

---

## Úloha č. 5: Měření teploty

---

jarní semestr 2022

### 1 Úvod

Teplota patří k nejdůležitějším charakteristikám termodynamických systémů. Je to proto, že řada vlastností i dějů, které v systémech probíhají, na teplotě více či méně závisí. Měření teploty je proto důležitý experimentální úkol, kterému se nevyhnou výzkumné a vývojové laboratoře ani průmyslová praxe.

Teplotní závislost řady jevů nás na jedné straně nutí v řadě případů teplotu měřit, na druhé straně nám dává možnost těchto teplotních závislostí využít jako metod k vlastnímu měření teploty. V rozmanitosti různých experimentálních metod teplota nesnese srovnání s žádnou jinou měřenou fyzikální veličinou.

K měření teploty se často využívá dilatačních teploměrů, které jsou založeny na principu teplotní roztažnosti látek. Podle skupenství látky obsažené v teploměru je možné rozlišovat teploměry kapalinové (typicky rtuťové, nebo lihové), plynové a kovové (často používanou podskupinou jsou teploměry dvoukovové – bimetalické). V této úloze se budeme věnovat dalším v praxi často používaným druhům teploměrů, teploměrům elektrickým, mezi které patří odporová čidla a termoelektrické články, a teploměrům radiačním.

### 2 Odporová čidla

Odpor je veličinou, která obecně vždy závisí na teplotě. Navíc je výhodné, že měření odporu je měřením elektrickým a lze je tedy snadno implementovat do elektronických automatizovaných systémů měření a řízení technologických procesů. Proto jsou odporové snímací prvky v současné technické a průmyslové praxi zřejmě používané nejčastěji.

#### 2.1 Kovové odporové senzory teploty

Odpor kovového vodiče s teplotou roste. Důvodem je rozptyl elektronů – nositelů proudu – na kmitech mříže, který je tím větší, čím je teplota vyšší. Pro malý rozsah teplot, přibližně v intervalu 100 °C, lze použít lineární závislost odporu na teplotě ve tvaru

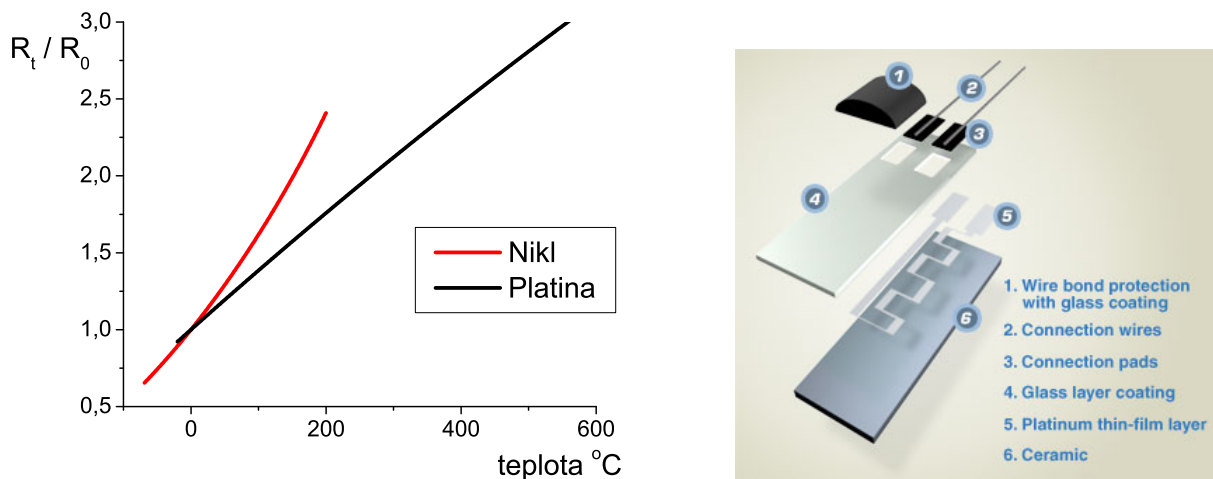
$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (1)$$

Teoreticky můžeme použít libovolný kov, v praxi se však používá jen několik málo materiálů, které nejlépe vyhovují zejména požadavkům stálosti. Nejužívanější materiály jsou uvedeny v příloze A, viz tabulka 2. Pro komerční použití čidel bylo zavedeno označení vyjadřující typ snímače a hodnotu jeho odporu při dané dohodnuté teplotě, typicky 0 °C. K nejpoužívanějším snímačům patří Pt100, Pt1000 a Ni1000, tj. snímače, které mají při teplotě 0 °C odpor 100 Ω, resp. 1000 Ω.

