

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Bakalářská práce

Měření teploty

Vedoucí práce: Volodymyr Ryzhenko, Ph.D.

Autor práce: Lucie Hájková

© 2017 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lucie Hájková

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Měření teploty

Název anglicky

Temperature measurement

Cíle práce

Na základě studia dostupných materiálů vypracovat přehled různých metod měření teploty, zaměřit se na porovnání teplotních čidel podle konstrukčního provedení a oblastí jejich použití.

Metodika

1. Na základě studia dostupných materiálů zpracujte přehledovou studii různých typů teplotních čidel.
2. Popište základní principy kontaktního a bezkontaktního měření teploty včetně popisu základních částí teplotních čidel.
3. Proveďte analýzu současného stavu vývoje různých teplotních čidel. Popište výhody a nevýhody použití vybraných typů teplotních čidel a proveďte jejich porovnání z hlediska přesnosti měření teploty a vhodnosti k určitým požadavkům. Zaměřte se na aplikace, ve kterých jsou využity.
4. Citujte veškerou použitou literaturu, včetně webových stránek.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

teploměr, termodynamická teplota, termografie, termočlánek, termistor

Doporučené zdroje informací

<http://www.hwserver.eu/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-v-prumyslu.html>

<http://www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie0.htm>

<http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni>

<http://www.wikiskripta.eu/index.php/Termografie>

Kreidl M.: Měření teploty – senzory a měřicí obvody – 1. díl, BEN-Technická literatura, 2005, 239 s., ISBN 80-7300-145-4.

Lysenko V.: Detektory pro bezdotykové měření teplot – 2. díl, BEN – technická literatura, 2005, 153 s., ISBN 80-7300-180-2.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

Volodymyr Ryzhenko, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2016

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 11. 03. 2017

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem diplomovou/bakalářskou práci na téma: Měření teploty vypracoval/a samostatně a použil/a jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom/a, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom/a, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom/a že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne:.....

.....

Poděkování

Tímto chci poděkovat panu Volodymyrovi Ryzhenkovi, Ph.D. za odporné vedení bakalářské práce, poskytování rad a věnovaný čas.

Měření teploty

Abstrakt: Předmětem této bakalářské práce je vytvořit literární rešerši týkající se různých metod měření teploty a objasnit jejich použití a vlastnosti. V úvodní části práce jsou popsány základní pojmy vztahující se k teplotě a teplotní stupnici. V následujících kapitolách jsou podrobně vylíčeny přístroje pro měření teploty, včetně principu jejich funkce. Tyto přístroje jsou, dle principu využívaného pro měření teploty, rozděleny do dvou kapitol, a to na dotykové a bezdotykové senzory. Závěrem těchto dvou kapitol je porovnání jednotlivých typů senzorů dle jejich vlastností a rozsahu měřící teploty. Porovnání je zpracováno v podobě tabulky za účelem zpřehlednění výsledků. Pro jednotlivé typy senzorů je uvedena jejich oblast použití.

Klíčová slova: teploměr, termodynamická teplota, termografie, termočlánek, termistor

Temperature measurement

Summary: The subject of this bachelor thesis is to create a literature search on different methods of temperature measurement and clarify their uses and properties. In the introductory part of the work are described the basic concepts related to temperature and temperature scale. In the following chapters are in detail described equipment for measuring temperature, including their principle function. These devices are, according to the principle used for the temperature measurement, divided into two chapters, named a touch and proximity sensors. In conclusion, these two chapters is a comparison of sensor types according to their characteristics and range of temperature measurement. The comparison is processed in table form for the purpose of streamlining the results. For individual types of sensors indicating their area of application.

Key words: thermometer, thermodynamic temperature, thermography, thermocouple, thermistor

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce	2
3	Metodika práce	2
4	Základní pojmy	3
4.1	Teplota	3
4.2	Teplotní stupnice	3
4.3	Senzor teploty	5
5	Dotykové senzory	6
5.1	Elektrické senzory	6
5.1.1	Kovové odporové senzory	6
5.1.2	Polovodičové senzory	8
5.1.3	Termoelektrické senzory (termočlánky)	12
5.2	Dilatační teploměry	15
5.2.1	Kapalinové teploměry	16
5.2.2	Plynové teploměry	16
5.2.3	Tenzní teploměry	17
5.2.4	Bimetalové teploměry	17
5.2.5	Tyčové teploměry	17
5.3	Speciální dotykové senzory teploty	17
5.3.1	Optické vláknové senzory	18
5.3.2	Indikátory teploty	21
5.4	Srovnání hlavních dotykových senzorů	23
5.4.1	Výhody a nevýhody dotykových senzorů	24
5.4.2	Použití dotykových senzorů	26
6	Bezdotykové senzory	27
6.1	Absolutně černé těleso	27
6.2	Senzory záření	29
6.2.1	Termoelektrické senzory IR záření	30
6.2.2	Bolometrické senzory	31
6.2.3	Pyroelektrické senzory IR záření	32
6.2.4	Fotorezistor	33
6.2.5	Fotodioda	33
6.3	Bezdotykové teploměry	34
6.3.1	Pyrometry	34
6.3.2	Termovize	36
6.4	Srovnání hlavních bezdotykových senzorů	36

6.4.1	Výhody a nevýhody bezdotykových senzorů.....	36
6.4.2	Použití bezdotykových senzorů.....	37
7	Závěr.....	38
8	Citovaná literatura	39
9	Přílohy	40

Seznam obrázků

Obr. 1	Přehled teplotních stupnic	4
Obr. 2	Platinový odporový teploměr a) drátkový, b) tenkovrstvý	7
Obr. 3	Provedení termistorů	9
Obr. 4	Porovnání teplotních závislostí termistorů NTC a PTC s kovovými odporovými senzory	10
Obr. 5	Charakteristika Si senzoru (KTY81-1 a KTY83)	11
Obr. 6	Seebeckův jev u termoelektrického článku.....	12
Obr. 7	Charakteristiky vybraných termoelektrických článků	13
Obr. 8	Schéma zapojení termočlánku	14
Obr. 9	Plášťové termoelektrické články.....	15
Obr. 10	Schéma plynového teploměru:.....	16
Obr. 11	Dvouvrstvý optický vláknový vlnovod.....	18
Obr. 12	Optický vláknový fluorescenční teploměr	20
Obr. 13	Žárovky před a po výpalu v peci	21
Obr. 14	Barevné indikátory teploty.....	22
Obr. 15	Schématické znázornění uspořádání molekul v cholesterickém kapalném krystalu ..	23
Obr. 16	Elektromagnetické spektrum.....	27
Obr. 17	Schéma termočlánkové baterie	30
Obr. 18	Provedení bolometru	31
Obr. 19	Závislost spontánní polarizace na teplotě	32
Obr. 20	Pyroelektrický čip s předzesilovačem.....	32
Obr. 21	Konstrukce fotorezistoru.....	33
Obr. 22	Voltampérová charakteristika fotodiody.....	34
Obr. 23	Zobrazení termogramem	36

Seznam tabulek

Tab. 1	Přehled teplotních stupnic.....	5
Tab. 2	Materiály používané pro kovové odporové snímače	7
Tab. 3	Typy termoelektrických článků a základní údaje dle IEC 584.1	13
Tab. 4	Výhody a nevýhody bezdotykového měření.....	36

1 Úvod

Teplota patří k základním stavovým veličinám určující stav hmoty a mezi jednotky soustavy SI. Jen velmi málo vlastností látek není teplotně závislých. Tyto teplotně závislé veličiny jsou mimo jiné délkové rozměry, elektrický odpor vodičů a polovodičů nebo objem pevných a kapalných látek.

Teplota se nedá určit přímo, její hodnota se odvozuje ze změny teplotně závislých látek. Měření teploty je tedy nepřímé. Mezi nejrozšířenější snímače teploty patří senzory s elektrickým výstupem (např. termoelektrické senzory), méně časté, ale stále používané jsou snímače s neelektrickým výstupem (např. dilatační teploměry).

Historie teploměru začíná roku 1592, kdy světu Galileo Galilei, italský fyzik, astronom, matematik a filozof, představil svůj vynález. Tento málo přesný teploměr byl založen na teplotní roztažnosti vzduchu. Skládal se z tenké skleněné trubičky dlouhé přibližně 30 cm, zakončené baňkou. Vzduch v baňce se zahřál a následně se trubička otevřeným koncem vložila do nádoby s kapalinou. Chladnoucí vzduch se v baňce smršťoval a vlivem tlaku vnikla voda z nádoby do trubičky. Výška vodního sloupce v trubičce se měnila s teplotou baňky a ta přijímala teplotu z okolního vzduchu. Nepřesnost tohoto prvního teploměru byla způsobena jeho závislostí na atmosférickém tlaku. Vědci se postupně zaměřili i na použití jiných měřících kapalin. A tak roku 1724 přichází německý fyzik Daniel G. Fahrenheit s rtuťovým teploměrem a s první teplotní stupnicí [1]. Postupně vznikají i ostatní teplotní stupnice. Senzory s elektrickým výstupem se datují do 16. století. V období kolem roku 1800 našel Sir William Herschel neviditelnou složku světla, infračervené záření. O 21 let později, v roce 1821, objevil Thomas J. Seebeck termoelektrický jev (Seebeckův jev). V téže roce Sir Humphry Davy zjistil závislost elektrického odporu kovů na teplotě.

Znalost teploty je nezbytná ve všech oblastech lidské činnosti. V lékařství byla uskutečněna jedna z prvních aplikací teploměru (lékařský teploměr byl vynalezen roku 1866). Teplotní diagnostika je základem bezpečnosti a spolehlivosti v oborech jako je energetika, v letecké, železniční a automobilové dopravě či ve veškeré průmyslové produkci. Klíčovou roli hraje měření teploty v potravinářské, farmaceutické a chemické výrobě. Dokonce i pro mnohé lidi samozřejmá regulace teploty v obytných a pracovních prostorech by bez teplotních senzorů nebyla možná.

2 Cíl práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je vypracovat přehled různých metod měření teploty. Dílčí cíle této bakalářské práce jsou rozděleny do několika částí, a to na:

- Vysvětlit základní pojmy týkající se teploty a teplotních stupnic.
- Popsat konstrukční provedení jednotlivých teplotních senzorů.
- Uvést oblasti použití jednotlivých typů senzorů.

3 Metodika práce

Na základě zadání bude při psaní literární rešerše postupováno podle prostudované odborné literatury. Tato literatura zahrnuje především odborné tištěné publikace či učebnice a renomované internetové stránky, převzaté z českých či zahraničních pramenů.

4 Základní pojmy

4.1 Teplota

Teplota je jednou ze základních termodynamických vlastností, ovlivňujících stav hmoty. Představuje míru kinetické energie pohybujících se částic (molekul a atomů), přičemž je závislá na okolí. Průměrná rychlost pohybu je konstantní, pokud na těleso nepůsobí prostředí, ve kterém se nachází. Na rozdíl od tepla (Q) je teplota (T) stavová veličina, závisí na současném stavu dané soustavy.

Nejnižší teplota je definována jako absolutní nula, při níž dochází k zastavení veškerého pohybu. K této teplotě se lze pouze přiblížit, nedá se jí dosáhnout. Lze také označit jako nula termodynamické stupnice $T = 0 \text{ K}$, tj. $-273,15 \text{ °C}$.

4.2 Teplotní stupnice

Termodynamická teplotní stupnice je definována na základě vratného Carnotova cyklu. Tento cyklus je založen na principu změn skupenství, a to z kapalného na plynné a naopak. Účinnost vratných Carnotových cyklů pracujících mezi stejnými lázněmi určitých teplot, je závislá jen na těchto teplotách a nezávislá na použité teplotě látky. Pro $T_2 > T_1$ platí: [1] [2]

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (4.1)$$

Kde

η je účinnost cyklu

T termodynamická teplota

Q_1 odebrané teplo teplotní látkou do lázně s teplotou T_1

Q_2 odebrané teplo teplotní látkou z lázně s teplotou T_2

Ze vztahu (4.1) vyplývá (4.2)

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (4.2)$$

Ideální tepelný stroj, který by pracoval na principu vratného Carnotova cyklu s dokonalým plynem jako teplotní látkou, nelze sestavit. Pro dokonalý plyn platí následující vztah, který je v souladu s Carnotovým cyklem. Stavová rovnice ideálního plynu: [3]

$$pV = R_m T \quad (4.3)$$

Kde

R_m je molární plynová konstanta [$\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$]

V objem plynu [m^3]

T teplota plynu [K]

Dále se používá Celsiova stupnice, ta je založena na dvou bodech. 0 °C pro teplotu tání ledu a 100 °C pro teplotu varu vody (obojí při tlaku $1013,25 \text{ hPa}$). Anders Celsius, autor Celsiovy stupnice, stanovil tyto body obráceně. Změna Celsiovy stupnice do podoby, jak ji známe dnes, proběhla až Andersově smrti.

