

# MĚŘENÍ TEPLOT

## **G** STUDIJNÍ CÍLE

Po prostudování :

- § Porozumíte problematice měření teploty.
- § Pochopíte principy jejího měření.
- § Seznámíte se základními vlastnostmi a principy teplotních senzorů.
- § Pochopíte výhody a nevýhody jednotlivých typů senzorů.

## **Ñ** KLÍČOVÁ SLOVA

termodynamická teplota, teplotní senzor, termočlánek, termovize.

## **Â** ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

240 minut

## & Text k prostudování

### 1. ZÁKLADNÍ POJMY

Správné měření teploty má rozhodující význam ve všech případech užití elektrického tepla. Každý tepelný pochod má určitou optimální teplotu, při které se získá výrobek, nebo při které proběhne daný výrobní pochod nejrychleji a nejoptimálněji, tj. s minimální spotřebou elektrické energie.

Veličina, název	značka	základní název	jednotka značka	vedlejší název	jednotka značka
termodynamická teplota	$\Theta$	kelvin	K		
Celsiova teplota	t			Celsiův stupeň	°C

Tab. 1.1 Základní veličiny

Kelvin jako základní jednotka termodynamické teploty je 273,16 část termodynamické teploty trojného bodu vody. Kromě termodynamické teploty se používá také Celsiovy teploty definované rovnicí

$$t = T - T_0 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.1)$$

kde  $T_0 = 273,15 \text{ K}$

Obě jednotky ( $^{\circ}\text{C}$ , K) lze použít pro vyjádření teplotního rozdílu, přičemž platí

$$\Delta t = \Delta T \quad [^{\circ}\text{C}, \text{K}] \quad (1.2)$$

Termodynamická teplotní stupnice je teoreticky definována na základě termodynamických zákonů nezávisle na vlastnostech reálných látek. K definování termodynamické stupnice lze použít vztahů :

#### a) z účinností Carnotova vratného cyklu

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \text{platí} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.3)$$

kde  $Q_1$  je teplo přijaté a  $Q_2$  je teplo odevzdané ze zásobníku Carnotova stroje pracujícího mezi teplotami  $T_1$  a  $T_2$ .

#### b) ze stavové rovnice pro konstantní objem ideálního plynu platí

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.4)$$

#### c) pro rychlost zvuku v ideálním plynu platí

$$w^2 = \frac{c_p}{c_v} - \frac{R \cdot T}{M} \quad (1.5)$$

kde  $c_p$ ,  $c_v$  jsou měrná tepla,  $R$  je plynová konstanta,  $M$  je molekulová hmotnost plynu.

V roce 1927 stanovena Mezinárodní praktická teplotní stupnice. Tato stupnice byla postupně generálními konferencemi pro váhy a míry doplňována a upravována. Její poslední znění je z roku 1990 a má označení ITS-90 (The International Temperature Scale of 1990).

ITS-90 je empirickou teplotní stupnicí stanovenou na 17 pevně definovaných teplotních bodech.

	teplota			
$T_{90}$ (K)	$t_{90}$ (°C)	látko	stav	$W_r(T_{90})$
3 až 5	-270,15 až -268,15	He	tlak syté páry	
13,8033	-259,3467	e-H <sub>2</sub>	trojný bod	0,00119007
~17	~ -256,15	e-H <sub>2</sub> (He)	tlak syté páry	
~20,3	~ -252,85	e-H <sub>2</sub> (He)	tlak syté páry	
24,5561	-248,5939	Ne	trojný bod	0,008 449 74
54,3584	-218,7916	O <sub>2</sub>	trojný bod	0,091 71804
83,8058	-189,3442	Ar	trojný bod	0,215 85975
234,3156	-38,8344	Hg	trojný bod	0,844 142 11
273,16	0,01	H <sub>2</sub> O	trojný bod	1,00000000
302,9146	29,7646	Ga	bod tání	1,118 13889
429,7485	156,5985	In	bod tuhnutí	1,609801 85
505,078	231,928	Sn	bod tuhnutí	1,892 797 68
692,677	419,527	Zn	bod tuhnutí	2,56891730
933,473	660,323	Al	bod tuhnutí	3,376008 60
1234,93	961,78	Ag	bod tuhnutí	4,286 420 53
1337,33	1064,18	Au	bod tuhnutí	
1357,77	1084,62	Cu	bod tuhnutí	

Tab. 1.2 Definiční pevné body ITS-90

ITS-90 je dle interpolačních přístrojů rozdělena do čtyř rozsahů:

**a) Rozsah od 0.65 K do 5.0 K**

Teplota  $T_{90}$  je definována tlakem páry <sup>3</sup>He nebo <sup>4</sup>He.

**b) Rozsah od 3 K do 24,556 K**

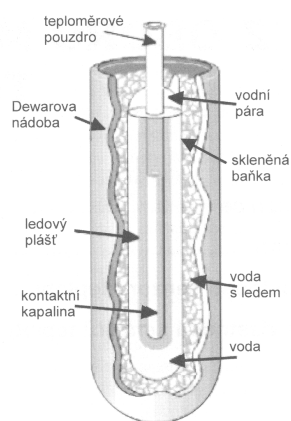
je definován tlakem plynového teploměru.

**c) Rozsah od 13,8033 K do 961.8 °C**

je definován rovnicemi pro platinový odporový teploměr. Tento rozsah se dále člení do čtyř rozsahů v pásmu od 13,8033 K do 273,16 K a do dalších šesti rozsahů v pásmu od 0°C do 961,8°C. Pro uvedené rozsahy se zavádí odporový poměr  $W(T_{90})$  vztahem.

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273,16)K} \quad (1.6)$$

kde  $R(T_{90})$  je odpor platinového teploměru.



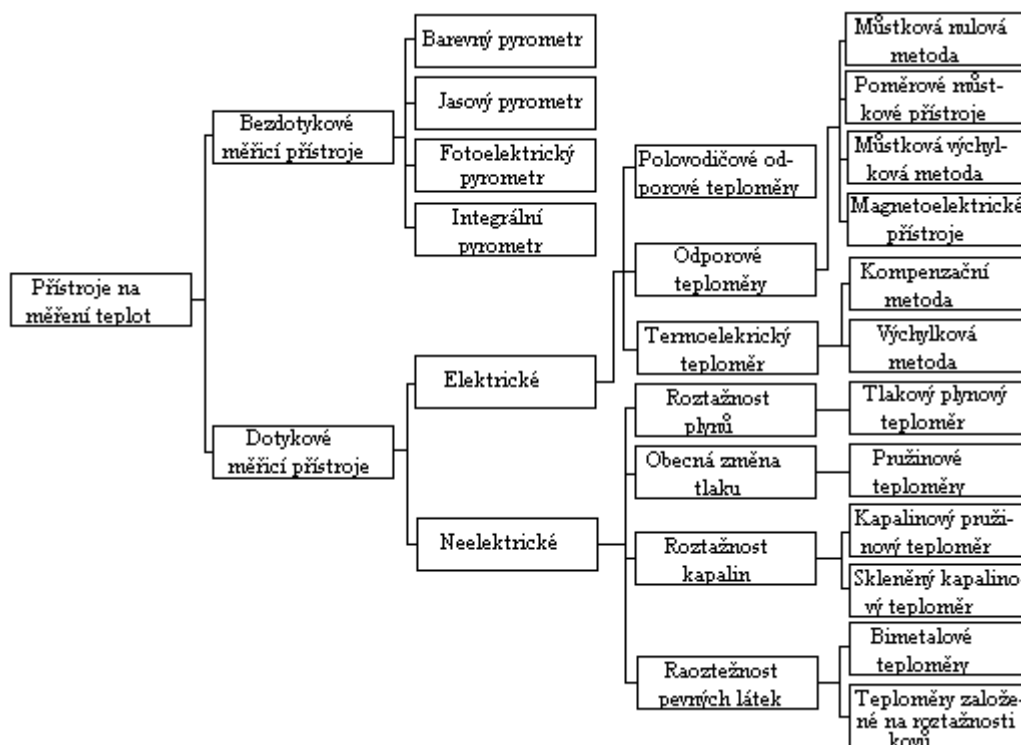
Obr. 1.1 Realizace trojného bodu vody

#### d) Rozsah nad 961,8 °C

je definován Planckovým vyzařovacím zákonem.

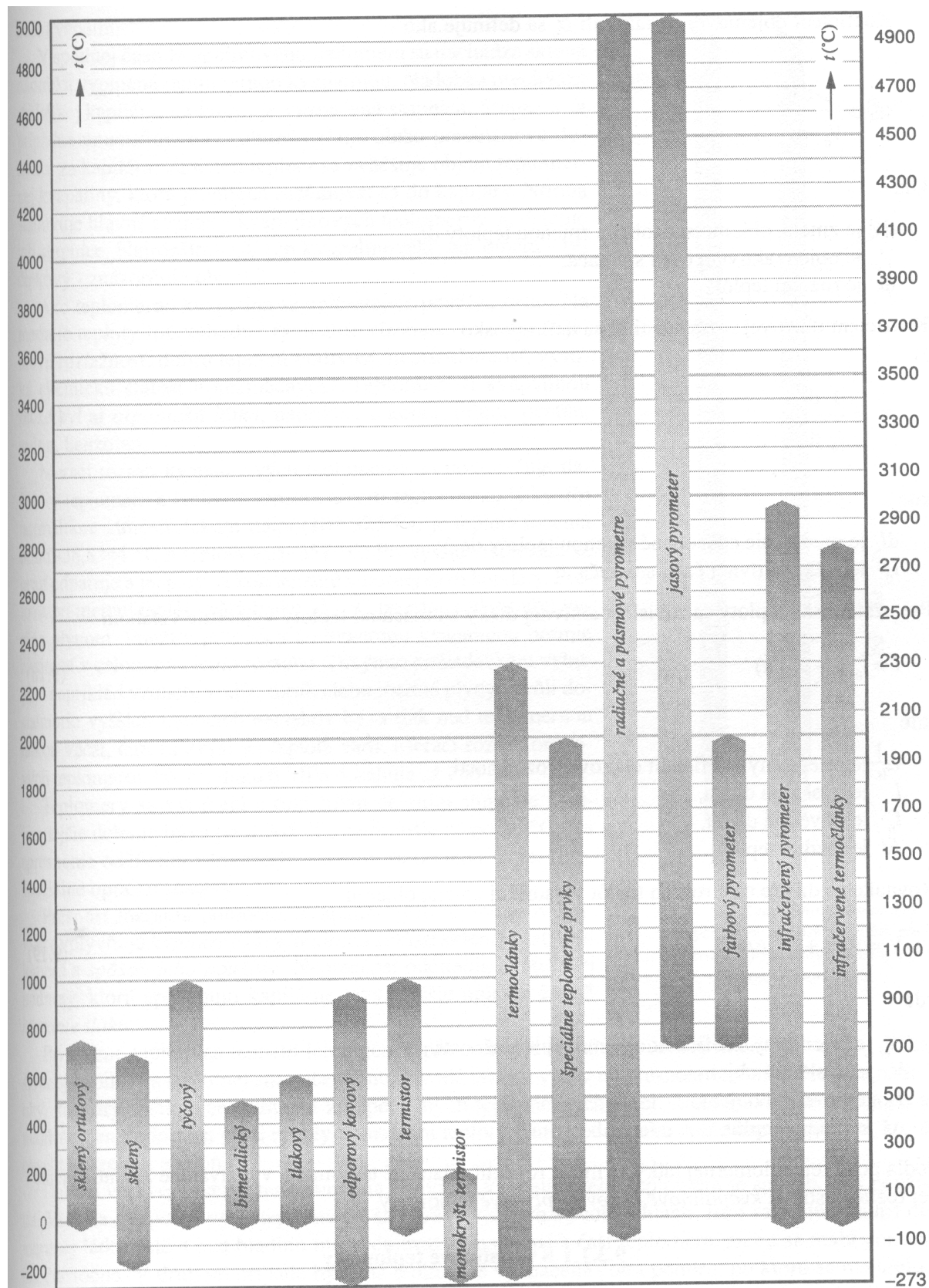
## 2. TEPLoměRY (SENZORY TEPLoty)

Jsou to funkční prvky, které tvoří vstupní blok měřicího řetězce – je v přímém styku s měřeným prostředím. Základní členění je uvedeno v tabulce 2.1.



