

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

Přístroje pro měření teplot

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Michal Šerý

Autor: Josef Horelica

Anotace

Práce se zabývá teoretickým popisem, praktickým zapojením přístrojů pro měření teploty a jejich principem fungování při měření teploty. Jsou zde vysvětleny základní pojmy jako je teplota, teplotní stupnice a její měření. Dále jsou uvedeny základní senzory, které se v přístrojích používají. Část práce tvoří obrazová prezentace, kde je uveden souhrnný přehled senzorů a jejich aplikace v přístrojích pro měření teploty. Cílem je poskytnout ucelený přehled pro orientaci v této problematice.

Annotation

This work deals with theoretical description, practical connection of temperature measuring instruments and how they function while measuring the temperature. This document explains basic concepts of temperature, temperature scales and temperature measuring. Further there are introduced standard types of sensors used in these measuring instruments. This document includes a picture presentation in PowerPoint, where an aggregate table of sensors and an application of these sensors in measuring instruments are introduced. The objective of this work is to provide a comprehensive view of this problem.

Prohlášení:

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Přístroje pro měření teplot jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích dne

Touto formou děkuji svému konzultantovi Ing. Michalu Šerému za cenné rady a připomínky při zpracování mé práce.

Obsah

1 Úvod	7
2 Měření teploty	8
2.1 Základní pojmy a jednotky	8
2.1.1 Teplota a princip měření	8
2.1.2 Teplotní stupnice	9
2.1.3 Mezinárodní teplotní stupnice a stupnice ITS-90	10
3 Dotykové měření teploty	11
3.1 Teploměry dilatační	11
3.1.1 Teploměry kapalinové	12
3.1.2 Teploměry tenzní	14
3.1.3 Teploměry bimetalové	15
3.1.4 Teploměry plynové	17
3.2 Teploměry elektrické	17
3.2.1 Teploměry termoelektrické	17
3.2.2 Teploměry odporové kovové	21
3.2.3 Polovodičové odporové senzory teploty	25
3.2.4 Diodové senzory teploty a integrované senzory teploty	26
3.3 Teploměry speciální	30

4 Bezdotykové měření teploty	32
4.1 Pyrometry	33
4.1.1 Tepelné senzory infračerveného záření	33
4.1.2 Kvantové senzory infračerveného záření	35
4.1.3 Širokopásmové pyrometry	36
4.1.4 Jednopásmové pyrometry	37
4.1.5 Dvoupásmové pyrometry	41
4.2 Termovizní systémy – termovize	42
4.2.1 Bez rozkladu obrazu	42
4.2.2 S rozkladem obrazu	42
4.3 Optovláknové snímače teploty	44
5 Závěr	46
6 Použitá literatura	47
7 Přílohy	48

1 Úvod

Tématem mé bakalářské práce je teoretický popis, praktické zapojení přístrojů pro měření teploty a jejich princip fungování při měření teploty. Cílem bylo vytvořit přehledný materiál, který bude obsahovat základní popis teploty, teplotní stupnice, princip jejího měření a metody, které se při měření aplikují. V této práci je hlavní rozdělení teploměrů a přístrojů provedeno podle toho, jakou metodu pro měření budeme aplikovat – dotykovou nebo bezdotykovou.

Dalším cílem bylo poskytnout ucelený přehled typů senzorů, s nimiž se můžeme setkat v jednotlivých teploměrech a přístrojích. Proto je další částí této práce obrazová prezentace, v níž jsou popsány jednotlivé senzory, které se používají v přístrojích a jsou zde uvedeny jejich základní parametry a použití. V závěru jsou namátkově vybrány různé druhy přístrojů, se kterými se můžeme v praxi setkat.

2 Měření teploty

2.1 Základní pojmy a jednotky

2.1.1 Teplota a princip měření

Teplota je jednou z nejdůležitějších stavových veličin ovlivňující téměř všechny stavy a procesy v přírodě. Patří tedy mezi nejčastěji měřené veličiny. Za nejnižší teplotu, kterou nazýváme absolutní teplotní nulou, je považován takový stav hmoty, kdy v ní ustane jakýkoli pohyb částic.

Při měření teploty se využívá nejrůznějších jevů závislých na teplotě, např. změny délky, objemu, tlaku, elektromotorické síly, elektrického odporu a dalších fyzikálních vlastností látek. Volí se takové fyzikální principy, u nichž lze teplotní závislosti veličin matematicky vyjádřit s minimální odchylkou od termodynamické teploty, která je definována nezávisle na vlastnostech měřenosné látky.

Před měřením teploty je též nutné zvolit správnou metodu, která je závislá na rozsahu a výši teploty, na žádané přesnosti a provozních podmínkách, na vzdálenosti přenosu a na účelu měření apod. Dále je v praxi důležité rozhodnout se pro vhodný typ teploměru, jeho instalaci, aby správně měřil a aby byly eliminovány nebo potlačeny rušivé vlivy na údaj snímače.

Z důvodu dosažení přesnějších výsledků při měření teploty, nezávisle na jeho principu, byla odvozena z účinnosti ideálního Carnotova cyklu základní termodynamická teplota. Základní jednotkou termodynamické teploty T je kelvin – K podle skotského fyzika lorda Kelvina.

V Mezinárodní teplotní stupnici ITS-90 (The International Temperature Scale of 1990) je definována základní jednotka termodynamické teploty T kelvin [K] jako 273,16 díl termodynamické teploty trojného bodu vody (rovnovážný stav tří skupenství – ledu, vody a syté vodní páry). V praxi se převážně používá Celsiova stupnice, značená t a jednotkou je stupeň Celsia [$^{\circ}\text{C}$], pro kterou platí následující vztah (1).

$$t = T - T_0 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

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

2.1.2 Teplotní stupnice

Teplotní stupnice vychází z některých fyzikálních zákonů zejména ze stavové rovnice ideálního plynu (2).

$$p \cdot V = R_m \cdot T \quad (2)$$

kde	p [Pa]	tlak plynu
	V [m ³]	objem plynu
	R_m [J · kmol ⁻¹ · K ⁻¹]	molární plynová konstanta
	T [K]	absolutní teplota

Pro vyšší teploty je důležitý Planckův zákon. Pro spektrální hustotu intenzity záření černého tělesa platí vztah (3).

$$M_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3)$$

kde	$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} [\text{W} \cdot \text{m}^2]$	první vyzařovací konstanta
	$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} [\text{m} \cdot \text{K}]$	druhá vyzařovací konstanta
	λ [m]	vlnová délka záření
	T [K]	teplota povrchu tělesa

Pro praktickou realizaci termodynamické teploty dnes slouží Mezinárodní stupnice ITS-90 [1].

2.1.3 Mezinárodní teplotní stupnice a stupnice ITS-90

Realizace měření je velmi náročná, proto se na termodynamické stupnici určují jen některé body. Teplotní rozsah je vymezen varem kyslíku při 90,20 K ($-182,95\text{ }^{\circ}\text{C}$) a tuhnutím wolframu při 3 660 K ($3\,387\text{ }^{\circ}\text{C}$). Od roku 1990 je tato stupnice empirickou stupnicí stanovenou na 17 pevně definovaných teplotních bodů.

Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 nahradila dříve používané stupnice ITS-27, ITS-48, ITS-48/60, IPTS-68 (doplněné vydání 1975) a provizorní teplotní stupnici 0,5 až 30 K z roku 1976. Od okamžiku stanovení první Mezinárodní teplotní stupnice ITS-27 pokračoval a dále pokračuje vývoj přesnějších metod měření i přesnějších přístrojů. Teplotní stupnice se zpřesňuje tak, aby se co nejvíce přiblížila k termodynamické teplotní stupnici [15].