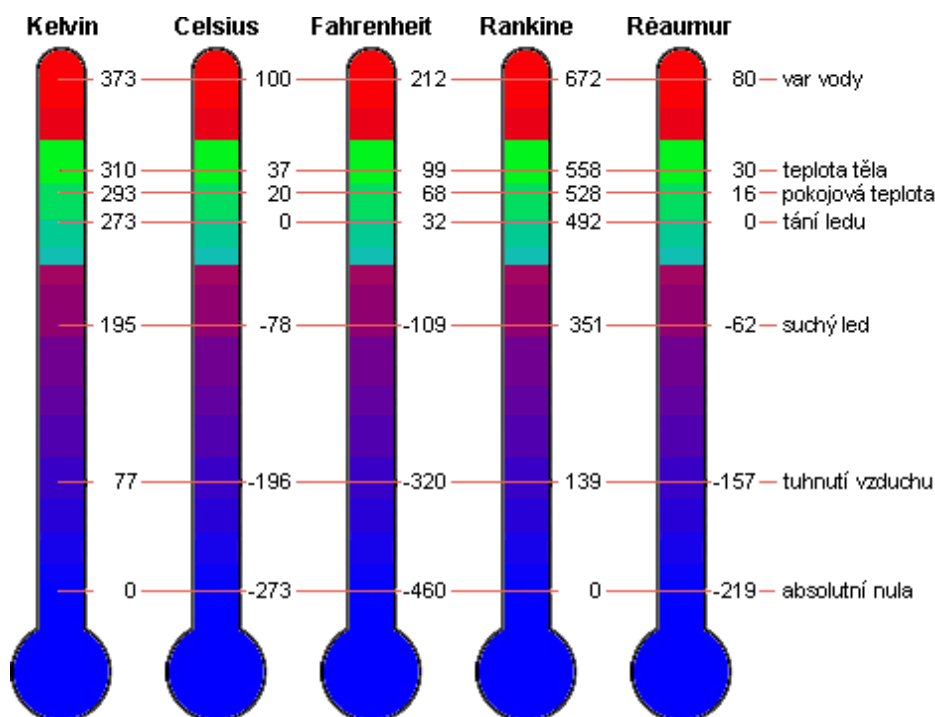
V anglosaských zemích se používá Fahrenheitova teplotní stupnice. Ta, obdobně jako Celsiova stupnice, je založena na dvou bodech. První bod je tepelný stav směsi vody, ledu a chloridu amonného odpovídající teplotě 0 °F. Druhý bod je teplota zdravého lidského těla, tedy 96 °F. Pro převod mezi Celsiovou a Fahrenheitova stupnicí platí vztah $0\text{ °C} = 32\text{ °F}$. [4]

Rankinova teplotní stupnice je pojmenovaná po skotském inženýrovi Williamu Johnu Macquomu Rankinovi. Má stejný jednotkový interval jako Fahrenheitova teplotní stupnice ($\text{deg R} = \text{deg F}$), její počátek je ale v absolutní nule. Platí tedy $0\text{ °R} = 0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$. [4]

Réamurova teplotní stupnice, kterou navrhl roku 1730 francouzský přírodovědec René Antoine Ferchault de Réaumur. Teplotní nula Réaumurovy teplotní stupnice je shodná s teplotní nulou Celsiovy teplotní stupnice, přísluší jí tedy hodnota $0\text{ °R} = 273,15\text{ K} = 0\text{ °C}$. Hlavní teplotní interval, interval mezi teplotou tání ledu a teplotou varu vody (oboje za předepsaných podmínek), je dělen na 80 stupňů. Platí tedy $80\text{ °R} = 373,15\text{ K} = 100\text{ °C}$ [4].

Plynová termometrie je nejpřesnější metrologická metoda, zároveň se jedná o metodu časově a technicky velmi náročnou. Z toho důvodu byla v roce 1927 stanovena Mezinárodní praktická teplotní stupnice. Tato stupnice byla generálními konferencemi pro míry a váhy postupně upravována a doplňována až do současné podoby z roku 1990. ITS-90 stanovuje 17 pevně definovaných teplotních bodů. Zkratka ITS-90 vyplývá z anglických slov The International Temperatour Scale of 1990 [5]. Přehled teplotních stupnic je v *Tab. 1*, k snažší interpretaci dat slouží *Obr. 1*.

Obr. 1 Přehled teplotních stupnic



Zdroj: [4]

Tab. 1 Přehled teplotních stupnic.

Teplotní stupnice	Jednotka	Značka	Převod na °C	Převod ze °C
Kelvinova	kelvin	K	$t_C = T - 273,15$	$T = t_C + 273,15$
Celsiova	stupeň Celsia	°C		
Fahrenheitova	stupeň Fahrenheita	°F	$t_C = 5/9 \cdot (t_F - 32)$	$t_F = 9/5 \cdot t_C + 32$
Rankinova	stupeň Rankina	°R	$t_C = 5/9 \cdot (t_R - 273,15)$	$t_R = 9/5 \cdot t_C + 273,15$
Réamurova	stupeň Réamura	°R	$t_C = 5/4 \cdot t_R$	$t_R = 4/5 \cdot t_C$

Zdroj: [4]

4.3 Senzor teploty

Senzor teploty je funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce, tj. blok, který je v přímém styku s měřeným prostředím [1]. Pojem senzor teploty je synonymem pro snímač teploty a čidlo teploty. Případně lze senzor označit jako detektor tepelného záření nebo teploměr.

Teplotní senzory se dělí dle několika kritérií. Jedna z možností dělení je dle fyzikálního principu na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické aj. Dle transformace signálu se teplotní senzory dělí na aktivní a pasivní. Aktivní senzory se díky působení teploty chovají jako zdroj elektrické energie. Pasivní senzory jsou založeny na principu dodávání elektrické energie. Ta se dodává za účelem transformace teploty na jinou fyzikální veličinu. Nejznámější rozdělení je dle styku s měřeným prostředím na dotykové a bezdotykové.

Vlastnosti senzorů teplot

Základní statické a dynamické vlastnosti senzoru jsou shrnuty v následujícím přehledu.

Statické vlastnosti senzorů teplot:

- Statická charakteristika – udává vztah mezi výstupní a měřenou veličinou.
- Citlivost – sklon statické přenosové charakteristiky
- Práh citlivost – nejnižší hodnota měřené veličiny, která může být senzorem detekována
- Dynamický rozsah – je dán intervalem dolní a horní hranicí měřicího rozsahu
- Reprodukovatelnost – je dána odchylkou naměřených hodnot při neměnné měřené veličině a konstantním vlivu okolí
- Rozlišitelnost – poměr věrohodné měřené hodnoty a prahu citlivosti

Dynamické vlastnosti senzorů teplot:

- Přechodové charakteristiky senzorů teplot – průběh výstupní veličiny v závislosti na čase při skokové změně vstupní veličiny. [3]

5 Dotykové senzory

Dotykové měření teploty je založeno na přímém kontaktu senzoru s objektem nebo látkou, jejíž teplotu má měřit. Tuto metodu lze uplatnit za podmínek dobrého přístupu k měřenému objektu nebo látce. Důležité je zajistit dobrý kontakt čidla s povrchem.

5.1 Elektrické senzory

5.1.1 Kovové odporové senzory

Principem kovových odporových senzorů je teplotní závislost odporu kovu na teplotě. Kov si lze představit jako skupinu elektronů umístěných v krystalové mřížce. Čím větší je teplota, tím je větší rozptyl elektronů na mřížce, tedy i odpor. Pro malý rozsah teplot, přibližně v rozsahu 0–100 °C, lze použít lineární vztah:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (5.1)$$

Kde

R_0 je odpor čidla při teplotě 0 °C

α střední hodnota teplotního součinitele odporu.

Teplotní součinitel odporu není konstantní, proto se pro potřeby výpočtů stanovuje střední hodnota teplotního součinitele α , a to nejčastěji teplotním rozsahu 0- 100 °C

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad (5.2)$$

Kde

R_{100} je odpor čidla při teplotě 100 °C

R_0 odpor čidla při teplotě 0 °C.

Dalším základním parametrem, stanovujícím citlivost odporových senzorů, je poměr odporů čidla R_{100} při teplotě 100 °C a R_0 při teplotě 0 °C. Tento poměr se označuje písmenem W dle vztahu [1]:

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (5.3)$$

Konstrukce kovových odporových senzorů

Teoreticky lze použít jakýkoliv kov, v praxi se ovšem používá jen několik materiálů, které nejlépe vyhovují. A to platina (dobrá teplotní a chemická stálost) dále pak nikl, Balco (Ni-Fi), měď aj. Vlastnosti jednotlivých materiálů jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Materiály používané pro kovové odporové snímače

Materiál	$\alpha * 10^2 (K^{-1})$	Teplotní rozsah (°C)	Poměr odporů W_{100}
Platina	0,385 až 0,391	-200 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

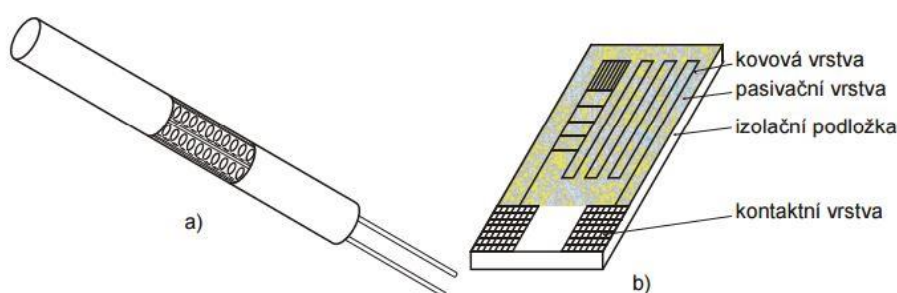
Zdroj: [1]

Senzory jsou vyráběny buď drátkovou technologií, ze spirálovitě stočeného drátku (\varnothing od 0,01 mm do 0,05 mm), nebo nanášením platinové folie na keramickou podložku, tenkovrstvou nebo tlustovrstvou technologií. Podle způsobu výroby je dělíme na senzory vinuté a vrstvé. Příklad drátkových a tenkovrstvých senzorů je uveden na Obr. 2 [6]

Starší tlustovrstvá technologie je založena na nanášení speciální pasty sítotiskem. Následně se nanesená vrstva tepelně stabilizuje. Hodnota základního odporu se nastavuje pomocí laseru, tzv. laserové trimování. U novější, tenkovrstvé technologie se kovová vrstva nanáší naprašováním ve vakuu. Hodnota odporu se opět stanovuje pomocí laserového trimování. [6] [7]

Senzory se vyrábějí ve tvaru plochém nebo válcovitém se dvěma nebo čtyřmi vývody. Obaly a nosné destičky senzorů se vyrábějí z keramiky, skla, slídy nebo umělé hmoty. Tyto postupy výroby jsou aplikovatelné na všechny odporové senzory.

Obr. 2 Platinový odporový teploměr a) drátkový, b) tenkovrstvý



Zdroj: [6]

Platinové odporové senzory

Platina se vyznačuje časovou stálostí, chemickou netečností a vysokou teplotou tání, proto se jedná o vhodný materiál k výrobě odporových senzorů. Při výrobě jsou kladeny vysoké nároky na čistotu. Ta je určena normou a předepsána poměrem elektrického odporu $W_{100} = 1,385$. Pro meteorologické účely jsou nároky přísnější, čistota musí být 99,999 %. Čistota se vyhodnocuje pomocí poměrů odporů při teplotě tání galia a trojného bodu vody [1]. Platinové měřicí odpory pro průmyslové použití se dělí do dvou tolerančních tříd na základě standartu IEC – 751. Toleranční třída A je stanovena pro rozsah teploty od -200 °C do 650 °C. Třída B je stanovena pro rozsah teploty od -200 °C do 850 °C. Kromě uvedených senzorů dle IEC – 751 existují vysokoteplotní snímače až do teploty 1100 °C. [1]

Niklové odporové senzory

Niklová čidla se, na rozdíl od platinových čidel, používají k měření nižších teplot. Rozsah měření je od -60 °C do 150 °C, krátkodobě až do 180 °C. Malý teplotní rozsah je zapříčiněn nevratnými strukturními změnami při teplotách mezi 300 až 400 °C. [6] Nikl je v teplotních senzorech využíván hlavně z důvodu menší ceně oproti platině. Mezi jeho další výhody patří vysoká citlivost, rychlá odezva a malé rozměry. K nevýhodám niklových senzorů patří špatná odolnost vůči prostředí a značná nelinearita v porovnání s platinovými čidly. [1] [6] [7]

Měděné odporové senzory

Měděné odporové senzory se obvykle nevyrábějí, ale přesto se dá měď jako měrný odpor využít, pro měření teploty v rozsahu od -200 °C do 200°C. Měď má velkou citlivost na reakci se vzduchem. Hlavně kvůli této vlastnosti se měď k výrobě senzorů nepoužívá. [1]

5.1.2 Polovodičové senzory

Polovodič je látka, jejíž měrný odpor je mnohem větší než u kovových vodičů a zároveň menší než u izolantů. Jejich elektrická vodivost silně závisí na dodání některého z druhů energie, a to buď tepelné, elektrické nebo světelné. Nejvýznamnějším polovodičem je křemík, dále pak germanium, selen, fosfor, arzen a řada dalších.

U polovodičů je důležitá teplotní závislost koncentrace nosičů náboje. Pro polovodičový jev platí přibližně vztah [8]

$$n \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (5.4)$$

Kde

n	je	počet elektronů v jednotkovém objemu [-]
E		rozdíl mezi energetickými hladinami mřížky
k		Boltzmannova konstanta [J · K ⁻¹]
T		teplota [K]

Polovodičové odporové senzory, podobně jako kovové odporové senzory, využívají teplotní závislost odporu na teplotě [1]. Můžeme je rozdělit na termistory a monokrystalické odporové senzory. Termistory se dále dělí na NTC termistory (negastory) a PTC termistory (pozistory).