Tab. 2.1 Základní rozdělení teploměrů

Na Obr. 2.1 je uvedeno rozpětí měřených teplot pro jednotlivé druhy teploměrů



Obr. 2.1 Teplotní rozsahy teploměrů

## 2.1 Statické vlastnosti senzorů teploty

### Statická charakteristika

je dáno funkční závislostí  $Y = f(X)$  mezi měřenou veličinou (teplotou) a transformovanou veličinou  $Y$  v časově ustáleném stavu.

Ideální statická charakteristika senzoru je

$$Y = K \cdot X \quad (2.1)$$

kde  $K$  je citlivost senzoru.

### Práh citlivosti

je dán hodnotou měřené veličiny, při níž je na výstupu senzoru signál odpovídající střední kvadratické odchylce šumu senzoru. Pro napěťový výstupní signál je dán směrodatnou odchylkou šumového napětí  $u_s$ .

$$u_r = \sqrt{u_s^2} \quad (2.2)$$

### Dynamický rozsah

je dán intervalem přípustných hodnot snímané veličiny, ohraničený prahem citlivosti a maximální hodnotou měřené veličiny.

### Reprodukovatelnost

je dána odchylkou naměřených hodnot při krátkodobě neměnné měřené veličině a neměnných rušivých vlivů okolí.

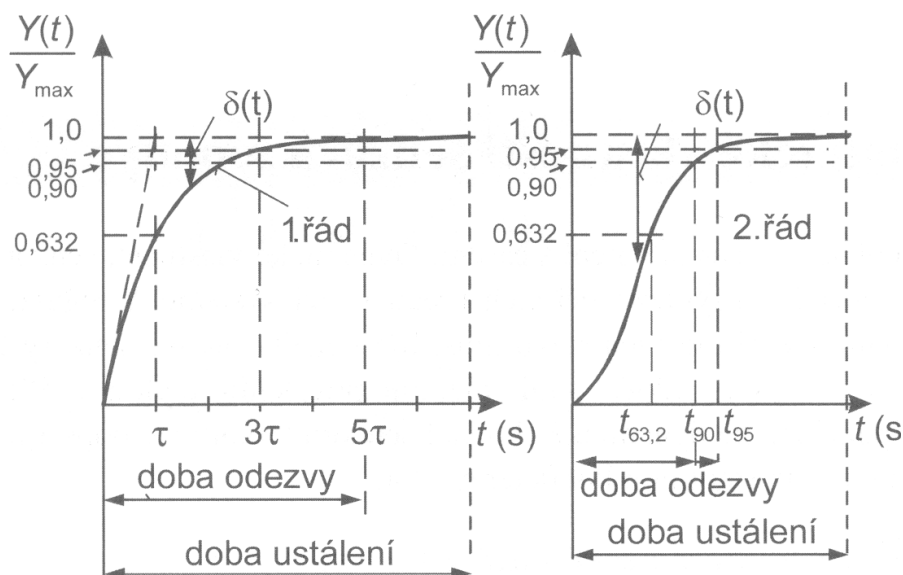
### Rozlišitelnost

je poměr věrohodné měřené veličiny a prahu citlivosti.

## 2.2 Dynamické vlastnosti senzorů teploty

Měřená teplota se neustále mění s časem. Dynamické vlastnosti je nutné znát pro analýzu a syntézu měřicích a regulačních systémů. Lze je popsat diferenciálními rovnicemi 1. a 2. řádu. Graficky se dynamické vlastnosti zobrazují přechodovou charakteristikou, tj. odezvou na jednotkový skok teploty nebo rychlostní charakteristikou, tj. odezvou na změnu teploty konstantní rychlostí. Senzory teploty nemají setrvačné hmotnosti > obě charakteristiky jsou vždy aperiodické nebo na mezi aperiodicity. Průběh typických přechodových charakteristik 1. a 2. řádu je Obr. 2.2.

Časová konstanta  $\tau$  je čas, za který odezva na skokovou změnu dosáhne 63,2% ustálené hodnoty. Výrobci senzorů uvádějí buď časovou konstantu  $\tau$  nebo tzv. dobu odezvy, tj. čas, za který dosáhne odezva 90% nebo 95% ustálené hodnoty nezávisle na hodnotě řádu.



Obr. 2.2 Přechodová charakteristika 1. a 2. řádu

### 3. KOVOVÉ ODPOROVÉ SNÍMAČE 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.

U kovů je jediným teplotně závislým parametrem relaxační čas, jehož hodnota je řádově  $10^{-13}$  s. Pro malý rozsah teplot  $0^{\circ}\text{C}$  až  $100^{\circ}\text{C}$  lze používat s určitou nejistotou lineární vztah :

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (3.1)$$

kde  $R_0$  je odpor čidla při teplotě  $0^{\circ}\text{C}$ . Lze tak stanovit střední hodnotu teplotního součinitele odporu  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad (3.2)$$

kde  $R_{100}$  je odpor čidla při teplotě  $100^{\circ}\text{C}$ .

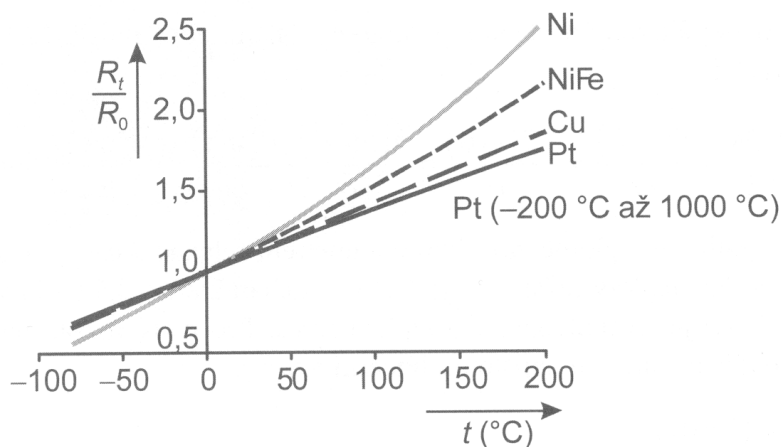
Dalším základním parametrem odporových snímačů teploty je poměr odporů čidla  $R_{100}$  při teplotě  $100^{\circ}\text{C}$  a  $R_0$  při teplotě  $0^{\circ}\text{C}$ . Tento poměr se označuje písmenem  $W$  dle vztahu :

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (3.3)$$

Pro větší rozsahy teplot již lineární vztahy nelze použít. Teplotní závislosti základních materiálů jsou na Obr. 3.1 a v Tab. 3.1.

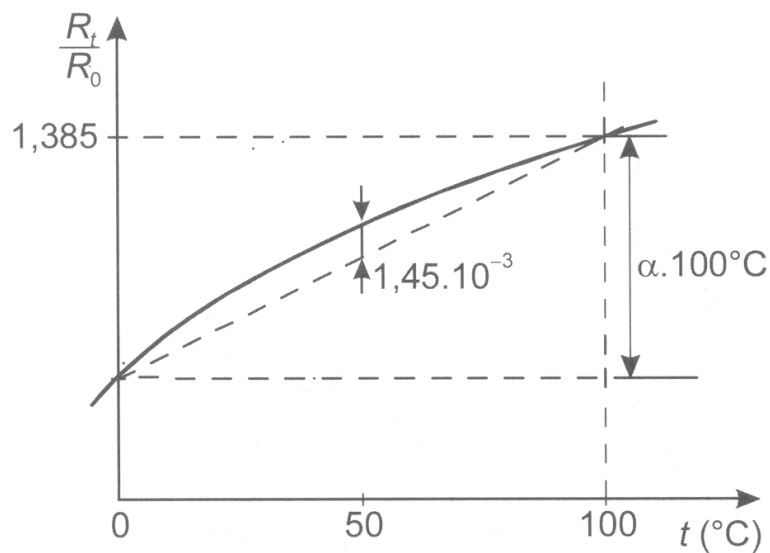
materiál	$\alpha \cdot 10^2 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	teplotní rozsah (°C)	poměr odporů $W_{100}$
platina	0,385 až 0,391	-20 až 850	1,3850
nikl	0,617 až 0,675	-70 až +150 (+200)	1,6180
Ni-Fe	0,518 až 0,527	-100 až +200	1,462
měď	0,426 až 0,433	-50 až +150	1,4260

Tab. 3.1 Materiály pro kovové snímače teploty



Obr. 3.1 Teplotní závislosti odporových teplotních snímačů

Kromě základní hodnoty odporu  $R_{100} = 100 \, \Omega$  se vyrábějí snímače se základní hodnotou odporu 50, 200, 500, 1000 a 2000  $\Omega$ . Pro platinové odporové snímače teploty je předepsán  $W_{100} = 1,385$ . Nelinearita  $Pt_{100}$  je na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Nelinearita  $Pt_{100}$

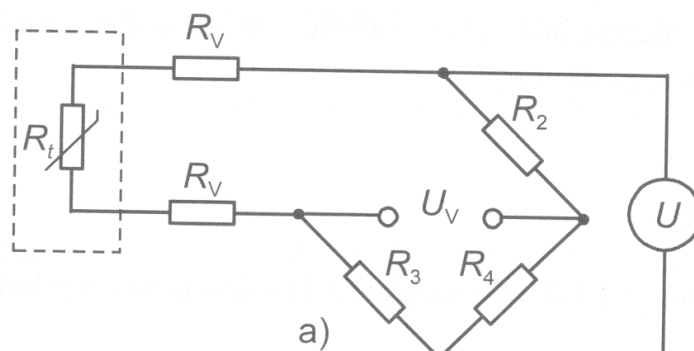


### 3.1 Měřicí obvody pro kovové odporové snímače teploty

#### Požadavky

- minimalizace vlivu proudu procházejícího čidlem
- minimální časová konstanta
- minimální vliv odporu vedení k měřicímu odporu
- linearizace závislosti odporu snímače na teplotě

Klasickým obvodem pro vyhodnocení odporových snímačů je Wheastoneův můstek (Obr. 3.3)



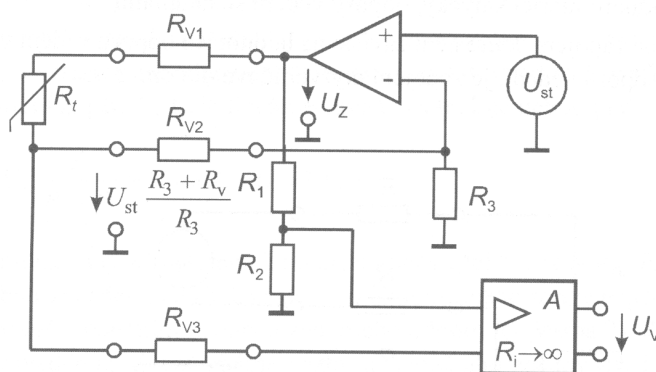
Obr. 3.3 Dvou vodičové zapojení

Pro vyvážení můstku je nutno splnit podmínku :

$$R_3 = R_2 = R \quad (3.4)$$

$$R_4 = R_{tz} = 2R_{Cu0} \quad (3.5)$$

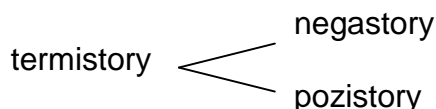
kde  $R_{tz}$  je odpor při počáteční teplotě. Při splnění těchto podmínek je citlivost můstku nejvyšší. V praxi se používá třívodičové zapojení s aktivním můstkem (Obr. 3.4), kde odporová síť operačního zesilovače zajišťuje proudové napájení snímače teploty.