Standardem mezi kovovými odporovými snímači je snímač Pt100. Čidlo Pt1000 s vyšší hodnotou odporu má vyšší citlivost, menší samoohřev a nižší vliv odporu přírodních vodičů, je však méně stálé. Ve starší, tzv. drátkové technologii však vyšší základní odpor znamenal vyšší cenu snímače vzhledem k nutnému použití většího množství drahého kovu. Při moderní tenkovrstevné

technologii již spotřeba materiálu neovlivňuje významně cenu a to dovoluje výrobu levných snímačů i vyššího základního odporu.

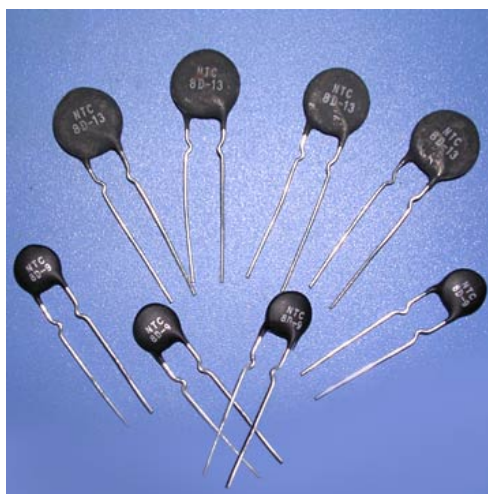
Pro větší rozsah teplot již nelze použít lineární aproximaci teplotní závislosti odporu a závislost se aproximuje polynomem vyššího řádu. Pro platinové a niklové čidlo jsou koeficienty uvedeny v příloze A. Teplotní závislost odporových čidel Pt a Ni je na obr. 1.



Obrázek 1: Teplotní závislost Pt a Ni odporových čidel (vlevo), konstrukce Pt čidla (vpravo)

## 2.2 Polovodičové odporové senzory teploty – termistory

Polovodičové odporové senzory teploty patří k nejpoužívanějším teplotním čidlům zejména v oblasti spotřební elektroniky, jako například domácí a venkovní digitální teploměry. K jejím výhodám patří vysoká teplotní citlivost (asi o řád vyšší než u kovů), malé rozměry a cena. Nevýhodou je nelineární teplotní charakteristika, menší rozsah teplot a menší dlouhodobá stabilita v porovnání s platinovými odporovými čidly.



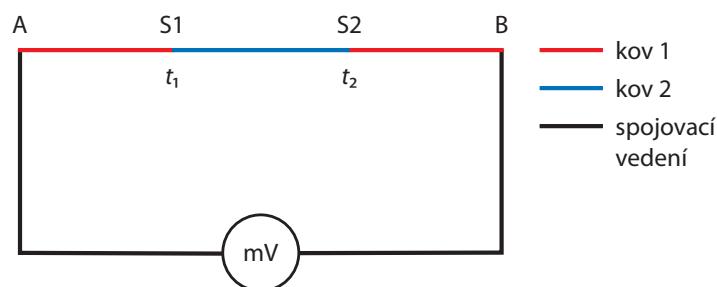
Obrázek 2: Termistory NTC

Odpor vlastního polovodiče s rostoucí teplotou klesá, neboť se zvyšuje pravděpodobnost excitace elektronu z valenčního do vodivostního pásu, a roste tak koncentrace nositelů náboje – elektronů ve vodivostním pásu a děr v pásu valenčním. Zvýšení rozptylu nositelů náboje s teplotou, které určovalo teplotní charakteristiku u kovů, má zde méně významný vliv. Termistory

se zápornou teplotní závislostí se nazývají negastory (NTC termistory). Silným dopováním lze vyrobit i polovodiče s kladnou teplotní závislostí odporu, tzv. pozistory, pro měření teploty se však prakticky nepoužívají.

### 3 Termoelektrické články

Pokud spojíme dva různé vodivé materiály (kovy nebo polovodiče) ve dvou místech podle obrázku 3 tak, že spoje S1 a S2 budou mít různou teplotu, vznikne mezi spoji tzv. termoelektrické napětí a uzavřeným obvodem začne protékat termoelektrický proud. Tento jev se nazývá také Seebeckův a souvisí s difúzí volných nositelů náboje z teplejších míst do chladnějších.



