

04

EXPERIMENTÁLNÍ METODY

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – **teplota**

Pro zjištění informace o hodnotě teploty v daném místě a daném časovém okamžiku existují prvky, které lze charakterizovat aktuálním účelem například takto

- měření teploty
- snímače teploty
- zařazení snímače teploty do technologie
- zapojení snímačů teploty v měřicích řetězcích
- měření odběru tepla
- atd.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Protože dlouholetým vývojem vznikla řada konstrukcí a uspořádání, je vhodné přijmout určité rozdělení, které může být třeba podle konstrukce, podle materiálu čidla, podle charakteru výstupního signálu, a případně podle jiných kritérií:

- mechanické – dilatační
- odporové
- termoelektrické
- emisivní – radiační
- speciální

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Jiné dělení:

- dotykové
- bezdotykové

- analogový výstup
- digitální (číslicový) výstup.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Teplotní stupnice

Snaha definovat primární etalonovou stupnici teplot, ze které by bylo možné odvozovat konkrétní praktické hodnoty, je velice stará.

Je to dáno tím, že teplota byla jednou z mála fyzikálních veličin, které zajímali již staré chemiky (přesněji alchymisty).

V historii kolem roku 1600 je zaznamenána první snaha stanovit cejchovní zdroje teplot, které jsou stálé a neměnné

Zapsána je snaha K. Schotta z cca roku 1630.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Teplotní stupnice

Dnešní primární etalonová stupnice teplot je dána tabulkou prvků s teplotně konstantními údaji.

Je mezinárodně platná a respektovaná.

V současnosti platí její úprava pod zkratkou ITS-90 (je z roku 1990).

Jsou v ní definované body od 0 (0,5) °K do 3387 °K (teoreticky by měla končit až na 6000 °K).

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Teplotní stupnice

Vybraní reprezentanti bodů (představují významnou změnu skupenství daného prvku) teplotní stupnice:

Teplotní etalony

vodík -259,3467 °K

rtuť -38,8344 °K

indium +156,5985 °K

hliník +660,323 °K

iridium +2447 °K

kyslík -218,7916 °K

wolfram +3387 °K

zinek + 419,527 °K

kobalt +1494 °K

síra +717,75 °K

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Číselné vztahy mezi jednotlivými jednotkami jsou:

$$T [\text{Celsius}] = 5/9 (T [\text{Fahrenheit}] - 32) = (F - 32) / 1,8$$

$$T [\text{Fahrenheit}] = 9/5 (T [\text{Celsius}] + 32) = 1,8 * C + 32$$

$$0^{\circ} \text{C} = 32^{\circ} \text{F} \quad \dots \quad 100^{\circ} \text{C} = 212^{\circ} \text{F}$$

$$T [\text{Kelvin}] = T [\text{Celsius}] + 273,16$$

$$T [\text{Rankies}] = T [\text{Fahrenheit}] + 459,7$$

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Absolutní nula je rovna $-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $-459,7\text{ }^{\circ}\text{F}$. Konverze hodnot změn teplot, značené též "delta" (Δ) mezi anglickým a metrickým systémem, je jednoduchý:

$$\begin{aligned}\Delta T [\text{Fahrenheit (nebo Rankies)}] &= \\ &= 1.8 * \Delta T [\text{Celsius (nebo Kelvin)}]\end{aligned}$$

Na hodnotu teploty má vliv hodnota tlaku v místě měření - pro používanou Celsiovu stupnici platí tlak 760 torrů.