NTC termistory (negastory)

Negastory jsou nejužívanější termistory používané k měření teploty. Proto se častěji setkáváme s označením NTC termistor, popřípadě termistor. Negastory využívají záporný součinitel odporu, což znamená, že při zvyšování teploty odpor termistoru klesá. Tato závislost je značně nelineární, a má za následek značnou citlivost senzoru v určité oblasti. Teplotní závislost odporu termistoru lze vyjádřit vztahem:

$$R_T = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (5.5)$$

Po logaritmování dostaneme tento vztah:

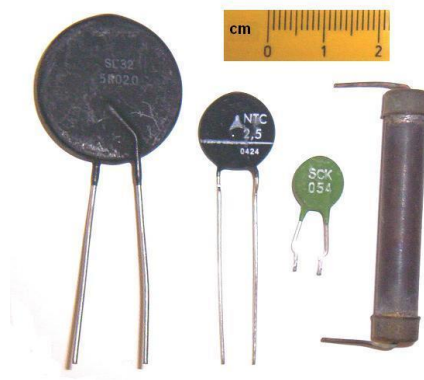
$$\ln R_T = A + \frac{B}{T} \quad (5.6)$$

Kde:

R_T	je	odpor termistoru
A		konstanta závislá na geometrických vlastnostech termistoru
B		teplotní konstanta dána materiálem termistoru
T		termodynamická teplota termistoru (K)

Termistory se vyrábí práškovou technologií, lisováním a následným slinováním za vysokých teplot ze směsi dvou nebo více oxidů kovů, a to například manganu (MnO), kobaltu (CoO), mědi (CuO), niklu (NiO), železa (Fe₂O₃) a dalších. Slinování slouží ke zpevnění vylisovaných senzorů. Termistory se vyrábí různých tvarových provedení, ve tvaru destičky, disku, kapky atd. viz Obr. 3. Teplotní rozsah u negastorů pro běžné použití je od -50 °C do 150°C. U senzorů pro speciální použití se teplotní rozsahy pohybují od -270 °C do 1000°C. Mezi negativní vlastností negastorů patří jejich nestabilita, velká neurčitost (+/- 1 K), nelinearita a poškození při přehřátí. Výhodami jsou malé rozměry, a tím i hmotnost, vysoký teplotní součinitel a krátká časová odezva. [8] [1].

Obr. 3 Provedení termistorů

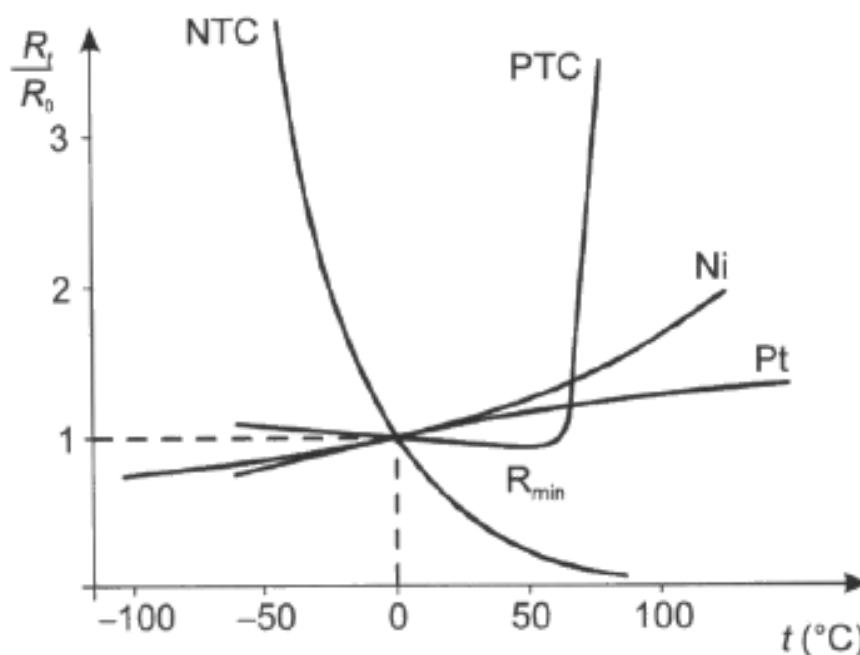


Zdroj: [12]

PTC termistory (pozistory)

Pozistory mají, na rozdíl od termistorů, kladný součinitel odporu. Odpor tedy stoupá při nárůstu teploty. Pozistory jsou stejně jako negastory nelineární součástky. Vyrábějí se z polykrystalické feroelektrické keramiky, např. z titaničitanu barnatého, v různých tvarových provedeních. [3]

Obr. 4 Porovnání teplotních závislostí termistorů NTC a PTC s kovovými odporovými senzory



Zdroj: [1]

Odpor pozistoru se stoupající teplotou nejprve mírně klesá. Od tzv. Curierovy teploty, která podle druhu materiálu bývá od 60 $^{\circ}\text{C}$ do 180 $^{\circ}\text{C}$, dochází k prudkému nárůstu odporu. Odpor roste až do dosažení další tepelné hranice, kdy dojde k zastavení růstu odporu a následnému mírnému poklesu. Odporové charakteristiky pro pozistory i negastory jsou zobrazeny na Obr. 4.

Monokrystalické odporové senzory

Monokrystalické senzory lze vyrobit z křemíku, germania nebo india, včetně jejich slitin. V praxi se ovšem používají nejčastěji senzory křemíkové. Jsou založeny na nevlastním polovodiči typu N s dominantní elektronovou vodivostí. Dělíme je na monokrystalické odporové senzory bez PN přechodu, s jedním PN přechodem nebo s více PN přechody. [1]

Teplotní závislost rezistivity křemíku závisí na pohyblivosti nosičů. Pohyblivost těchto nosičů náboje v krystalové mřížce je určena teplotou a počtem příměsí. S rostoucí teplotou dochází k rozptylu nosičů náboje na mřížce polovodiče a tím ke zmenšování pohyblivosti těchto nosičů. Tento proces vede k nárůstu rezistivity. Teplotní závislost Si senzoru lze vyjádřit vztahem:

$$R_T = R_{25}(1 + \alpha\Delta t + \beta\Delta t^2) \quad (5.7)$$

Kde

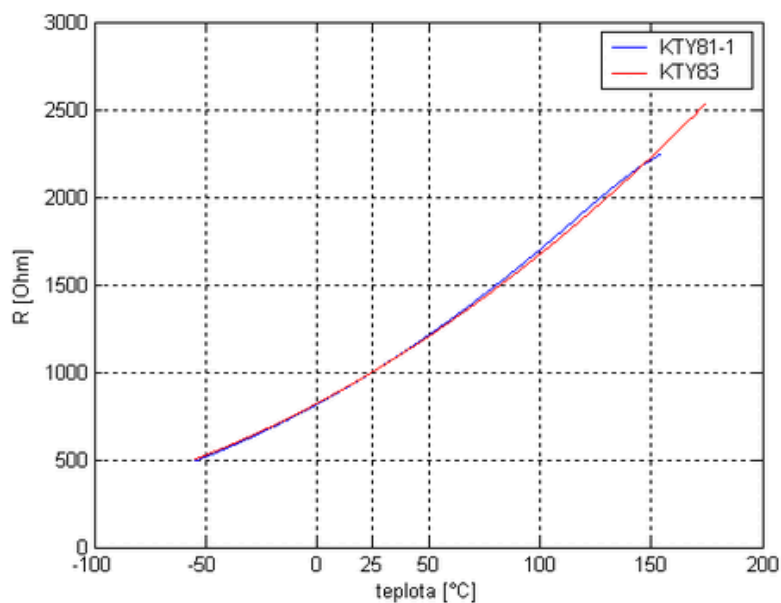
R_T je odpor při teplotě T

R_{25} odpor při teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$, tzv. jmenovitý odpor

α, β koeficienty polynomu, hodnoty závisí na koncentraci příměsí

Linearita monokrystalických senzorů je lepší než u NTC termistorů, ale horší než u platinových senzorů. Teplotní rozsah je obvykle -55 až $150\text{ }^\circ\text{C}$. Monokrystalické křemíkové senzory jsou snadno k dostání za přijatelnou cenu. Nejtypičtějšími představiteli jsou čidla řad KT a KTY. [6]

Obr. 5 Charakteristika Si senzoru (KTY81-1 a KTY83)



Zdroj: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>

5.1.3 Termoelektrické senzory (termočlánky)

Termoelektrické senzory jsou založeny na Seebeckově jevu, tj. na jevu převodu tepelné energie na elektrickou. [1]. Termočlánek se skládá ze dvou různých kusů kovů, které jsou spojeny ve dvou místech. Pokud budeme spoj zahřívat, dojde ke změně termoelektrického napětí. V teplejší části vodiče nebo polovodiče mají nositelé náboje větší energii, z toho důvodu se tyto náboje přesouvají do chladnější části. Přesun nositelů z chladnějších míst je znatelně pomalejší. Z tohoto důvodu vzniká na jedné straně vodiče převaha nábojů a tím i termoelektrické napětí. Toto napětí, tedy rozdíl napětí spoje A a spoje B, je rovno celkovému napětí a nazývá se Seebeckovo termoelektrické napětí U_S . Jeho teplotní závislost přibližně popisuje lineární vztah [1] [3]

$$U_S = \alpha(T_A - T_B) \quad (5.8)$$

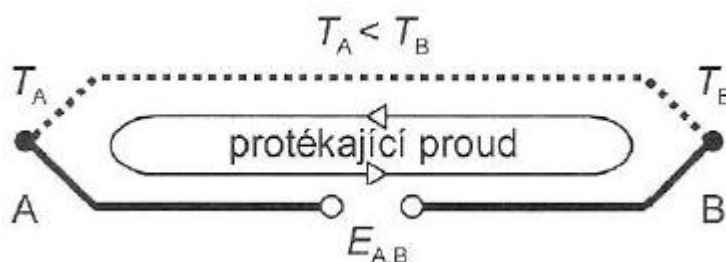
Kde

α je konstanta závislá na dané dvojici kovů, termoelektrický koeficient

T_A teplota spoje A

T_B teplota spoje B

Obr. 6 Seebeckův jev u termoelektrického článku



Zdroj: [1]

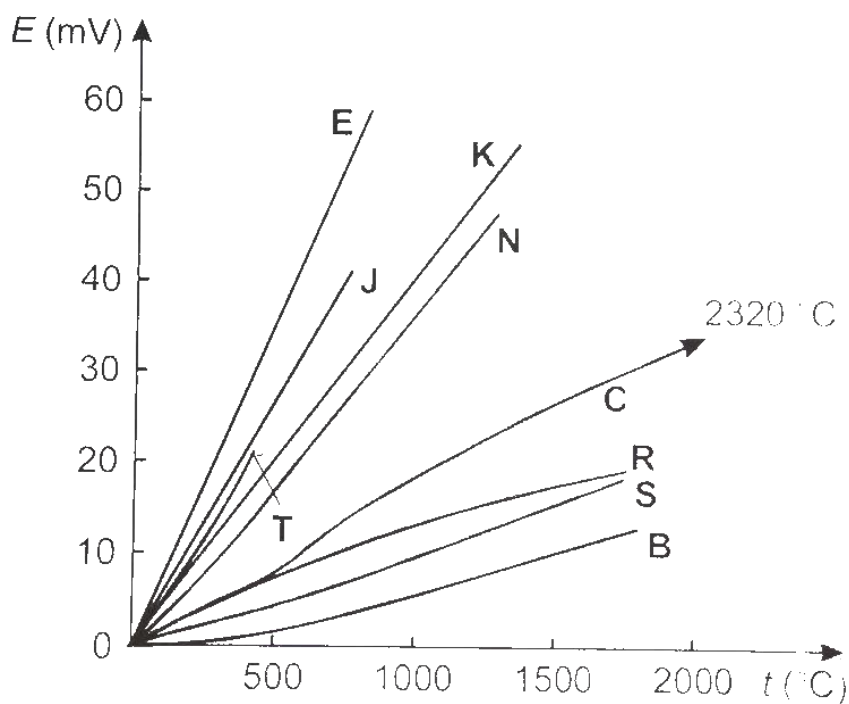
Jednotlivé páry kovů používaných pro výrobu termoelektrických článků jsou normalizovány dle normy IEC 584 a značí se velkým písmem. Měřicí rozsah teplot jednotlivých termočlánků včetně jejich chemického složení a průměrného termoelektrického koeficientu, udává Tab. 3. Teplotní závislost termoelektrického napětí termočlánků uvedených v Tab. 3 zachycuje graf na Obr. 7.

Tab. 3 Typy termoelektrických článků a základní údaje dle IEC 584.1

KOD	Složení	Teplotní rozsah [°C] dlouhodobě	Teplotní rozsah [°C] krátkodobě	Průměrná hodnota termoelektrického koeficientu α [mV/°C]
K	chromel – alumel (NiCr – NiAl)	0 až +1100	-180 až +1350	0,0413
T	měď – konstantan (Cu – CuNi)	-185 až +300	-250 až +400	0,0460
J	železo – konstantan (Fe – CuNi)	+20 až +700	-180 až +750	0,0563
N	nickrosil – nisil (NiCrSi – NiSiMg)	0 až +1100	-270 až +1300	0,0357
E	chromel – konstantan (NiCr – CuNi)	0 až +800	-40 až +900	0,0745
R	PtRh13 – Pt	0 až +1600	-50 až +1700	0,0100
S	PtRh10 – Pt	0 až +1550	-50 až +1750	0,0090
B	PtRh30 – PtRh6	+100 až +1000	+100 až 1820	0,0050
G	W – WRh	+20 až +2320	0 až +2600	0,0140
C	WRh5 – WRh26	+50 až +1820	+20 až +2300	0,0170

Zdroj: [1]

Obr. 7 Charakteristiky vybraných termoelektrických článků

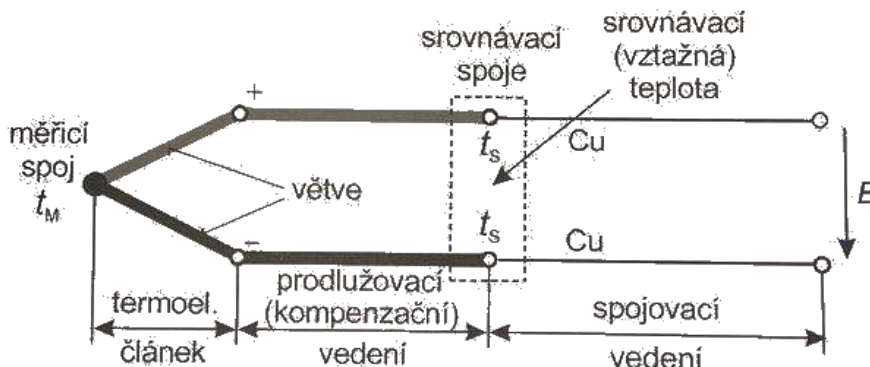


Zdroj: [1]

Materiály používané pro termočlánky musí splňovat určité požadavky: přibližně lineární průběh závislosti termoelektrického napětí na teplotě, odolnost proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření, a co největší hodnotu termoelektrického napětí.