ITS-90 spočívá na mnoha fyzikálních stavech látek – primárních teplotních bodech (a jejich číselných hodnotách), na interpolačních přístrojích (pro definici teplot mezi těmito body) a na matematických vztazích pro interpolační přístroje.

Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 uvažuje čtyři hlavní rozsahy:

- v rozsahu 0,65 K až 5,0 K se teplota definuje pomocí tlaku páry $^3\text{H}_e$ a $^4\text{H}_e$;
- v rozsahu 3,0 K až 24,56 K (trojný bod neónu) se teplota definuje prostřednictvím héliového plynového teploměru kalibrovaného při experimentálně realizovatelných teplotách, které mají přiřazené číselné hodnoty (definované pevné body);
- v rozsahu 13,80 K (trojný bod rovnovážného stavu vodíku) až 1 234,93 K (bod tuhnutí stříbra) se teplota definuje pomocí platinového odporového teploměru kalibrovaného v určitých pevných bodech;
- nad teplotou 1 234,93 K se teplota definuje pomocí definičních pevných bodů a Planckova radiačního zákona.

ITS-90 je definována tak, aby jednotlivé rozsahy měření přesně vyjadřovaly číselné hodnoty termodynamické teploty a měly vysokou reprodukovatelnost [1].

3 Dotykové měření teploty

Dotykové měření teploty spočívá v tom, že teploměr je v přímém styku s objektem nebo látkou, jejíž teplotu má měřit a přenos tepla je uskutečňován vedením. Tuto metodu měření lze použít tam, kde je snadný přístup k měřenému objektu (látce) a nebo kde okolní prostředí nebo sám měřený objekt chemicky nebo jinak nereaguje se senzorem. Výhodou této metody je její velká přesnost. Avšak nevýhodou může být to, že teploměr může být ovlivněn měřeným objektem.

3.1 Teploměry dilatační

Pracují na principu změny tlaku, objemu, tenze par a délkové roztažnosti příslušné látky s měnící se teplotou, což vyjadřují následující vztahy:

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \Delta \vartheta) \quad (4)$$

$$v = v_0 \cdot (1 + \beta \Delta \vartheta) \quad (5)$$

$$p = p_0 \cdot (1 + \beta \Delta \vartheta) \quad (6)$$

l, v, p	[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

Tato skupina teploměrů se podle použití teploměrné látky dále dělí na:

- kapalinové;
- tenzní;
- bimetalové;
- plynové.

3.1.1 Teploměry kapalinové

Tyto teploměry využívají objemové roztažnosti kapalin. Jako teploměrná kapalina se nejčastěji používá rtuť nebo líh, méně pak pentan nebo toulén. Kapalinové teploměry se mohou rozdělovat nejen podle použité teploměrné kapaliny, ale i podle konstrukčního řešení a fyzikálních principů, kterých využívají teploměry *skleněné a tlakové*. Teplotní rozsah kapalinových teploměrů se pohybuje od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+750\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2].

Teploměry skleněné

Jsou nejrozšířenější kapalinové teploměry, které se skládají z nádoby (jímky) naplněné teploměrnou kapalinou, která se změnou teploty roztahuje do kapiláry o malém průměru, čímž dochází ke zvýraznění závislosti a dobré rozlišitelnosti teploty na lineární stupnici.

Podle konstrukce je můžeme dělit na:

- *škálové* – tyto teploměry mají nádobku s kapilárou připevněnou ke stupnici (škále) a vše je jako celek zataveno do skleněného pouzdra;
- *stonkové* – speciální úpravou škálového teploměru je teploměr stonkový, který je ve spodní části zúžen a od počátku stupnice směrem k jímce vytváří stonek;
- *tyčinkové* – tyčinkový teploměr je tvořen silnostěnnou trubičkou skla, která tvoří přímo kapiláru a je rozšířena v teploměrnou jímku.

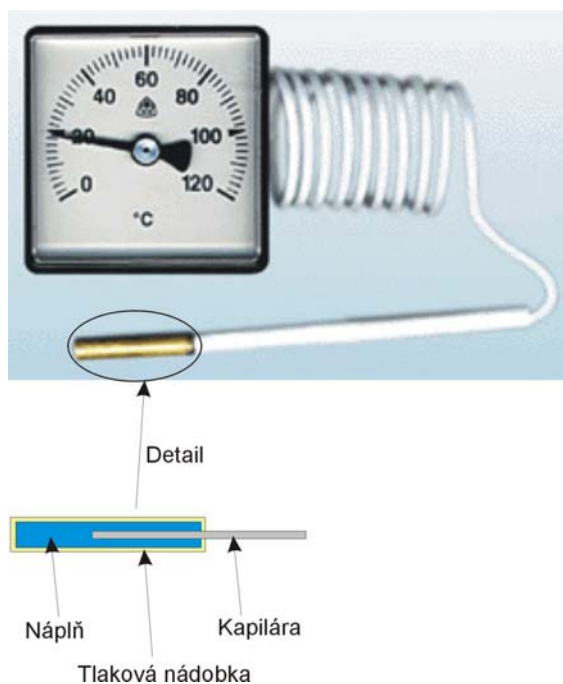


Obr. č. 1 Skleněné teploměry [2]

Teploměry tlakové

Tlakové teploměry využívají roztažnosti plynů, nasycených par nebo kapalin při stálém objemu. Náplní těchto teploměrů bývá dusík, kyslík, suchý vzduch; u teploměrů pracujících s nasycenými parami se používá methylchlorid, kysličník siřičitý, ethyléter, etanol, toulén; u kapalinových teploměrů rtuť, xylén a metanol.

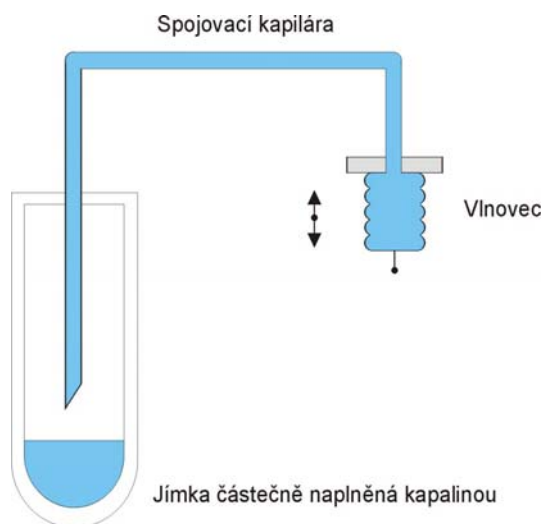
Protože tlaky v teploměru jsou poměrně velké, nádobka s teploměrnou látkou bývá kovová, nejčastěji ocelová nebo bronzová. Výhodou tlakových teploměrů je jejich linearita v širokém rozsahu a velká síla výstupu, využitelná přímo k regulačním účelům. Nevýhodou je potřeba kompenzace. Jsou jednoduché, mechanicky odolné, mohou se použít i pro dálkové měření, registraci a regulaci teplot [2].