Obr. 3.4 Třívodičové zapojení s aktivním můstkem

## 4. POLOVODIČOVÉ SNÍMAČE TEPLOTY

Využívají jako kovové senzory teplotní závislost odporu. Lze je rozdělit na :



monolitické odporové senzory

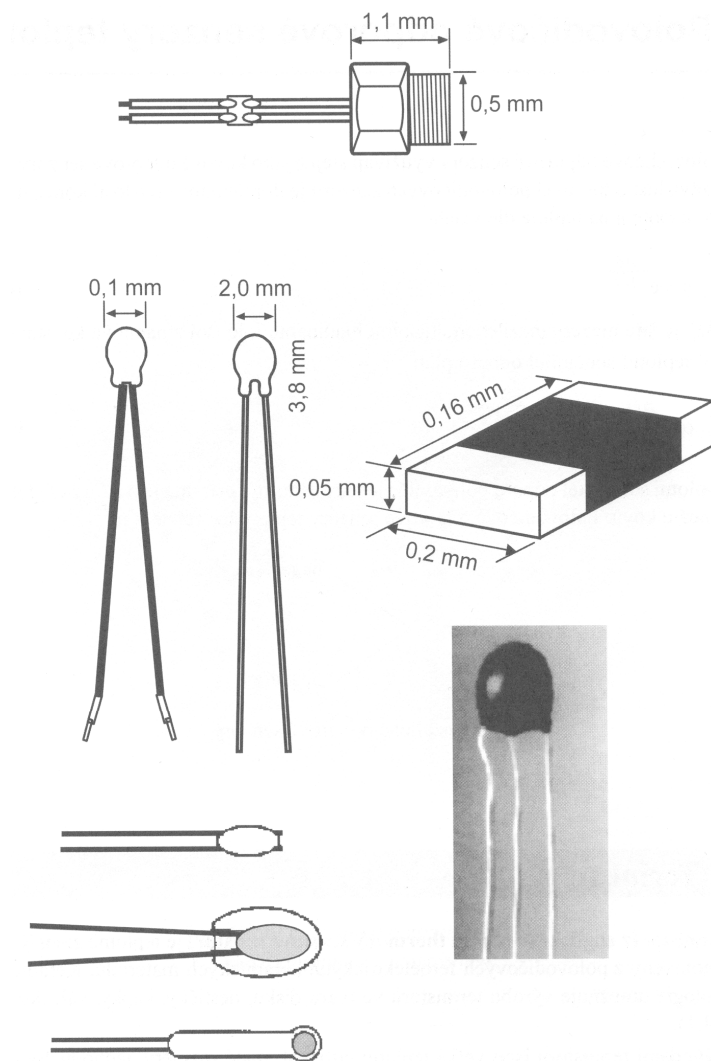
Termistor (z anglického popisu **thermally sensitive resistor**) je teplotně závislý odpor zhotovený z polovodičových feroelektrických keramických materiálů. Keramická technologie umožňuje výrobu termistorů ve tvaru disku, destičky, kapky, válečku, aj. (obr. 4.1).

Výhodami termistoru jsou velká teplotní citlivost, malé rozměry, jednoduchý převod odporu na elektrické napětí nebo proud a možnost přímého měření odporu termistoru na větší vzdálenost. Nevýhodou je nelineární charakteristika.

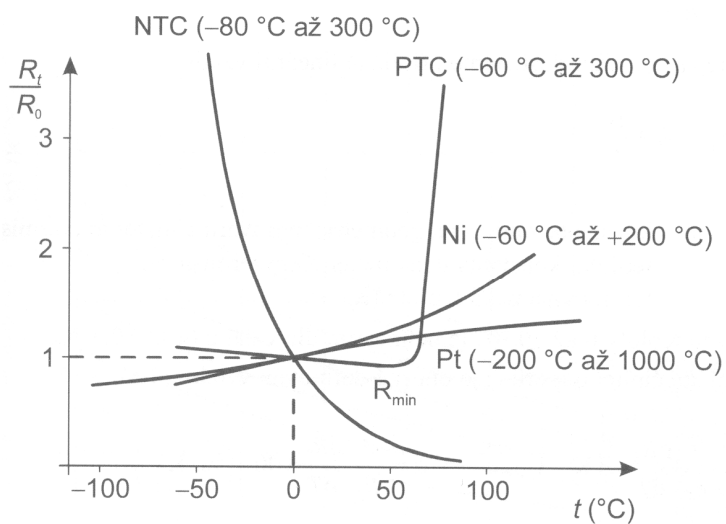
Termistory se dle struktury dělí na amorfnní a polykrystalické. V závislosti na materiálu má termistor buď velký záporný teplotní součinitel odporu, tzv. negastor neboli NTC termistor (Negative Temperature Coefficient) nebo velký kladný teplotní součinitel odporu, tzv. pozistor nebo-li PTC termistor (Positive Temperature Coefficient). Teplotní závislost odporu negastoru a pozistoru v porovnání s teplotní závislostí kovových odporových senzorů (Pt, Ni) je na obr. 4.2.

### 4.1 Negastory (NTC termistory)

Negastory se vyrábějí práškovou technologií z kysličníků kovů jako je kysličník chromu, kobaltu, mědi, železa, manganu, niklu a titanu např.  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO} + \text{CoO}$ . Vylisované senzory se zpevňují slinováním za vysokých teplot. Teplotní rozsahy negastorů jsou od běžných  $-50^\circ\text{C}$  do  $+150^\circ\text{C}$  až do extrémních rozsahů v oblasti nízkých teplot od  $+4,2^\circ\text{C}$  do vysokých teplot do  $1000^\circ\text{C}$ .



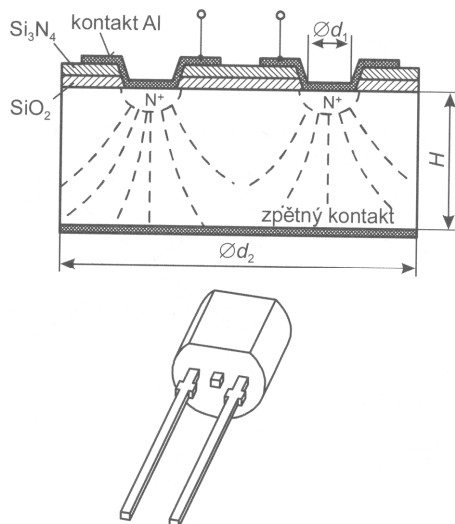
Obr. 4.1 Tvary miniaturních termistorů



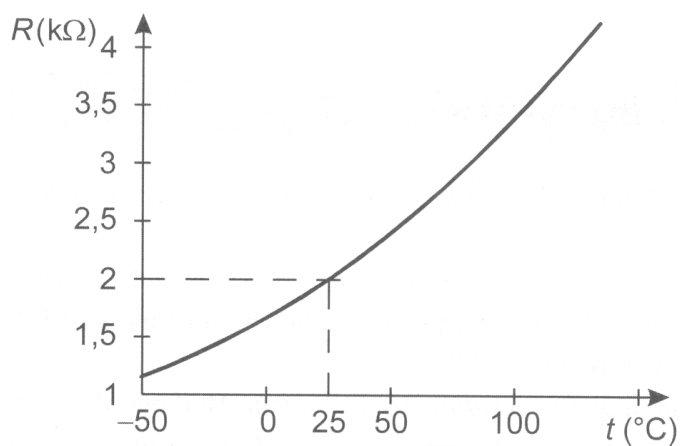
Obr. 4.2 Porovnání teplotních závislostí termistorů NTC a TPC s kovovými senzory

## 4.2 Monokrystalické Si senzory

Jsou určeny pro rozsahy teplot  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $150^{\circ}\text{C}$ . Senzor je založen na nevlastním polovodiči typu N. Jeho uspořádání je na Obr. 4.3, typická charakteristika na Obr. 4.4.



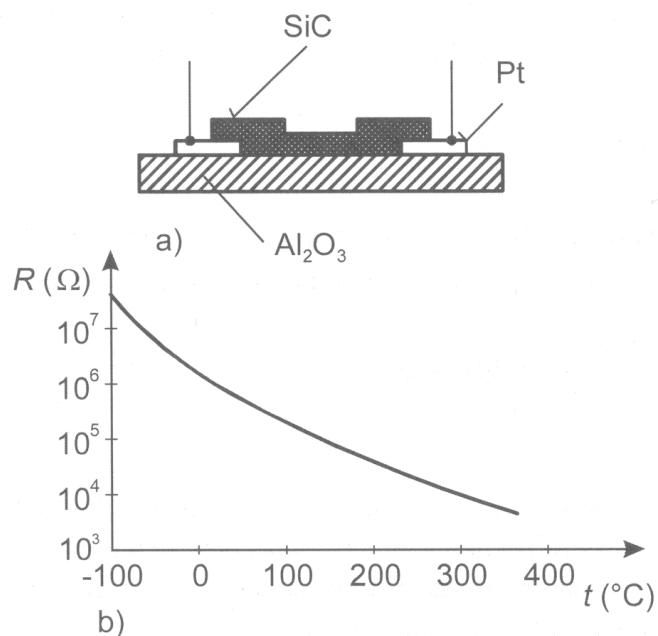
Obr. 4.3 Uspořádání monokrystalického Si senzoru, pouzdro TO-92



Obr. 4.4 Charakteristika Si senzoru (KTY 10, KTY 81 Philips)

## 4.3 Senzor SiC

Lze je použít pro větší rozsah teplot, od  $-100^{\circ}\text{C}$  do  $450^{\circ}\text{C}$ . Charakteristika odpovídá negatorům (Obr. 4.5).