Měření teploty je založeno na měření termoelektrického napětí. Chceme-li změřit jeho velikost, do obvodu snímače musíme zapojit měřicí přístroj. A to buď zapojením do jedné větve termočlánku nebo rozpojením srovnávacího spoje. Schéma obvykle používaného termočlánku, s jedním spojem je na Obr. 8.

Obr. 8 Schéma zapojení termočlánku



Zdroj: [1]

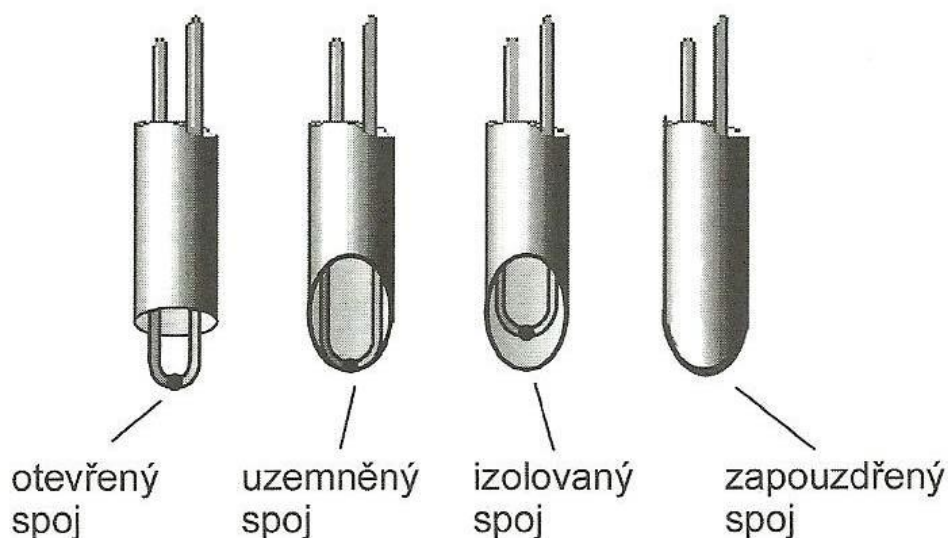
Měřicí obvod termočlánku tvoří následující komponenty. Termočlánek s jedním spojem označovaným jako měřicí spoj. Kompenzační (prodlužovací) vedení je tvořeno z jiných kovů než větve termoelektrického článku. Srovnávací teplota se definuje jako teplota srovnávacího spoje, tj. teplota svorek spojovacího vedení.

Termoelektrické senzory se dají dle konstrukce rozdělit do dvou skupin. Na drátové a plášťové termoelektrické články.

Drátové termoelektrické články jsou tvořeny dvěma kovovými větvemi, uloženými v izolačních trubkách. Tyto trubky slouží k elektrické izolaci a k ochraně článku před vlivy vnějšího prostředí. Izolační trubky se, dle rozsahu provozních teplot, vyrábějí z plastu, skla, keramiky, atd. Průměr termoelektrických vodičů je od 0,5 mm do 3,5 mm. Podle konstrukčního provedení se člení na snímače do jímky, s jímkou, bez jímky, tyčové aj.

Plášťové termoelektrické články mají větve (vodiče) uloženy v kovovém plášti ve tvaru trubky. K izolaci se používá prášková izolace z oxidu MgO nebo Al₂O₃. Vnější průměr trubky se pohybuje v rozsahu od 0,1 mm do 8 mm. V plášti je obvykle umístěno dva, čtyři nebo šest termočlánekových větví. Konstrukční provedení se dělí na izolované, uzemněné a otevřené viz Obr. 9.

Obr. 9 Plášťové termoelektrické články



Zdroj: [1]

5.2 Dilatační teploměry

Dilatační teploměry jsou založeny na principu roztažnosti pevných látek a změny tlaku, objemu a tenze par s měnící se teplotou. Teplotní roztažnost se dá souhrnně popsat jako jev, při kterém se se změnou teploty tělesa (zahřátí nebo ochlazení) změní jeho délkové rozměry (objem). Tento jev lze pro jednotlivé veličiny popsat následujícími vztahy:

$$v = v_0 * (1 + \beta \Delta \vartheta) \quad (5.9)$$

$$l = l_0 * (1 + \alpha \Delta \vartheta) \quad (5.10)$$

$$p = p_0 * (1 + \beta \Delta \vartheta) \quad (5.11)$$

Kde

l, v, p	je	[m, m ³ , Pa]	výsledná délka, objem, tlak
l_0, v_0, p_0		[m, m ³ , Pa]	původní délka, objem, tlak
α		[-]	součinitel délkové teplotní roztažnosti
β		[-]	součinitel objemové teplotní roztažnosti
$\Delta \vartheta$		[°C, K]	teplotní rozdíl

Dle konstrukce se dělí na: kapalinové, plynové, tyčové, tenzní a bimetalové.

5.2.1 Kapalinové teploměry

Kapalinové teploměry využívají teplotní roztažnosti teploměrné kapaliny (rtuť, líh atd.) A platí pro ně vzorec (5.9). Dělí se na skleněné a tlakové, a to podle fyzikálních principů.

Skleněné teploměry

U skleněných teploměrů se jako teploměrná kapalina používá rtuť nebo líh, méně častěji pak pentan atd. Konstrukci tvoří nádobka (jímka), naplněná teploměrnou kapalinou a kapilára, která se s rostoucí teplotou plní teploměrnou kapalinou. Z výšky sloupce kapaliny v kapiláře se odečtením ze stupnice určí teplota měřeného objektu.

Teplotní rozsah skleněných teploměrů je od -190°C do 600°C . Jejich hlavní výhody spočívají v nízké ceně a vysoké spolehlivosti (chyba měření je zpravidla $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$). Díky tomu se jedná o nejrozšířenější kapalinové teploměry.

Tlakové teploměry

Teploměry tlakové jsou založeny na teplotní roztažnosti plynů a nasycených par při stálém objemu. Náplň je obvykle dusík, helium nebo suchý vzduch (pod tlakem až $2,5 \cdot 10^6 \text{ Pa}$). Konstrukce je podobná jako u kapalinového teploměru. Je tvořena kovovou baňkou naplněnou plynem pod tlakem, kapilárou a deformačním členem – Burdonovou trubicí. Při konstantním objemu dochází rostoucím teplotou také k nárůstu tlaku. Z tohoto důvodu bývá nádobka s teploměrnou látkou kovová nebo ocelová. Výhodné u těchto teploměrů jsou jednoduchá konstrukce a mechanická odolnost. Jejich nevýhodou je menší přesnost měření (chyba měření je $\pm 1^{\circ}\text{C}$).

5.2.2 Plynové teploměry

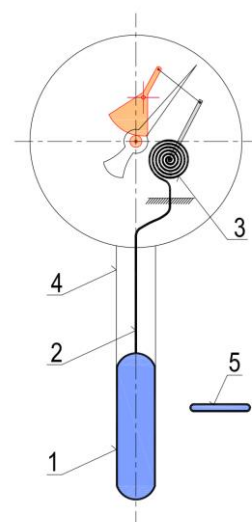
Plynové teploměry jsou založeny na stejném principu jako teploměry tlakové. K měření teploty se využívá závislost tlaku plynu na teplotě při stálém objemu plynu, popř. závislost objemu plynu na teplotě při stálém tlaku. Náplň je obvykle dusík, vodík, helium nebo vzduch.

Plynový teploměr na Obr. 10 se skládá z baňky A umístěné v prostoru, jehož teplota je měřena. Tato baňka je kapilárou propojena s jedním ramenem rtuťového manometru. Tlak, a tedy i teplota, je měřen pomocí rozdílu hladin rtuti v ramenech manometru.

Plynový teploměr se používá v potravinářském průmyslu a ve zpracovatelských technologiích. Značnou výhodou těchto teploměrů je vysoká přesnost, až do $0,005^{\circ}\text{C}$

Obr. 10 Schéma plynového teploměru:

- 1 – plynové tělísko
- 2 – kapilára
- 3 – tlakoměrný deformační člen
- 4 – stonek
- 5 – průřez trubice, z níž je zhotoven deformační člen



Zdroj: [13]

5.2.3 Tenzní teploměry

Tenzní teploměry využívají závislost tenze par na teplotě. Náplní bývá toluen, benzen, aceton, líh, propad, atd. Tenzní teploměr se skládá z jímky, spojovací kapiláry a tlakoměrného ústrojí. Jímka je kapalinou vyplněna jen z části, díky tomu jsou teploměry tohoto typu citlivější.

5.2.4 Bimetalové teploměry

Jedná se o teplotní senzory založené na principu teplotní roztažnosti. Bimetal se skládá ze dvou vzájemně propojených kovových pásků, každý z nich s jiným koeficientem teplotní roztažnosti. Při vzrůstu teploty se kov s větší teplotní roztažností ohne a tím způsobí zakřivení bimetalu. Průhyb je přibližně úměrný druhé mocnině délky a nepřímo úměrný tloušťce pásku. Vyrábí se různé tvary bimetalových pásků, to spirálový, plochý, tvar U nebo šroubovice.

5.2.5 Tyčové teploměry

Tyčové teploměry jsou založeny na teplotní délkové roztažnosti, platí pro ně tedy vztah (5.10). Skládají se ze dvou konstrukčních dílů s rozdílným součinitelem teplotní roztažnosti. Teploměr je nerozebíratelný a vyrábí se z nerezového materiálu.

5.3 Speciální dotykové senzory teploty

Akustické teploměry

Akustické teploměry jsou založeny na teplotní závislosti rychlosti šíření zvuku v plynném nebo pevném prostředí. [1] Tyto teploměry se používají jak pro velmi nízké, tak vysoké teploty. Vyrábějí se ve dvou metodách provedení, a to v rezonanční metoda a pulsní metoda. Rezonanční metoda využívá teplotně závislé rychlosti šíření zvuku v plynném prostředí. Pulsní metoda využívá teplotní závislost rychlosti šíření zvuku v pevném prostředí. Vyhodnocuje dobu průchodu akustického pulsu procházející tyčí od vysílajícího akustického měniče k přijímacímu. [1] Teplotní rozsah akustických teploměrů je od +750 do +3 000 °C.

Krystalové teploměry

Tyto teploměry jsou založeny na teplotní závislosti rezonančního kmitočtu křemenného výbrusu. Mají dobrou linearitu a velkou citlivost. Teplotní rozsahy je v rozmezí -80 až +200°C. [1]

Šumové teploměry

Šumové teploměry jsou založeny na generování šumového napětí volným pohybem elektronů v odporu. Na vývodech každého rezistoru je v důsledku teplotně závislého pohybu elektronů ve vodivostním pásmu měřitelné elektrické napětí. [1] Teplotní rozsah je od -270 do +827 °C.

Magnetické teploměry

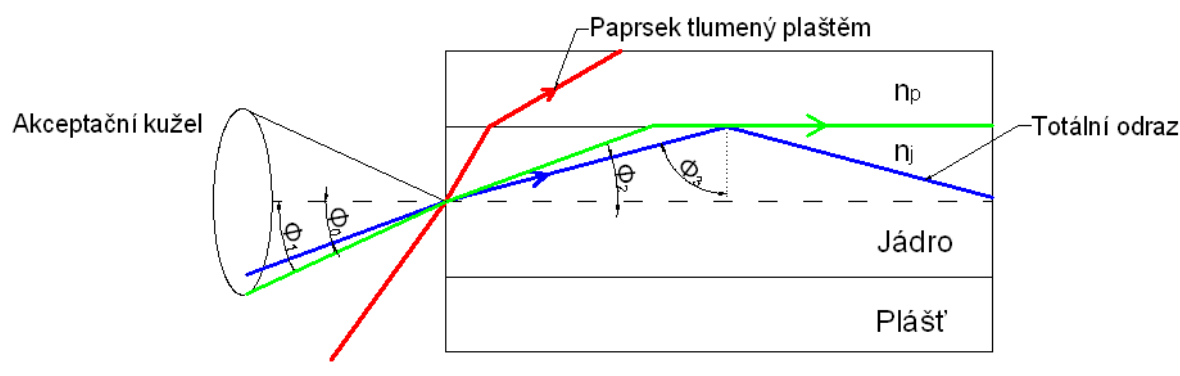
Magnetické teploměry jsou založeny na teplotní závislosti magnetické susceptibility paramagnetických solí. Mezi tyto soli se řadí např. dusičnan hořečnatý, síran amonný manganatý. Teplotní rozsah je od -274 do -253 °C. [1]

5.3.1 Optické vláknové senzory

Optické vláknové senzory, dále jen OVS, jsou založeny na využití vlivu teploty na vlastnosti optických vláken. Senzory se skládají ze zdroje záření, nejčastěji polovodičové elektroluminiscenční diody nebo laserové diody. Dále obsahují optické vlákno, které plní funkci snímače teploty nebo přenosu optického signálu. [9]

Optické vlákno používané pro OVS se skládá ze dvou materiálů, které se od sebe liší hodnotou indexu lomu. Z kruhového jádra s indexem lomu n_j , které je obklopeno obalem s indexem lomu n_p viz Obr. 11. Obal slouží k ochraně a zpevnění jádra. Celé optické vlákno je obaleno primární ochranou.