Obr. č. 2 Tlakový teploměr [14]

3.1.2 Teploměry tenzní

Využívají závislosti tenze par na teplotě. Jsou přesnější, citlivější a liší se tím, že mají jímku vyplněnou kapalinou jen částečně. Teploměrnou látku tvoří lehce odpařitelné látky, přičemž sytá pára vyplňuje zbytek jímky a kapiláru až po deformační manometr. Náplní bývá toulén, benzen, aceton, líh, propan, butan, methylchlorid atd. Teplotní rozsah je od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

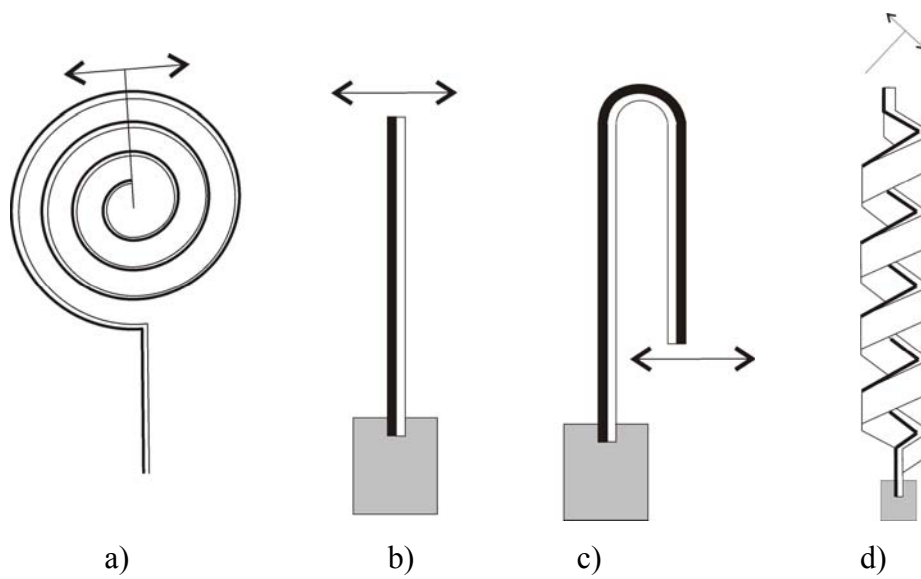


Obr. č. 3 Schéma tenzního teploměru [3]

3.1.3 Teploměry bimetalové

Tyto teploměry využívají délkové roztažnosti kovů, resp. rozdílného teplotního součinitele roztažnosti. Teplotní rozsah je od 0 °C do +900 °C.

Bimetalické teploměry jsou citlivější. Tvoří je dva rozdílné kovové pásy (s různou délkovou roztažností, např. kombinace invaru a mědi), které jsou spolu po délce svařeny, nebo jinak spojeny. Při ohřátí se kov s větší teplotní roztažností ohne na stranu kovu s menší teplotní roztažností. Průhyb je přibližně úměrný druhé mocnině délky a nepřímo úměrný tloušťce pásu. Pohyb volného konce pásu se převádí opět na ukazatel nebo ovládání regulátoru apod. Tvar bimetalového pásu může být spirálový, plochý, tvar U nebo šroubovice (viz. obrázek č. 4). Tvarování bimetalového pásu do šroubovice nebo spirály zvyšuje citlivost čidla.



Obr. č. 4 Druhy provedení bimetalických elementů:

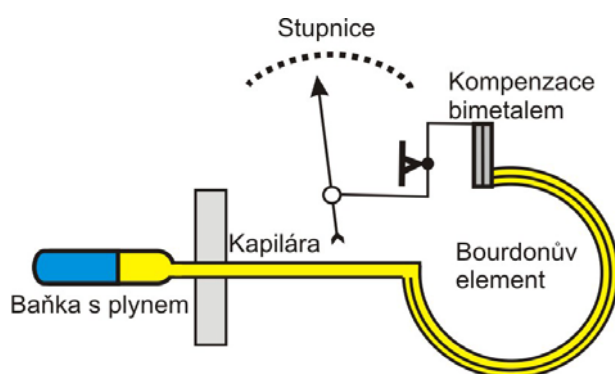
- a) spirálový
- b) plochý
- c) tvar U
- d) šroubovice [2]



Obr. č. 5 Tyčový teploměr bimetalický [13]

3.1.4 Teploměry plynové

Plynové teploměry jsou principálně shodné s teploměry tlakovými. Jejich náplní je nejčastěji inertní plyn jako je dusík, hélium, neon apod. Využívají buď objemové roztažnosti, anebo pracují s konstantním objemem s využitím stavové rovnice. Teploměrná nádobka má malý obsah přibližně okolo 1 cm^3 a délka kapiláry může být až 100 mm. Jsou vhodné pro regulační systémy. Nevýhodou je malý přírůstek tlaku v závislosti na změně teploty. Teplotní rozsah je od $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [2].



Obr. č. 7 Schéma plynového teploměru [5]

3.2 Teploměry elektrické

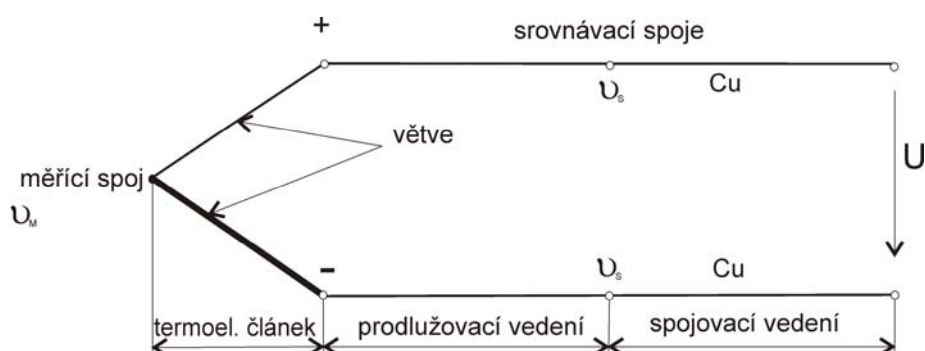
Mezi elektrické teploměry řadíme ty, které pro měření teplot využívají přesné definice teplotní závislosti některé elektrické veličiny na teplotě. Elektrické teploměry jsou díky svému elektrickému výstupu nejrozšířenějšími teploměry v automatizovaných systémech [9].

3.2.1 Teploměry termoelektrické

Jejich základ tvoří termoelektrický článek, což jsou dva materiály elektricky vodivé spojené. K měření teploty se využívá termoelektrický jev (Seebeckův jev) v místě spojení vodičů (v uzavřené smyčce vzniká termoelektrické napětí). U každého z nich

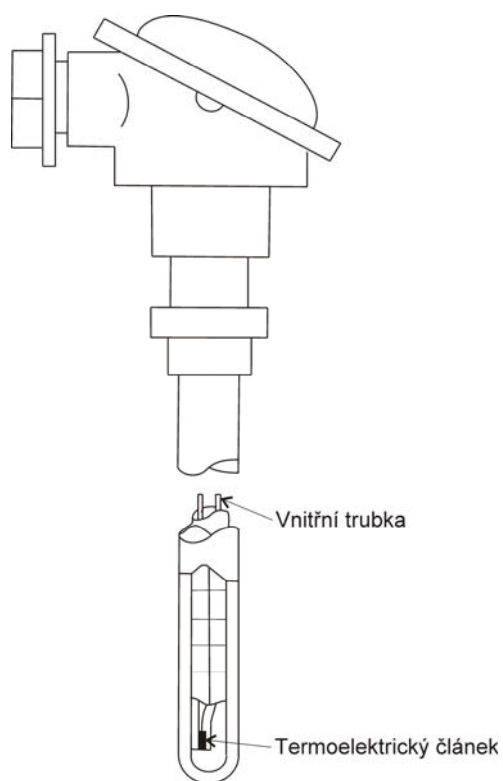
totiž stejná změna teploty odpovídá jiné změně odporu. Teplotní rozsah je od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+2\,800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejjednodušší uspořádání senzoru je na obrázku č. 8. Obvod je složený ze dvou rozdílných materiálů, které jsou spojeny na obou koncích. Jeden spoj se nazývá měřicí a druhý srovnávací.

Termoelektrický senzor pracuje jako zdroj napětí, jehož velikost závisí na použitém materiálu a na rozdílné teplotě obou spojů. Aby senzor plnil svoji funkci, je nutné, aby teplota srovnávacího spoje byla konstantní, nebo známá.