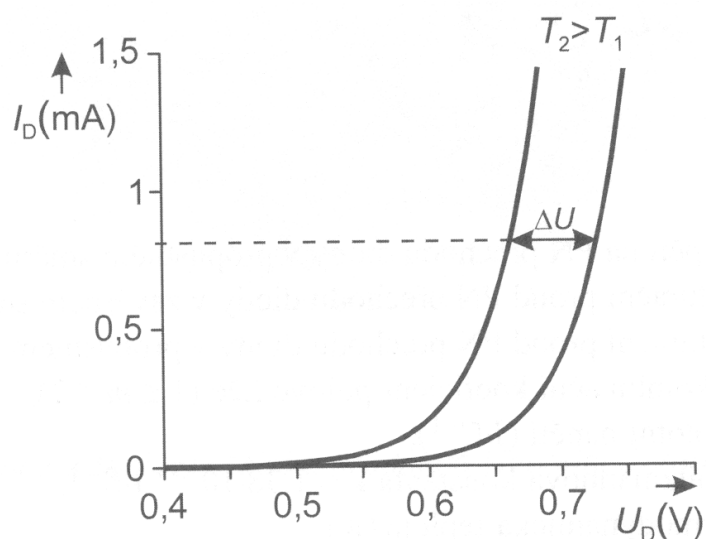


Senzor SiC (a – struktura, b – charakteristika)

Obr. 4.5 Senzor SiC

## 5. MONOLITICKÉ PN SENZORY TEPLoty

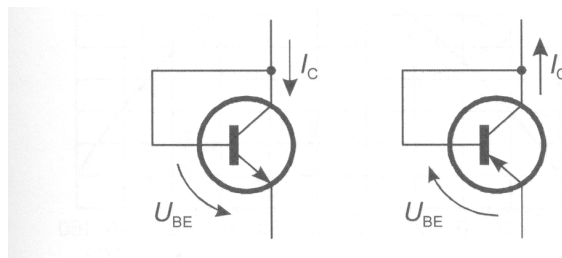
Integrované monolitické senzory teploty jsou nejčastěji založeny na teplotní závislosti PN přechodu v propustném směru. Mají teplotní rozsah od  $-55^{\circ}\text{C}$  do  $+150^{\circ}\text{C}$  a nejistotu měření do 2%. Teplotní závislost napětí PN přechodu diody vidíme na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Teplotní závislost charakteristiky přechodu PN diody

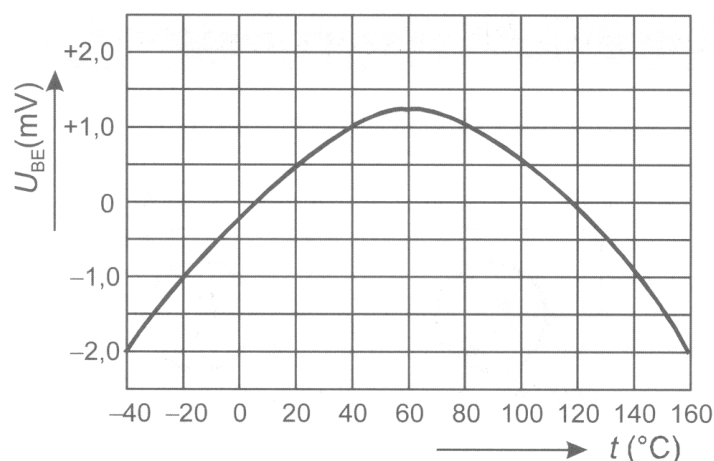
### 5.1 Tranzistorové PN senzory teploty

Jsou založeny na obdobném principu jako PN-diody.



Obr. 5.2 Tranzistorová dioda

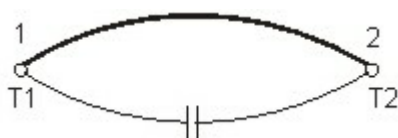
Z Obr. 5.3 vyplývá odchylka od lineární funkce  $U_{BE} = kt$



Obr. 5.3 Nelinearita závislosti napětí přechodu  $U_{BE}$  na teplotě při  $I=0,1$  mA

## 6. TERMoeLEKTRICKÉ ČLÁNKY

Podstatou termoelektrického jevu je přímá přeměna tepelné energie v energii elektrickou a naopak. Termoelektrický jev objevil v roce 1758 ruský vědec akademik Epinus, který zjistil, že v obvodu složeném ze dvou různých vodičů vzniká napětí mají-li spoje vodičů různou teplotu.



Obr. 6.1 Seebeckův jev

Termoelektrický článek převádí teplotní změnu prostředí na změnu elektrického napětí. Využívá se přitom toho, že jestliže jsou v jednoduchém elektrickém obvodu, tvořeném dvěma vodiči z různých kovů, viz. Obr.6.1, oba jejich spoje 1 a 2 umístěny v prostředí se dvěma různými teplotami  $T_1$  a  $T_2$ , začne obvodem procházet elektrický proud. Pokud obvod v naznačeném místě přerušíme a zařadíme do něj vhodný měřicí přístroj, naměříme malý rozdíl elektrických potenciálů, který je funkcí rozdílu teplot  $T_2 - T_1$ . Tento rozdíl potenciálů se nazývá termoelektrické napětí. Takto je zjednodušeně popsán takzvaný Seebeckův jev, na kterém je založeno měření teploty termoelektrickými články (termočlánky).

K Seebeckovu jevu existuje jev opačný, který se nazývá Peltierův jev. Ten se projevuje tak, že při průchodu elektrického proudu zmíněným elektrickým obvodem se z jeho spojů jeden zahřívá a druhý naopak ochlazuje. Také s tímto jevem se můžeme setkat při měření teploty vzhledem k tomu, že jej někteří výrobci využívají k chlazení např. v zařízeních pro realizaci bodu tání ledu, tj. 0°.

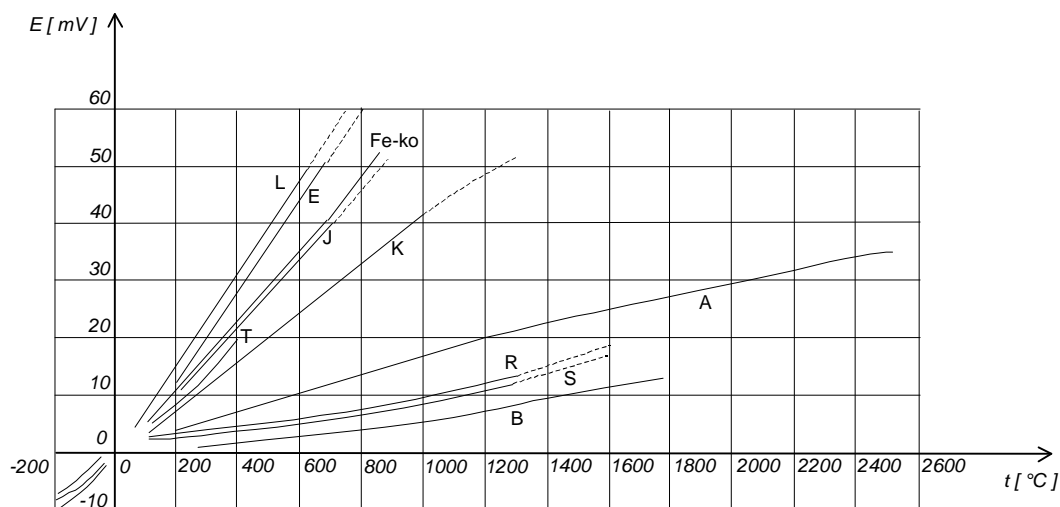
Uvedli jsme, že termoelektrické napětí vzniká, jestliže navzájem spojíme vodiče ze dvou různých kovů. Pak vznikne při rozdílné teplotě mezi spojenými a volnými konci drátů na jejich volných koncích napětí, které je úměrné rozdílu teplot. Konce drátů, svařené a navzájem od sebe izolované, se umístí do prostoru, jehož teplotu měříme, k volným koncům připojíme milivoltmetr, který je zpravidla cejchován ve stupních Celsia. Změřené napětí udává rozdíl teplot mezi teplým a studeným spojem termoelektrického článku. Je proto důležité, aby studený spoj byl udržován na stálé teplotě. Vztah mezi napětím a teplotou závisí jedině na složení použitých kovů a nezávisí na průřezu nebo délce těchto drátů.

Z hlediska měření je však potřebné, aby generované termoelektrické napětí bylo co největší a aby oba kovy byly co nejodolnější proti vlivům okolního prostředí, tak aby se jejich vlastnosti co nejméně měnily v průběhu času. Tomu vyhovuje jen několik dvojic materiálu a jejich složení je proto normováno, takže vlastnosti stejně označených termočlánků vyrobených různými výrobci jsou shodné.

V současné době se doporučuje používat termočlánky dle normy IEC 584-1, respektive ČSN IEC 584-1, nebo EN 60584-1. Tato norma obsahuje tabulky základních hodnot termoelektrického napětí jednotlivých termočlánků a polynomy pro výpočet jejich charakteristik. Méně se používají termočlánky podle normy DIN 43710. Je nutné dát pozor na to, že v normách jsou uvedeny základní hodnoty termoelektrického napětí pro vztaznou (referenční) teplotu 0° C. V praxi se ale obvykle používají jiné srovnávací teploty (v termostatech srovnávacích spojů), jako např. 20 °C, 50 °C, ale i třeba 70 °C a na tyto srovnávací teploty je nutné naměřené hodnoty termoelektrického napětí korigovat.

Označení termočlánku dle IEC 584	Původní označení	Měřicí rozsah [ ° C ]
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350
J	Fe-CuNi	- 200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	- 100 až 900
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	- 200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700
Označení termočlánku dle DIN 43710	Původní označení	Měřicí rozsah [°C ]
L	Fe-CuNi, Fe-ko	- 200 až 900
U	Cu-Ni, Cu-ko	- 200 až 600

Tab. 6.1 Měřicí rozsahy termočlánků



Obr. 6.2. Závislost termoelektrického napětí nejužívanějších termoelektrických článků na teplotě

Dovolené odchylky (tolerance) termočlánků uvádí norma IEC 584-2, respektive ČSN IEC 584-2.