Obr. 11 Dvouvrstvý optický vláknový vlnovod



Zdroj: [1]

K tomu, aby paprsek procházel jádrem, musí na rozhraní jádra a pláště docházet k totálnímu odrazu. Index lomu jádra je alespoň o 1 % větší než index lomu pláště. Je nutné splnit podmínku:

$$\frac{n_p}{n_j} < 1 \quad (5.12)$$

Ze Snellova zákona pro kritický úhel Φ_{3C} platí:

$$\sin\Phi_{3C} = \frac{n_p}{n_j} \quad (5.13)$$

Kritický úhel Φ_{1C} , tj. úhel, pod kterým mohou paprsky vstupovat do optického vlákna tak, aby byla dodržena podmínka totálního odrazu, je odvozen z rovnic (5.12) a (5.13). Sinus kritického úhlu je označován jako NA, neboli číselná (numerická) apertura vlákna a platí pro ni následující vztah:

$$NA = \sin\Phi_{1C} = n_j \sin\Phi_{2C} = n_j \sin\Phi_{3C} = \sqrt{n_j^2 - n_p^2} \quad (5.14)$$

Ze vztahu (5.14) vyplývá, že číselná apertura závisí na indexu lomu jádra a pláště optického vlákna. Jedná se o bezrozměrný parametr, nabývající nejčastěji hodnot $NA = 0,15 - 0,5$.

OVS lze dělit podle různých kategorií, např. podle způsobu modulace, reakce na měřenou teplotu, počtu vidů, konstrukce snímače atd.

Dle počtu vidů, které se mnou šířit vláknem, dělíme optická vlákna na jednovidová a mnohavidová. Jednovidová vlákna jsou uzpůsobena k vedení pouze jednoho vidu osou vlákna. Tyto vlákna mají malý průměr jádra (jednotky mikrometrů) a číselná apertura dosahuje hodnot $NA = 0,12 - 0,13$. Mezi výhody jednovidových vláken patří možnost přenosu na delší vzdálenosti a malý útlum a disperze. Nevýhody těchto vláken jsou malá hodnota číselné apertury, drahá výroba a vyšší náročnost na generátory. [10]

Mnohavidová optická vlákna, jak již název napovídá, jsou vlákna, jimiž se může šířit více vidů. To platí díky většímu průměru jádra než u jednovidových vláken, průměr jádra se pohybuje v desítkách mikrometrů. Výhodou mnohavidových vláken je jejich levná a velké hodnoty NA. Nevýhody velký útlum a disperze. [9] [10]

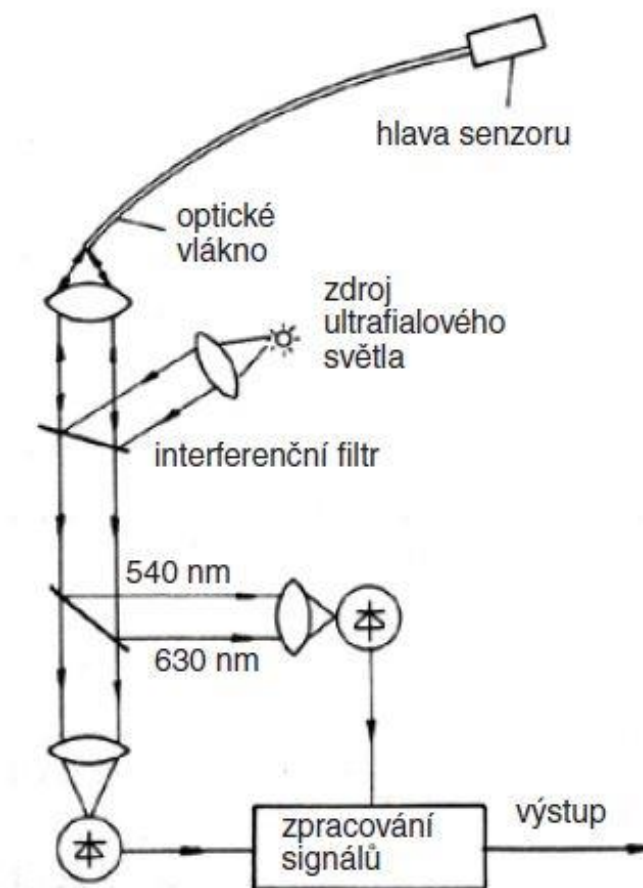
Z konstrukčního hlediska se rozlišují na OVS vlastní (teplota ovlivňuje přímo vlastnosti optického vlákna) a nevlastní (optické vlákno plní pouze funkci transportního prostředí) [9].

Dle způsobu modulace lze OVS rozdělit na senzory s modulací amplitudovou, fázovou, polarizační a spektrální. Modulace amplitudová je založena na změně útlumu optické vlny nebo na změně indexu lomu, popřípadě na proměnné emisivitě ukončení vlákna. Fázová modulace je založena na změně fáze optické vlny. Polarizační je založena na teplotní závislosti stáčení roviny polarizace světla. A nakonec spektrální modulace, která je založena na změně vlnové délky světla. [9]

Jeden z mnoha principů OVS je využití teplotních změn fluorescence viz *Obr. 12*. Tyto senzory se využívají v mnoha oborech od medicíny (např. měření teploty tkání lidského těla), až po měření fyzikálních veličin. Tento OVS se řadí mezi nevlastní s modulací vlnové délky. Základem fluorescenčního OVS je fosforová vrstva v sensorové hlavě, tato sonda je v přímém kontaktu s měřeným tělesem. Zdrojem záření je laserová dioda, která po optickém vlákně vyšle puls světla. Tento optický paprsek je absorbován fluorescenčním materiálem a dochází k jeho excitaci. Následuje vyzáření přebytečné energie (deexcitace) a dochází k fluorescenci čidla. Zpětný optický paprsek je interferenčním filtrem rozdělen na červenou a zelenou složku. Následným vyhodnocením poměru intenzit obou světelných paprsků je určena teplota sensorové hlavy, a tedy i tělesa. Teplotní rozsah je od -50 do $+200$ °C s malou nejistotou měření, $\pm 0,1$ °C. [9] [10] [1]

Vlákna používaná pro optické senzory mohou být buď skleněná nebo plastová. Skleněná vlákna mají, na rozdíl od plastových, menší útlum a měří teplotu až do 450 °C. Jejich nevýhody jsou špatná schopnost ohybu, jejich malá mechanická odolnost a nemožnost upravovat jejich délku. Plastová vlákna mají oproti skleněným větší útlum a měří teplotu do 150 °C. Mají dobrou schopnost ohybu, jsou mechanicky odolné a jejich délka se dá snadno upravovat.

Obr. 12 Optický vláknový fluorescenční teploměr



Zdroj: [9]

Mezi hlavní výhody OVS, oproti klasickým sensorům, je hlavně jejich vysoká odolnost jak proti elektromagnetickému rušení, tak vůči nárazům a nepříznivým vlivům prostředí. Díky těmto vlastnostem jsou OVS použitelné v chemicky agresivních nebo v lehkó zápalných prostředích. Dále disponují vysokou spolehlivostí a rychlou odezvou. Jejich nevýhodou je vysoká cena v porovnání s klasickými senzory. [10]

5.3.2 Indikátory teploty

Indikátory teploty se využívají k přibližnému stanovení teploty těles. Teplota je indikována na základě znalosti kritické teploty, tedy teploty, při níž nastává změna vzhledu indikátoru. Indikátor pracuje bez přívodu elektrické energie. U indikátorů dochází k změně tvaru nebo barvy. Dále se indikátory dělí na vratné a nevratné. [1]

Keramické žároměrky

Keramické žároměrky jsou nevratné, deformační, indikátory. Vyrábějí se z keramické hmoty, kyslíčků SiO_2 a Al_2O_3 , a tvarují se do podoby trojbokých jehlánků, kroužků a tyčinek s čtvercovým profilem. Nejčastěji se používají Segerovy žároměrky, dále pak Ortonova řada používaná hlavně v Americe. Teplotní rozsah je od $600\text{ }^\circ\text{C}$ do $2000\text{ }^\circ\text{C}$ s odstupňováním po $10\text{ }^\circ\text{C}$ až $50\text{ }^\circ\text{C}$. Nejistota měření teploty je $\pm 15\text{ }^\circ\text{C}$. Pro měření konkrétní teploty se využívají tři až čtyři žároměrky najednou zapíchnuté do kousku hlíny. Pokud se žároměrka ohne do úhlu 90° , značí to dosažení teploty příslušné pro daný typ žároměrky. Používají se v keramickém průmyslu a u výroby umělecké keramiky. [11]

Obr. 13 Žároměrky před a po výpalu v peci



Zdroj: [11]

Tavné indikátory teploty

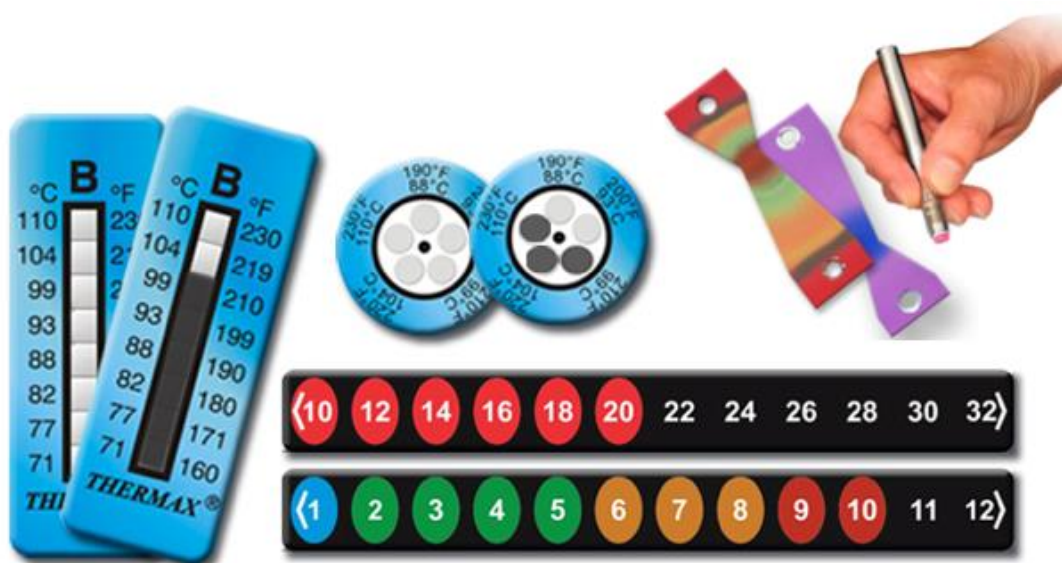
Tavné indikátory jsou další nevratné indikátory. Vyrábějí se ve formě tablet, kapalin, tužek a nálepek. Teploměrné tablety se vyrábějí lisováním keramických prášků ve dvou velikostech a po dosažení kritické teploty dojde k jejich roztavení. Teploměrné kapaliny jsou vyráběny z keramického prášku rozpuštěného v těkavé kapalině. Kapalina se nanese štětcem nebo sprejem, a po dosažení kritické teploty se zředí a rozteče. Teploměrné tužky jsou založeny na podobném principu jako teploměrné kapaliny. Obrazce nakreslené tužkou se po dosažení kritické teploty roztaví ve skvrnu a ztmavnou. Teploměrné nálepky jsou složeny z jednoho (až osmi) indikačních kruhů nebo obdélníků. Po dosažení tavné teploty změní indikační kruhy barvu z bílé (oranžové) na černou. [1]

Barevné indikátory teploty

Barevné indikátory teploty se používají k přibližnému stanovení teploty těles. Při dané teplotě dojde ke změně barvy indikátoru. Indikátory fungují na tavném principu nebo na vratné či nevratné chemické reakci. Barevné indikátory se vyrábějí ve formě teploměrných barev, tužek, nálepek, kapalných krystalů a luminiscenčních indikátorů viz *Obr. 14*. [7] [1] [12]

Teploměřové barvy a tužky patří mezi nevratné indikátory. Po dosažení kritické teploty dojde k chemické reakci, která způsobí změnu barvy nabarveného měřeného objektu. Nevratné teploměrné barvy obsahují různé druhy kovů, např. kobalt, chrom, měď atd. Teploměřové nálepky se vyrábějí s vratnými teploměrnými barvami. [12]

Obr. 14 Barevné indikátory teploty



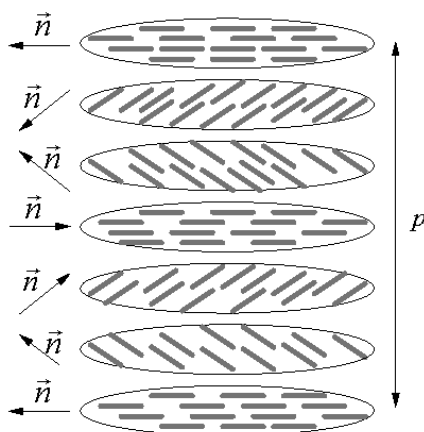
Zdroj: [12]

Indikátory teploty s kapalnými krystaly jsou vratné indikátory. Kapalné krystaly jsou organické látky s teplotní závislostí molekulární struktury ve stavu mezi pevnou a kapalnou fází. Ve skutečnosti jsou to kapaliny, které si při zvyšování teploty udržují do určité teploty molekulární orientaci při skupenské přeměně z pevné do kapalné fáze. [1] Pro účely měření teploty se využívají tzv. cholesterické fáze kapalného krystalu. Ty obsahují molekuly tyčinkovitěho tvaru uspořádané do vrstev. Jednotlivé vrstvy tyčinek jsou vzájemně pootočený, ve výsledku tvoří podélné osy tyčinek ve vrstvách pomyslnou šroubovici. Šroubovice poté odráží nejvíce tu vlnovou délku, která odpovídá stoupání šroubovice. Toto stoupání se odvíjí od teploty. [3] [1]

Kapalné krystaly měří teplotu v rozmezí $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aplikují se buď v podobě nátěru o tloušťce několika setin mm nebo v podobě folie a nálepek. Výhodou folie oproti přímému nátěru na povrch tělesa je jejich dlouhodobá životnost, nevýhodou neschopnost měřit teplotu na členitých površích. Změna teploty je sledována s minimálním zpožděním, díky této vlastnosti jsou kapalné krystaly vhodné nejen ke kontrole správné funkčnosti různých zařízení, ale i ke sledování teploty potravin a nápojů.

