MĚŘENÍ TEPLOTY

- teplota je jednou z nejdůležitějších veličin ovlivňujících téměř všechny stavy a procesy v přírodě
- při měření teploty se měří obecně jiná veličina ***A***, která je na teplotě závislá podle určitého vztahu ***A = f (A)***, který lze číselně vyjádřit
- k měření teploty se využívá celé řady funkčních principů

Pro praxi je důležité:

- správné rozhodnutí o **výběru teploměru**
- **vhodné zabudování** teploměrného snímače
  - eliminace nebo potlačení rušivých vlivů na údaj snímače

Rozdělení snímačů teploty:

- **snímače dotykové**
- **snímače bezdotykové**

1

Přehled technických teploměrů

Skupina teploměrů	*Typ teploměru*	*Fyzikální princip*	*Teplotní rozsah [°C]*	
Dilatační teploměry	plynový	změna tlaku	-5	+500
	tenzní	změna tenze par	-40	+400
	kapalinový	změna objemu	-200	+750
	kovový	délková roztažnost	0	+900
Elektrické teploměry	termoelektrické	termoelektrické jev	-200	+1 700
	odporové kovové odporové polovodičové	změna elektrického odporu	-250	+1 000
	diodové	změna prahového napětí	-200	+400
Speciální teploměry	teploměrná tělíska	bod tání	+100	+1 300
	teploměrné barvy	změna barvy	+20	+1 000
	kapalné krystaly	změna orientace	0	+ 300
Bezdotykové teploměry	širokopásmové pyrometry	zachycení veškerého teplotního záření	-40	+5 000
	monochromatické pyrometry	zachycení úzkého svazku záření	+100	+3 000
	poměrové pyrometry	srovnání dvou svazků teplotního záření o různých vlnových délkách	+700	+2 000
	termovize	snímání teplotního obrazu tělesa	-30	+1 200

2

Speciální teploměry

- **teploměrná tělíska**
  - využívá se keramické hmoty s definovaným bodem měknutí
  - dochází k deformaci teploměrného tělíska ve tvaru šikmého jehlanu
- **teploměrné barvy**
  - na bázi **kapalných krystalů** (termochromní kapalné krystaly)
    - kapalné krystaly cholesterického typu, u nichž dochází k vratným změnám orientace se změnou teploty
  - na bázi organických **molekulárních komplexů**
    - dochází ke změně barvy při tzv. teplotě zvratu

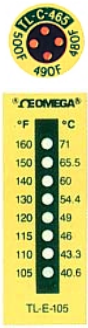
Použití speciálních teploměrů:

- pro měření **povrchové teploty** těles
- k přípravě **termochromních tiskových barev** např. pro etikety (termocitlivá látka je uzavřena do polymerní mikrokapsule)
- pro jednorázové změření teploty
- nejsou vhodné jako čidla regulátorů v řídicích obvodech

3

Ukázky aplikace termochromních barev

samolepicí štítky



- vratná změna barvy při překročení mezní teploty
- využití na etiketách některých výrobků (např. lahvové pivo)

- nevratná změna barvy při překročení mezní teploty

4

Teploměry dilatační

Teploměry plynové

- tlak plynu za stálého objemu je přímo úměrný teplotě

$$p = \frac{nR}{V} \cdot T = k \cdot T$$

- teploměr se skládá z jímky (kovové baničky), spojovací kapiláry a manometru (nejčastěji deformačního)
- náplň: dusík, hélium, vzduch
- jako provozní snímače nejsou vhodné

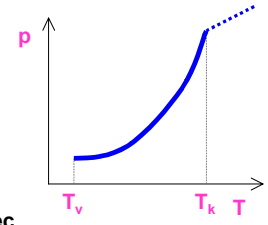
5

Teploměry tenzní

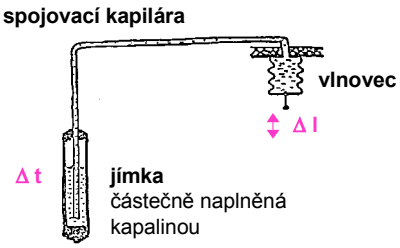
- využívají závislosti tenze par na teplotě, kterou je možno vyjádřit např. Antoineovou rovnicí:

$$\log p = A - \frac{B}{t + C}$$

Statická charakteristika:



Provedení tenzního teploměru:



Používané náplně:

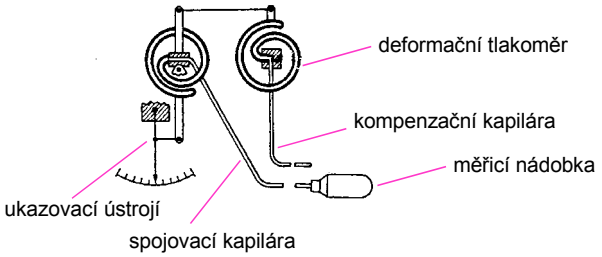
propan (-40 až 90) °C
ethylether (35 až 190) °C
toluen (120 až 300) °C
a další . . .

6

Teploměry kapalinové

- měření změn objemu při změně teploty: $V_t = V_0 (1 + \beta . t)$
- běžně používané jsou skleněné teploměry, nejčastěji plněné rtutí

Provedení kapalinového teploměru pro provozní použití:



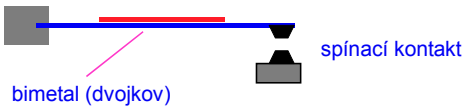
Používané náplně:
rtuť (-30 až 500) °C, xylen (-40 až 400) °C, methanol (-40 až 150) °C aj.

7

Dvojkovové senzory teploty

- teploměrným čidlem je **bimetal** (dvojkov)
- bimetalický pásek je zhotovený ze dvojice pevně spojených kovových materiálů s rozdílným teplotním součinitelem roztažnosti

Provedení bimetalového teploměru pro spínací účely:



- pro zvýšení citlivosti bývá bimetalový pásek stočen do spirály nebo šroubovice
- bimetalových senzorů se nejčastěji využívá pro dvoupolohovou regulaci teploty

8

Elektrické teploměry

- **termoelektrické snímače teploty**
- **odporové snímače teploty**

- **transformují teplotu na elektrický signál (napětí, proud, odpor)**
- **nejčastěji používané typy senzorů**
  - **pro provozní měření teploty**
  - **pro čidla regulátorů při automatickém řízení teploty**
  - **pro moderní přenosné teploměry**

9

Termoelektrické senzory teploty

- termoelektrické senzory jsou založeny na **Seebeckovu jevu** (převod tepelné energie na elektrickou)
- **termoelektrický článek** je tvořen dvěma vodiči z různých kovových materiálů, které jsou na obou koncích spolu vodivě spojeny
- jestliže teplota t_m měřicího spoje bude různá od teploty t_0 srovnávacího spoje, vzniká **termoelektrické napětí** a obvodem prochází proud
- v zjednodušené formě můžeme závislost termoelektrického napětí na teplotě vyjádřit lineárním vztahem:

$$E = \alpha_{AB} t_m + \alpha_{BA} t_0 = \alpha_{AB}(t_m - t_0)$$

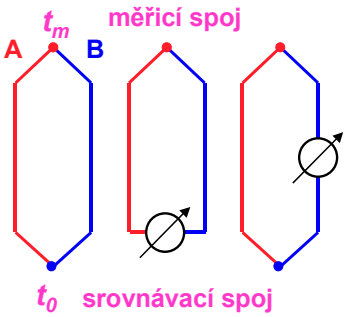
α_{AB} je koeficient závislý na materiálech použitých kovů a platí $\alpha_{AB} = -\alpha_{BA}$

Uvedený vztah platí jen pro úzké rozmezí teplot. Pro přesnější vyjádření se používá vztahu:

$$E = \sum_{i=0}^{n} a_i \Delta t^i$$

n = 2 až 14 podle požadované přesnosti

Měřicí obvod termočlánku



- dva spojené kovové vodiče **A** a **B** navzájem spolu spojené
  - **měřicí spoj**
  - **srovnávací spoj**
- pro správnou funkci snímače je nutné aby teplota t_0 srovnávacího spoje byla konstantní, nebo aby vliv termoelektrického napětí tohoto spoje byl kompenzován

Měření termoelektrického napětí:

- **měřicí přístroj se zapojí tak, že se rozpojí srovnávací spoj**
- **měřicí přístroj se zapojí do jedné větve termočlánku**

Přehled vlastností termočlánků

Materiál na výrobu termočlánků by měl vykazovat:

- co největší a lineární přírůstek termoelektrického napětí s teplotou
- stabilitu údaje při dlouhodobém provozu
- odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům

Páry materiálů pro vytvoření termočlánků jsou normalizovány.