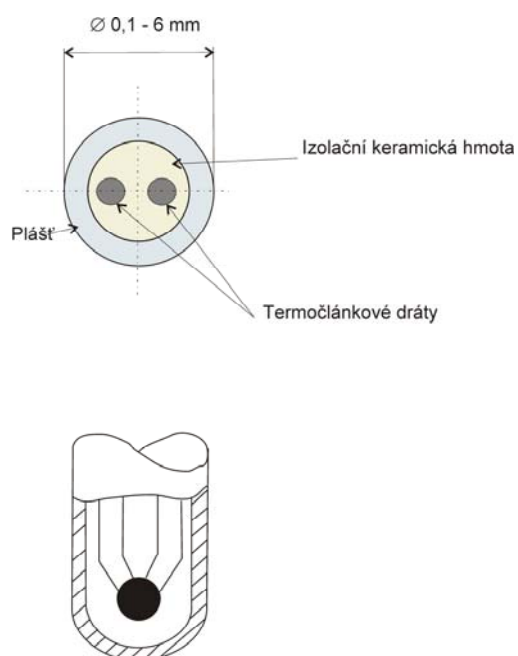


Obr. č. 8 Názvosloví měřicího řetězce s termoelektrickým článkem, T_M – měřená teplota, T_S – srovnávací teplota, Cu vedení [1]

V praxi mezi nejpoužívanější termoelektrické teploměry patří teploměr tyčového provedení (viz. obr. č. 9).



Obr. č. 9 Tyčový termoelektrický teploměr [1]

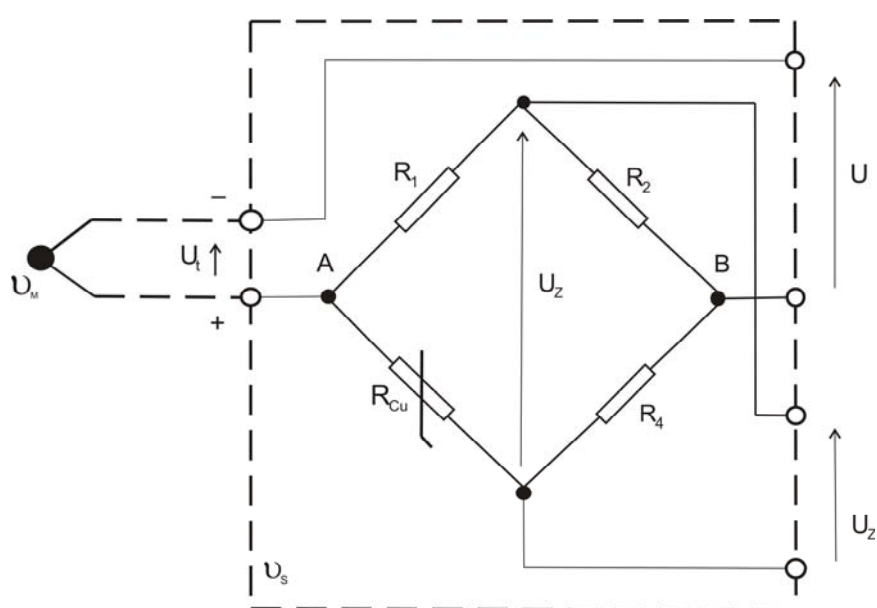


Obr. č. 10 Provedení plášťového termoelektrického článku s izolovaným měřícím spojem [1]

Obvody s termoelektrickými senzory

Kompenzační krabice

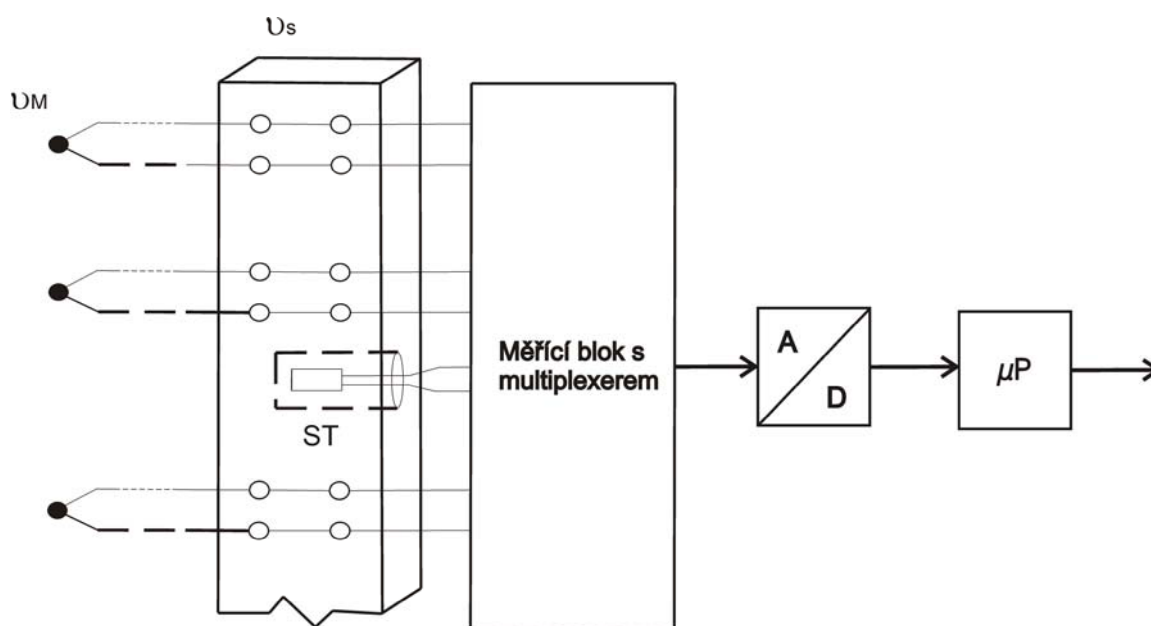
Základ tvoří sériové spojení termočlánku a odporového můstku. V jedné větvi můstku je teplotně závislý odpor R_{Cu} . Výstupní napětí můstku se superponuje k napětí termočlánku. U_Z je kompenzační napětí, které je úměrné odchylce teploty srovnávacího spoje.



Obr. č. 11 Kompenzační krabice, R_{Cu} – teplotně závislý odpor, ϑ_M – měřená teplota, ϑ_S – srovnávací teplota, U – korigovaná hodnota napětí pro srovnávací teplotu, U_Z – kompenzační napětí [1]

Izotermická svorkovnice

Pro určení teploty svorkovnice používáme odporový nebo polovodičový senzor teploty ST. Při každém zjištění teploty ze všech měřicích míst se korekce na změny teploty srovnávacích spojů vyhodnotí číselově. Teplotní kompenzace je zde řešena softwarově pomocí počítače. Izotermická svorkovnice se používá u číselných měřicích a řídicích systémů.