5.4 Srovnání hlavních dotykových senzorů

Obr. 15 Schématické znázornění uspořádání molekul v cholesterickém kapalném krystalu



\vec{n} je orientace krystalů ve vrstvě

P je krok šroubovice

Zdroj:[9]

5.4.1 Výhody a nevýhody dotykových senzorů

Platinové odporové senzory	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Chemická netečnost. - Vysoká přesnost. - Časová stálost. - Vysoká spolehlivost. - Dlouhodobá teplotní stabilita. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vyšší cena. - Zahřívání způsobené procházejícím proudem.
Teplotní rozsah: -200 až +850 °C		
Niklové odporové senzory	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Vysoká přesnost - Malé rozměry - Rychlá odezva 	<ul style="list-style-type: none"> - Horší linearita než u platinových - Omezenější teplotní rozsah - Horší dlouhodobá stálost
Teplotní rozsah: -60 až +180 °C		
Měděné odporové senzory	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Možnost měřit přímo na vinutí stroje 	<ul style="list-style-type: none"> - Rychle oxiduje - Malá rezistivita
Teplotní rozsah: -50 až +150 °C		
Termoelektrické senzory	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Nízká cena - Široký teplotní rozsah - Široké množství využití 	<ul style="list-style-type: none"> - Nízká citlivost - Nelineárnost - Stárnutí materiálu v místě spoje
Teplotní rozsah: -200 až +2300 °C (v závislosti na typu)		
Negastory	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Vysoká citlivost - Rychlá časová odezva - Malé rozměry 	<ul style="list-style-type: none"> - Značná nelineárnost
Teplotní rozsah: -50 až + 150 °C		

Pozistory	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Rychlá časová odezva - Vysoká citlivost - Malé rozměry - Dvoupolohové měření 	<ul style="list-style-type: none"> - Menší stálost - Omezený teplotní rozsah
	Teplotní rozsah: +60 až +180 °C	
Monokrystalické senzory	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Dlouhodobá stabilita - Značná lineárnost 	<ul style="list-style-type: none"> - Omezený teplotní rozsah
	Teplotní rozsah: -60 až +150 °C	
Dilatační kapalinové	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Jednoduché provedení - Nízká cena - Dlouhodobá stabilita 	<ul style="list-style-type: none"> - Malá mechanická odolnost - Nevhodné pro měření povrchových teplot
	Teplotní rozsah: -190 °C do 600 °C	
Dilatační plynové	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Netoxická teploměrová látka - Odolné proti vibracím a mechanickým rázům - Délka spojovací kapiláry až 100 m 	<ul style="list-style-type: none"> - Nevhodné pro měření povrchových teplot
	Teplotní rozsah: -250 až 800 °C	
Dilatační tenzní	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Větší citlivost ve srovnání s kapalinovými. - Menší teploměrová nádobka - Menší teplotní časová konstanta 	<ul style="list-style-type: none"> - Nelineární průběh stupnice
	Teplotní rozsah: -40 až +230 °C	
Dilatační bimetalové	Výhody	Nevýhody
	<ul style="list-style-type: none"> - Jednoduché provedení 	<ul style="list-style-type: none"> - Malá přesnost - Delší časová odezva než u tyčových teploměrů
	Teplotní rozsah: -100 až 500 °C	

5.4.2 Použití dotykových senzorů

Kovové odporové senzory

Jedná se o velmi rozšířené teplotní senzory a jsou přesnější než termočlánky. Mezi typické oblasti použití kovových odporových senzorů jsou teplotní sondy, medicína a klimatizační technika. Platinové senzory jsou montovány do snímačů teploty různého provedení. Je to například provedení nástěnné nebo do jímky. [8]

Polovodičové senzory

Tyto senzory mají oproti odporovým a termoelektrickým senzorům menší rozsah měřených teplot. Polovodičové senzory patří mezi nejpoužívanější senzory teploty v elektronice. Pozistory jsou používány v praxi u limitních snímačů a u snímačů pro spojitě měření v určitém úzkém pásmu teplot. Často jsou používány pozistory jako ohřívací odpory pro malé rozsahy teplot ohřátí (např. pro ohřev skel automobilů) [8]. Další možností použití je pro signalizaci překročení mezní teploty nebo pro dvoupolohovou regulaci. Negastory, nejpoužívanější z polovodičových senzorů, mohou být použity kromě přímého měření teploty i pro měření jiných fyzikálních veličin (rychlost průtoku kapalin a plynů potrubím). Další možností použití jsou termostaty a požární hlásiče. Monokrystalické Si senzory najdou využití například v automobilovém průmyslu, pro kontrolu teploty oleje nebo v klimatizační technice.

Termoelektrické senzory

Termoelektrické senzory jsou díky nízké ceně a jednoduchosti nejpoužívanější senzory. Určité typy senzorů jsou schopné snášet i vysoké teploty. Díky své všestrannosti jsou vhodné pro petrochemii, metalurgii, pece, letecké motory laboratoře, potravinářský průmysl, výměníky tepla, elektrárny atd.

Dilatační teploměry

Bimetalový teploměr je nejrozšířenějším přístrojem v kategorii levnějších průmyslových teploměrů [13], využívají jednak ve funkci aktuátorů (akčních členů), bimetalických pojistek aj. Skleněné teploměry mají svoje uplatnění jak v lékařství, tak jako pomůcka v laboratořích. Tyčové teploměry se používají pro přímé měření a vyhodnocování teplot v jádře měřené látky (např. kapaliny, sena, slámy, kompostu, siláže, drobného sypkého materiálu atd.) Plynové teploměry se používají hlavně v potravinářství, ve výrobě léčiv a v chemickém průmyslu.

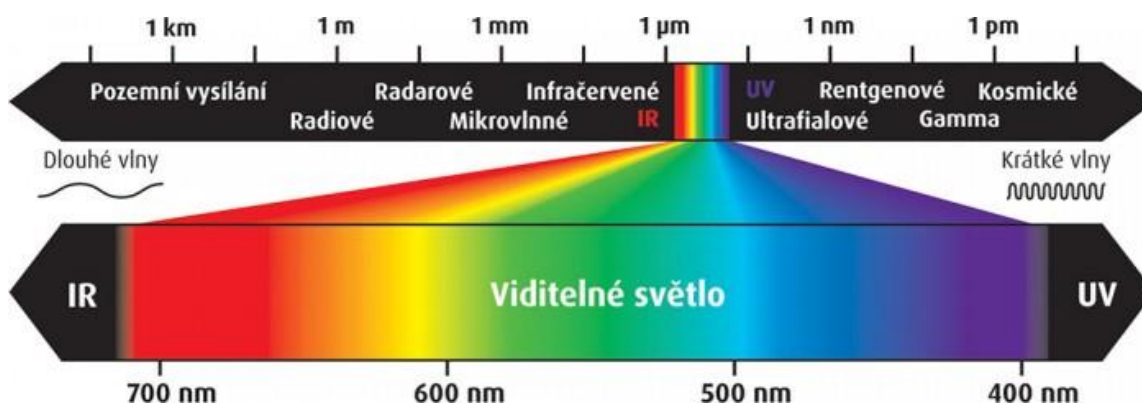
Speciální senzory

Tyto senzory jsou určeny pro speciální aplikace, a to od měření velmi nízkých teplot, měření v laboratořích nebo agresivních prostředích. Teploměrné barvy se v používají v potravinářství, viz barvu mění pruh na plechovkách od piva. Oblíbené jsou i mezi chovateli zvířat, kde se indikátory teploty s kapalnými krystaly využívají k měření teploty terárií.

6 Bezdotykové senzory

Bezdotykové měření teploty je založeno na měření povrchové teploty těles na základě elektromagnetického záření vysílaného tělesem a přijímaného senzorem. [1] Poznaťte, že povrch každého tělesa, jehož teplota je vyšší než absolutní nula emituje do svého okolí elektromagnetické záření, je základ bezdotykového měření. Výsledná povrchová teplota těles se dopočítává z elektromagnetického záření, tj. tepelného záření, emitovaného tělesem. Při bezdotykovém měření teploty se využívá elektromagnetické záření o vlnových délkách 0,4 μm až 25 μm . Toto záření spadá částečně do viditelné oblasti, z větší části do infračervené oblasti spektra. [14] Pro hodnoty od 0,4 μm do 0,78 μm se jedná o viditelné spektrum. Dále tento rozsah pokrývá blízkého infračerveného spektra (0,78 – 1 μm), oblast krátkovlnného infračerveného spektra (2–3 μm), oblast středovlnného infračerveného spektra (3–5 μm) a oblast dlouhovlnného infračerveného spektra (5–25 μm). Tyto tři poslední oblasti, od 2 μm do 25 μm , se souhrnně označují jako tepelné záření.

Obr. 16 Elektromagnetické spektrum



Zdroj: [17]

6.1 Absolutně černé těleso

Absolutně černé těleso (dále jen AČT) je model ideálního tělesa, které dokonale absorbuje záření všech vlnových délek, dopadající na jeho povrch. Zároveň se jedná také o ideální zářič, jelikož při každé vlnové délce vyzařuje největší možné množství energie nezávisle na použitém materiálu. [5]

Schopnost těles vyřazovat teplo je určena emisivitou. Emisivita je definována jako poměr energie vyzařované objektem při dané teplotě k energii ideálně černého tělesa při stejné teplotě. Emisivita černého tělesa je rovna 1,0.

Pro emisivitu platí vztah:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} \quad (6.1)$$

Kde

M_0 je intenzita vyzařování černého tělesa

M intenzita vyzařování daného tělesa

Emisivita je závislá na mnoha faktorech. Roli hrají termodynamické teplotě tělesa, jeho materiálu, barvě a struktuře povrchu a také na vlnové délce záření λ . Z tohoto důvodu se zavádí pojem spektrální emisivita ε_λ , tj. emisivita pro danou vlnovou délku. Spektrální emisivita je poměr spektrální hustoty intenzity vyzařování tepelného zářiče ke spektrální hustotě vyzařování černého tělesa při téže teplotě. [1] [3]

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{0\lambda}} \quad (6.2)$$

Kde

M_λ je spektrální hustota intenzity vyzařování daného tělesa

$M_{0\lambda}$ spektrální hustota intenzity vyzařování AČT.

Mezi další vlastnosti popisující záření patří pohltivost (absorbance), prostupnost (transmittance) a odraznost (reflektance).

Tab. 4 Emisivita pro vybrané povrchy

černé těleso	1,00
černý matový lak	0,99
voda	0,95
cihly	0,85
zoxidovaný ocelový plech	0,75
zoxidovaný hliník	0,55
lesklý ocelový plech	0,25

Zdroj: [5]

6.2 Senzory záření

Dle způsobu vzájemného působení záření s měřenou látkou dělíme bezdotykové senzory záření na:

A. Tepelné senzory

Tepelné senzory absorbují elektromagnetické záření, emitované měřenými tělesy, dopadající na povrch senzoru a tím vyvolávající zvýšení teploty senzoru. Tepelné senzory jsou v principu neselektivní, což znamená, že jsou nezávislé na vlnové délce dopadajícího záření. Hlavní nevýhodou tepelných sensorů je velká časová konstanta, naopak výhodou je vysoká citlivost měření.

Mezi tepelné detektory patří: termoelektrické senzory, bolometry a pyroelektrické senzory.

B. Kvantové senzory

Kvantové detektory jsou založeny na interakci dopadajících fotonů s detektorem, dochází ke generaci páru elektron-díra. Tento fyzikální jev nastává při teplotě vyšší, než je absolutní nula, a při splnění podmínky, kdy energie fotonů je větší než energie šířky zakázaného pásu polovodiče. [1]

Jedná se o selektivní senzory a mezi jejich hlavní výhody patří vysoká citlivost a malá časová konstanta.

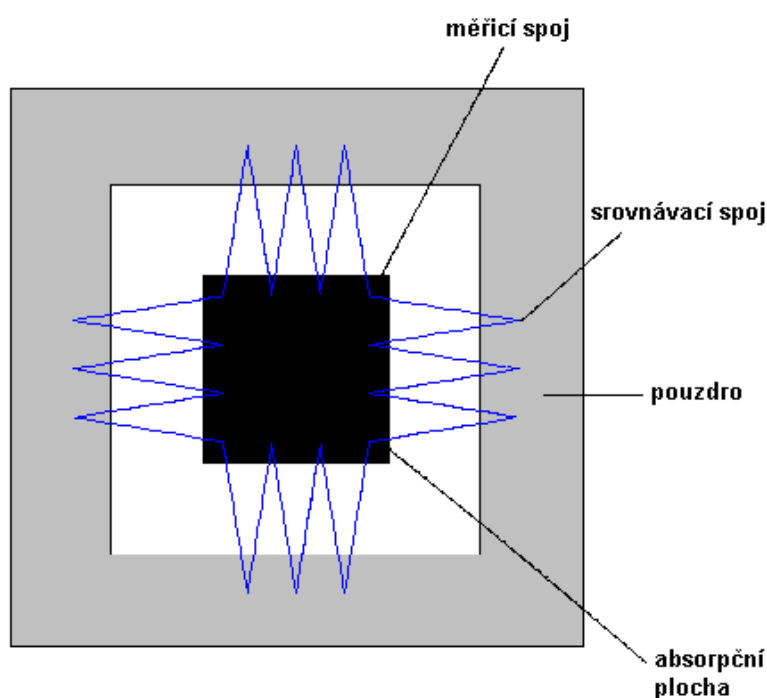
Kvantové senzory se vyrábí z polovodičů a dle typu použitého polovodiče se dělí na:

- Intristické – vyrábí se z vlastního (tj. čistého) polovodiče, např. fotorezistory
- Extristické – vyrábí se z nevlastních polovodičů (polovodiče typu P a N), např. fotodiody a fototranzistory [8]

