový měřicí obvod se zdrojem proudu I_{st} a pomocným zdrojem napětí U ($R_v = R_{cv}$)

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 hlavice 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:

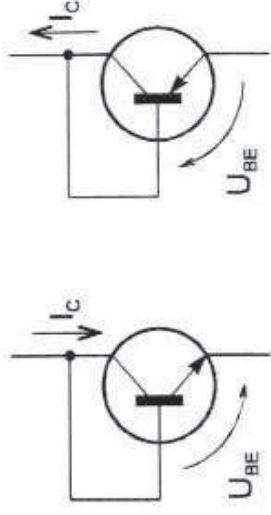


Teplotní závislost napětí $\Delta U_D = f(T)$ PN-diody

- **Material**
 - křemík
 - galiumarsenid

Tranzistorové PN senzory

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

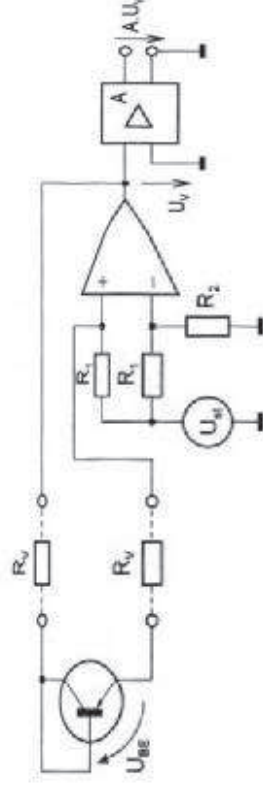


Tranzistorová dioda

- **vyhodnocovací obvod**

- ze schématu lze odvodit vztah:

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



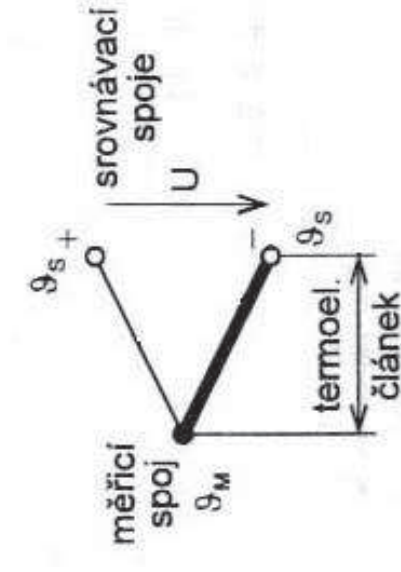
Aktivní můstek s tranzistorovou diodou

Termoelektrické snímače teploty

- **Princip**
 - vznik termoelektrického napětí (Seebeckův jev)
 - materiál kovy (různé), polovodiče
 - výpočet napětí pro malý rozdíl teplot:
$$U = \alpha_{12} (\vartheta_m - \vartheta_s) \text{ [mV, mV/K, K]}$$
$$\alpha_{12} \text{ termoelektrický koeficient}$$
 - 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