Některé typy termočlánků jsou uvedeny v tabulce:

Označení a název termočlánku	T *měď-měďnikl*	J *železo-měďnikl*	K *niklchrom--niklhliník*	S *platinarhodium--platina*
Použitelnost trvale krátkodobě	(-200 až +400) °C +600 °C	(-200 až +600) °C +900 °C	(-50 až +1000)°C +1300 °C	(0 až +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

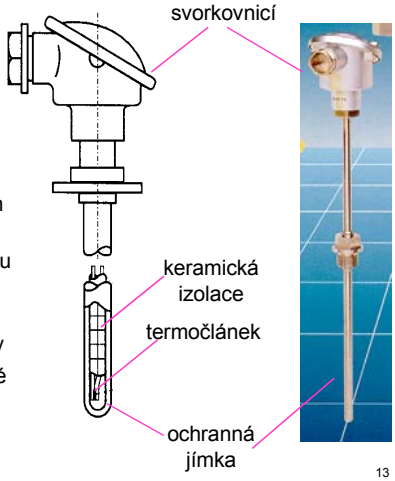
Konstrukční uspořádání termoelektrických snímačů

Termoelektrický snímač s ochrannou jímkou

⇒ snímač pro provozní aplikace

Termoelektrický článek je umístěn v ochranné armatuře

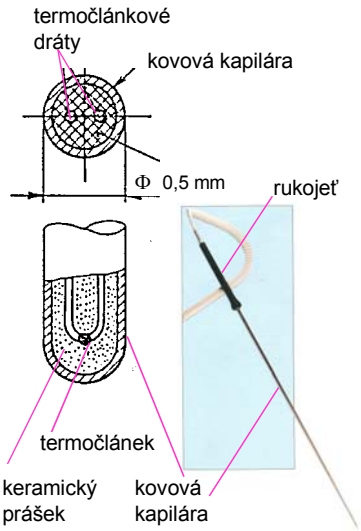
- zabraňuje jeho mechanickému poškození
- chrání před nepříznivými fyzikálními a chemickými vlivy
- zhoršuje však jeho dynamické vlastnosti



13

Plášťový termočlánek

Termočlánkové dráty jsou uloženy v niklové nebo nerezové trubičce vyplněné práškovým MgO nebo Al_2O_3



Přednosti plášťových termočlánků:

- snadné tvarové přizpůsobení
  ⇒ možnost měření na těžko přístupných místech
- malá tepelná kapacita
- velmi dobrý přestup tepla
  ⇒ příznivé dynamické vlastnosti

14

Měřicí obvody pro termoelektrické senzory

Požadavky na měřicí obvody:

- minimalizace vlivu kolísání teploty srovnávacího spoje
- minimalizace vlivu odporu přívodů k senzoru
- potlačení rušivých signálů

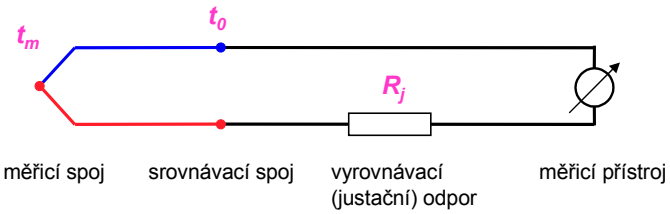
Potlačení vlivu teploty srovnávacího spoje:

- umístěním srovnávacího spoje **do termostatu**
  – v laboratoři při 0 °C
  – u provozních aplikací při 50 °C
- analogovými **kompenzačními obvody**
  – kompenzační krabice
- u číslicových měřicích systémů **číslicovou korekcí**