Teplotu absolutní nuly, tj. $0\text{ }^{\circ}\text{K}$ nebo $-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zaokrouhleno) nelze dosáhnout, protože při ní ustává pohyb v atomech a tedy existence hmoty i bytí.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Měření teploty

Teplota je stavová veličina s rozlišením intenzity a intervalu – v podstatě je mírou pohybové energie molekul, atomů, ... – základním vztahem je proto stavová rovnice ideálního plynu:

$$p * V = R_p * T$$

kde: p ... tlak plynu

V ... objem

R_p ... universální plynová konst. (8,3144 [J/mol*°K])

T ... absolutní teplota -273,15 °C.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Měření teploty

V praxi se jako další etalony teploty používají – mimo standardních bodů teplotní stupnice – následující hodnoty teplot: :

trojný bod vody	+ i - 0 °C
var vody	+100 °C
tuhnutí antimonu	+630,74 °C
tuhnutí stříbra	+931,93 °C
tuhnutí zlata	+1064,43 °C
tuhnutí paladia	+1554 °C
tuhnutí platiny	+1772 °C

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Snímače teploty

Vhodné základní dělení snímačů je podle způsobu, v jakém kontaktu je čidlo snímače s měřeným prostředím (tělesem, kapalinou či plynem):

- dotykové
- bezdotykové

- dilatační
- elektrické
- termoelektrické s čidlem kapkovitým
- emisivní – radiační
- speciální.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

druh	provedení	rozsah [°C]	obvyklá chyba [%]
mechanické	dilatační tyčové	0 až 180	1 až 2
	dvojkov	-130 až + 450	2 až 3
	dvojkov (invar – Cu nebo Fe)	-30 až +250	3
	tlak (kapalinové)	-50 (0) až 200	3
	skleněné – rtuťové	-50 až +250 (500)	0,02 až 1

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

druh	provedení	rozsah [°C]	obvyklá chyba [%]
termoeler.	Cu – CuNi	-200 až +400	0,01 až 3
	Fe – CuNi	-200 až +350	0,01 až 3
	Ch – k	-200 až + 600	0,05 až 3
	NiCr – NiAl	-200 až +1300	0,1 až 3
	Pt10Rh – Pt	(0) +630 až +1100	0,001 až 3
	Pt13Rh – Pt	0 až +1300	1 až 3
	Pt30Rh – PtGRt	(0) +900 až +1800	1 až 3

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

druh	provedení	rozsah [°C]	obvyklá chyba [%]
odporové	Pt100	-250 až +630	0,01 až 3
	Ni	-200 až +1000	0,05 až 3
	NiCrNi	-60 až +1150	0,01 až 3
	Mo	-200 až +200	0,01 až 3
termistorové	PTC	-200 až +450	0,1 až 3
	NTC	-20 až +200	0,1 až 3

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

druh	provedení	rozsah [°C]	obvyklá chyba [%]
pyrometry	jasové	+650 až +3500	1 až 35 °K
	pásmové	+500 až +2000	1 až 1,5
	radiační	+100 až +2500	1 až 5
	záření	-40 až +3000	2 až 5
	barvové – porov.	+1150 až +3000	3 až 5
	barvové – poměr.	+700 až +1800	10 až 25 °K
termovize	CCD prvek	-20 až +1000	1 až 1,5

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

O odporové snímače

U odporových snímačů je čidlem a tedy převodníkem teploty na odpovídající informaci (elektrický) odpor. Materiálem měrného odporu je nejčastěji některý z prvků: Pt, Ni, Cr, vyjimečně Cu v podobě čistého kovu, nebo speciální slitiny jakou jsou Rh-Fe nebo PtRh-Fe, CrNi.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Termistory (krystalické)

V posledních cca 20 letech se jako čidlo velmi často používá polovodič (polykrystal, nebo čistý krystal Si nebo Ge), který má výhodu v tom, že součástí měrného čipu může být zároveň obvod první úpravy signálu.

Základní rozdělení tohoto druhu snímačů je:

polykrystalické – termistory

monokrystalické – klasický polovodič s p-n nebo n-p přechodem.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Termistory NTC (negistory)

Tento typ snímače využívá fyzikální závislost materiálu, z něhož je vyroben, kdy odpor v závislosti na teplotě klesá.

Mají **záporný teplotní koeficient** – obvykle pro nižší teploty strmější.