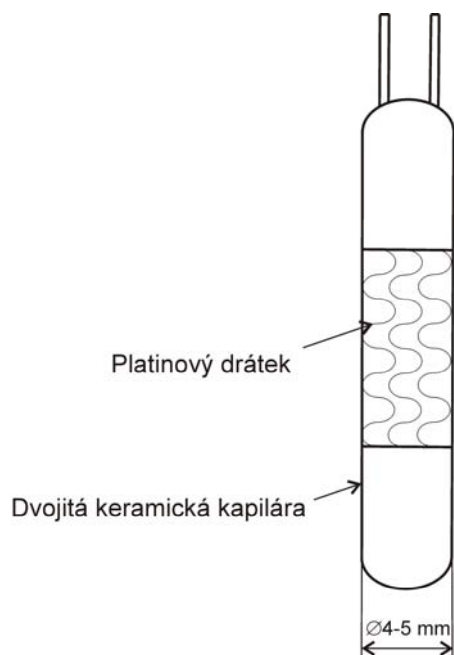


Obr. č. 12 Izotermická svorkovnice, ST – polovodičový senzor teploty, μP – měřicí systém řízený mikroprocesorem, A/D převodník, měřicí blok s multiplexerem – mnohopolohový přepínač: zajišťuje sériové zpracování informací z jednotlivých měřicích míst [1]

3.2.2 Teploměry odporové kovové

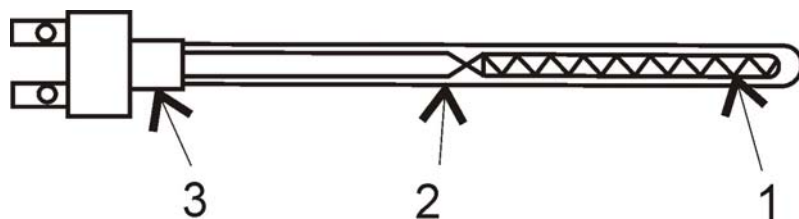
Principem odporových kovových teploměrů je teplotní závislost odporu kovu na teplotě. Odporový teploměr je tvořen kovovým drátkem, svinutým do spirály a zataveným do keramického tělíska, popřípadě navinutým na slídové destičce, a to tak, aby drát mohl dilatovat a nepodléhal mechanickému napětí (viz. obrázek 13). Měřicí odpor, tvořící základní konstrukční část teploměru, se vyrábí drátkovou, tenkovrstvou a tlustovrstvou

technologií. Nejčastěji používaným kovem pro tyto teploměry je platina díky své teplotní a chemické stálosti. Pro nižší rozsahy teplot se používá nikl, měď, molybdén apod. Odporové kovové teploměry se používají pro měření v provozu, ale i v laboratořích jako etalon. Teplotní rozsah je od $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].



Obr. č. 13 Drátkový platinový měřící odpor [6]

Na obrázku č. 14 je vnitřní část odporového kovového teploměru. Senzor bývá uložen v kovovém plášti, ve kterém je uloženo vedení na svorkovnici. Pro větší bezpečnost bývá plášť uložen v ochranné trubici. Svorkovnice je uložena v ochranné hlavici.

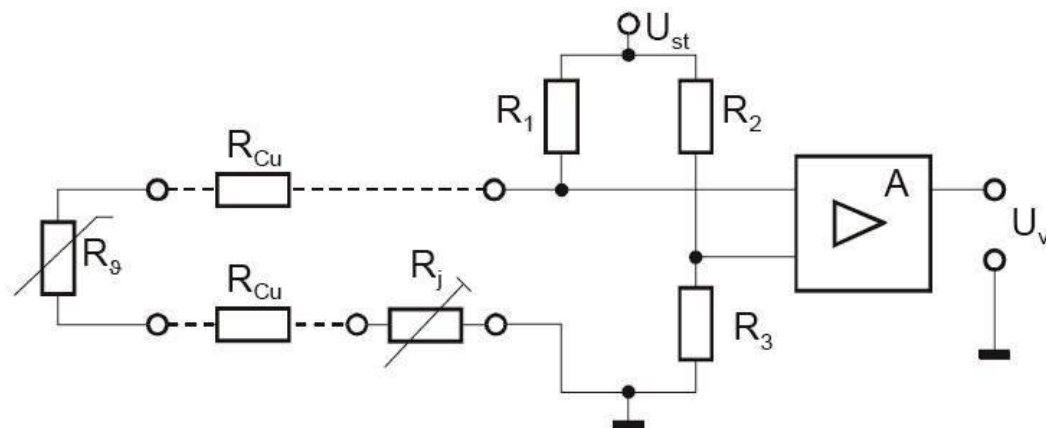


Obr. č. 14 Odporový kovový teploměr – plášťová sonda, 1 – odporové čidlo, 2 – plášť, 3 – svorkovnice [7]

Obvody s odporovými senzory

Dvou vodičové můstkové připojení odporového senzoru teploty

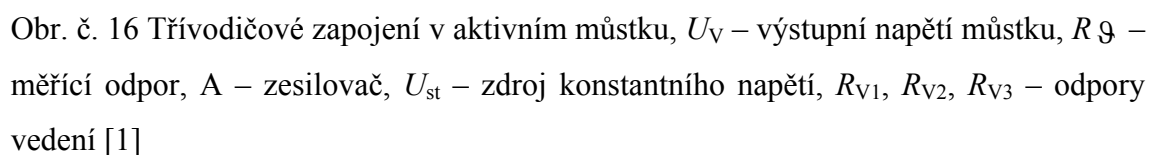
Vliv odporu v přívodu R_{Cu} je kompenzován justačním odporem R_j . Justační odpor zároveň slouží k přesné korekci měřících rozsahů. Odpory přívodů R_{Cu} jsou převážně závislé na teplotě, a to představuje chybu v měření. Vliv teploty na přívodních vodičích se kompenzuje pomocí tří nebo čtyř vodičového zapojení.



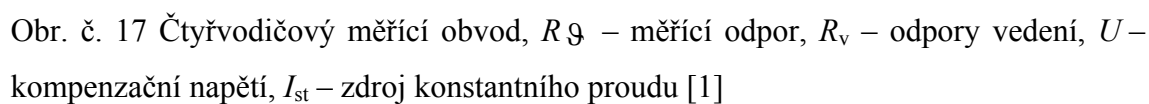
Obr. č. 15 Dvou vodičové můstkové připojení odporového senzoru teploty, R_j – justační (srovnávací) odpor, R_{Cu} – odpory přívodů, R_g – měřící odpor, A – zesilovač, U_v – výstupní napětí, U_{st} – zdroj konstantního napětí [1]

Třívodičové zapojení odporového senzoru teploty v aktivním můstku

V současnosti se toto zapojení pro vyhodnocování odporových senzorů teploty využívá nejvíce. Zapojení je v aktivním můstku, který je dále zapojen v síti operačního zesilovače (viz. obrázek 16).



Zapojení eliminuje vliv odporu přírodních vodičů. Zesilovač má velký vstupní odpor. Měření je podle Ohmova zákona a vyhodnocuje se spád napětí na měřicím odporu při konstantním napájecím proudu. Nulová poloha se nastavuje změnou velikosti kompenzačního napětí.



3.2.3 Polovodičové odporové senzory teploty

Polovodičové odporové senzory využívají podobně jako kovové odporové senzory teplotní závislost odporu na teplotě [1]. Polovodičové odporové senzory můžeme rozdělit na:

- NTC termistory (negastory);
- PTC termistory (pozistory);
- monokrystalické odporové senzory.

NTC termistory

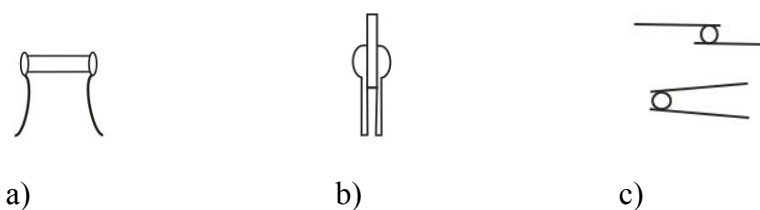
Jejich hodnota elektrického odporu klesá se vzrůstající teplotou, mají záporný teplotní součinitel. Vyrábějí se práškovou technologií ze směsi oxidů kovů ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ apod.). Vylisované senzory se zpevňují slinováním za vysokých teplot. Teplotní rozsahy se pohybují od $-50\text{ }^\circ\text{C}$ do $+150\text{ }^\circ\text{C}$. Používají se pro méně náročné aplikace, např. dvoustavové regulace [1].