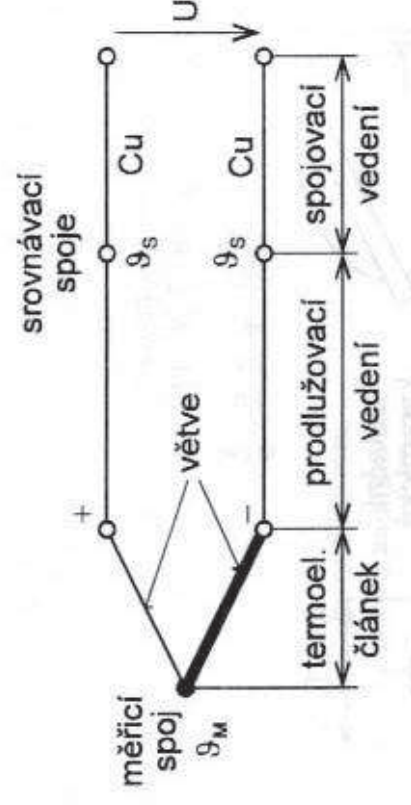
Kompensace teploty srovnávacího konce

Druhy kompenzací

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

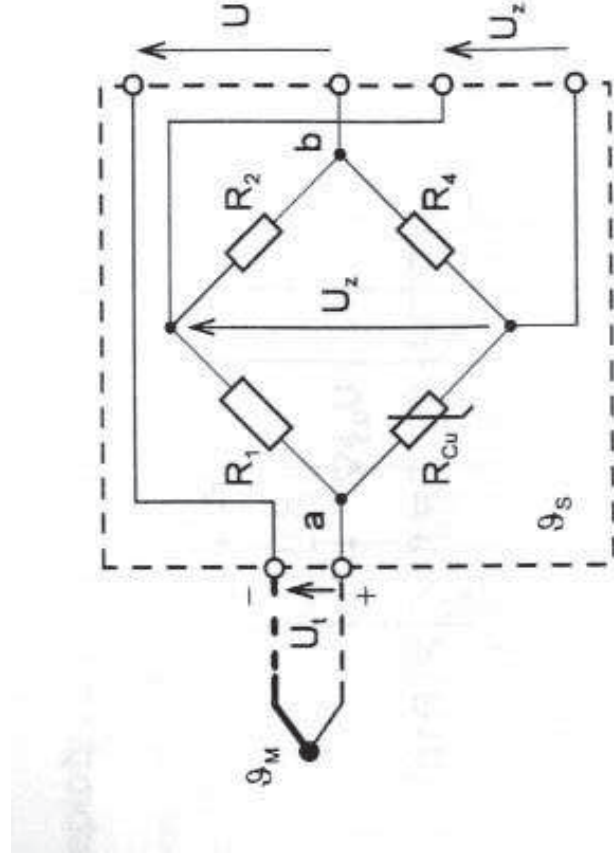
Kompenzační vedení

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



Kompenzační krabice

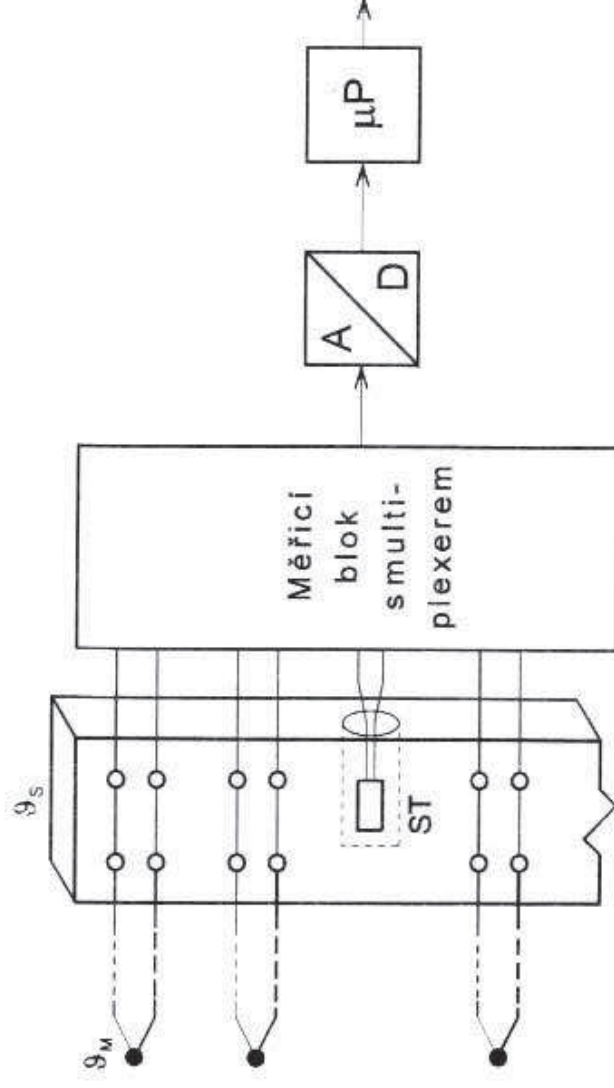
- do série s termočlánkem umístěn odporový můstek
- v jedné větvi můstku je teplotně závislý odpor (Cu)
- výstupní napětí můstku se superponuje k napětí termočlánku



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):

$$l_9 = l_0 \cdot [1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)]$$

l_9
 l_0
 α

délka při měřené teplotě

délka při vztážené teplotě

součinitel délkové roztažnosti

Provedení:

trubice - velký součinitel α (mosaz)

tyč - malé α (invar, křemen)

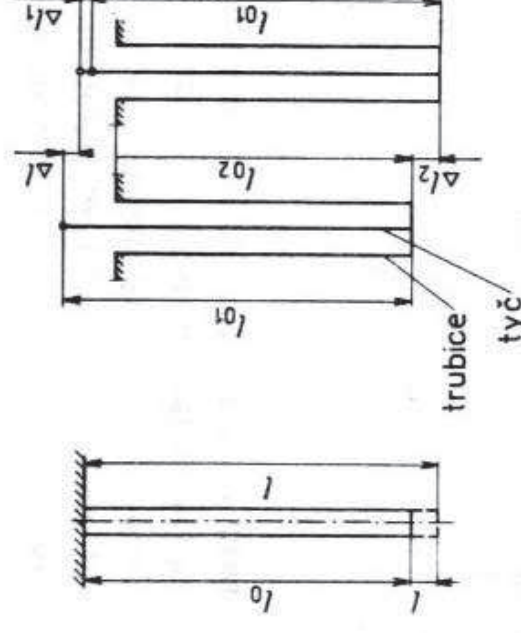
Vlastnosti

malá citlivost (převody)

měří průměrnou teplotu (po celé délce)