15

Zapojení měřicích obvodů s termočlánky

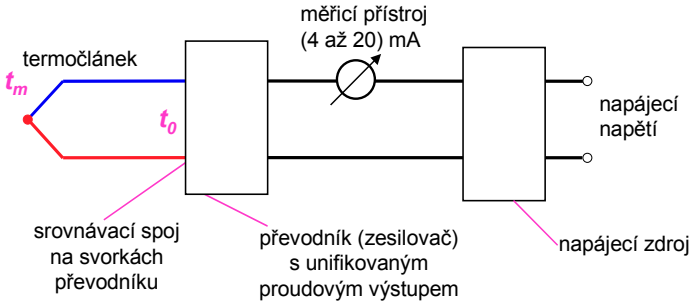
Přímé měření termoelektrického napětí milivoltmetrem



- vliv velikosti vnitřního odporu měřicího přístroje
- vliv odporu spojovacího vedení
- vliv kolísání teploty srovnávacího spoje

16

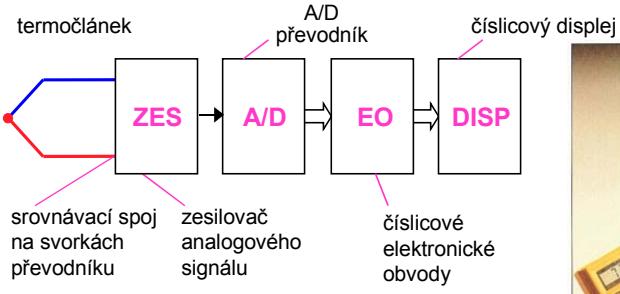
Měření teploty termoelektrickým senzorem s použitím dvouvodičového převodníku



- velikost napájecího proudu převodníku je funkcí hodnoty měřené veličiny
- při počáteční hodnotě teploty je hodnota výstupního signálu 4 mA
- s rostoucí teplotou se zvyšuje velikost proudového výstupu až k maximální hodnotě 20 mA
- tohoto zapojení se používá při provozním měření teploty

17

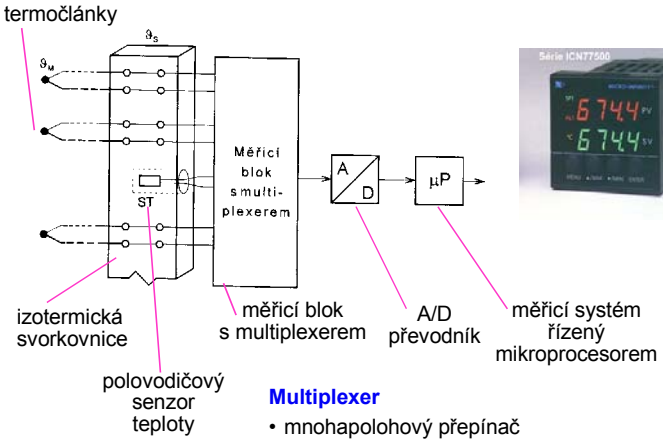
Teploměr s číslicovým výstupem



- teplota srovnávacího spoje se měří polovodičovým senzorem teploty
- číslicový elektronický obvod zajišťuje korekci údaje při změnách teploty srovnávacího spoje
- číslicové obvody zajišťují rovněž linearizaci statické charakteristiky teploměru

18

Měření teploty vícemístným měřicím systémem



Multiplexer

- mnohapolohový přepínač
- zajišťuje sériové zpracování informací z jednotlivých měřicích míst

19

Elektronický záznamník teplot

Dataloger

- zařízení umožňující ukládání naměřených dat do paměti a následné čtení zaznamenaných údajů
- elektronický zapisovač naměřených hodnot
- možnost přenosu dat do PC

Miniaturní **kompaktní dataloger**

- obsahuje termoelektrický senzor
- elektronické obvody
- paměť 3 000 hodnot teploty
- rozměry 55x35 mm
- životnost baterie 10 let

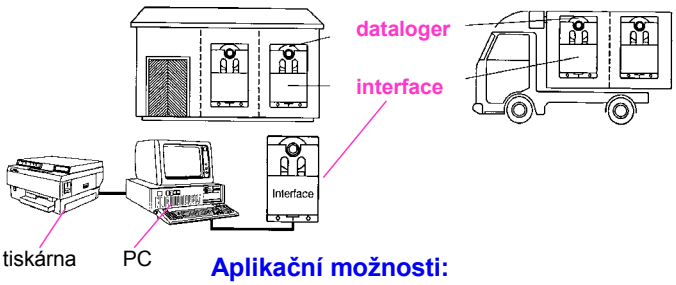
Interface:

zařízení umožňující

- propojení datalogeru s počítačem
- programování datalogeru
- čtení zaznamenaných údajů
- nabíjení akumulátoru datalogeru

20

Aplikace teploměru s datalogerem



software

- grafické a tabulkové vyhodnocení

Aplikační možnosti:

záznam teploty

- při laboratorních experimentech
- při skladování
- při transportu
- při výrobním procesu
- konzervárenství, mrazírny, farmaceutické výroby ap.