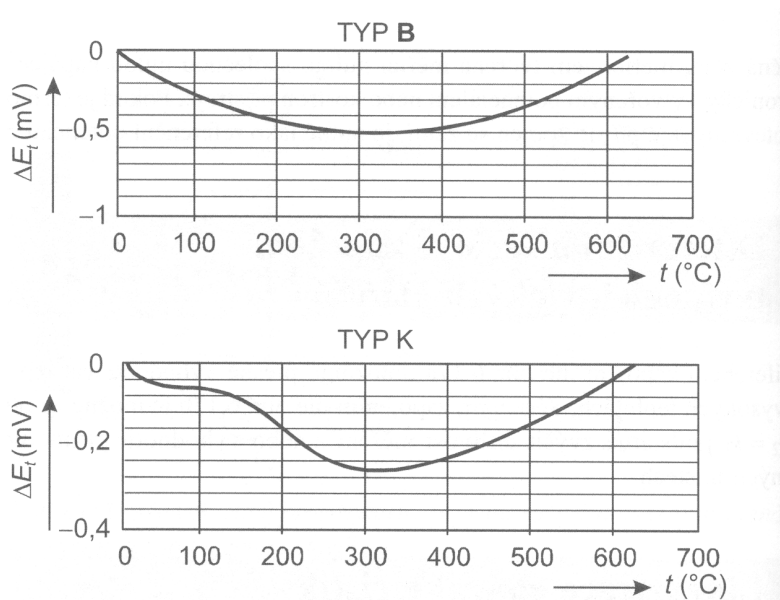
Označení Termočlánku	Třída přesnosti	Dovolené (tolerance) [°C]	odchylky
J	1	$\pm 0,004 \cdot  t $ nebo $\pm 1,5^\circ \text{C}$ v rozsahu $(-40 \text{ až } 750)^\circ \text{C}$	
	2	$\pm 0,0075 \cdot  t $ nebo $\pm 2,5^\circ \text{C}$ v rozsahu $(-40 \text{ až } 750)^\circ \text{C}$	
K a N	1	$\pm 0,004 \cdot  t $ nebo $\pm 1,5^\circ \text{C}$ v rozsahu $(-40 \text{ až } 1000)^\circ \text{C}$	
	2	$\pm 0,0075 \cdot  t $ nebo $\pm 2,5^\circ \text{C}$ v rozsahu $(-40 \text{ až } 1200)^\circ \text{C}$	
	3	$\pm 0,015 \cdot  t $ nebo $\pm 2,5^\circ \text{C}$ v rozsahu $(-200 \text{ až } 40)^\circ \text{C}$	
S	1	$\pm [1 + (t-1000) \cdot 0,003]$ nebo $\pm 1,0^\circ \text{C}$ v rozsahu $(0 \text{ až } 1600)^\circ \text{C}$	
	2	$\pm 0,0025 \cdot  t $ nebo $\pm 1,5^\circ \text{C}$ v rozsahu $(-40 \text{ až } 1600)^\circ \text{C}$	
B	2	$\pm 0,0025 \cdot  t $ nebo $\pm 1,5^\circ \text{C}$ v rozsahu $(600 \text{ až } 1700)^\circ \text{C}$	
	3	$\pm 0,005 \cdot  t $ nebo $\pm 4^\circ \text{C}$ v rozsahu $(600 \text{ až } 1700)^\circ \text{C}$	
L		$\pm 3^\circ \text{C}$ v rozsahu $(100 \text{ až } 400)^\circ \text{C}$	
		$\pm 0,75^\circ \text{C}$ v rozsahu $(400 \text{ až } 900)^\circ \text{C}$	

Tab. 6.2 Tolerance dle IEC 584-2 a DIN 43710



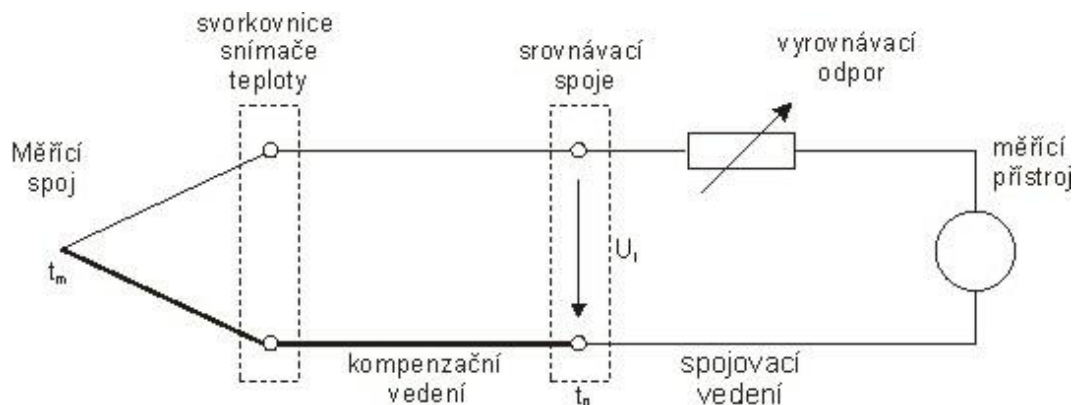
**Poznámka:** Z určených hodnot tolerancí platí vždy ta větší! Absolutní hodnota teploty ve stupních Celsia bez ohledu na znaménko.

Na Obr. 6.3 jsou uvedeny odchylky od lineární charakteristiky.



Obr. 6.3 Odchylky od lineární charakteristiky termoelektrických článků typu **B** a **K**

## 6.1 Zapojení termočlánků



Obr. 6.4 Měřicí řetězec termoelektrického článku

Na Obr. 6.4. jsou vyznačena jednotlivá funkční místa obvodu. Termoelektrické napětí  $U_t$ , jehož hodnota je úměrná rozdílu teploty  $t_m$  v místě měřicího spoje (teplý konec) a teploty  $t_0$  v místě srovnávacích spojů (studený konec) se přivádí kompenzačním (prodlužovacím) vedením a měděným spojovacím vedením na měřicí přístroj. Aby bylo možno každé hodnotě termoelektrického napětí přiřadit určitou teplotu, je třeba udržovat srovnávací spoje na známé a konstantní teplotě, tzv. teplotě vztažné.

## 6.2 Prodlužovací vedení

Prodlužovací a kompenzační vedení prodlužují vlastní termoelektrický článek od svorek termoelektrického snímače až do místa se známou a zaručenou teplotou srovnávacích spojů. Takovým místem je termostat srovnávacích spojů, kompenzační krabice nebo jiné pomocné zařízení. Podle terminologie IEC rozeznáváme prodlužovací vedení ( je ze stejných materiálů jako termoelektrický článek ) a kompenzační vedení ( je z náhradních materiálů ). Kompenzační vedení se používá u termoelektrických článků z drahých kovů. Charakteristické pro obě vedení je skutečnost, že v určitém intervalu teplot ( obvykle 0 až 200 °C ) mají stejnou charakteristiku jako příslušný termoelektrický článek. Nejčastěji má stejnou charakteristiku každá z větví, někdy ( pro méně přesná měření ) má stejnou charakteristiku pouze dvojice jako celek.

Tolerance prodlužovacího a kompenzačního vedení jsou uvedeny v příslušných normách. Obecně lze konstatovat, že odpovídají cca ( 1,5 až 2,5 ) °C pro třídu A a ( 2,5 až 5 ) °C pro třídu B. Záměnou podobných termoelektrických článků vzniká přídatná chyba měření – např. záměnou termoelektrického článku J za Fe-Ko vzniká chyba cca 3 °C.

Při zapojování prodlužovacího vedení často dochází k následujícím chybám:

- záměna typu prodlužovacího vedení
- špatné polaritě zapojeného vedení ( pokud se přehodí polarita na obou koncích, tak se to při „studeném“ vedení velmi těžko poznává )
- názor, že kompenzační vedení kompenzuje vliv teploty srovnávacího spoje je zcela chybný ( ale častý ) a nelze proto opomenout zapojení termostatu srovnávacího spoje
- prodlužovací vedení nemá dostatečný izolační odpor
- jako prodlužovací vedení se použije jakýkoliv pár vodičů
- pro termoelektrický článek typu B se použije kompenzační ( prodlužovací ) vedení pro termoelektrický článek typu S.

## 6.3 Materiály termoelektrických snímačů

Při výběru materiálu pro termoelektrický snímač se snažíme splnit některé základní požadavky. Především, aby se závislost termoelektrického napětí na teplotě blížila lineárnímu průběhu. Materiál má být odolný proti chemickým, mechanickým a korozním vlivům. Výstupní termoelektrické napětí má být co největší. Čím je hodnota napětí menší, tím je menší přesnost, měřicí přístroj musí být citlivější, a tím je choulostivější. U snímačů z křehkých kovů (vizmut, antimon apod.) je nutno tyto na sebe ve vakuu nastříkat nebo spékat.

Materiál volíme z hlediska požadovaného rozsahu teplot a požadované přesnosti měření. Důležitá je též časová stálost, popř. Střední doba životnosti snímače. Stálost charakteristiky má být s časem neproměnná. Tato podmínka se dá, obzvlášť za vyšších podmínek, těžko dodržet. Dochází k rekrytalizaci v místě spoje, popř. ke stárnutí. Snímače se pak musí obnovovat a občas přecejchovat. Byly sestaveny dvojice materiálů, které se ke konstrukci termoelektrických snímačů používají. Jejich parametry jsou uvedeny v normách.

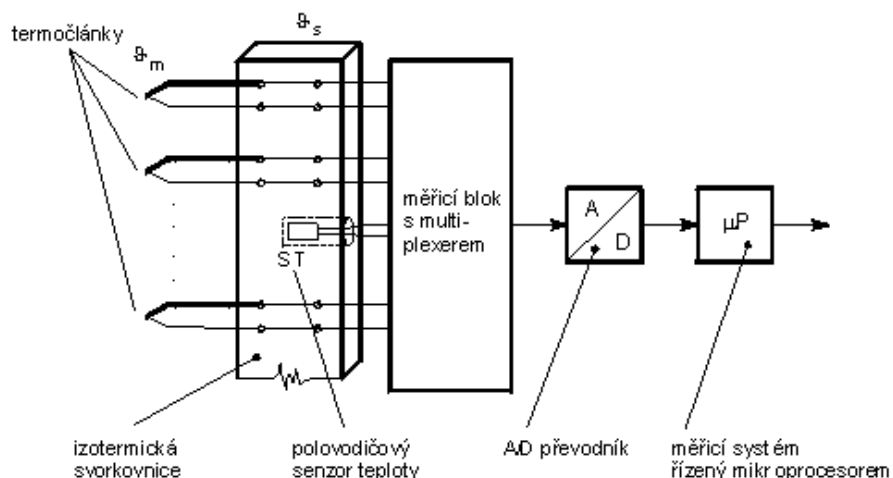
## 6.4 Termočlánek typu K

Termoelektrický článek typu K je nejdůležitějším představitelem termočlánků z niklových slitin a nejužívanějším průmyslovým termočlánkem. Dodával se pod řadou názvů: niklchrom-nikl, niklchrom-niklhlíník, tophel, Hoskins, thermokanthal, chromel-alumel. Vždy se jednalo o stejné základní materiály ve slitinách s různými přísadami. I dnes jednotliví výrobci dodávají různé materiály, ale se stejnou výslednou charakteristikou. Nedoporučuje se proto např. kombinovat materiály od různých výrobců. Termoelektrický článek K se vyznačuje téměř lineární charakteristikou – citlivost je v celém rozsahu cca  $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Termočlánek je vhodný pro měření v neutronovém toku. Při deformacích se termočlánek stává nehomogenním a termoelektrické napětí mění (chyba měření může být až desítky stupňů). Termočlánky se vyznačují nestabilitou hodnot v oblasti teplot 200 až  $600^\circ\text{C}$ . Tyto tzv. K – stavy jsou způsobeny stavem atomů v krystalické mřížce niklových materiálů a způsobují chyby měření několik stupňů. Velikost chyby závisí na gradientu teploty, nelze ji odstranit běžným tepelným zpracováním materiálu. Jedná se o vratné změny charakteristiky. Proto se doporučuje v oblasti teplot do  $600^\circ\text{C}$  používat termoelektrické články typu J.