Obrázek 3: Termoelektrický článek – spojení dvou různých kovů

Teplotní charakteristika termoelektrického napětí je i v relativně velkém rozsahu přibližně lineární; lze ji tedy charakterizovat vztahem

$$U = \beta (t_1 - t_2) \quad (2)$$

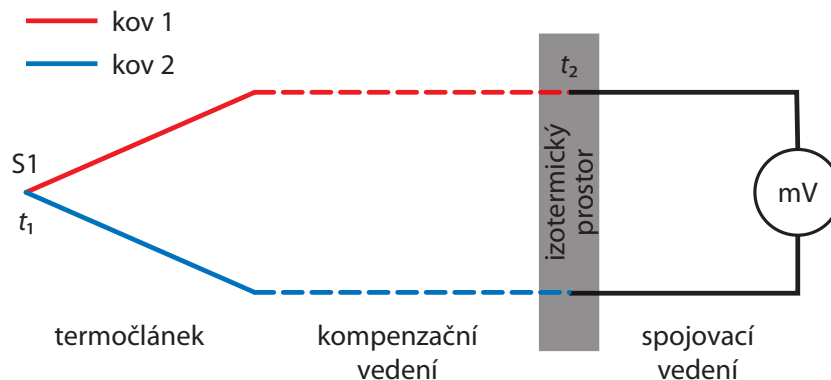
kde  $\beta$  je tzv. Seebeckův termoelektrický koeficient. Jeho hodnota závisí na materiálech použitých při výrobě termoelektrického článku (viz příloha A).

Pokud do obvodu termoelektrického článku zapojíme vodiče z jiného materiálu (tzv. spojovací vedení), nedojde ke změně termoelektrického napětí, jsou-li všechny ostatní spoje na téže teplotě (viz například body A a B na obr. 3). To je důležitá vlastnost, díky které můžeme za předpokladu teplotní homogenity prostředí použít pro spojení termoelektrického článku s měřicím přístrojem libovolné vhodné vodiče (nejčastěji měděné). Pokud teplotní homogenitu zajistit nelze, musíme postupovat některým z následujících dvou způsobů:

1. Použít materiál termoelektrického článku pro celý obvod až ke svorkám měřicího přístroje (o kterém lze předpokládat, že má homogenní teplotu) a nebo alespoň do míst, kde lze homogenitu teploty s požadovanou přesností zajistit.
2. Použít tzv. prodlužovací (kompenzační) vedení z jiných kovů, které ovšem mají termoelektrický koeficient co nejblíže materiálům termoelektrického článku. Tento postup se volí, pokud je nutné pro vlastní termoelektrický článek použít drahých kovů (například z důvodů požadovaného teplotního rozsahu) a kompenzační vedení může být realizováno materiály levnějšími.

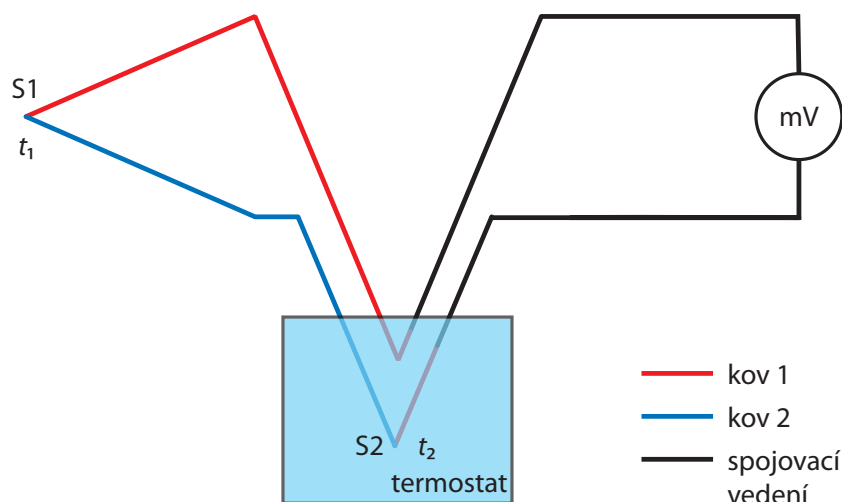
V technické praxi se nejčastěji používá termoelektrický článek, který má pouze jeden spoj různých kovů. Druhý spoj je pak v místě, kde se připojuje spojovací vedení nebo přímo měřicí přístroj. Na obr. 4 je zakresleno schéma termoelektrického článku s jedním spojem, doplněným kompenzačním a spojovacím vedením.

Pro nej přesnější měření je nutné srovnávací teplotu termostatizovat. Přitom je nejvýhodnější použít termoelektrický článek s oběma konci, z nichž jeden umístíme do termostatu. Velmi dobrý



Obrázek 4: Termoelektrický článek s jedním spojem

termostat jednoduše získáme pomocí směsi ledu a vody v Dewarově nádobě, která se bez jakékoliv aktivní termostatizace udržuje na teplotě  $0^{\circ}\text{C}$ . Příklad zapojení termoelektrického článku s oběma konci je na obr. 5.



Obrázek 5: Termoelektrický článek se dvěma spoji. První spoj je měřicí a druhý je termostatizován.

Z předchozího textu jednoznačně vyplývá, že termoelektrické články měří pouze rozdíl teplot, nikoliv absolutní hodnotu teploty. Přesto jsou běžně na trhu digitální teploměry s termočláňkovými sondami, které absolutní hodnotu teploty ukazují (viz obr. 6). To lze zařídit jen tak, že vlastní elektronická část teploměru je vybavena teplotním čidlem, které měří absolutně teplotu samotného teploměru (například termistor) a k jehož údaji se teplotní rozdíl určený termoelektrickým článkem přičítá.