21

Odporové snímače teploty

- **kovové odporové teploměry**
- **polovodičové odporové teploměry**

ukázky provedení průmyslových snímačů teploty

22

Kovové odporové teploměry

- elektrický **odpor kovových vodičů vzrůstá s teplotou**
- pro čisté kovy je možno závislost vyjádřit polynomem; v technické praxi vystačíme s polynomem 2. stupně:

$$R = R_0 [1 + \alpha (t - t_0) + \beta (t - t_0)^2]$$

- pro menší teplotní rozsah ($\Delta t < 100$ °C) lze použít lineárního vztahu:

$$R = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)]$$

- kde α je teplotní součinitel definovaný v pracovním bodě t_0

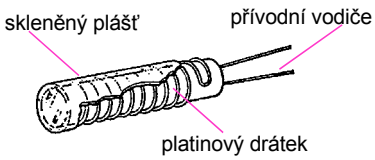
Pro realizaci odporových teploměrů se používají především čisté kovy, jejichž teplotní součinitel má být stálý a pokud možno co největší:

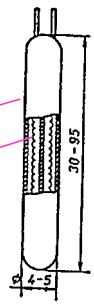
- používanými materiály jsou platina, nikl, měď
- nejčastěji používaným materiálem je **platina**
  - může být vyrobena ve standardně čistém stavu
  - je fyzikálně a chemicky stálá

23

Provedení kovových odporových senzorů

- **drátkové měřicí odpory**
  - čidlo senzoru je tvořeno spirálovitě stočeným tenkým platinovým drátkem (průměr 0,05 mm), který je zataven do keramického nebo skleněného tělíska
  - v jiném uspořádání je drátek navinut na slídové či pertinaxové podložce
  - jmenovitá hodnota odporu při 0 °C činí 100 Ω

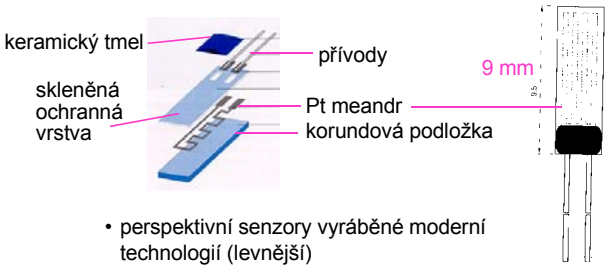




- drátkové měřicí odpory jsou časově velmi stálé
- nevýhodou jsou nepříznivé dynamické vlastnosti (velká tepelná kapacita)

24

- **plošné měřicí odpory**
  - měřicí odpory vyráběné tenkovrstvou technologií, při níž se platinový odpor vytvoří fotolitografickou technikou ve formě jednoduchého meandru na ploché korundové destičce
  - jmenovitý odpor čidla se nastaví pomocí laseru
  - plošné měřicí odpory se vyrábí se jmenovitou hodnotou 100 Ω, 500 Ω, 1000 Ω, 2000 Ω



- perspektivní senzory vyráběné moderní technologií (levnější)
- vyšší hodnota jmenovitého odporu
- příznivé dynamické vlastnosti

25

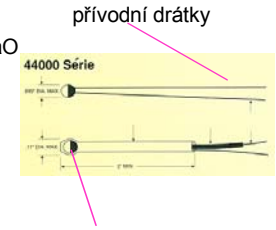
Polovodičové odporové teploměry

- využívá se závislosti odporu polovodičů na teplotě
- v praxi se využívá několika typů polovodičových senzorů teploty:

NTC - termistory (negastory)