PTC termistory

U těchto termistorů hodnota elektrického odporu roste se vzrůstající teplotou. Vyrábějí se z polykrytalické feroelektrické keramiky, např. BaTiO_3 (titaničitan barnatý). Obvykle se používají jako signalizace při překročení maximální přípustné teploty. Teplotní rozsahy se pohybují od $-60\text{ }^\circ\text{C}$ do $+180\text{ }^\circ\text{C}$ [1].

Monokrystalické křemíkové senzory

Jsou složeny z nevlastního polovodiče typu N (s dominantní elektronovou vodivostí). Materiály používanými pro výrobu monokrystalických křemíkových senzorů jsou především germanium, křemík, galium a arzenid. Teplotní rozsahy se pohybují od $-50\text{ }^\circ\text{C}$ do $+150\text{ }^\circ\text{C}$ [1].



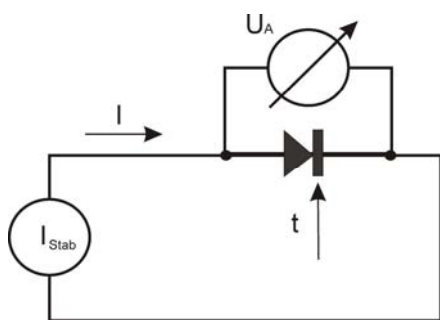
Obr. č. 18 Provedení polovodičových odporových senzorů:

- a) válečkový
- b) diskový
- c) perličkový [9]

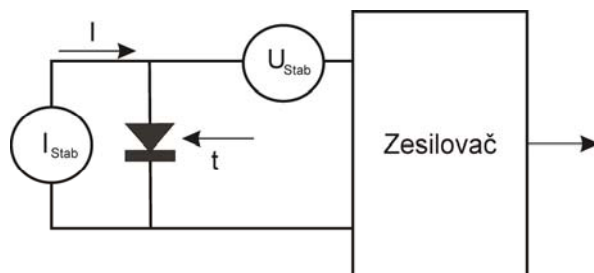
3.2.4 Diodové senzory teploty a integrované senzory teploty

Tyto senzory teploty využívají změny vlastností PN přechodu s teplotou. Pro jejich výrobu se používá germaniových diod, křemíkových diod nebo tranzistoru. Jsou časově stálé, mají velmi dobré dynamické vlastnosti a lineární charakteristiku. Germaniové diody se používají převážně k měření nízkých teplot. Pro teploty v rozmezí $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ se používají křemíkové diody [3].

Měřicí obvod diodového teploměru



Obr. č. 19 Princip měřicího obvodu diodového teploměru [3]

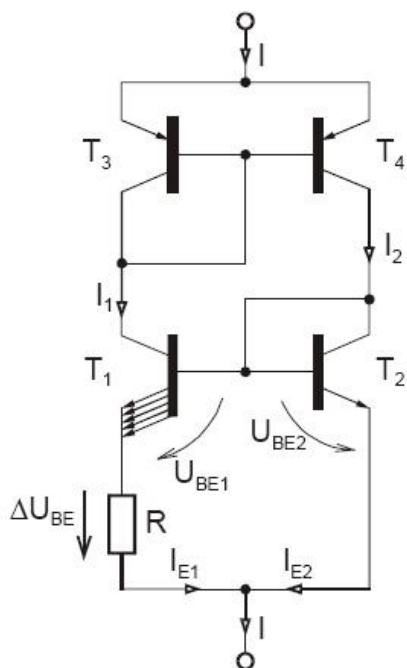


Obr. č. 20 Schéma měřícího obvodu diodového teploměru [3]

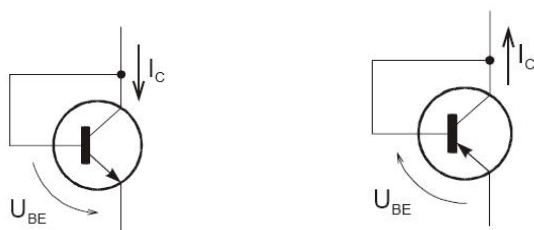
Měřící obvod podle obrázku č. 20 musí být vybaven stabilizovaným zdrojem I_{stab} , který zajišťuje napájení konstantním proudem I , jenž protéká přes PN přechod v propustném směru. Další zdroj stabilizovaného napětí U_{stab} slouží k posunutí počátku rozsahu o napětí U_0 [3].

Integrované monolitické PN senzory teploty

Základem senzoru je vlastní PN přechod a elektronický převodník tvořící jediný monolitický obvod. Obvody jsou konstruovány s napěťovým či proudovým výstupem. Výstup je lineární funkcí teploty – typicky $1\mu V/K$. Diodových a integrovaných senzorů se často využívá k měření a následné kompenzaci vlivu teploty na výstupní signál u inteligentních převodníků pro monitorování různých technologických veličin. Na obrázcích č. 21 a č. 22 jsou schémata zapojení integrovaného PN senzoru, resp. tranzistorové diody [3].



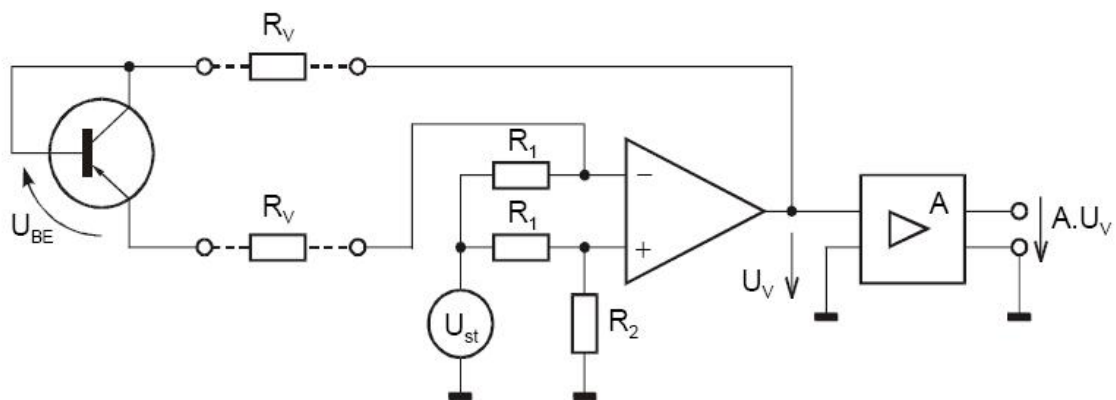
Obr. č. 21 Integrovaný PN senzor [1]



Obr. č. 22 Tranzistorová dioda [1]

Na obrázku č.

23 je uveden příklad zapojení jednoduchého dvouvodičového obvodu s PN přechodem v aktivním můstku.



Obr. č. 23 Aktivní můstek s tranzistorovou diodou, U_V – výstupní napětí můstku, A – zesilovač, U_{st} – zdroj konstantního napětí, R_V – odpory vedení, U_{BE} – napětí mezi bází a emitorem [1]

3.3 Teploměry speciální

Teploměr akustický

Akustické teploměry jsou založeny na teplotní změně rychlosti zvuku v ideálním plynu. Používají se v metrologii [1].

Teploměr šumový

Je založen na generování šumového napětí náhodným pohybem elektronů v odporu. Používají se k měření velmi nízkých teplot [1].

Teploměrná tělíska

Pro tyto indikátory se využívá keramické hmoty s definovaným bodem měknutí. Jsou vyrobená ze slitiny (tvaru válce případně hranolu) s přesně udanou prodlevou tání, jejíž dosažení je doprovázeno rychlým roztavením tělíska [3].