6.2.1 Termoelektrické senzory IR záření

Termoelektrické senzory jsou složeny ze sériově zapojených termočlánků. Zvýšení počtu termočlánků zvyšuje sice citlivost, ale zároveň zhoršuje tepelnou časovou odezvu. Termoelektrické senzory jsou založeny na stejném principu jako termoelektrické senzory dotykové, tedy pracují na základě Seebeckova jevu. Tento jev je podrobně popsán v kapitole zabývající se termočlánky. Snímací část senzoru, natřena černým lakem, absorbuje elektromagnetické záření emitované měřeným tělesem. Toto záření se po dopadu na absorpční plochu přemění v teplo a zahřeje měřící spoje termočlánků. Teplota měřících spojů termočlánků se porovná s teplotou srovnávacího spoje, který je udržován na stálé teplotě. Výsledkem rozdílných teplot obou spojů je termoelektrické napětí. Schéma termoelektrického senzoru je na Obr. 17. [5] [1]

Obr. 17 Schéma termočlánkové baterie



Zdroj: [5]

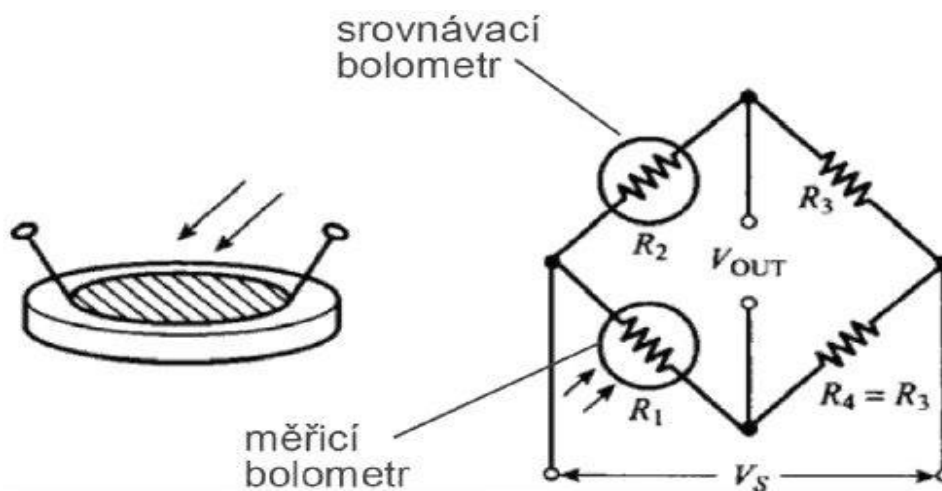
Termočlánky se vyrábějí buď drátkovou technologií (tvoří se tenké kovové pásky) nebo tenkovrstvou technologií, kdy se pásky napařují na křemíkový podklad. Materiály na jejich výrobu se užívají stejné jako u klasických termočlánků. Mezi jejich výhody patří široký spektrální rozsah a jednoduchá instalace.

6.2.2 Bolometrické senzory

Bolometrické senzory jsou tvořeny odporovým čidlem, odpor toho čidla je závislý na teplotě. Elektromagnetické záření dopadá přes černě natřené okénko na odporové čidlo, kde se absorbuje a tím roste elektrický odpor. Jedná se o obdobný princip jako u odporových senzorů teploty. Schéma bolometru je na Obr. 18. Bolometr musí být tepelně izolován od okolí, aby nedocházelo k absorpci tepla z jiných zdrojů než z měřeného tělesa. [15]

K výrobě bolometrů se užívá tenkovrstvá technologie. Jako materiály pro výrobu se užívají Oxid titaničitý, Oxid manganatý nebo chalkogenidové sklo. Bolometry mohou být buď jednoduché nebo jako mikrobolometry. Mikrobolometry jsou desítky a tisíce jednoduchých bolometrů poskládaných do matic, tedy do bolometrického pole. Teplotní rozsah je -40 až +100 °C. Hlavní výhody bolometrů jsou velká citlivost, malé rozměry a to, že se jedná o neselektivní detektory záření. Mezi nevýhody se řadí nutnost chladit (platí jen pro některé typy) a vysoká cena. [15] [1]

Obr. 18 Provedení bolometru

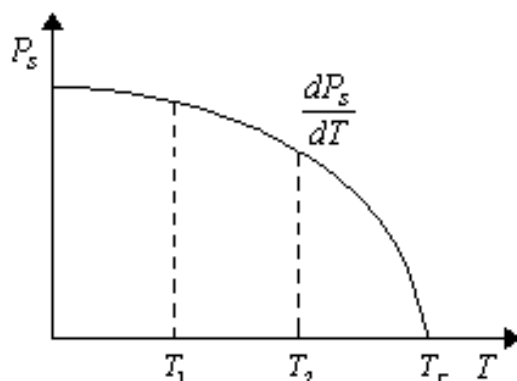


Zdroj: [15]

6.2.3 Pyroelektrické senzory IR záření

Pyroelektrické senzory záření jsou založeny na pyroelektrickém jevu, tj. na změně spontánní polarizace P_s při změně teploty, tato závislost je na *Obr. 19*. [1] Tato spontánní polarizace s rostoucí teplotou klesá a po dosažení T_c (Curieovy teploty) je nulová.

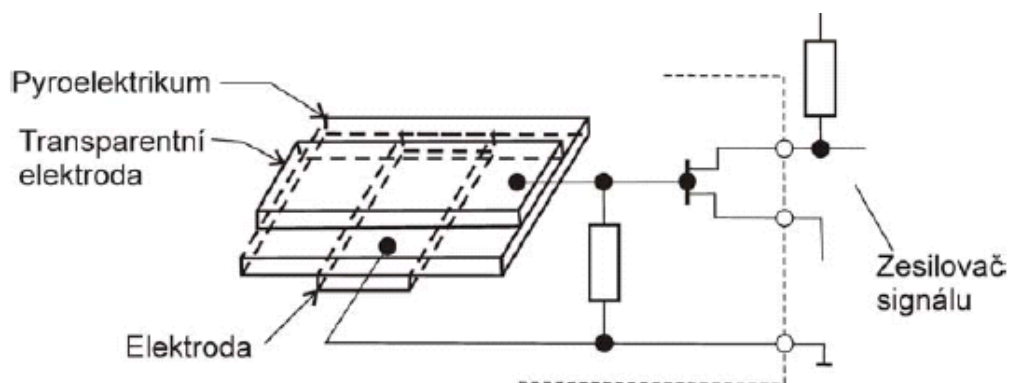
Obr. 19 Závislost spontánní polarizace na teplotě



Zdroj: [1]

Nejčastěji používané materiály jsou keramické látky na bázi titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého, triglycin-sulfát nebo polyvinylfluorid. Na *Obr. 20* je vyobrazeno uspořádání pyroelektrického čipu s transparentní čelní elektrodou pro infračervené záření. Napětí, které je měřené na elektrodách pyroelektrického čipu, je úměrné časové změně emitovaného záření. Z tohoto důvodu je nutné, před každým odměrem, detektor začlenit a opět odclonit. Pyroelektrické detektory jsou neselektivní detektory záření. Jejich hlavní výhodou je, že nepotřebují chlazení.

Obr. 20 Pyroelektrický čip s předzesilovačem

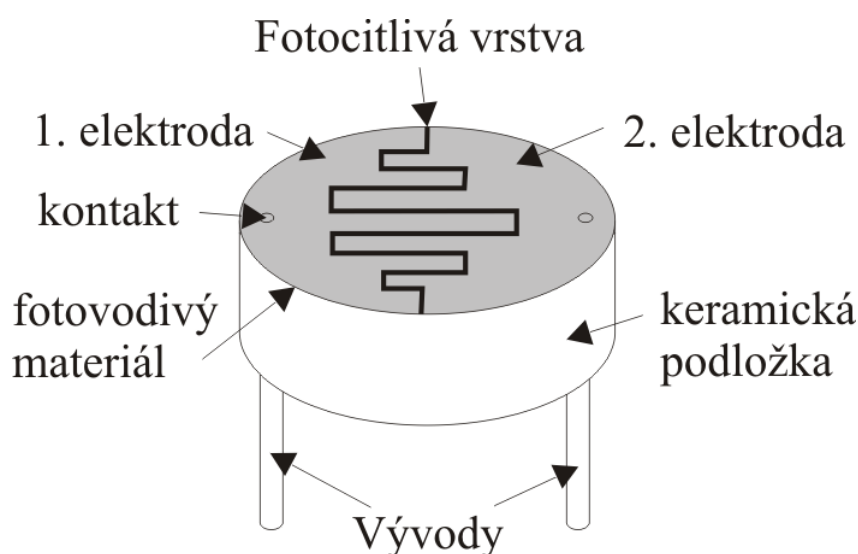


Zdroj: [1]

6.2.4 Fotorezistor

Fotorezistory, nebo také fotoodpor, se řadí mezi kvantové detektory záření a fungují na principu vnitřního fotoelektrického jevu. Odpor fotorezistoru se snižuje se zvyšující se intenzitou dopadajícího světla. Pokud na fotorezistor nedopadá světlo, nacházejí se všechny elektrony ve valenčním pásu. Pokud je tento neosvětlený fotorezistor připojen ke vnějšímu zdroji napětí, neprochází jím žádný proud a jeho odpor je maximální. Po dopadu světla dochází přesunu elektronů z valenčního do vodivostního pásu a fotorezistorem začne procházet proud. Fotorezistory se nejčastěji vyrábějí napařením vrstvičky kovu. Nejčastěji používané materiály jsou sulfid kadmia nebo sulfid olova. Konstrukce fotorezistoru je na Obr. 21. Výhody fotorezistoru jsou značná citlivost, snadné použití a nízká cena. Nevýhody jsou dlouhodobá doba odezvy na změnu osvětlení a značná teplotní závislost odporu. Využívají se v požárních hlásičích, kalorimetrech a v regulační technice. [5] [3]

Obr. 21 Konstrukce fotorezistoru



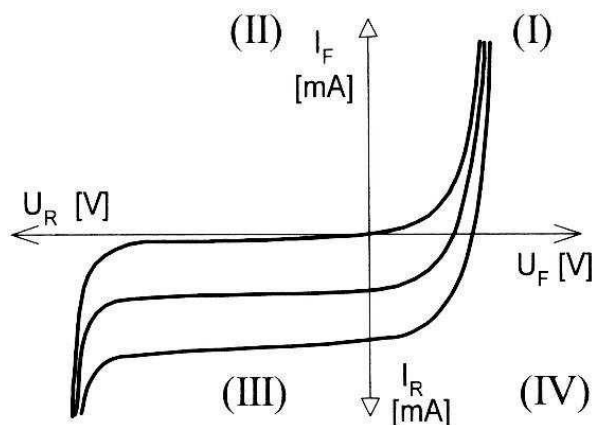
Zdroj: [Filip Albert](#)

6.2.5 Fotodioda

Fotodioda je polovodičová součástka s jedním PN přechodem, využívající vnitřní fotoelektrický jev. Stejně jako fotorezistor se řadí mezi kvantové detektory. Fotodioda, stejně jako fotoodpor, využívá vnitřní fotoelektrický jev. Tento jev je již popsán v předchozí kapitole.

Voltampérová charakteristika fotodiody prochází třemi kvadranty, v praxi se ovšem využívají jen dva, a to kvadrant III. a IV. V třetím kvadrantu, v tzv. odporovém (fotovodivostním) režimu, se chová fotodioda jako rezistor citlivý na světlo. Ve čtvrtém kvadrantu, v tzv. hradlovém (fotovoltaickém) režimu, se dioda chová jako zdroj elektrické energie. Voltampérová charakteristika je na Obr. 22 *Voltampérová charakteristika fotodiody* Obr. 22.

Obr. 22 *Voltampérová charakteristika fotodiody*



Zdroj: [1]

6.3 Bezdotykové teploměry

Bezdotykové teploměry, měří teplotu daného tělesa prostřednictvím měření tepelného záření emitované tělesy do okolí. Dle měřícího principu se dělí na:

- Přímé měřící bezdotykové teploměry – Pyrometry
- Zobrazovací bezdotykové teploměry – Termovize

6.3.1 Pyrometry

Pyrometry vyhodnocují teplotu v jednom bodě, přesněji řečeno vyhodnocují průměrnou teplotu v určité oblasti. Tato měřící oblast je nejčastěji kruhová, ve speciálních případech mají měřící oblasti tvar např. obdélníku. Pyrometry jsou schopné měřit teplotu v rozsahu -50 až $+3500$ °C. Existuje mnoho způsobů dělení pyrometrů, například dle spektrální oblasti využitého záření, a to na úhrnné, monochromatické, pásmové a poměrové. [3] [14]

Úhrnné pyrometry

Úhrnné pyrometry neboli pyrometry na celkové záření, jsou nejjednodušší a nejlevnější. Měří teplotu dle Stefan – Boltzmannova zákona, tj. vyhodnocují tepelné záření v celém spektru vlnových délek, a předpokládají, že těleso je dokonale černé. Rozsah vlnových délek záření, který je pyrometr ještě schopný vyhodnotit, závisí jak na absorpční schopnosti detektoru, jednak na propustnosti čočky pyrometru. K jejich výrobě se používají tepelné detektory, protože splňují podmínku absorpce záření v širokém rozsahu vlnových délek. [14]

Protože úhrnné pyrometry předpokládají, že těleso je dokonale černé, je skutečná teplota tělesa vyšší než je teplota naměřená úhrnným pyrometrem. Úhrnné pyrometry, u kterých se nedá nastavit emisivita, se používají pouze k měření teploty dobře uzavřených prostorů a tmavých objektů bez lesku. U většiny radiačních pyrometrů je možné nastavit emisivitu snímaného povrchu tak, aby naměřená teplota odpovídala skutečné teplotě tělesa. Z definice Stefan – Boltzmannova zákona dostaneme vztah mezi skutečnou teplotou tělesa a teplotou naměřenou pyrometrem. [1]

$$T_s = T_{\check{c}} \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (6.3)$$