## 4 Infračervené teploměry

Každé těleso na teplotě vyšší než absolutní nula (tedy skutečně každé) vyzařuje elektromagnetické záření. Toto záření nazýváme tepelné, abychom jej odlišili od záření vzniklého jiným způsobem, například luminiscencí. Emise tepelného záření je ovlivněna zejména teplotou, ale také vlastnostmi povrchu tělesa. Ukazuje se, že nejvíce září to těleso, jež v dané oblasti vlnových délek nejvíce



Obrázek 6: Digitální teploměr s teplotní termočlávkovou sondou typu K.

absorbuje. Ideálním zářičem je tedy těleso zcela pohlcující dopadající záření, tzv. dokonale černé těleso. Odchylku vyzařování konkrétního povrchu od vyzařování dokonale černého popisuje veličina zvaná emisivita  $\varepsilon$ , která je definovaná jako

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{I(\lambda, T)}{I_{\text{čt}}(\lambda, T)}, \quad (3)$$

kde  $I(\lambda, T)$  je intenzita vyzařování daného povrchu o absolutní teplotě  $T$  na vlnové délce  $\lambda$  a  $I_{\text{čt}}(\lambda, T)$  intenzita vyzařování dokonale černého tělesa o stejné teplotě a na stejné vlnové délce. Emisivita černého tělesa je tedy vždy rovna jedné, v běžných případech  $\varepsilon < 1$ . Pokud je emisivita tělesa v daném intervalu vlnových délek konstantní, těleso září jako tzv. šedý zářič. Mění-li se, mluvíme o selektivním zářiči. Se změnou teploty jsou spojeny dva charakteristické jevy:

1. S rostoucí teplotou se zmenšuje vlnová délka, při které je vyzařování největší. Tuto závislost popisuje tzv. Wienův posunovací zákon

$$\lambda_{\text{max}} T = \text{konst} = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}. \quad (4)$$

2. Současně se vzrůstem teploty prudce narůstá celková vyzářená energie dle Stefanova – Boltzmanova zákona

$$I_{\text{čt}} = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \quad (5)$$

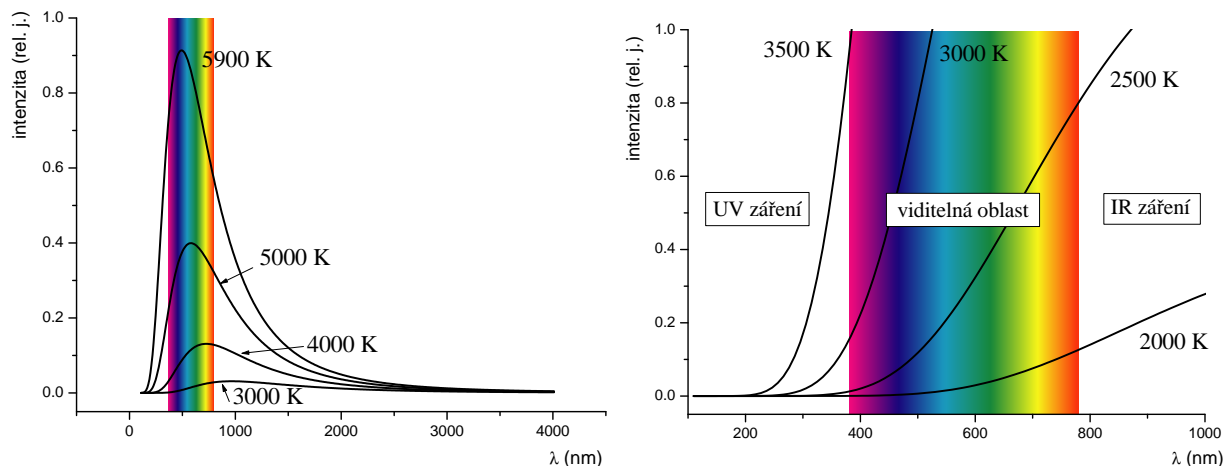
Obě výše uvedené závislosti jsou zdůvodněním toho, že záření těles, která nás běžně obklopují, nevnímáme, a sama existence tohoto záření je pro mnohé laiky překvapením. Těleso na pokojové teplotě má maximum vyzařování pro vlnovou délku cca  $10 \mu\text{m}$ , což je daleko od oblastí viditelného světla.

Spektrální závislost intenzity vyzařování (přesněji řečeno spektrální hustota intenzity vyzařování) dokonale černého tělesa je popsána tzv. Planckovým vyzařovacím zákonem ve tvaru

$$I_{\text{čt}}(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\left( e^{\frac{hc}{k_b T \lambda}} - 1 \right)} \quad (\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}), \quad (6)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta ( $6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ),  $c$  rychlost světla,  $k_b$  Boltzmannova konstanta ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ). Příklady závislostí pro některé teploty jsou na obr. 7.