Použití

jednoduché obvody dvoupoloh. regulace

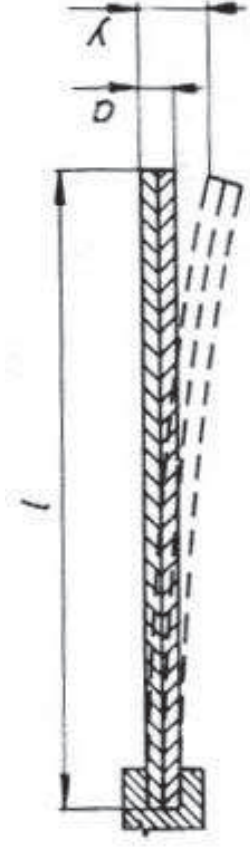


Kovové snímače teploty

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:



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

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

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

$$\frac{V_{\vartheta}}{V_0}$$

$$\beta$$

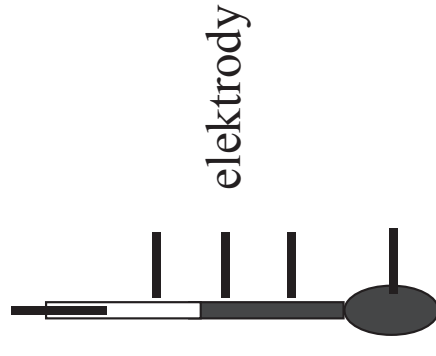
objem při měřené teplotě

objem při vztážené teplotě

součinitel objemové roztažnosti

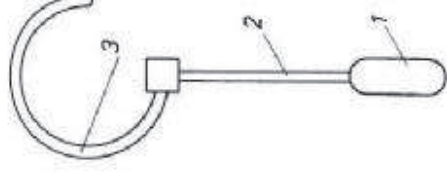
- **Provedení**

- 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), xylén (-40 až 400 °C), metylalkohol (-20 až 290 °C)
 - kompenzace teploty kapiláry
 - bimetal do vyhodnocovacího zařízení
 - kompenzační kapilára
- **plynové snímače**
 - N_2 , H_2 , CO_2
 - 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

Bezdotykové měření teploty

- **Princip**
 - vyhodnocení tepelného záření vysílaného měřeným předmětem
 - závislost intenzity záření H_0 černého tělesa na teplotě
 - závislost lze popsat matematicky

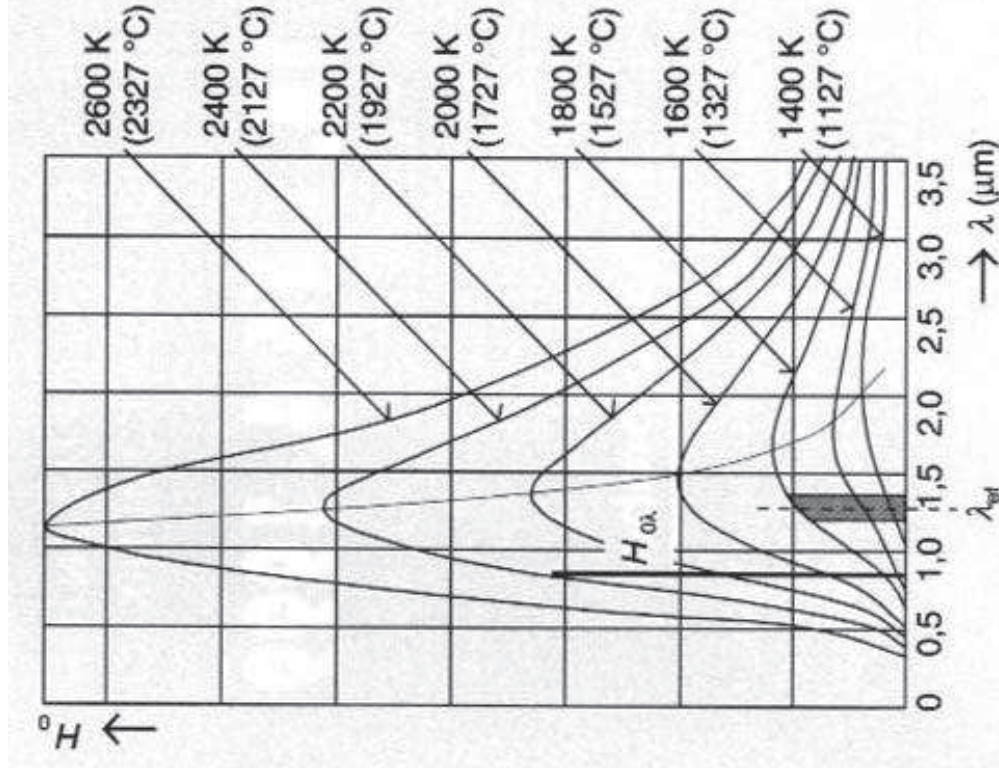
- **Rozdělení pyrometrů**

podle rozsahu vlnových délek

- monochromatické
- pásmové
- radiální (celé spektrum)

podle způsobu detekce

- subjektivní (lidské oko)
- objektivní (detektory záření)
 - selektivní (Si fotočlánek)
 - neselektivní (termočlánek)