Průběh statické charakteristiky je vždy nelineárním průběhem funkce odporu na teplotě. Jeho čidlo je podle typu a způsobu zapojení vstupního obvodu navazujícího přístroje, víceméně ovlivňováno proudem jím procházejícím.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Termistory NTC (negistory)

Tento typ snímače využívá fyzikální závislost materiálu, z něhož je vyroben, kdy odpor v závislosti na teplotě klesá.

Mají **záporný teplotní koeficient** – obvykle pro nižší teploty strmější.

Průběh statické charakteristiky je vždy nelineárním průběhem funkce odporu na teplotě. Jeho čidlo je podle typu a způsobu zapojení vstupního obvodu navazujícího přístroje, víceméně ovlivňováno proudem jím procházejícím.

Materiály na bázi kyslíčnicků: Fe_2O_3 , TiO_2 , CuO , MnO , NiO , CoO a BaO .

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Termistory PTC (posistory)

Tento typ má opačnou vlastnost – odpor v závislosti na teplotě stoupá.

Obvykle pro vyšší teploty strměji (pro nízké teploty někdy i trochu klesá).

Stejně tak má nelineární statickou charakteristiku průběhu funkce odporu na teplotě. I jeho čidlo je, podle typu a způsobu zapojení, ovlivňováno proudem jím procházejícím.

Obvyklým konstrukčním materiálem je polykrystalický kysličník BaTiO_2 .

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

tlustovrstvé termistory

Jsou to velice levné a spolehlivé prvky pro dotyková měření teplot v průmyslu (v technologiích, v automobilech, v telekomunikacích aj.), ale i v lékařských aplikacích (!)

Mají dostatečnou celkovou robustnost, malé rozměry, vysokou, mechanickou, chemickou odolnost a tepelnou přetížitelnost.

Nevynikají vysokou přesností, ale pro běžné (nelaboratorní) aplikace je dostačující (1 % běžně).

Jsou velmi rychlé – dotyk je celou plochou čidla a miniaturní konstrukce zpožďuje přenos tepla jen minimálně.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

tlustovrstvé odporové teploměry (RTD)

Jsou charakterizovány rozměrově „tenkou dlouhou“ a různě tvarovanou linkou ze speciální pasty.

Existují provedení NTC i PTC.

Běžnější jsou NTC s teplotním součinitelem $\alpha = -3(7) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Mají velmi dobrou linearitou.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Termoelektrické snímače

Termoelektrické snímače pracují na principu vzniku termoelektrického napětí v místě (bodě) spojení (svaru) dvou vhodných materiálů – s rozdílným termoelektrickým potenciálem.

Spojení je ve tvaru perličkového sváru zaručujícího minimální fyzické rozměry takto vzniklého čidla.

Vlastnostmi použitých kovů je pak dán i pracovní rozsah měřených teplot.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Tlustovrstvé termočlánky

Jsou charakterizovány dvěma vrstvami z různých speciálních past (obvykle jedna je vodivá a druhá odporová).

Používají se pro rozsah teplot od -50 až do $+650$ °C a mají přesnost měření ± 1 (10) °C.

Jejich teplotní citlivost je od 10 až do (cca) $20 \mu\text{V}/^\circ\text{K}$.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Emisivní / radiační snímače – pyrometry

Principem je snímání záření tělesa, které každé těleso vyzařuje do chladnějšího okolního prostoru v určitém frekvenčním spektru. Celková energie, kterou těleso vyzařuje jednotkovou plochou za jednotku času, se nazývá celkovou zářivostí.

MĚŘENÍ – TEORIE A PRINCIPY

Měření fyzikálních veličin – teplota

Optické vláknové snímače

Využívají vlastnosti optických vláken při přenosu záření diody GeAs.

Jsou založeny na dvou principech:

- změna teploty ovlivňuje absorpci a mění přenášené spektrum
- změna teploty ovlivňuje úbytek intenzity fluorescence.