Planckův vyzařovací zákon je úplným popisem záření dokonale černého tělesa. Dříve uvedené zákony – Wienův posunovací a Stefanův – Boltzmannův – jsou v něm obsaženy a je možné je z Planckova zákona odvodit.



Obrázek 7: Spektrální hustota vyzařování dokonale černého tělesa.

Z výše uvedeného popisu je zřejmé, že tepelné záření emitované tělesem nese informaci o teplotě tělesa a může být využito pro bezkontaktní měření teploty. Přístroje měřící toto záření nazýváme infračervené (IR) teploměry.

Základním problémem při měření IR teploměry je určení emisivity měřeného povrchu. Z definice emisivity a Stefanova – Boltzmannova zákona plyne vztah mezi skutečnou teplotou tělesa  $T$  a teplotou  $T_{\text{IR}}$ , kterou ukazuje IR teploměr předpokládající, že těleso je dokonale černé

$$T = \frac{T_{\text{IR}}}{\sqrt[4]{\varepsilon}}. \quad (7)$$

V praxi ale tento postup dává pouze přibližné výsledky a určená teplota nebo emisivita povrchu je zatíženou značnou chybou. Většina lepších IR teploměrů má možnost korekce na emisivitu měřeného tělesa. Pokud na přístroji nastavíme správnou emisivitu, provádí přístroj automaticky korekci a ukazuje správnou hodnotu teploty.

#### 4.1 Principy detekce infračerveného záření IR teploměrem

Pro měření nižších teplot musíme použít snímač, který je schopen detekovat delší vlnové délky, tedy infračervenou oblast elektromagnetického spektra. V praxi se používá několik možností detekce infračerveného záření. Lze je rozdělit následujícím způsobem:

1. tepelné – měří ohřev čidla, na které dopadá fokusovaný svazek IR záření. Pro detekci ohřevu lze využít následující jevy:
  - (a) termoelektrický. IR záření ohřívá baterii sériově zapojených termoelektrických článků (cca 100) a měříme celkové generované napětí.
  - (b) odporový. Oteplení detektoru je snímáno prostřednictvím změny odporu vhodného materiálu. Používají se nejčastěji oxidy MgO, MnO, NiO, TiO<sub>2</sub> a jiné. Tyto detektory nazýváme bolometry. Mikrobolometrické senzory lze uspořádat do plošné matice, a tak získat plošný detektor termovizních kamer.
  - (c) pyroelektrický. Pyroelektrický jev je změna spontánní polarizace v závislosti na teplotě u některých materiálů zvaných pyroelektrika. Nejčastěji se používají keramické materiály na bázi titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého (označení PZT), triglycin sulfát (TGS), polyvinylfluorid (PVF). Snímač je konstruován tak, že pyroelektrická látka tvoří dielektrikum kondenzátoru, na němž při změně teploty dochází k indukci elektrického náboje.

2. kvantové. Při absorpci fotonu elektronem z valenčního pásu polovodiče dojde k excitaci elektronu z valenčního do vodivostního pásu a ke vzniku páru elektron – díra. Zvýšením koncentrace nositelů proudu – elektronů a děr – dojde ke dvěma jevům:

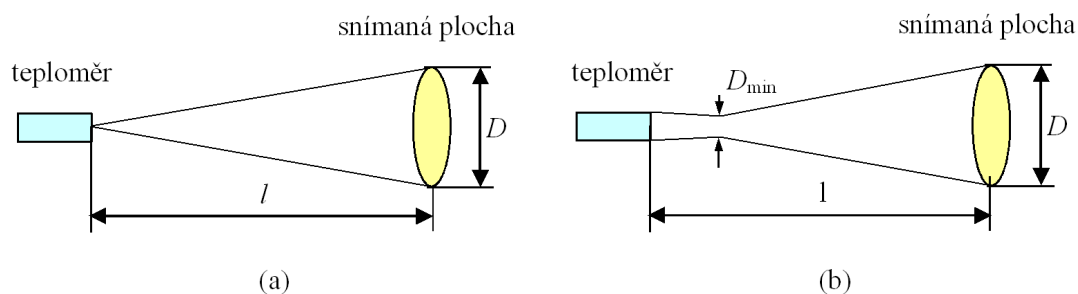
- zvýšení vodivosti (snížení odporu) homogenního polovodiče. Jevo nazýváme fotovodivost a takto pracující součástky fotoodpory. Změnu odporu pak můžeme detekovat podobným způsobem, jako u odporových teplotních čidel.
- generaci elektrického napětí. Dojde-li k absorpci fotonu v oblasti p-n přechodu, pak elektrické pole, jež je spontánně v oblasti p-n přechodu přítomné, oddělí oba druhy nositelů proudu od sebe a vzniká elektrické napětí, případně v uzavřeném obvodu elektrický proud. Tento jev nazýváme fotovoltaický.<sup>1</sup> Měření vzniklého elektrického napětí resp. elektrického proudu je již standardní experimentální úkol.