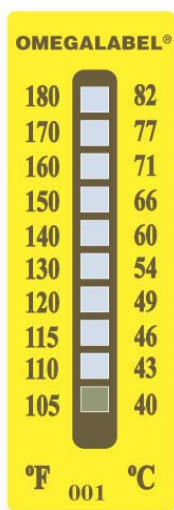
Žároměrky

Základem je keramická hmota tvarovaná do trojbokého jehlanu. Tato hmota je složena z přesně definovaných směsí, které se v závislosti na vzrůstající teplotě mění a tím tvoří postupnou řadu. Při zahřátí se sleduje jejich deformace. Teplota, kterou žároměrka signalizuje, je definována jako okamžik, kdy se špička dotkne podložky. Žároměrky se mohou používat k regulaci teplot v pecích. Nejčastěji používanými jsou Segerovy žároměrky. Teplotní rozsah je obvykle mezi +600 °C až +2 000 °C [20].

Teploměrné barvy

Tyto indikátory jsou určeny k přibližnému stanovení teploty (povrchu) těles. Při určité teplotě dojde ke změně vzhledu indikátoru. Indikátory mohou být založeny na tavném principu nebo na vratné či nevratné chemické reakci. Jsou ve formě teploměrných tablet, tužek, nátěrů nebo nálepek.

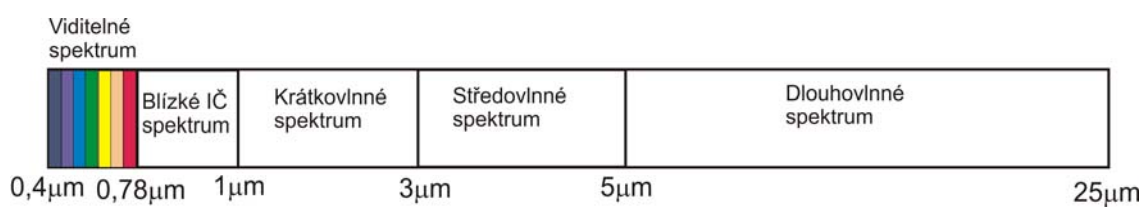
Barevné teplotní indikátory jsou nálepky vyrobené z fólie s naneseným terčíkem z nátěru obsahujícího teplotně citlivé pigmenty. Při dosažení teploty zvratu se v důsledku chemické reakce změní spektrum odrazivosti nátěru a tím i jeho barva. Teplota, při které dojde ke změně barvy je dána složením nátěru a nálepka má na sobě tuto teplotu vyznačenu. Většinou je na nálepce několik terčíků s různou teplotou zvratu, teplota se zjistí podle čísla na příslušném terčíku. Základními prvky pro výrobu jsou např. Hg, Ag, Cu, Pb, As, Sb apod. Rozsah teplot se obvykle pohybuje mezi +40 °C až +1 350 °C [19].



Obr. č. 24 Teploměrná nálepka [3]

4 Bezdotykové měření teploty

Princip bezdotykového měření (tzv. pyrometrie) teplot spočívá v měření povrchové teploty těles na základě elektromagnetického záření mezi tělesem a senzorem záření v rozmezí vlnové délky od $0,4\text{ }\mu\text{m}$ do $25\text{ }\mu\text{m}$. Uvedený rozsah pokrývá měření teploty od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dle členění elektromagnetického záření spadá oblast od $0,4\text{ }\mu\text{m}$ do $0,78\text{ }\mu\text{m}$ do viditelného spektra, od $0,78\text{ }\mu\text{m}$ do $1\text{ }\mu\text{m}$ do blízkého infračerveného spektra, od $1\text{ }\mu\text{m}$ do $3\text{ }\mu\text{m}$ do krátkovlnného infračerveného spektra, od $3\text{ }\mu\text{m}$ do $5\text{ }\mu\text{m}$ do středovlnného spektra a od $5\text{ }\mu\text{m}$ do $25\text{ }\mu\text{m}$ do dlouhovlnného spektra. Bezdotykové teploměry se uplatňují tam, kde není možné měřit teplotu přímým dotykem čidla teploměru s měřeným objektem [1].



Obr. č. 25 Schéma elektromagnetického spektra [5]

Výhody bezdotykového měření teplot:

- a) zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt;
- b) možnost měření rotujících nebo pohybujících se těles;
- c) možnost měření rychlých teplotních změn;
- d) lze snímat a zobrazovat celé povrchy těles (termovize).

Nevýhody bezdotykového měření teplot:

- a) chyba způsobená nejistotou stanovení emisivity měřeného tělesa;
- b) chyba způsobená prostupností prostředí;
- c) chyba způsobená odraženým zářením z okolního prostředí.

4.1 Pyrometry

4.1.1 Tepelné senzory infračerveného záření

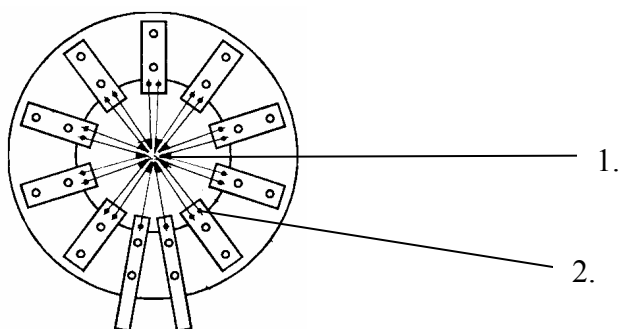
U tepelných senzorů dochází k absorpci optického záření v širokém spektru vlnových délek. Jako absorbní materiál se využívá materiál (černý absorbér), který je nanesen na povrchu senzoru.

Termočláňkové baterie

Jejich senzory přímo reagují na tepelné vyzařování části objektu ve směru, na který jsou namířeny. Základ tvoří skupina termočláňků, jejichž aktivní konce jsou umístěny do jednoho místa a jsou pokryty pro infračervené světlo pohlcujícím černě zbarveným materiálem. Ten převádí dopadající záření na teplo měřené termočláňky. Toto záření prochází okénkem v pouzdru senzoru, které zároveň pracuje jako optický filtr a vymezuje i snímanou oblast. Výstupem senzoru je pak napětí úměrné dopadající intenzitě záření a tím i teplotě měřeného objektu.



Obr. č. 26 Termočláňková baterie [3]



Obr. č. 27 Provedení senzoru s termočláňkovou baterií, 1. měřicí spoje termočláňků, 2. srovnávací spoje termočláňků [3]

Bolometry

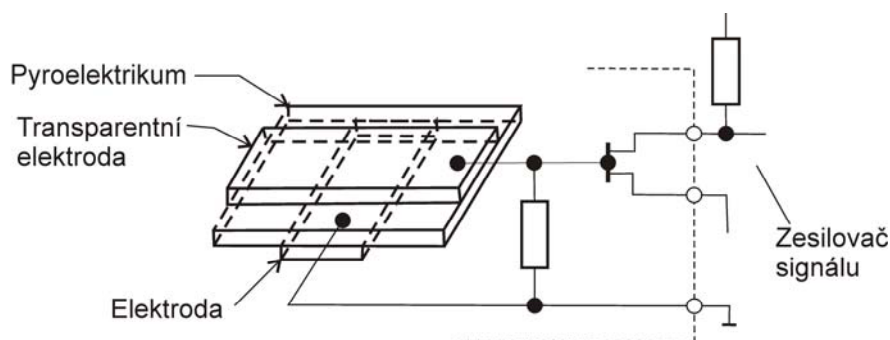
Využívají principu odporových senzorů teploty. Elektrický odpor bolometru se mění v závislosti na jeho teplotě, která však závisí na množství absorbovaného dopadajícího infračerveného záření. Množství dopadajícího záření může být určeno ze změn odporu bolometru. Aby byla změna teploty bolometru úměrná pouze absorbovanému infračervenému záření, musí být vlastní bolometr tepelně izolován od svého okolí.