- jsou vyráběny práškovou technologií z oxidů kovů (Fe_2O_3, TiO_2, CuO, MnO, NiO, CoO, BaO a dalších)
- vylisované senzory (nejčastěji ve tvaru perličky) se zpevňují slinováním za vysoké teploty
- vykazují záporný teplotní součinitel odporu
- závislost odporu na teplotě je nelineární a odpor s teplotou klesá:

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



R, R_0 - odpory termistoru při teplotách *T a T_0*
B - veličina úměrná aktivační energii

26

PTC - termistory (pozistory)

- vyrábějí se z polykrystalické feroelektrické keramiky např. $BaTiO_3$
- vykazují **kladný teplotní součinitel odporu**
- v úzkém teplotním rozmezí odpor pozistoru prudce stoupá
- pro oblast nárůstu odporu platí vztah:

$$R = R_r \cdot e^{A \cdot T}$$

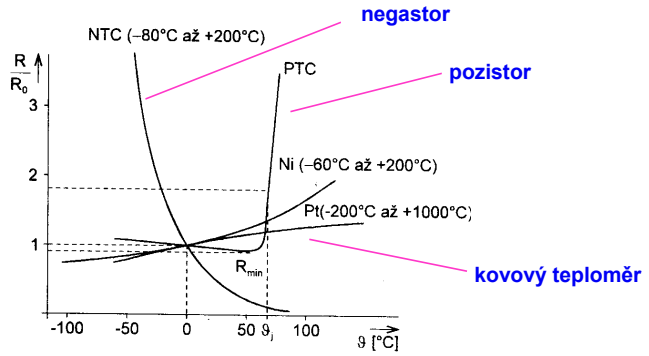
- pozistory se obvykle používají jako dvoustavové senzory
  - signalizace překročení mezní teploty
  - dvoupolohová regulace

Polovodičové monokrystalické senzory teploty

- vyrábějí se z křemíku, germania či india
- v průmyslové praxi se nejčastěji využívá **křemíkových senzorů** z nevlastního polovodiče typu N pro měření v rozsahu od -50 °C do 150 °C
- teplotní závislost lze aproximovat kvadratickou závislostí

27

Porovnání teplotních závislostí odporových senzorů



- polovodičové senzory vykazují vyšší citlivost než kovové
- polovodičové senzory mají příznivější dynamické vlastnosti
- kovové senzory vykazují vysokou stabilitu, reprodukovatelnost a přesnost

28

Měřicí obvody pro odporové senzory teploty

Na měřicí obvody jsou kladeny tyto požadavky:

- minimalizace **vlivu měřicího proudu** (proudu procházejícího senzorem)
- minimalizace **vlivu odporu přívodů** k senzoru
- analogová nebo číslicová **linearizace**

Vliv měřicího proudu

- průchodem měřicího proudu odporovým senzorem teploty dochází k chybě měření vlivem oteplení senzoru
- chybu je možno vyjádřit vztahem:

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

D - zatěžovací konstanta [W K^{-1}]

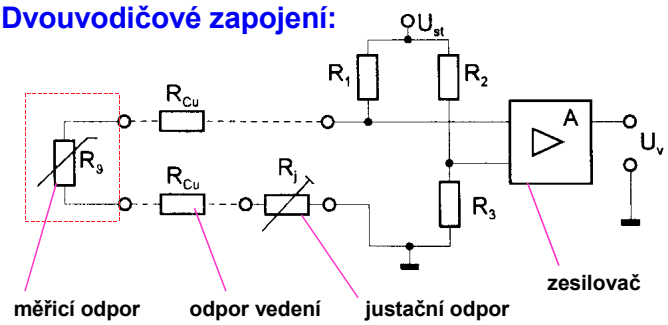
- pomocí uvedeného vztahu a katalogové hodnoty D je možno vypočíst maximální proud pro přípustnou chybu Δ t

29

Vliv odporu přívodů

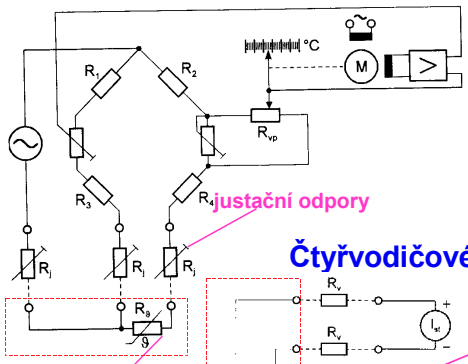
- definovaná hodnota odporu vedení R_v = 20 Ω
- vliv teploty na odpor spojovacího vedení
- dvouvodičové, třívodičové a čtyřvodičové zapojení odporového senzoru