MĚŘENÍ TEPLOTY

- ✗ Významná veličina (základní jednotka SI)
- ✗ Fyzikální vlastnosti materiálů jsou závislé na teplotě
- ✗ Základní dělení
 - + Dotykové metody měření
 - + Bezdotykové metody měření

MĚŘENÍ TEPLOTY

- ✗ Základní podmínky el. teploměrů
 - + Závislost měřené veličiny na teplotě je časově stálá
 - + Konstrukce čidla taková, aby vlivy okolí neovlivnili jeho vlastnosti
 - + V daném rozsahu teplot musí ležet hodnota měřené veličiny v povolené toleranci

MĚŘENÍ TEPLOTY

- ✕ Dotykové metody měření teploty
 - + Odporové teploměry
 - + Termistory
 - + Termodiody
 - + Termotranzistory
 - + Termočláanky

MĚŘENÍ TEPLOTY

× Odporové teploměry

- + Odpor vodiče se vzrůstající teplotou roste (např. platinový drát navinutý na keramickém či slídovém nosníku)
- + Pasivní snímač
- + Nutno užívat co nejmenší napájecí proud – ohřívání (max. 10mA)
 - × Eliminace buď výpočtem nebo kalibrací, nebo předehřátí před měřením

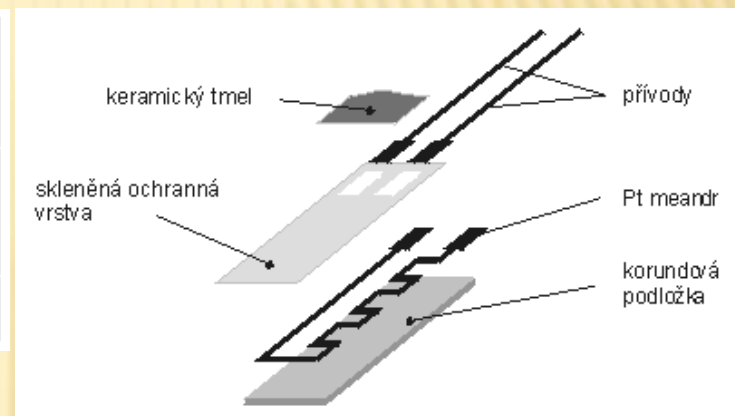
MĚŘENÍ TEPLOTY

× Tři základní druhy

- + **Pt10, Pt25,5, Pt100** (odpor čidla při 0 °C)
- + Rozsah: -200 °C až +850 °C
- + Přesnost 0,1 až 0,01 K dle konstrukce
 - × Při napájení střídavým proudem až 10^{-5} K

MĚŘENÍ TEPLOTY

<i>materiál</i>	$\alpha \cdot 10^{-3}$ [K ⁻¹]	<i>meze použití</i> [°C]
Pt	3,85 - 3,93	-200 až 850
Ni	6,17 - 6,70	-60 až 200
Cu	4,26 - 4,33	-50 až 150



MĚŘENÍ TEPLOTY

× Termistory

- + Výrazněji než kovy mění s teplotou odpor polovodiče (Si, Ge, Se, Cu_2O , PbS)
- + Jejich odpor s teplotou klesá (může i stoupat)
- + Čidlo bodové (kulička od 0,1 – několika mm)
- + Přesnost 0,01 K
- + Vyráběny pro různá teplotní rozmezí – linearita měření