Kde

T_s je skutečná teplota tělesa
 T_p teplota naměřená pyrometrem
 ε emisivita

Pásmové pyrometry

Pásmové pyrometry, na rozdíl od úhrnných, využívají jen určitou část spektra tepelného záření. K jejich výrobě se používají kvantové detektory, tj. fotorezistory a fotodiody. U pásmových pyrometrů prochází tepelné záření, emitované tělesem, optickým systémem pyrometru a dopadá na fotodetektor přes optický filtr, který vymezuje požadovanou šířku vlnového pásma. Ten následně absorbované tepelné záření převede na výstupní napětí, již je úměrné teplotě. Pásmové pyrometry jsou kalibrovány na teploty absolutně černého tělesa, proto je potřeba brát v úvahu skutečnou hodnotu emisivity měřeného tělesa, která je při měření zjišťována. [14] [1]

Monochromatické pyrometry

Monochromatické pyrometry, nebo také spektrální pyrometry, vyhodnocují tepelné záření tělesa pouze na jedné vlnové délce. Ve skutečnosti nelze vyrobit zcela monochromatický pyrometr, takže se vždy měří v úzkém vlnovém pásmu $\Delta\lambda$, již je dáno spektrální citlivostí kvantového detektoru, spektrální prostupností optiky, ale hlavně spektrální prostupností interferenčních filtrů, zajišťujících monochromatické měření teploty. [1]

Poměrové pyrometry

Poměrové pyrometry, nebo také dvoubarevné radiační teploměry, vyhodnocují tepelné záření emitované tělesem při dvou úzkých pásmech vlnových délek, které jsou vymezeny dvěma optickými filtry (nejčastěji je jeden červený a druhý zelený). Jejich hlavní výhodou je, že mohou měřit tělesa, u jejichž emisivita kolísá nebo kde ji neznáme. Poměrový pyrometr je tvořen dvěma samostatnými jasovými pyrometry. [14] [5]

6.3.2 Termovize

Termovize snímá záření v IR oblasti spektra, pomocí speciální kamery, za účelem zjištění rozložení teploty na povrchu měřeného tělesa. Termokamery vyhodnocují teplotní pole na povrchu celých objektů, toto je hlavní rozdíl oproti pyrometrům. Pro termovizní kamery se používají kvantové, pyroelektrické nebo mikrobometrické detektory. Neviditelné infračervené záření se zobrazuje na obrazovku speciálního monitoru. Tento infračervený snímek pořízený termokamerou se označuje jako termogram. Vizualizace termogramu se provádí tak, že určitému toku záření odpovídajícímu určité teplotě na povrchu tělesa přiřadí určitá barva nebo určitý stupeň šedi. Příklad zobrazení termogramem je na *Obr. 23*. Termovizní systémy lze rozdělit na systémy bez rozkladu, tj. přímo zobrazující a na systémy s rozkladem obrazu. [14]

Termovize je poměrně nákladná, ale velmi užitečná pro měření teploty v různých

Obr. 23 Zobrazení termogramem



Zdroj: [14]

oblastech lidské činnosti. Mezi hlavní oblastmi použití termovizního měření patří stavebnictví, průmysl, elektrotechnika a pro armádní použití. V průmyslu se termovize používá zejména pro kontroly. Snímání teploty termokamerou je možné v teplotním rozsahu - 30 až 1200 °C a je velmi přesné, udávaná chyba je $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Nevýhodou je vysoká cena termokamer. [14]

6.4 Srovnání hlavních bezdotykových senzorů

6.4.1 Výhody a nevýhody bezdotykových senzorů

Tab. 4 Výhody a nevýhody bezdotykového měření

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none">- Měření rychlých teplotních změn- Možnost měření velmi vysokých teplot- Minimální vliv senzorů na měřený objekt- Možnost měření pohybujících se objektů- Možnost bodového i plošného snímání	<ul style="list-style-type: none">- Vysoká cena měřicí techniky- Složitost měřicí techniky- Chyby měření způsobené odražením zářením- Složitost určení emisivity měřeného objektu- Nutnost opakované kalibrace

6.4.2 Použití bezdotykových senzorů

Bezdotykové senzory teploty nacházejí uplatnění v mnoha oborech. A to od bezpečnostních aplikací noční ochrany, přes detekci teplotních ztrát a poruch až po řízení složitých technologických procesů, kde se využívá jejich vysoká přesnost a rychlá odezva. Bezdotykové senzory mají své uplatnění i v rizikovém prostředí kde jejich schopnost měřit teplotu na dálku je značnou výhodou.

Termoelektrické senzory IR záření

Termoelektrické senzory se využívají pro levné a jednoduché měření teploty. Další možnost použití je rovněž jako průtokoměry, senzory vakua a pro chemickou analýzu plynu.

Bolometry

Bolometry se používají u vědeckých přístrojů, u termovizních kamer, u zařízení v kosmickém výzkumu, pro bezdotykové měření teploty z družic, u snímačů polohy družic. [8]

Fotorezistor

Fotorezistory mají širokou oblast použití při měření intenzity světla (např. v soumrakových spínačích, ve fotoaparátech). Využívají se jako součásti požárních hlásičů a zabezpečovacích zařízení.

Fotodiody

Fotodiody v hradlovém zapojení se využívají jako sluneční (solární) články. Toho se používá například k napájení malých spotřebičů (kalkulačky) nebo jako zdroj napájení družic. Při odporovém zapojení se její použití shoduje s fotorezistorem.

Pyrometry

Pyrometry se používají pro dlouhodobé měření teploty (teplota v pecích) , rovněž ve válcovnách a slévárnách. Pyrometry s nastavitelnou emisivitou a poměrové pyrometry se používají k měření teploty objektu s neznámou hodnotou emisivity. Další uplatnění nacházejí pyrometry v agresivním nebo neprostupném prostředí.

Termovize

Termovize má mnoho oblastí použití. Díky snímání teplotních polí je vhodná například ke kontrole úniků tepla ve stavebnictví a energetice, dále v slévárenství, strojírenství, teplárenství, zdravotnictví. Neméně důležité je použití termovize v bezpečnostních systémech nebo pro armádní účely.

7 Závěr

V této bakalářské práci jsou, na základě literární rešerše, popsány metody měření teploty. Práce je koncipována tak, aby čtenář získal ucelený přehled o funkci a použití teplotních senzorů.

Práce je rozdělena do tří celků. V první části je čtenář obeznámen se základní problematikou měření teploty a rozdělení teplotních stupnic. Největší důraz byl kladen na metody dotykového měření, které jsou popsány v druhé části práce. Pozornost je věnována klasickým typům snímačů jako jsou např. termoelektrické senzory, odporové senzory aj. Ale i speciálním senzorům jako jsou teploměrné barvy a optické vláknové senzory, které mají velký potenciál. Senzory jsou na závěr kapitoly porovnány z hlediska jejich použití a vlastností. Ve třetí, poslední části jsou popsány metody bezdotykového měření. Zvláště dynamicky se rozvíjející oblast termovize a pyrometrie. Bezdotykového měření je na konci kapitoly zhodnoceno z pohledu výhodnosti jeho použití a jsou uvedeny oblasti využití jednotlivých typů senzorů.

Z provedených hodnocení, uvedených na konci páté a šesté kapitoly vyplývá, že nejpoužívanější dotykové senzory jsou termoelektrické senzory z důvodu nízké ceny a velké variability. Nejpoužívanější bezdotykové senzory jsou termokamery, dále úhrnné a pásmové pyrometry. Nelze ale říci, že některé senzory jsou nejlepší, každý senzor má své uplatnění a přednosti oproti ostatním. Pro zvolení vhodného senzoru je důležité zvážit několik základních hledisek. Mezi ně například patří: požadovaný rozsah měřené teploty, požadovaná přesnost měření, možnost ukládání naměřených hodnot nebo jde-li o jednorázové či kontinuální měření. Velkou roli hraje i finanční stránka.

Teploměry a tepelné senzory jsou přínosným prvkem, který má v naší společnosti široké využití. Rozebráním této problematiky jsem poukázala na využití, funkci a význam tohoto produktu.

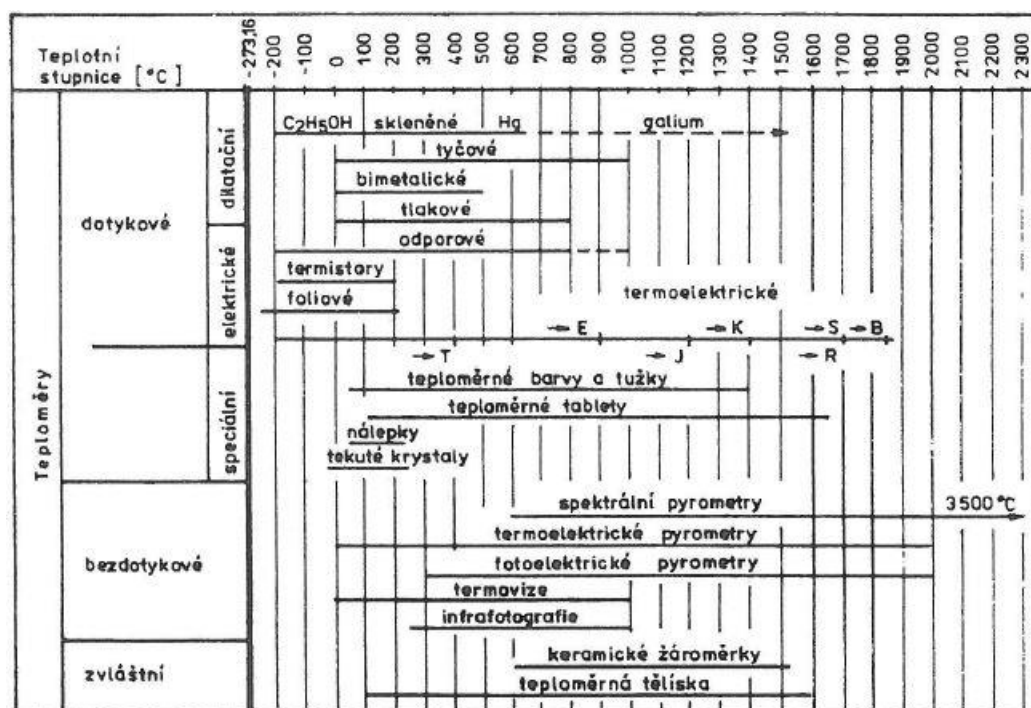
8 Citovaná literatura

- [1] M. Kreidl, Měření teploty: senzory a měřicí obvody, Praha: BEN - technická literatura, 2005.
- [2] J. Čech a J. Pemikář, Strojírenská metrologie, Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005.
- [3] S. Ďaďo a M. Kreidl, Senzory a měřicí obvody: senzory a měřicí obvody, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999.
- [4] „Přehled teplotních stupnic,“ 5 únor 2017. [Online]. Available: <http://www.prevod.cz/popis.php?str=220&parent=y>.
- [5] „VŠCHT učebnice,“ 5 Leden 2017. [Online]. Available: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm#k43>.
- [6] „Příručka pro konstruktéry, projektanty a realizátory měřicí a regulační techniky,“ 5 leden 2017. [Online]. Available: <http://www.sensit.cz/soubory-stazeni-slozka/1404042057/>.
- [7] „Senzory teplotních veličin,“ 3 únor 2017. [Online]. Available: http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/09_teplota%20text%20.pdf.
- [8] F. Hruška, Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.
- [9] L. Bejček, „Optické vláknové snímače teploty,“ *AUTOMA*, pp. 38-43, 8-9/2011.
- [10] J. Sova, „Teoretické základy bezdotykového měření teploty,“ *Automa*, sv. 2/2014, pp. 16-21, 2014.
- [11] „Žároměrky,“ 6 únor 2017. [Online]. Available: <http://firing.wz.cz/zaromer.htm>.
- [12] TIP TEMPerature Products, „tiptemp,“ TIP TEMPerature Products, březen 2017. [Online]. Available: <http://www.tiptemp.com/Products/Temperature-Labels-Paints/>. [Přístup získán březen 2017].
- [13] J. Vaculík, „Plynové teploměry pro průmyslové použití,“ *Automa*, č. 3/2013, pp. 44-45, 2013.
- [14] J. Svoboda a K. Kadlec, „Termokamery a pyrometry,“ *allforpower*, č. 01/2014, pp. 111-120, 2014.
- [15] J. Pech a P. Zahradník, „Mikobolometrické obrazové snímače,“ 2003. [Online].
- [16] L. Navrátil a J. Rosina, Medicínská biofyzika, Praha: Grada, 2005, pp. 439-442.
- [17] J. Dušek, „Barvy a vlnová délka,“ *Megazín*, Březen 2012.

9 Přílohy

Příloha 1 Členění teploměrů a měřicí rozsahy

Dotykové	Bezdotykové	Zvláštní
dilatační (skleněné, tlakové, tyčové, dvojkovové) parní	přímoměřicí pyrometry - subjektivní spektrální (jasové, monochromatické) pásmové barvové radiační	keramické žároměrky
elektrické (odporové, polovodičové, termoelektrické)	zobrazovací fotometrie	teploměrná tělíska
speciální (krystalové, tekuté krystaly, teploměrné barvy, tužky, nálepky, tablety)	termovize	



Zdroj: [2]

Příloha 3 Klasifikace barevných indikátorů teploty

Barevné indikátory teploty				
typ	termochemická	tavné	kapalné krystaly	luminiscenční
a)	prášek tužka pasta barva tableta	prášek tužka (1400) pasta barva (1370) tableta (1650)	prášek barva	prášek tužka pasta barva tableta
b)	vratné nevratné kvazivratné	nevratné	vratné	vratné
c)	-50 až 1400°C	35 až 1650°C	-20 až 120°C	-200 až 300°C
d)	2,5 až 10%	0,5 až 2,5%	0,1 až 2%	0,5 až 2%
e)	jeden nebo několik	jeden		jeden nebo několik
f)	závisí	nezávisí	závisí	závisí

Vysvětlivky:

a – forma indikátoru
b – vratnost změny barvy
c – teplotní rozsah

d – relativní chyba
e – počet barevných přechodů
f – závislost na způsobu ohřevu

Zdroj: [2]