Kvantové detektory se používají u metrologicky nejpřesnějších měřidel – etalonů.

Důležitou charakteristikou IR teploměru je tzv. optika  $\Omega$ , která určuje velikost oblasti, z níž IR teploměr záření snímá. Optika je definována jako poměr průměru snímané oblasti a její vzdálenosti od přístroje, viz obr. 8.

$$\Omega = D:l. \quad (8)$$

Je však třeba mít na paměti, že průměr snímané oblasti neklesá se snižující se vzdáleností od přístroje k nule, jak by mohl naznačovat obr. 8 (a), ale má jistou minimální hodnotu  $D_{min}$ . Reálný profil snímané oblasti vystihuje obr. 8 (b).



Obrázek 8: (a) K definici optiky IR teploměru. (b) Reálný profil snímané oblasti

## 4.2 Měření teploty infračerveným teploměrem

Infračervené teploměry, přes bezspornou výhodu rychlé, jednoduché a bezkontaktní metody, mají své nevýhody a měření s nimi přináší značné úskalí. V první řadě je to neznámá emisivita měřeného povrchu. Při měření nízkých teplot může být údaj IR čidla ovlivněn odrazem IR záření okolních předmětů a průchodem prostředím mezi měřeným objektem a vlastním snímačem. Někdy je nutné měřit teplotu přes okénko oddělující například vakuovaný prostor s měřeným tělesem. Okénko vždy snižuje tok záření a obvykle je nutné provést speciální kalibraci při daném experimentálním uspořádání. Propustnost okénka  $\mathcal{T}$  lze orientačně stanovit z poměru intenzit záření prošlého přes okénko a záření dopadajícího na okénko

$$\mathcal{T} = \frac{T_{\text{IR},\text{O}}^4}{T_{\text{IR},\text{V}}^4}, \quad (9)$$

kde  $T_{\text{IR},\text{O}}$  je teplota vařiče měřená IR teploměrem přes okénko a  $T_{\text{IR},\text{V}}$  je teplota vařiče měřená IR teploměrem přímo. V případě okének s velmi malou propustností dává tento vztah zjevně

<sup>1</sup>Právě tento jev je základem činnosti tzv. solárních článků, které umožňují přímý převod slunečního záření na elektrickou energii.



nesprávné výsledky, neboť značná část záření měřená IR teploměrem přes okénko ve skutečnosti přichází odrazem záření z okolí na okénku, případně je vlastním zářením okénka. V této situaci je vhodné toto záření odečíst:

$$\mathcal{T} = \frac{T_{\text{IR,O}}^4 - T_{\text{IR,P}}^4}{T_{\text{IR,V}}^4}, \quad (10)$$

kde  $T_{\text{IR,P}}$  je teplota změřená IR teploměrem s okénkem při pohledu na málo vyzařující objekt.

## 5 Termocitlivé fólie

Termocitlivé fólie jsou plastové fólie s tenkou vrstvou z tekutých krystalů, která reaguje na aktuální teplotu změnou barvy. V praktiku jsou k dispozici termocitlivé fólie, které mění barvu jen ve velmi úzkém rozsahu  $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ , a lze je proto použít jako relativně citlivý indikátor rozložení teploty v ploše. Teplotní rozsahy fólií jsou následující:

| Označení                             | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Teplotní rozsah ( $^\circ\text{C}$ ) | 20 – 25 | 25 – 30 | 30 – 35 | 35 – 40 | 40 – 45 |

## Reference

- [1] Marcel Kreidl, Měření teploty, BEN – technická literatura, Praha 2005.
- [2] <http://www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie3.htm>
- [3] <http://www.sensit.cz>

## Úkoly

### Identifikace teplotních čidel

1. V olejové lázni proměřte teplotní závislost elektrického odporu či napětí neznámých odporových a termoelektrických čidel. K měření napětí termoelektrického článku použijte měřicí USB modul NI 9162. Pro měření slouží program *Teplota\_tab.vi*. Teplotu nechte vzrůstat v rozsahu 20–120  $^\circ\text{C}$ . **Míchání nastavte velmi opatrně, ať magnet nerozbije rtuťový teploměr!** Naměřené závislosti vynesete do grafu a proložíte vhodným typem závislosti. Využijte program *QtiPlot*. Posuďte linearitu čidel, identifikujte jednotlivá čidla.