Dvouvodičové zapojení:

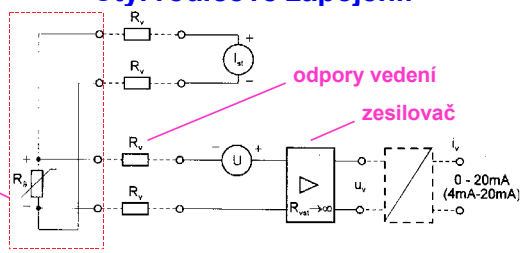


30

Třívodičové zapojení:



Čtyřvodičové zapojení:



Porovnání elektrických teploměrů

	Termočlánek	*Kovový teploměr*	*Termistor*
Výhody	aktivní snímač jednoduchý levný odolný široce použitelný široký teplotní rozsah	vysoká stabilita vysoká přesnost lepší linearita než u termočlánku	vysoká citlivost rychlá odezva dvouvodičové měření
Nevýhody	nelineární nízká úroveň signálu potřeba referenčního signálu nízká citlivost nízká stabilita	poměrně vysoká cena potřeba stabilizačního napájecího zdroje malá změna odporu nízká hodnota odporu zahřívání procházejícím proudem	nelineární omezený teplotní rozsah křehký potřeba stabilizovaného napěťového zdroje zahřívání procházejícím proudem

32

Inteligentní převodníky teploty

- **Inteligentní převodník (smart transmitter) :**
  - **umožňuje připojení různých čidel pro snímání měřené veličiny (termočlánek, odporový teploměr a j.)**
  - **zahrnuje elektronické obvody pro zpracování, analýzu a unifikaci signálu**
  - **konfigurace a funkce převodníku je programovatelná uživatelem**

Provedení inteligentního převodníku:

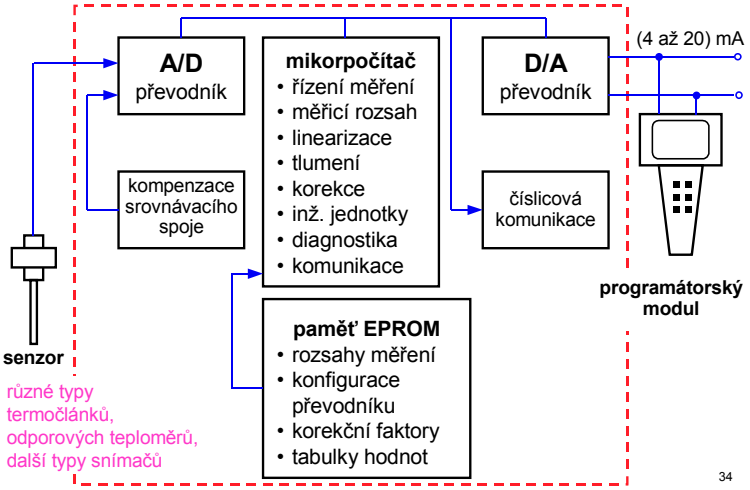
displej pro zobrazení hodnot

zdířky pro připojení programovacího modulu

výměnný přední panel

33

Schéma inteligentního převodníku teploty



34

Zabudování dotykových teploměrů

- **vhodné** umístění teplotních snímačů **je jedním ze základních předpokladů správného měření teploty**
- **u snímače musí být zajištěn** dokonalý styk s prostředím **aby docházelo i k dobrému přestupu tepla**
- **ztráty tepla vedením se omezí** dostatečným ponorem **teploměru**
- **měření teploty kapalin v nádobách vyžaduje** míchání
  - **zvětšení součinitele přestupu tepla**
  - **dosažení homogenního teplotního pole**

Volba měřicího místa:

- **snadná montáž**, demontáž a údržba teploměru
- umístění čidla **do teploměrné jímky** chrání teploměr proti chemickým a mechanickým vlivům
  - dochází však ke zhoršení dynamických vlastností

35