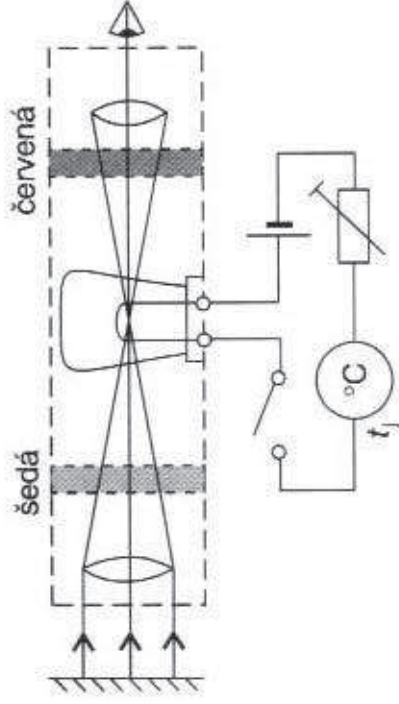


Monochromatické pyrometry

- **Jasové pyrometry**
 - využívají monochromatické záření ve viditelné oblasti $\lambda = 0,65\mu\text{m}$
 - pyrometr je vybaven
 - srovnávacím zdrojem záření (pyrometrická žárovka)
 - vnitřní optikou
 - červeným filtrem
 - obvody pro modulaci jasu přijímaného nebo srovnávacího záření
 - jas měřeného objektu se lidským okem přes filtr porovnává s jasnem srovnávacího zdroje

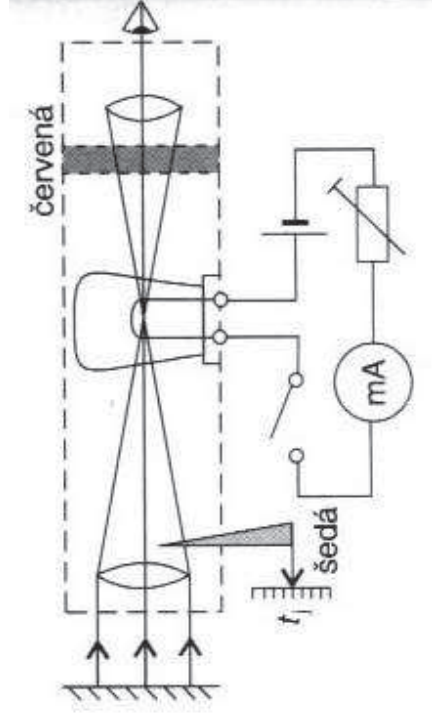
Provedení jasových pyrometrů

- Pyrometry s mizejícím vláknem



- mění se jas pyrometrické žárovky
- je-li jas tělesa a jas žárovky stejný vláknem není vidět
- mA - metr je ocejchován ve °C
- rozsah omezen teplotou wolframového vlákna (700 až 1500 °C)
- zvětšení rozsahu - šedý filtr (3500 °C)

- Pyrometry s šedým klínem



- srovnávací zdroj má konstantní jas
- klínový šedý filtr mění jas tělesa
- měřicí rozsah (700 až 3500 °C)
- podstatně delší životnost srovnávacího zdroje