## 6.5 Omezení vlivu kolísání teploty srovnávacího spoje

Vliv kolísání teploty srovnávacího spoje lze vyloučit umístěním srovnávacích spojů do termostatu (v laboratoři při  $0^\circ\text{C}$ , u průmyslových aplikací při  $50^\circ\text{C}$ ) nebo použitím kompenzačních obvodů. U číslicových měřicích systémů se nejčastěji používá tzv. izotermické svorkovnice, jejíž teplota se snímá např. polovodičovým odporovým teploměrem. Příslušná korekce se vyhodnotí číslicově.

Užití termočlánků je zvláště vhodné při monitorování velkého množství měřicích míst. V těchto případech lze použít i různých typů termočlánků, jejichž srovnávací spoje jsou připojeny k izotermické svorkovnici. Kompenzace vlivu změn teploty srovnávacího spoje se provádí softwarově s využitím počítače (obr. 6.4). Počítač řídí vyhodnocování signálu a prostřednictvím multiplexoru i sériové snímání údajů z jednotlivých míst. Multiplexer představuje vlastně mnohopolohový přepínač, který zajišťuje postupné připojování jednotlivých termočlánků k vyhodnocovacímu zařízení. Jistou nevýhodou tohoto uspořádání je delší čas potřebný pro zpracování údajů. Při požadavku rychlé odezvy je nutno použít hardwarové kompenzace speciální pro každý termočlánek.



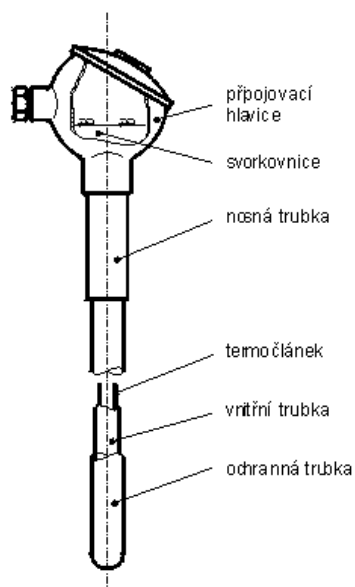
Obr. 6.5 Monitorování teploty

## 6.6 Konstrukce termoelektrických snímačů

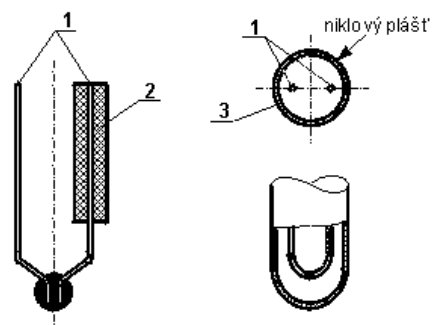
Rozlišujeme dvě základní provedení termoelektrických snímačů teploty. Klasické provedení se skládá z vlastního termoelektrického článku, umístěného v ochranné armatuře, která zabraňuje jeho mechanickému poškození a chrání jej před nepříznivými fyzikálními a chemickými vlivy. Vlastní termoelektrický článek je vložen do stonkové trubice zakončené svorkovnicí a ta je vložena do ochranné trubice s hlavicí. Materiál vnější ochranné trubky je různý podle charakteru prostředí a velikosti měřené teploty. Ochranná jímka chrání teploměr před nepříznivými účinky prostředí, zhoršuje však jeho dynamické vlastnosti.

Moderním typem kompaktních snímačů jsou tzv. plášťové termočláanky, u nichž jsou dráty uloženy v niklové trubičce vyplněné práškovým  $\text{MgO}$  nebo  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (obr. 6.6 b). Průměr kovového pláště činí (0,15 až 10) mm. Plášťový termoelektrický článek je „plášťový kabel“, kde vlastní termoelektrická dvojice je pevně zalisovaná v izolaci v kovovém plášti. Plášťované termoelektrické články se dodávají jako kabel (v délkách např. 100 m), nebo jako „konfekce“ v požadované délce. Uživatel by měl vždy objednávat tuto konfekci, protože zhotovení měřicího spoje i vývodů kabelu je náročná operace vyžadující speciální zařízení. Měřicí spoj u těchto termoelektrických článků může být proveden jako izolovaný (od pláště), spojený s pláštěm (zemněný) nebo „exponovaný“ (měřicí spoj je vně pláště). Doporučuje se provedení s izolovaným spojem. Ukončení plášťového termoelektrického snímače je buď standardní (půlkulaté zakončení kabelu), nebo s redukováním průměrem (asi na 1/3), ploché, příp. jinak tvarované zakončení. Plášťové termočláanky lze ohýbat, mají malou časovou konstantu a umožňují měření i na těžko přístupných místech. Termoelektrické měřicí vložky se vyrábějí s jedním nebo dvěma články.

Termočláankové dráty jsou vzájemně elektricky izolované keramickými trubičkami (Obr. 6.6).



Obr. 6.6 Detail termočlánu



Obr. 6.7 Plášťový termočlánek  
1-termočláňkové dráty, 2-keramická izolace  
3-keramický prášek

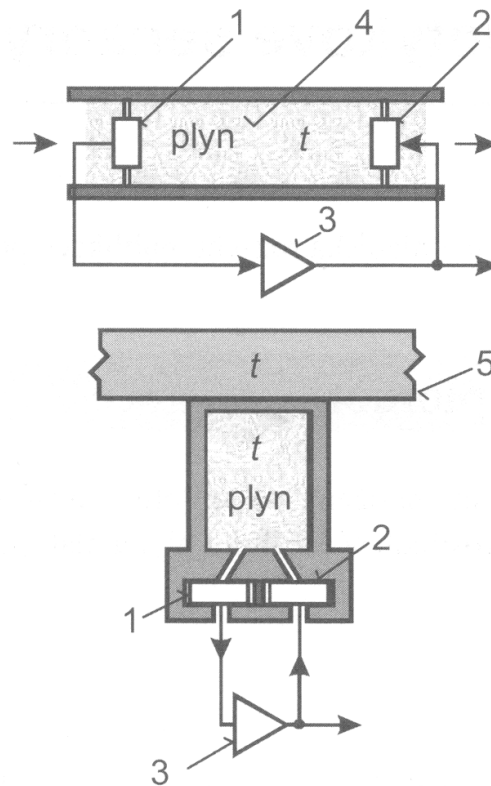
## 7. SPECIÁLNÍ DOTYKOVÉ SENZORY TEPLoty

### 7.1 Akustické teploměry

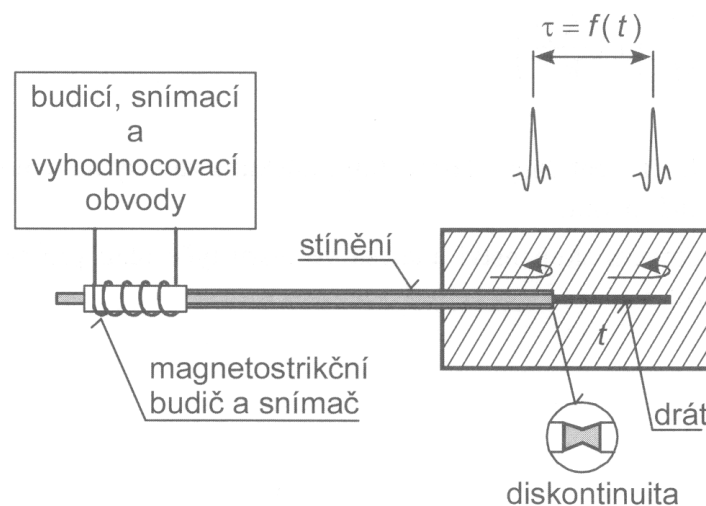
Jsou založeny na teplotní závislosti rychlosti šíření zvuku v plynném nebo pevném prostředí.

Na Obr. 7.1 je:

- 1... vysílač,
- 2... přijímač,
- 3... zpěťovazební zesilovač,
- 4... protékající plyn, jehož teplotu měříme,
- 5... objekt, jehož teplotu měříme



Obr. 7.1 Rezonanční akustický teploměr



Obr. 7.2 Pulzní akustický teploměr

Z hlediska vyhodnocení rychlosti šíření zvuku lze použít různých metod:

- rezonanční metoda se zpětnovazebním oscilátorem dle Obr. 7.1 využívá teplotně závislé rychlosti šíření zvuku v plynném prostředí,
- pulzní metoda využívá teplotní závislosti rychlosti šíření zvuku v pevném prostředí a je založená na vyhodnocení doby průchodu akustického pulsu procházející tyčí od vysílajícího akustického měniče k přijímacímu nebo od diskontinuity do konce senzoru dle Obr. 7.2.

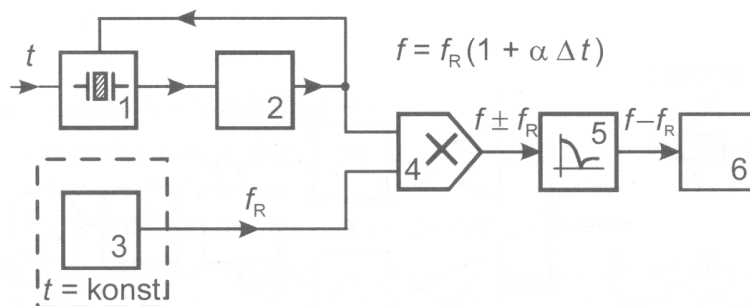
Akustické teploměry se používají jak pro velmi nízké (od 2 K do 20 K) tak i vysoké teploty. Uspořádání pulzního akustického teploměru dle Obr. 7.2 je založeno na měřící tyčce (hliník, ocel, safír, ruthenium, molybden, wolfram, wolfram/rhenium) o

průměru od 0,03 mm do 3 mm, délky od 1,3 cm do 3 m. Prostřednictvím magnetostrikčního budiče je do tyčky vyslán ultrazvukový impuls, který se nejprve částečně odrazí od diskontinuity a následně se odrazí od konce tyčky. Oba odražené impulsy se snímají opět magnetostrikčním snímačem a časový rozdíl se zpracuje ve vyhodnocovací jednotce. Teplotní rozsah dle použitého materiálu je od 750 °C do 3000 °C při nejistotě měření  $\pm 20$  °C.

## 7.2 Krystalové teploměry

Pro měření teploty lze využít teplotní závislosti rezonančního kmitočtu křemenného výbrusu. Princip je zřejmý z měřicího řetězce dle Obr. 7.3.

Je-li např. pro rozsah od -80 °C do +250 °C teplotní součinitel frekvence oscilátoru  $\alpha = 35,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a referenční frekvence  $f_R = 28,2 \text{ MHz}$ , bude citlivost krystalového teploměru 1 kHz/K. Lze tedy docílit rozlišovací schopnosti  $10^{-4}$  °C, což odpovídá krátkodobé frekvenční stabilitě krystalu. Nejistota měření způsobená nelinearitou je v řádu +0,05 °C.