MĚŘENÍ TEPLOTY



MĚŘENÍ TEPLoty

× Termodiody a termotranzistory

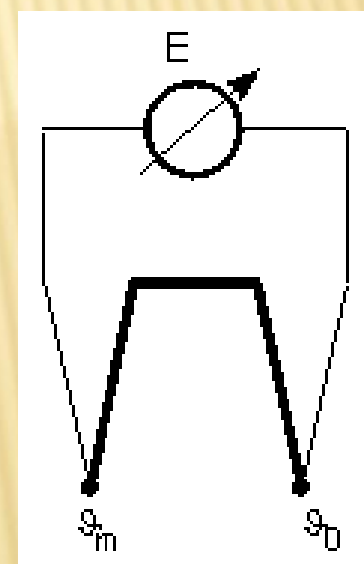
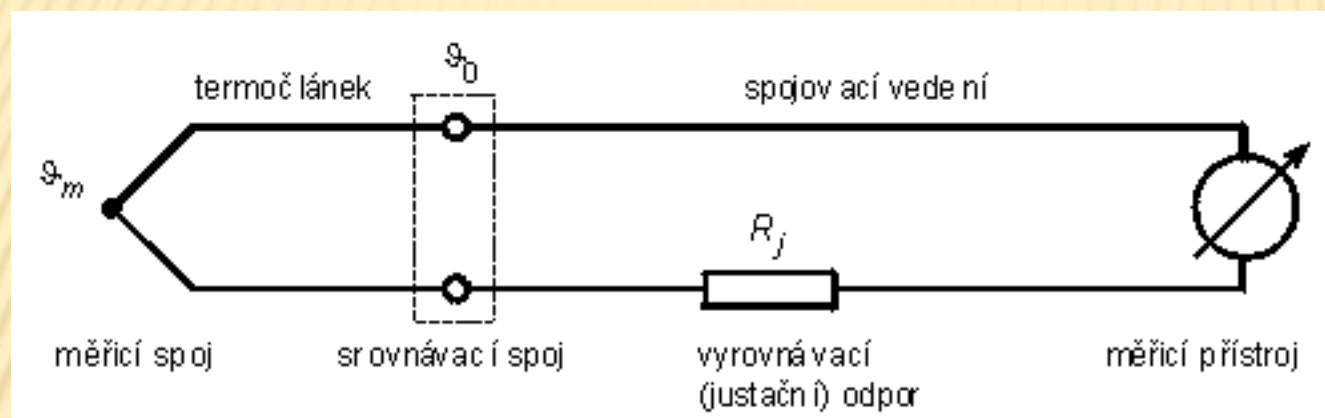
- + Nízké pořizovací náklady – koruny
- + Rozsah: -180°C až $+85^{\circ}\text{C}$
- + V tomto rozsahu je změna odporu téměř lineární
- + Přesnost měření 0,01 K

MĚŘENÍ TEPLOTY

× Termočláanky

- + Spojení dvou různých kovů – vzniká kontaktní rozdíl potenciálů
- + Spoj pracuje jako zdroj elektromotorického napětí – závislost na teplotě
- + Měří teplotní rozdíl mezi dvěma místy

MĚŘENÍ TEPLOTY



Označení termočlásku	T	J	X	S
název termočlásku	měď-měďnikl	železo-měďnikl	niklchrom-niklhlíník	platinarhodium-platina
použitelnost: trvale	-200 °C až +400 °C	-200 °C až +600 °C	-50 °C až +1000 °C	0 °C až +1300 °C
krátkodobě	+600 °C	+900 °C	+1300 °C	+1800 °C
termoelektrické napětí (mV/100 °C)	4,25	5,37	4,8	0,64
odolnost v oxidačním prostředí	malá	malá	velká	velká
odolnost v redukčním prostředí		velká	malá	malá

MĚŘENÍ TEPLOTY

× Bezdotykové metody měření teploty

- + Založeno na tepelném záření v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+10000\text{ }^{\circ}\text{C}$

- × Tepelné snímače
- × Kvantové snímače

× Tepelné snímače

- + Neselektivní snímače – stejná citlivost pro všechny vlnové délky

- × Termistory
- × Termočláňkové baterie
- × Bolometry
- × Pyroelektrické snímače