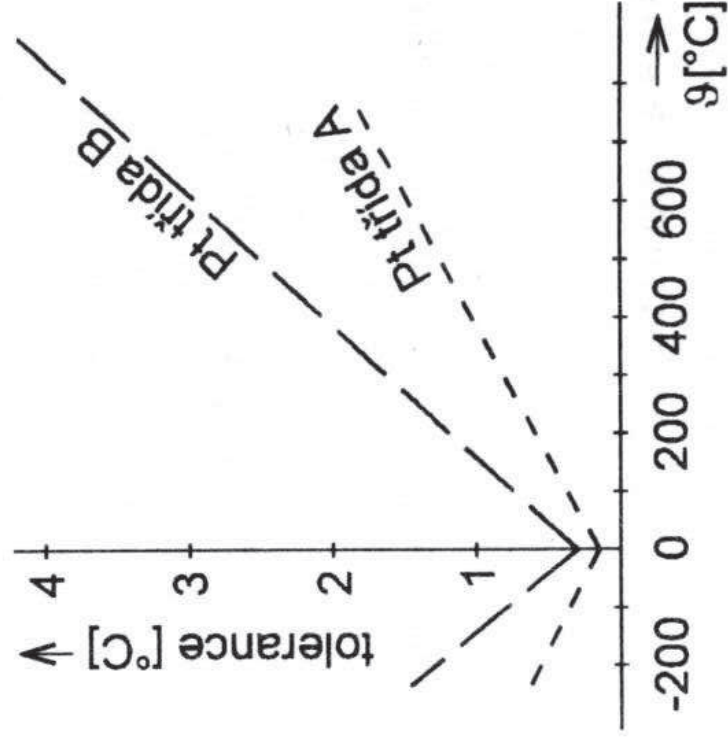
Korekce naměřené teploty

- **Naměřeným údajem je jasová teplota černého tělesa**
 - ve skutečnosti není žádný objekt černým tělesem!!
 - **spektrální emisivita**: poměr mezi zářením černého tělesa a skutečného tělesa
 - spektrální emisivita vybraných materiálů

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{H_{\lambda}}{H_{0\lambda}}$$

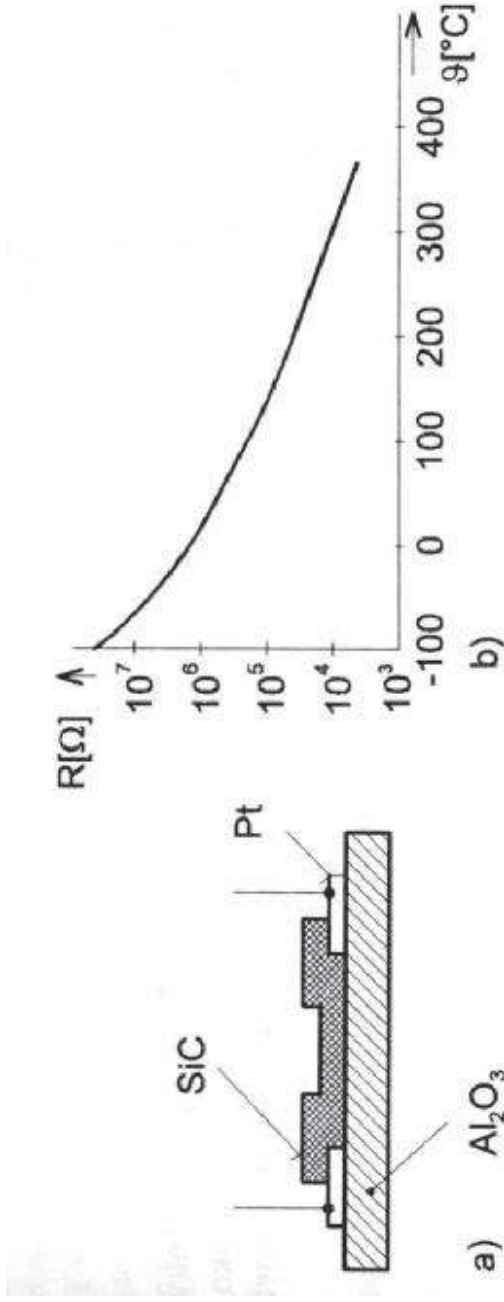
- podle spektrální emisivity je třeba naměřenou teplotu korigovat
- z korekčního grafu odečteme hodnotu Δt , kterou je třeba k údajům pyrometru přičíst