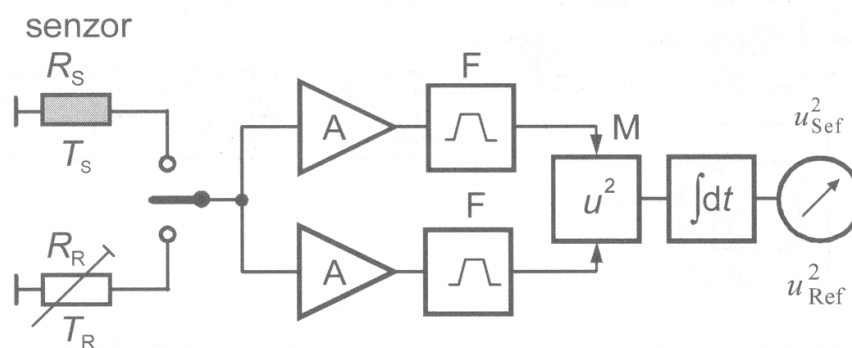
*Krystalový teploměr (1 – krystal, 2 – oscilátor řízený krystalem, 3 – oscilátor řízený krystalem umístěným v termostatu, 4 – směšovač, 5 – nízkofrekvenční filtr, 6 – čítač s displejem)*

Obr. 7.3 Krystalový teploměr

## 7.3 Šumové teploměry

Na vývodech každého rezistoru jev důsledku teplotně závislého volného pohybu elektronů ve vodivostním pásmu měřitelné elektrické napětí, které má stochastický charakter. Toto napětí se označuje jako Johnsonův nebo Nyquistův nebo jednoduše jako tepelný šum. Energie tohoto šumu je rovnoměrně rozložena po celém frekvenčním pásmu neboli odpovídá specifikaci bílého šumu.

Výhodou šumového teploměru je nezávislost na prostředí včetně ionizačního záření, vysoce agresivní atmosféry, toku neutronů a vysoké teploty ( $> 1000$  °C). Veškeré vlivy, které způsobí změnu odporu se dají buď vyloučit přesným změřením odporu nebo poměrovým vyhodnocením (Obr. 7.4). Podstatnou nevýhodou šumových teploměrů je velmi malé výstupní elektrické napětí. Jestliže např. bude odpor  $R = 100 \text{ } \Omega$ ,  $\Delta f = 100 \text{ kHz}$  a teplota 300 K, pak  $u_{ef} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ V}$ . Z tohoto příkladu vyplývají nároky na elektronické zpracování signálu. Poměrové zapojení se snímacím rezistorem  $R_S$  a referenčním rezistorem  $R_R$  je na Obr. 7.4.



Obr. 7.4 Blokové schéma šumového teploměru

Na Obr. 7.4 je:

A... zesilovač,

F... filtr,

M... násobička

## 7.4 Optické vláknové senzory teploty

Optické vláknové senzory (dále OVS) vznikly využitím nežádoucích vlivů okolního prostředí na parametry optických sdělovacích kabelů. Základ OVS teploty je ve využití vlivu teploty na vlastnosti optických vláken. Měřená teplota moduluje optický signál, který je vysílán do optického vlákna zdrojem záření (polovodičové elektroluminiscenční diody LED nebo polovodičový laser) a detekován polovodičovou diodou typu PN, PIN nebo lavinového typu).

Optické vlákno používané pro OVS se skládá z válcového jádra s indexem lomu  $n_j$  a obalu s indexem lomu  $n_p$  dle Obr. 7.5. Paprsek prochází jádrem tehdy, pokud dochází na rozhraní jádra a pláště k totálnímu odrazu, tj. pokud index lomu jádra je alespoň o 1 % větší než index lomu pláště. Neboli je nutné splnit podmínku :

$$\frac{n_p}{n_j} < 1 \quad (7.1)$$

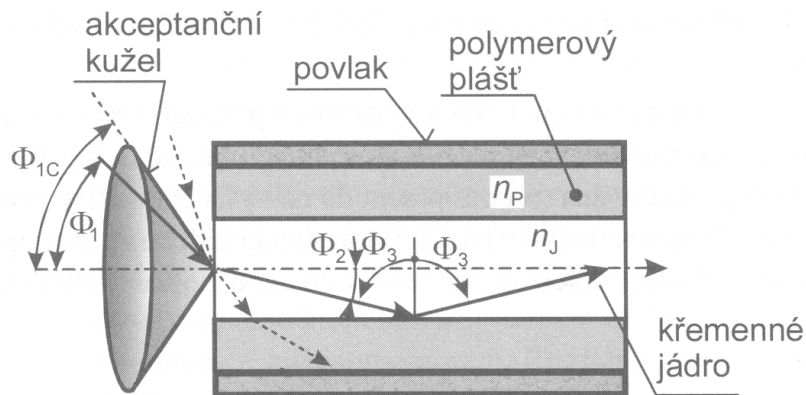
Lze odvodit vztah :

$$NA = \sin \Phi_{1C} = n_j \sin \Phi_{2C} = \sqrt{n_j^2 - n_p^2} \quad (7.2)$$

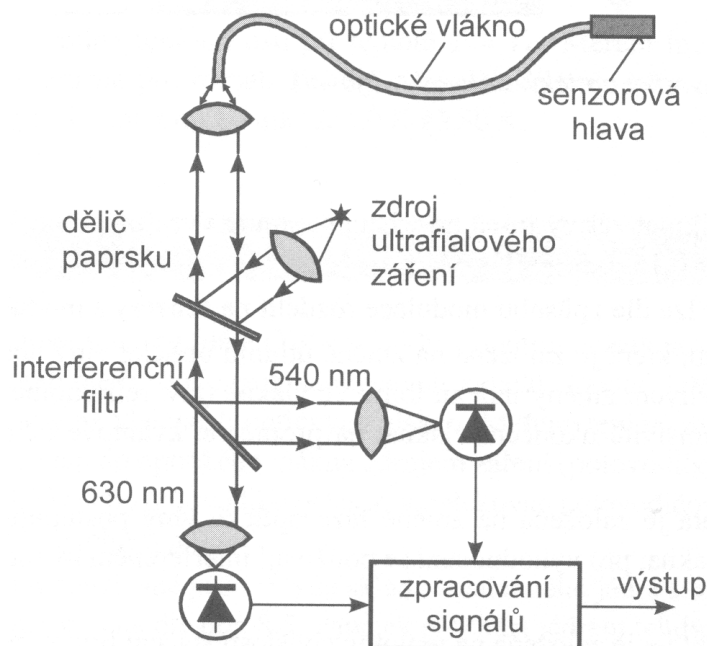
kde  $NA$  je numerická apertura vlákna, která určuje úhel, pod kterým je vlnovod schopen přijímat zářivý tok a na výstupní straně vyzařovat tok. Typická hodnota apertury je  $NA = 0,15-0,5$ .

Jeden z možných principů využití je na Obr 7.6. Fosforová vrstva v sensorové hlavě je excitována (proces přechodu na vyšší energetickou hladinu) ultrafialovým zářením. Při deexcitaci dochází k fluorescenci čidla a zpětný optický paprsek e v interferenčním filtru rozdělen na červenou a zelenou složku. Vyhodnocením poměru intenzit světelných paprsků je jednoznačně definována teplota sensorové hlavy. Rozsah měřených teplot je od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nejistota měření je  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .





Obr. 7.5 Dvoustvrstvý optický vláknový vlnovod



Obr. 7.6 Optický vláknový fluorescenční teploměr

## 8. BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLOTY

Bezdotykové měření teploty (také označované jako *infračervená pyrometrie*) je měření povrchové teploty těles na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem a přijímaného senzorem (detektorem) záření vlnové délky od 0,4  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$ . Tento rozsah pokrývá oblast viditelného spektra od 0,4  $\mu\text{m}$  do 0,78  $\mu\text{m}$ , oblast blízkého infračerveného spektra od 0,78  $\mu\text{m}$  do 1  $\mu\text{m}$ , oblast krátkovlnného infračerveného spektra od 2  $\mu\text{m}$  do 3  $\mu\text{m}$ , oblast středovlnného infračerveného spektra od 3  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$  a konečně oblast dlouhovlnného infračerveného spektra od 5  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$ . Elektromagnetické záření s vlnovou délkou od 2  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$  se označuje jako *tepelné záření*. Uvedené rozsahy pokrývají měření teplot v rozsahu od -40  $^{\circ}\text{C}$  do +10000  $^{\circ}\text{C}$ .

### Bezdotykové měření teploty je výhodné pro:

- zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt,
- možnost měření teploty na rotujících nebo pohybujících se objektech,
- měření teploty z bezpečné vzdálenosti (elektrická zařízení, hutní objekty aj.),
- možnost měření velmi rychlých změn teploty,
- možnost měřit a dále číslicově zpracovat teploty celých povrchů těles (termografie, termovize).

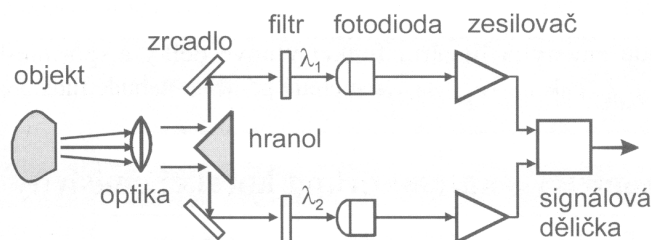
### Je však nutné upozornit na nevýhody bezdotykového měření teplot:

- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa,
- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty prostupnosti prostředí mezi čidlem a objektem,
- nejistoty měření způsobené nepřesnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.

### Základní dělení pyrometrů :

- **úhrnné** – dle Stefan-Boltzmannova zákona
- **monochromatické** – dle Planckova (Wienova zákona)
- **pásmové** – dle Stefan-Boltzmannova zákona
- **poměrové**

Na Obr. 8.1 je znázorněn princip poměrového pyrometru.

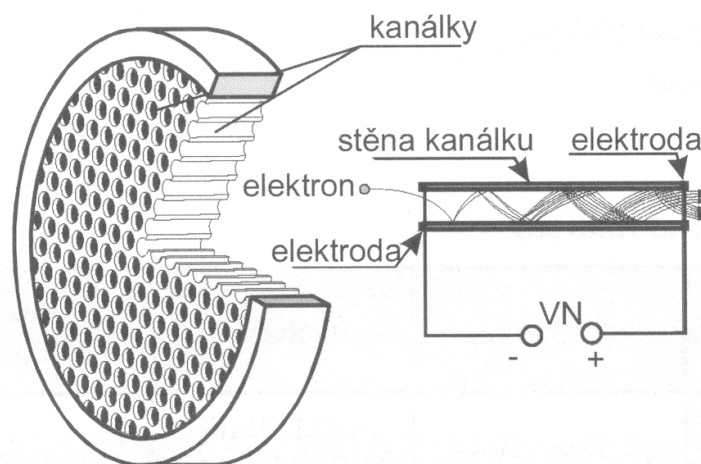


Obr. 8.1 Princip poměrového pyrometru

## 8.1 Snímání teplotních polí

Systémy pro bezdotykové měření a plošné zobrazení teplotních polí lze rozdělit na systémy bez rozkladu a s rozkladem obrazu. Systémy založené na přímé konverzi zářivého toku na obraz jsou vakuové fotodiody, u nichž se tepelný obraz vytvoří optikou na fotokatodě. Ozáření fotokatody způsobí fotoemisi elektronů, jejichž tok je zesílen fotonásobičem a dále pomocí elektrického pole usměrněn na luminiscenční stínítko, kde se vytvoří odpovídající viditelný obraz. V popisovaném systému je v současné době používána mikrokanálová destička MCP (Microchanell Plate), která za fotonásobičem nebo i bez něj zesiluje tok elektronů na principu velkého počtu paralelních fotonásobičů realizovaných v jednotlivých mikrokanálcích. Kanálky jsou připojeny na zdroj vysokého napětí (VN) tak, aby vektor intenzity elektrického pole měl axiální směr. Emitované elektrony jsou v kanálcích urychlovány, přičemž na vnitřní odporové vrstvě dochází k odrazům s následnou sekundární emisí. Urychlené a znásobené elektrony dopadají na výstupní stínítko multianody a odtud je viditelný

obraz přiveden přes optiku na CCD (Charge Coupled Devices) čip, používaný v digitálních fotoaparátech nebo kamerách (Obr. 8.2).