### Měření s infračerveným teploměrem

1. **Emisivita tmavého a lesklého povrchu.** Vyhřejte desku, jejíž jedna polovina je pokryta černým žáruvzdorným lakem a druhá polovina je lesklá, na vařiči asi na teplotu 300  $^\circ\text{C}$ . Nastavte na IR teploměru emisivitu  $\epsilon = 1$ . Měřte současně teplotu kontaktním termočlánkovým čidlem. Porovnejte údaje získané oběma přístroji z černé a z lesklé části, stanovte emisivitu obou povrchů.

Změnou nastavení emisivity na IR teploměru se snažte dosáhnout toho, aby IR teploměr ukazoval stejnou teplotu jako kontaktní čidlo.

Srovnajte emisivitu získanou předešlým a tímto způsobem pro oba druhy povrchů.

**POZOR! IR teploměr držte dostatečně daleko od horké desky.**

2. **Problematika měření nízkých teplot.** Ochlaďte měděnou chladicí plotnu s Peltierovými články. **POZOR! Dolní – horkou část chladicí plotny je při provozu nutno chladit průtokem vody v plochém chladicím tělese.** Počkejte, až se plotna pokryje jinovatkou a pak z části



plotny jinovatku seškrábněte. Změřte IR teploměrem teplotu povrchu plotny v místě s jinovatkou a bez ní. Porovnejte se skutečnou teplotou měřenou kontaktním teploměrem. Jak vysvětlíte získané hodnoty?

3. Změřte znovu teplotu očištěné chladné desky tak, že měřený povrch přikryjete dutým zrcadlem (nerezovou miskou) a měřit budete skrz otvor v jeho středu. Jak vysvětlíte pozorovaný jev? Už víte odpověď na otázku u předešlého měření?
4. **Emisivita ve viditelné a IR oblasti spektra.** Výše popsáním způsobem určete emisivitu ledové tříště. Jakou „barvu“ má led?
5. **Měření přes okénko.** Změřte teplotu plotýnky vařiče zahřáté asi na  $300^{\circ}\text{C}$  přes „okénka“ z různých materiálů. Máme sadu „okének“, která zahrnuje plast, sklo,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{KBr}$  (dielektrika), křemík,  $\text{GaAs}$  (polovodiče) a kov. Vypočtětě propustnost okénka  $\mathcal{T}$ .

Prosím nesahejte přímo na vlastní plochu okénka, udržujte dost velkou vzdálenost okénka od vařiče; po použití vračejte okénka do krabičky.

Výsledky porovnejte s hodnotami naměřenými bez okénka. Pozorování komentujte a vysvětlíte.

## Experimenty s termocitlivými foliemi

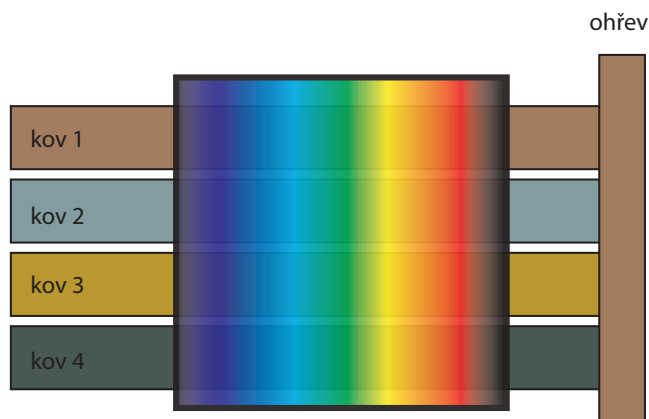
1. **Teplná stopa ruky.** Přitiskněte vlastní prohřátou ruku na desku stolu a přidržte ji tam asi 15 sekund. Pak ruku oddělte a okamžitě položte na stejné místo fólii č. 1 nebo 2<sup>2</sup>. Pozorujte vzniklý jev. Totéž opakujte s tím, že ruku přiložíte na měděný plech, železný plech a desku z pěnového polystyrénu. Komentujte a vysvětlíte pozorované rozdíly.
2. **Srovnání teplotních vodivostí různých kovů.** Zahřívejte elektrickým proudem více desek z různých kovů v místě jejich spojení (přípravek dle obr. 9). Na tyče současně položte fólii vhodného teplotního rozsahu. **Pozor! Vždy dbejte na to, aby fólie nebyla ohřátá na teplotu vyšší než  $100^{\circ}\text{C}$ . Hrozí její trvalé poškození!** Sledujte vývoj izoterm v čase. Povšimněte si, že více vodivý materiál se od méně vodivého odlišuje ve dvou rysech:
  - a) izotermly rychleji postupují od zdroje tepla,
  - b) barevné „spektrum“ fólie je širší. Vysvětlíte oba pozorované rozdíly.