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

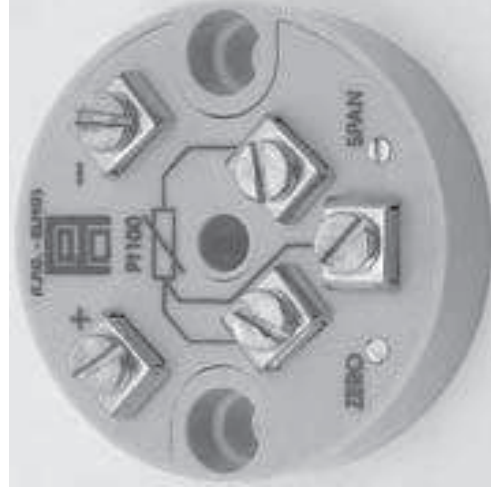
Konstanta B

- dle teploty rozsah 1600 K až 3400 K

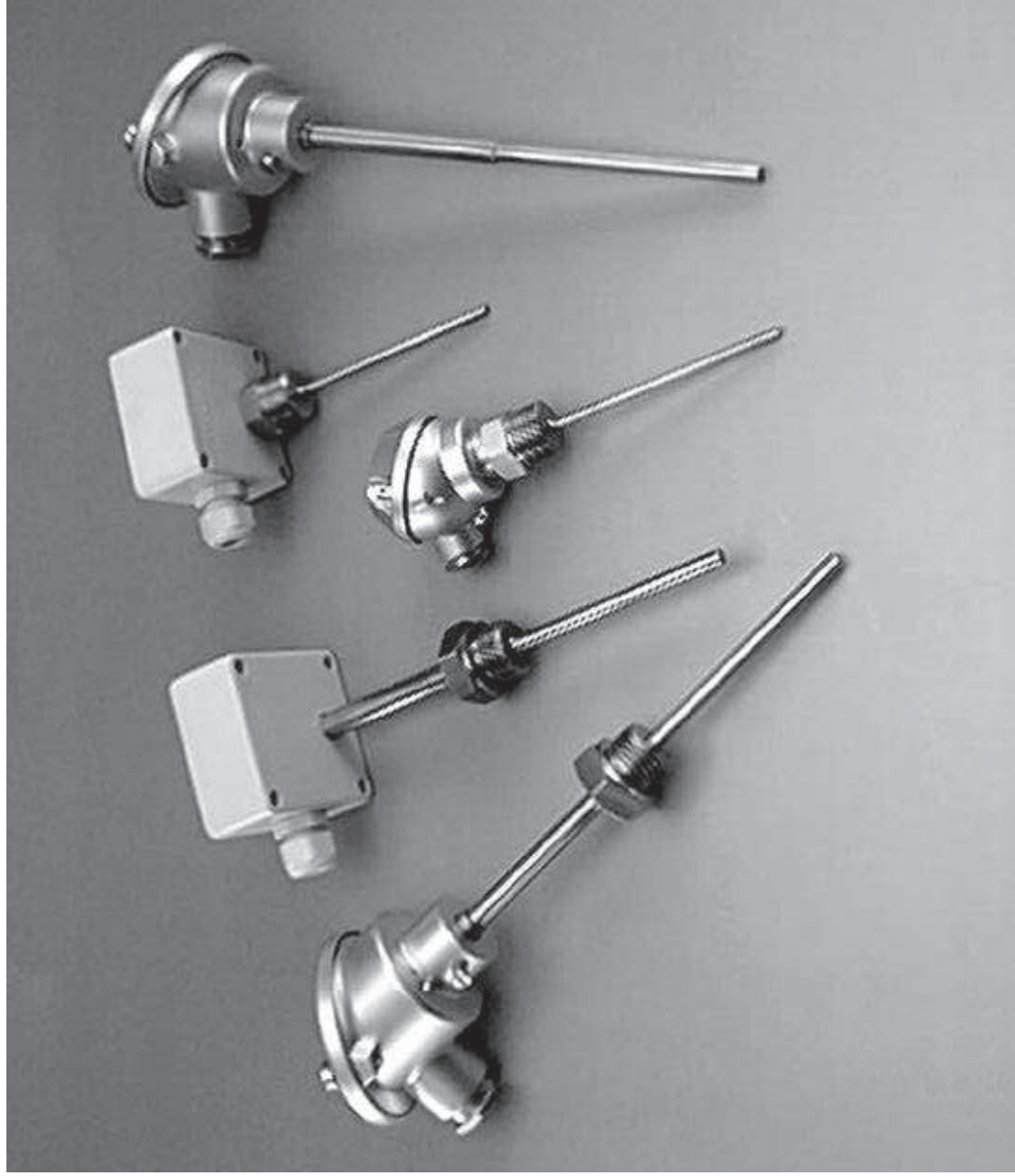
Základní hodnota R (při 25 $^{\circ}\text{C}$)