Obr. 8.2 Mikrokanálový zesilovač obrazu

Popisovaný princip je omezen na vlnové délky do 1  $\mu\text{m}$ . Systémy s rozkladem obrazu se označují jako termovize.

## 8.2 Termovize

Termovizní systémy se dělí na

- termovizní systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu,
- termovizní systémy s maticovým detektorem.

Opticko-mechanický rozklad obrazu se realizuje snímáním jednotlivých bodů objektu řízenou optickou osou. Okamžité zorné pole termovize se postupně zaměřuje na všechny body (plošky) měřeného objektu. Dráha rozkladu se provádí pohyblivými optickými částmi kamery (otočné hranoly nebo zrcadla). Vzhledem k tomu, že výroba těchto systémů pro civilní účely skončila, nebude opticko-mechanický princip podrobněji popisován.

Pro termovizní kamery se nyní používají chlazené a nechlazené maticové mikrobolometrické a kvantové (QW1P) FPA detektory (1D-řádkové a 2D-plošné). Chlazení FPA matice se provádí Stirlingovým chladičem (hermeticky uzavřený chladicí systém se dvěma písty s plyným heliem, pracující na principu kompresorové mikročladičky) nebo termoelektrickým chladičem pracujícím na principu Peltierova jevu. Zpracování signálů je realizováno přímo na čipu prostřednictvím multiplexerů a 14-bitových A/D převodníků v každé řádce matice. V termovizní technice se používají dvě hlavní pásma vlnových délek, a to krátkovlnné (2  $\mu\text{m}$  až 5  $\mu\text{m}$ ) a dlouhovlnné (7  $\mu\text{m}$  až 13  $\mu\text{m}$ ).

Termovize je základním měřicím zařízením pro infračervenou diagnostiku. Na základě znalosti rozložení teplotního pole diagnostikovaného objektu lze kontrolovat funkce zařízení, jejichž činnost je spojena s vývinem nebo absorpcí tepla. Lze tak lokalizovat různé materiálové vady, opotřebení způsobené třením (např. u ložiska) a jiné takové defekty vnitřních dílů objektu, které ovlivňují rozložení povrchové teploty.

V energetice je možné např. diagnostikovat pod vysokým napětím za provozu izolační stavy izolátorů, spojovacích svorek kontaktů, stavy vypínačů aj. V hutním průmyslu lze detekovat poškození vyzdívek pecí, v elektrotechnice sledovat teplotu pláště elektromotoru atd. Existují dvě metody, které umožňují diagnostikovat i defekty uvnitř materiálu:

**Pulzní termografie**, která je založena na ozařování diagnostikovaného objektu z externího zářiče tepelnými stimulačními pulzy a následném snímání teploty povrchu objektu termovizní kamerou. Tepelné pulzy trvají od několika milisekund u materiálů s velkou tepelnou vodivostí až do několika sekund u málo tepelně vodivých vrstev jako jsou plasty, lamináty aj. Krátce trvajícím oteplením o několik stupňů nezpůsobí poškození objektu. Po dopadu tepelného pulzu na povrch materiálu se teplo šíří tepelnou difúzí materiálem. Tepelná difúze (rozptyl tepelného záření v tělese)  $\xi$  závisí na tepelné vodivosti  $\lambda_{tep}$ , hustotě  $\rho$  a měrné tepelné kapacitě  $c$  materiálu a je dána vztahem :

$$X = \frac{l_{tep}}{r \cdot c} \quad (8.1)$$

Teplota uvnitř materiálu se zvýší a po ukončení tepelného pulzu se vnitřek materiálu opět difúzí ochlazuje. Pokud je v materiálu nehomogenita s rozdílnou měrnou tepelnou kapacitou a tepelnou vodivostí, promítne se defekt v určitém časovém okamžiku na tepelném obrazu povrchu objektu. Ohřev lze realizovat také horkým vzduchem. Metoda pulzní termografie se používá např. při tomografii u leteckých vrtulí z kompozitních materiálů.

**Lock-in termografie** je založena na modulaci tepelného toku. Tepelná vlna (obvykle sinusová s úhlovým kmitočtem  $\omega$ ) proniká po dopadu na povrch tělesa dovnitř a odráží se v místě změny prostředí (defektu) zpět k povrchu. Na povrchu pak dochází k interferencím s primárním vlněním. Termovizní kamerou snímané obrazce jsou číslicově zpracovány Fourierovou rychlou transformací (FFT), takže lze z každého pixelu stanovit amplitudu a fázový posun. Amplituda signálu je ovlivněna pohltivostí, emisivitou povrchu tělesa a rozložením ozáření. Avšak ve fázi signálu jsou tyto jevy vyloučeny a projeví se pouze informace o teplotě jak těsně pod povrchem tak i do určité hloubky v materiálu. Diagnostikovaná hloubka je dána tzv. hloubkou vniku tepelného vlnění  $\mu$ , při níž je poměrný pokles amplitudy daný násobkem  $1/e = 0,37$ .

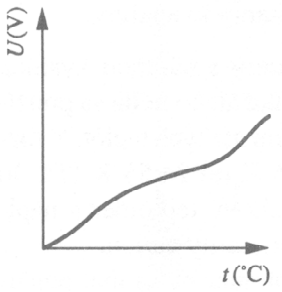
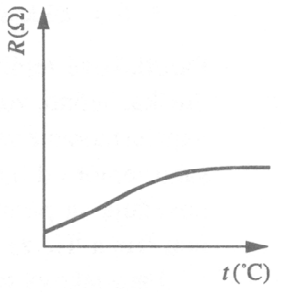
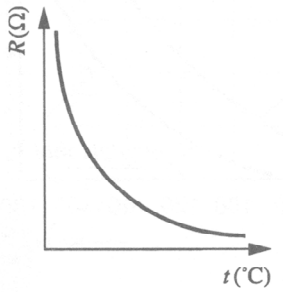
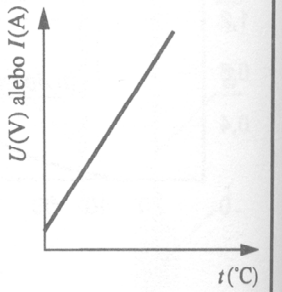
## 9. SHRNUTÍ

Vlastnosti jednotlivých snímačů jsou přehledně zobrazeny v Tab. 9.1

### Poznámka

V této části jsou použity doslovné citace a obrázky z literatury :

Kreidl, M.: Senzory neelektrických veličin – Měření teploty. BEN, Praha 2005.

Termočlánky	Kovové odporové snímače	Polovodičové odporové snímače (termistory)	Infračervené snímače
<b>Statická charakteristika</b>			
			
<b>Vyhodnocuje sa</b>			
• napäťový výstupný signál	• zmena odporu snímača	• zmena odporu snímača	• napäťový alebo prúdový výstupný signál
<b>Výhody</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>vlastné napájanie</li> <li>jednoduché</li> <li>robustné</li> <li>lacné</li> <li>široká paleta vyhotovení</li> <li>veľký teplotný rozsah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>najstabilnejšie</li> <li>najpresnejšie</li> <li>lineárnejšie ako termočlánky</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>veľký výstupný signál</li> <li>rýchle</li> <li>dvojvodičové meranie odporu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>najlineárnejšie</li> <li>najväčší výstupný signál</li> <li>lacné</li> </ul>
<b>Nevýhody</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>nelineárne</li> <li>nízke napätie</li> <li>vyžaduje sa referenčná hodnota teploty</li> <li>najmenej stabilné</li> <li>najmenej citlivé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>drahé</li> <li>vyžaduje sa prúdový zdroj</li> <li>malá zmena odporu v závislosti od teploty</li> <li>malý merný odpor</li> <li>zohrievajú sa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nelineárne</li> <li>obmedzený teplotný rozsah</li> <li>krhké</li> <li>vyžaduje sa prúdový zdroj</li> <li>zohrievajú sa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>vyžaduje sa zdroj napätia</li> <li>pomalé</li> <li>zohrievajú sa</li> <li>obmedzené množstvo vyhotovení</li> </ul>

Tab. 9.1 Kľúčové charakteristiky teplotných snímačov

## S KONTROLNÍ OTÁZKY TEORETICKÉ

- (2 body) Co definuje mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 ?
- (2 body) Vysvětlete pojem trojný bod.
- (5 body) Jaké je základní dělení senzorů teploty.
- (4 body) Pro jaké rozmezí teplot jsou jednotlivé senzory vhodné ?
- (4 body) Co jsou statické a dynamické vlastnosti senzorů teploty ?
- (2 body) Který materiál je nejvhodnější pro kovové snímače teploty a proč ?
- (3 body) Jaké znáte polovodičové snímače teploty, jaké jsou jejich charakteristické vlastnosti ?
- (2 body) Na čem jsou založeny monolitické senzory teploty ?
- (6 bodů) Popište měřicí zapojení s termoelektrickými články, jaké jsou jejich základní typy ?
- (6 bodů) Popište základní principy speciálních senzorů teploty.
- (2 body) Jaké jsou výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty ?
- (2 body) Jmenujte a stručně popište základní systémy termovize.

## **SHRNUTÍ**

### **Nové poznatky:**

- senzory teploty
- jednotlivé typy senzorů teploty
- fyzikální principy senzorů teploty
- měřicí teplotní řetězec
- výhody a nevýhody jednotlivých senzorů a měřicích zapojení

### **Nové pojmy :**

termodynamická teplota, teplotní senzor, termočlánek, dotykové a bezdotykové měření teploty, termovize

## **Ñ**

### **KLÍČ K TEORETICKÝM OTÁZKÁM**

1. Kapitola 1
2. Obr. 1.1
3. Kapitola 2, Obr. 2.1
4. Kapitola 2, Tab. 2.1
5. Kapitoly 2.1, 2.2
6. Kapitola 3, Obr. 3.1
7. Kapitola 4
8. Kapitola 5
9. Kapitola 6, Obr. 6.2, Obr. 6.4
10. Kapitola 7
11. Kapitola 8
12. Kapitola 8.2

## **\$**

### **AUTOKONTROLA**

Pokud jste získali alespoň 20 bodů, můžete pokračovat dále ve studiu. V opačném případě si kapitolu důkladně zopakujte.