MĚŘENÍ TEPLOTY

× Kvantové snímače

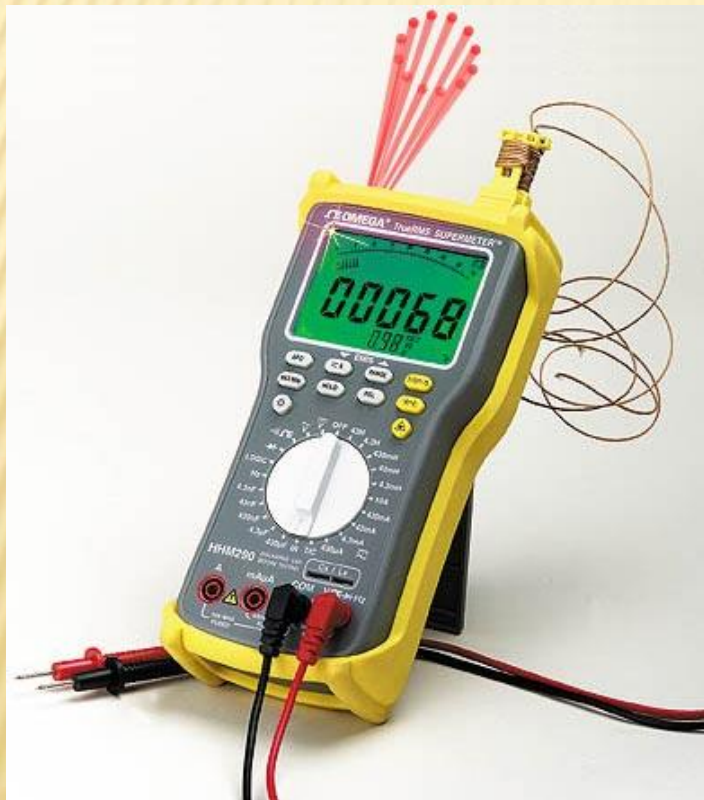
- + Využití fotoelektrického jevu v polovodičích
- + Snímače jsou selektivní, citlivé a mají malou časovou konstantu
- + Pyrometry
 - × Radiační pyrometry
 - × Spektrální pyrometry
 - × Barvové pyrometry
 - × Pásmové pyrometry