- 10 $\text{k}\Omega$ až 1 $\text{M}\Omega$

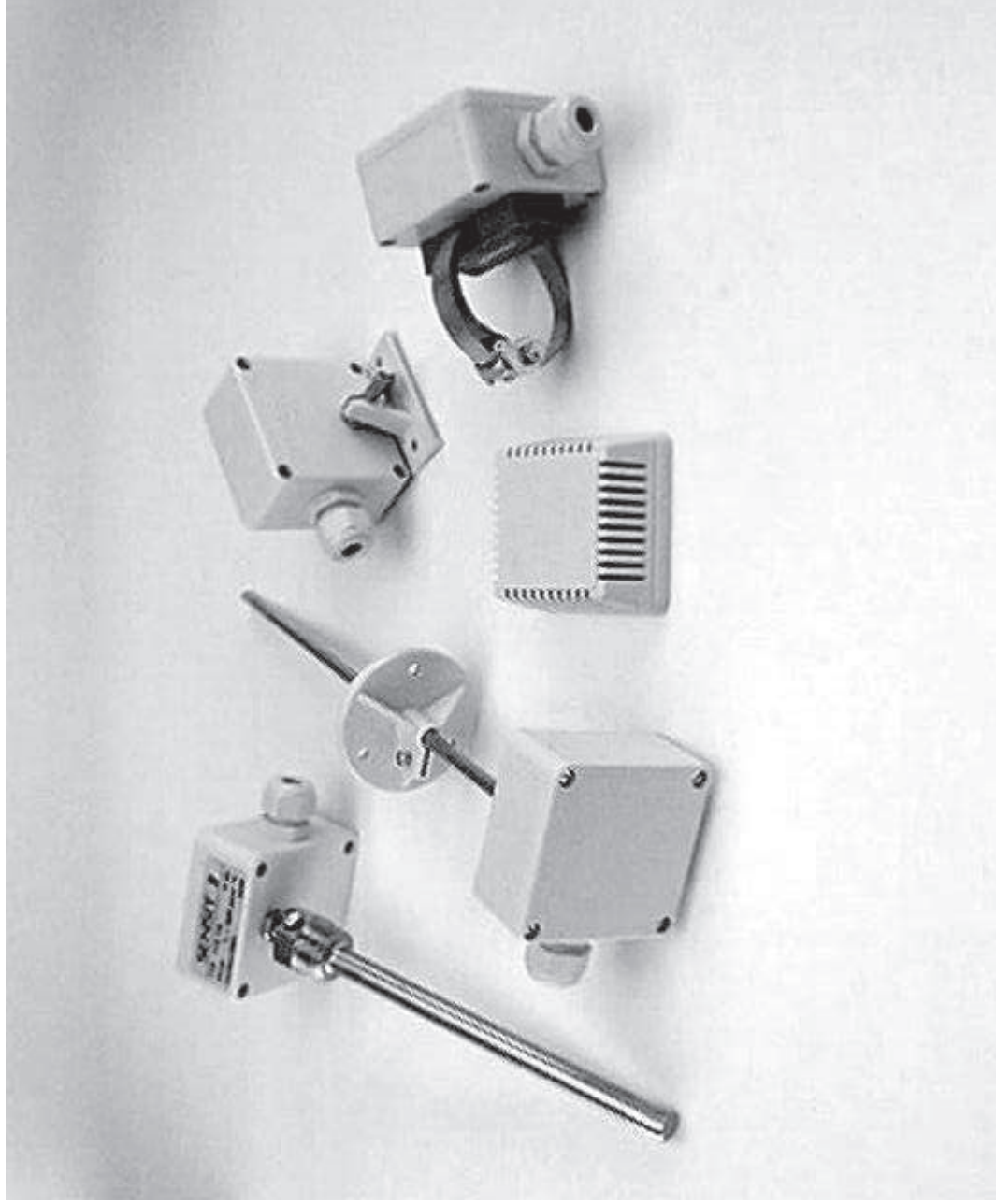
Dvojvodičové převodníky pro Pt100



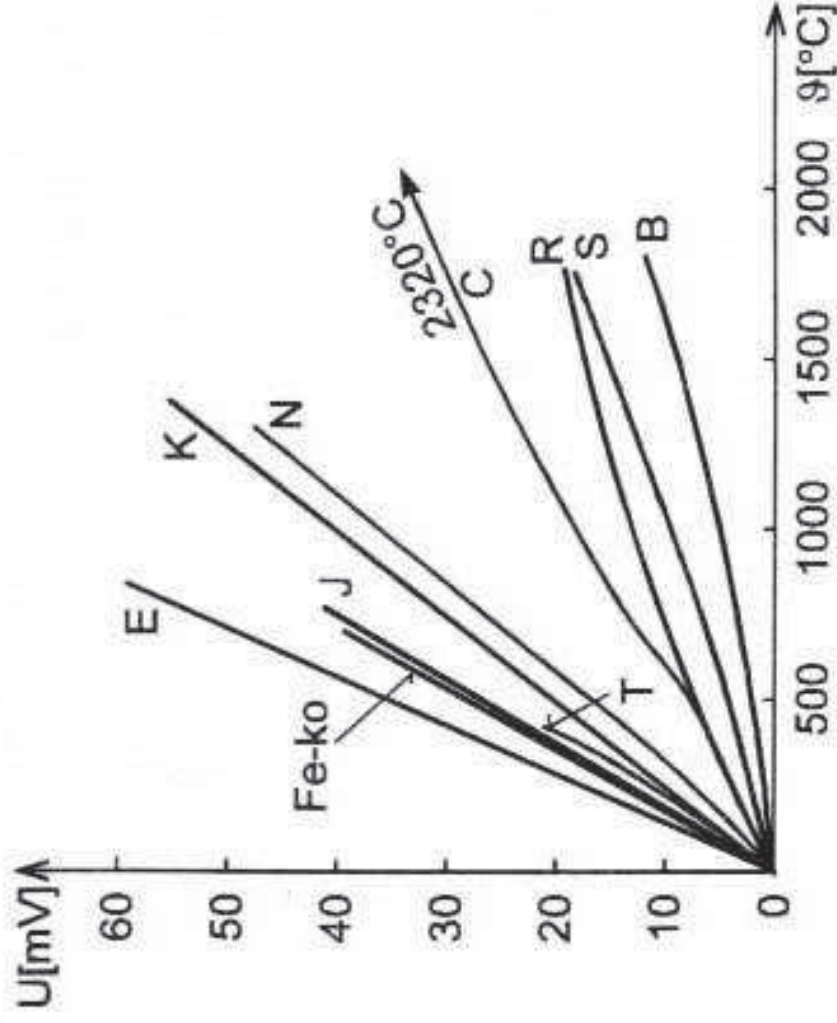
Jímkové odporové teploměry



Prostorové odporové teploměry



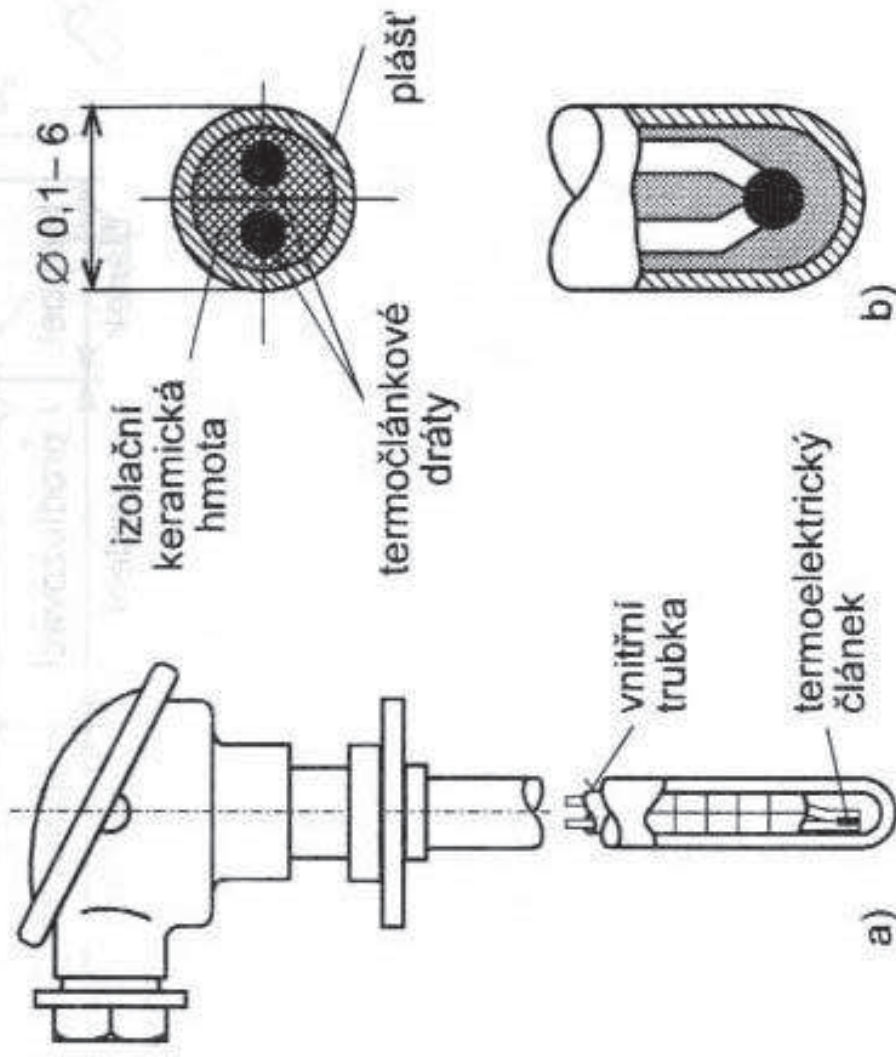
Statické charakteristiky termočlánků



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



(a - tyčový termoelektrický teploměr, b - plášťový termoelektrický článek s izolovaným měřicím spojem)

Korekční graf pro jasový pyrometr

Tab. 1. Hodnoty spektrální emisivity ϵ_λ materiálů při $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$	
Materiál	ϵ_λ
hliník neoxidovaný	0,12 až 0,18
železo tuhé, lesklé	0,32 až 0,42
železo kapalně, neoxid.	0,45 až 0,53
železo kapalně, oxid.	0,53 až 0,92
měď tuhá	0,10 až 0,35
měď kapalná, neoxid.	0,12 až 0,20
nikl tuhý	0,31 až 0,45
nikl kapalný	0,35
olovo kapal. bez strusky	0,50 až 0,60
wolfram	0,37 až 0,48
zinek	0,25 až 0,40
Al_2O_3	0,11 až 0,40
FeO tuhý	0,63 až 0,95
Mg, MgO	0,08 až 0,51
platina	0,28 až 0,42
grafit, uhlí	0,65 až 0,97
vápenec	0,82 až 0,92
porcelán	0,26 až 0,51
struska	0,71 až 0,98
dinasové cihly	0,92 až 1,00