## Studium fázového přechodu termočláňkovým čidlem

1. Termočláňkové teplotní čidlo využijeme ke studiu tuhnutí naftalenu nebo octanu sodného. Jeden spoj termoelektrického článku (v podobě tyčinkového teploměru) umístíme do zkumavky s měřenou látkou, druhý vložíme do termosky se směsí vody a ledu. Použité čidlo je téhož typu jako čidlo v části „Identifikace teplotních čidel“; proto dříve získané parametry můžeme užít při měření fázového přechodu. K měření napětí termoelektrického článku použijeme měřicí USB modul NI 9219. Měření provádí program *Teplota\_graf.vi*.
2. Na horkovzdušné pistolí nastavte teplotu  $100$  až  $120^{\circ}\text{C}$  a pistolí postavte pod zkumavku. Vyčkejte, až veškerá krystalická látka ve zkumavce roztaje. Je-li veškerá látka roztátá, pistolí vypněte a na počítači sledujte pokles teploty látky. Jak ze změřené závislosti poznáme, jaká je teplota tuhnutí? Jak by vypadala závislost u amorfni látky?

---

<sup>2</sup>Vyberte vhodnou možnost podle teploty v místnosti, případně teploty vaší ruky.



Obrázek 9: Studium tepelné vodivosti kovů pomocí termocitlivé fólie

## A Koeficienty teplotních čidel

| Kód | Složení                                  | Teplotní rozsah<br>(dlouhodobý) | $\beta$ ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) |                         |                          |
|-----|--|---------------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
|     |  |                                 | při $100^\circ\text{C}$                  | při $500^\circ\text{C}$ | při $1000^\circ\text{C}$ |
| K   | NiCr(+) NiAl(-)<br>chromel - alumel      | 0 až 1100                       | 42                                       | 43                      | 39                       |
| T   | Cu(+) CuNi(-)<br>měď - konstantan        | -185 až 300                     | 46                                       |                         |                          |
| J   | Fe(+) CuNi(-)<br>železo - konstantan     | 20 až 700                       | 54                                       | 56                      | 59                       |
| N   | NiCrSi(+) NiSiMg(-)<br>nicosil - nisil   | 0 až 1100                       | 30                                       | 38                      | 39                       |
| E   | NiCr(+) CuNi(-)<br>chromel - konstantan  | 0 až 800                        | 68                                       | 81                      |                          |
| R   | PtRh13 Pt<br>platina rhodium - platina   | 0 až 1600                       | 8  | 10                      | 13                       |
| S   | PtRh10 Pt<br>platina rhodium - platina   | 0 až 1550                       | 8  | 9                       | 11                       |
| G   | W(+) WRe(-)<br>wolfram - wolfram rhenium | 20 až 2320                      | 5  | 16                      | 21                       |

Tabulka 1: Seebeckův koeficient  $\beta$  termočlánekových čidel

### A.1 Lineární aproximace teplotní závislosti kovových odporových čidel

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t)$$

| materiál | $\alpha(K^{-1})$              |                        | teplotní rozsah<br>použití |
|----------|-------------------------------|------------------------|----------------------------|
|          | v celém teplotním rozsahu     | v intervalu 0 – 100 °C |                            |
| Pt       | $0,385 - 0,391 \cdot 10^{-2}$ | $0,385 \cdot 10^{-2}$  | -20 až 850 °C              |
| Ni       | $0,617 - 0,675 \cdot 10^{-2}$ | $0,618 \cdot 10^{-2}$  | -70 až 200 °C              |
| Cu       | $0,426 - 0,433 \cdot 10^{-2}$ | $0,426 \cdot 10^{-2}$  | -50 až 150 °C              |

Tabulka 2: Koeficient  $\alpha$  kovových odporových čidel

## A.2 Polynomiální aproximace teplotní závislosti kovových odporových čidel

### Platina

Pro platinový snímač a teplotní rozsah -200 °C až 0 °C je teplotní závislost odporu dána vztahem

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)]$$

a pro teplotu vyšší než 0 °C vztahem

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

kde

$R_0$  je odpor při teplotě 0 °C

$$A = 3,908\,02 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

$$B = -5,801\,95 \cdot 10^{-7} K^{-2}$$

$$C = -4,273\,50 \cdot 10^{-12} K^{-3}$$

### Nikl

Pro teplotní závislost odporu niklového snímače lze použít v celém pracovním rozsahu vztah

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^4 + Dt^6)$$

kde

$$A = 5,485 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

$$B = 6,65 \cdot 10^{-6} K^{-2}$$

$$C = 2,805 \cdot 10^{-11} K^{-4}$$

$$D = 2,0 \cdot 10^{-17} K^{-6}$$

Potřebnou inverzní závislost získáme nejnázne numericky, proložením vhodného polynomu inverzní funkcí  $t(R)$  (prosté prohození sloupců  $X$  a  $Y$  při kreslení grafu)