MĚŘENÍ TEPLoty

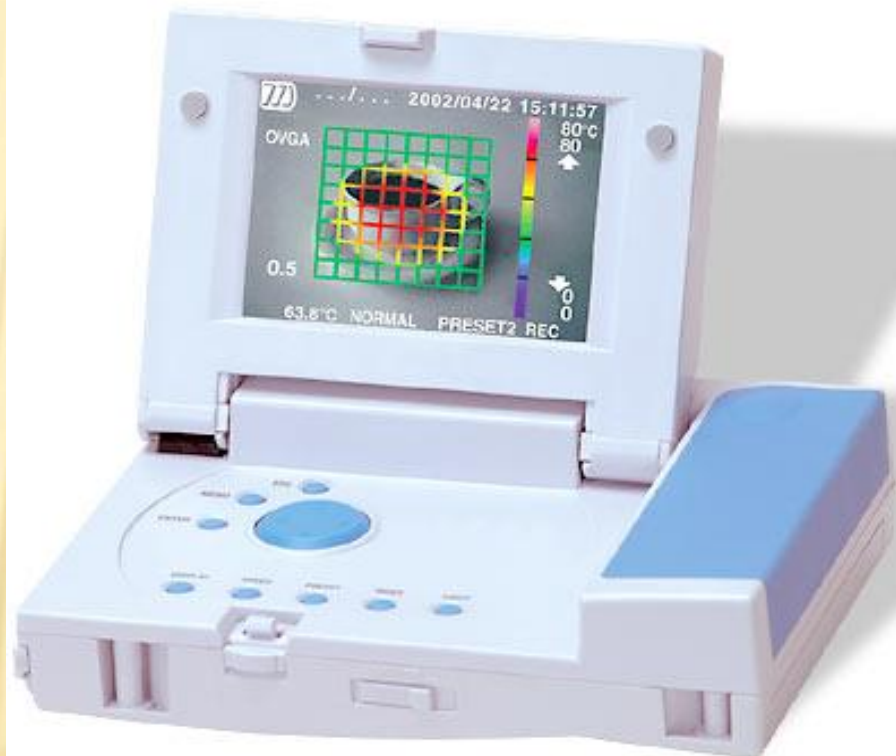


MĚŘENÍ TEPLOTY

✖ Inframěření teploty



MĚŘENÍ TEPLOTY



MĚŘENÍ VLHKOSTI

MĚŘENÍ VLHKOSTI

× Několik kvantitativních veličin

- + Parciální objemová hustota vody

$$\rho_u = m_v/V$$

- + Objemová vlhkost

$$u_v = V_v/V$$

- + Hmotnostní vlhkost

$$u = m_v/m_s$$

- + Stupeň nasycení

$$\psi = u/u_{\max}$$

- + Normová (relativní) vlhkost

$$u_v = u(\rho_s/\rho_v)$$

MĚŘENÍ VLHKOSTI

✕ Metody měření vlhkosti

- + Požadavky – měření vlhkosti s přesností 0,1%, okamžité vyhodnocení, zjištění vlhkosti v kterémkoli místě konstrukce, nedestruktivní měření
- + Realita – nelze podmínky splnit
- + Přímé a nepřímé metody měření
 - ✕ Často se používají kombinace

MĚŘENÍ VLHKOSTI

✖ Skupiny principů měření vlhkosti

+ Oddělování vody od pevné fáze

- ✖ Vodu lze oddělit odpařením, vytlačením, destilací

+ Stanovení obsahu vody na základě jejích specifických vlastností

- ✖ Vyvolání některých chemických reakcí
- ✖ Pohltivost elektromagnetického záření vysokých frekvencí
- ✖ Zpomalovací účinek vodíkových jader na rychlé neutrony
- ✖ Vysoká rozpouštěcí schopnost a vytváření elektrolytů
- ✖ Dipólový charakter molekul vody a související vysoká hodnota relativní permitivity

+ Měření jiných veličin v souvislosti s obsahem vody

- ✖ Některé materiály mění s vlhkostí svůj objem, všechny měrnou tepelnou kapacitu a součinitel tepelné vodivosti

MĚŘENÍ VLHKOSTI

✕ Gravimetrická metoda

- + Celosvětový standard

- + Odebrán vzorek, zvážen, vysušen a opět zvážen

$$u = (m - m_s) / m_s \times 100\%$$

- + Nevýhody

 - ✱ Destruktivní metoda

 - ✱ Nemožnost opakování

 - ✱ Časové zpoždění informace

- + Velikost vzorku – alespoň 100x větší než největší nehomogenita (např. zrno kameniva)

- + Vysušení vzorku – zbavení volné vody, případně fyzikálně vázané – energeticky a časově náročné – urychlující metody

MĚŘENÍ VLHKOSTI

✕ Ostatní metody

- ✧ Pyknometrická a destilační metoda
- ✧ Tenziometrická metoda
- ✧ Metoda rovnovážné vlhkosti
- ✧ Hygrometrická metoda
- ✧ Chemické metody
- ✧ Metoda K. Fischera
- ✧ Metoda karbidu vápníku
- ✧ Extrakční metody

+ Metody založené na pohltivosti vody pro elektromagnetické záření

- ✧ Spektrometrická metoda
- ✧ Metoda nukleární magnetické rezonance (NMR)

MĚŘENÍ VLHKOSTI

- ✧ Metoda pohlcování gama a rentgenového záření
- ✧ Měření útlumu mikrovlnné energie
- ✧ Neutronová metoda

+ Elektrické metody měření vlhkosti

- ✧ Kapacitní metoda měření vlhkosti
- ✧ Odporová metoda měření vlhkosti

MĚŘENÍ VLHKOSTI

× Vlhkost vzduchu

+ Absolutní vlhkost

$$\phi = m_v/V$$

+ Relativní vlhkost

$$\varphi = \phi/\phi_n = m_v/m_n$$

+ Metody měření vlhkosti vzduchu

- × Metoda psychrometrická

- × Metoda kondenzační

- × Metoda hygrometrická