Obr. č. 28 Bolometr [5]

Pyroelektrické senzory

Jsou založeny na pyroelektrickém principu, tzn. změna spontánní polarizace pyroelektrika (např. keramické látky na bázi titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého) při změně teploty. Při tomto jevu dochází ke změně orientace polarizovaných krystalů. Tato čidla nevyžadují chlazení, obvykle se používají pro nízké teploty. Doba odezvy je velmi malá [ms].



Obr. č. 29 Schéma uspořádání pyroelektrického senzoru [3]

4.1.2 Kvantové senzory infračerveného záření

Kvantové senzory využívají fyzikálních jevů vznikajících při přímé interakci dopadajících fotonů na strukturu senzoru. Tyto senzory jsou polovodičové infračervené fotodiody a fotovodivostní detektory. Pro bezdotykové měření teploty se fotodiody používají obvykle ve fotonapěťovém režimu. Pro vyšší nároky na odstup signálu od šumu je nutné senzory chladit. Kvantové senzory se používají podobně jako bolometry pro termovizní snímání obrazů [18].

4.1.3 Širokopásmové pyrometry

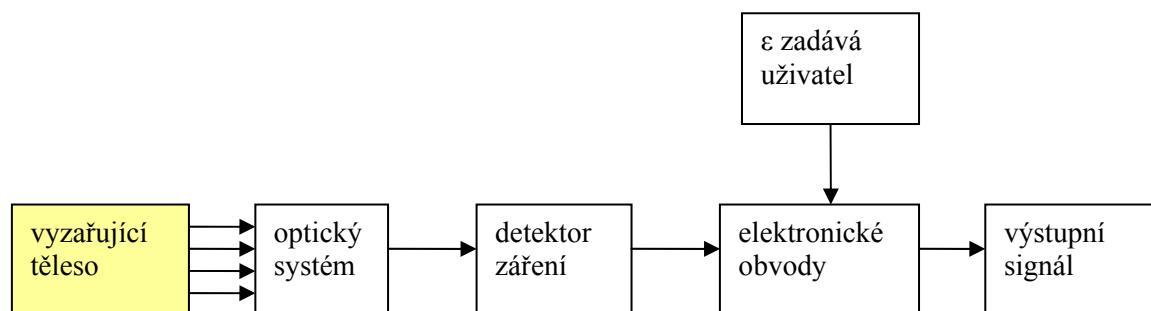
Přístroje se někdy označují jako radiační pyrometry nebo úhrnné pyrometry, protože měří v široké oblasti vyzařovaného teplotního záření. Jsou to přístroje vyhodnocující teplotu přímo dle Stefan-Boltzmanova zákona, tj. teoreticky pracují v celém spektru vlnových délek od $\lambda = 0$ do $\lambda = \infty$. Pro širokopásmové pyrometry lze využívat pouze tepelné senzory, neboť kvantové senzory jsou spektrálně omezené. Při měření teploty je důležité, aby měřený povrch překryl celé zorné pole, jinak dochází k hrubým chybám měření. Z měřeného tělesa je optickou soustavou vysílané záření soustředěné do ohniska objektivu event. zrcadla, kde dopadá na termočlánek nebo bolometr. Tyto prvky pak udávají teplotu, která však není skutečná.

K převodu mezi teplotou měřenou a skutečnou slouží vztah s emisním součinitelem:

$$T_s = \frac{T_p}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \quad [\text{K}] \quad (7)$$

kde	$T_s [\text{K}]$	skutečná teplota
	$T_p [\text{K}]$	teplota udaná pyrometrem
	$\varepsilon [-]$	poměrná emise úhrnného záření

Rozsah použití je přibližně od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$, ve speciálních případech však od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+5\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výhodou je jejich použití pro bezdotyková měření při relativně nízkých teplotách.



Obr. č. 30 Blokové schéma pyrometru [3]

4.1.4 Jednopásmové pyrometry

Jednopásmové pyrometry pracují v relativně úzkém rozmezí vlnových délek, přičemž volba tohoto rozmezí souvisí s požadovaným účelem měření. Požadované pásmo vlnových délek se vymezuje aplikací vhodné optiky, optického filtru a vhodnou spektrální citlivostí čidla. Jako čidla pásmových pyrometrů se používá fotonek, fotočlánků, fotodiod, fototranzistorů a fotoodporů. Přístroj pracuje kompenzační měřicí metodou, při níž se porovnává záře měřeného objektu se září srovnávacího zdroje při určité vlnové délce, vymezené barevným filtrem. Mezi jednopásmové pyrometry můžeme zařadit např. jasové a barvové pyrometry [3].

Jasový pyrometr

Jasové pyrometry využívají k měření množství tepelné energie, vyzářené v úzkém pásmu vlnových délek. Teplota se měří tak, že se jas měřeného objektu porovnává s jasnem porovnávacího zdroje pyrometru a nastavuje se tak dlouho, dokud vlákno žárovky nezmizí v záření vyzařovaném měřeným objektem. Porovnání obou jasů se provádí buď lidským okem nebo automaticky. Jasové pyrometry při odečítání na stupnici ukáží teplotu, která odpovídá záření absolutně černého tělesa. Všeobecně bývá odečítaná teplota na stupnici pyrometru nižší, než je skutečná teplota měřeného objektu [3].

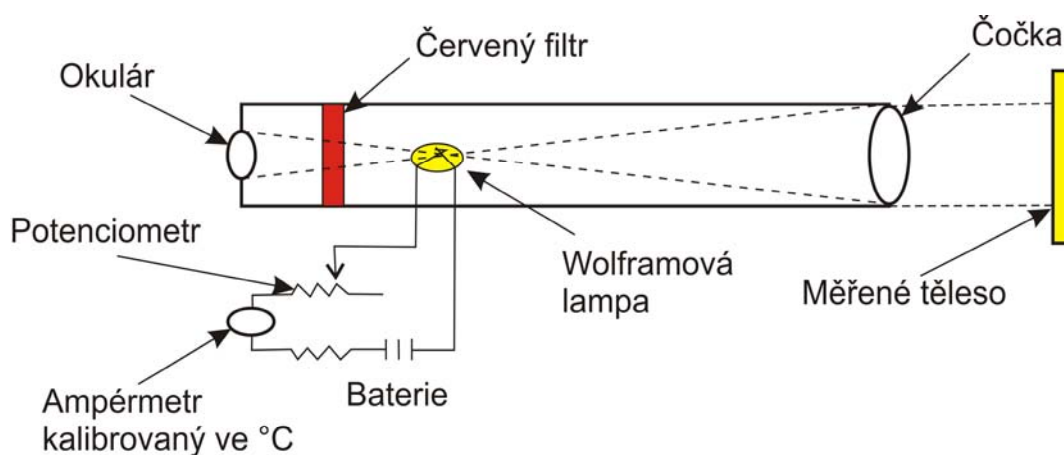
Pro skutečnou teplotu tedy platí vztah:

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_p} + \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \varepsilon_\lambda \quad (8)$$

kde	T_s [K]	skutečná teplota
	T_p [K]	teplota na stupnici jasového pyrometru
	λ [m]	použitá vlnová délka
	$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ [m · K]	druhá vyzařovací konstanta
	ε_λ [–]	spektrální emisivita měřeného objektu

Podle konstrukce se dají jasové pyrometry rozdělit do dvou skupin:

- *přístroje s proměnným jasem* vymezené červeným filtrem. Ukazatelem měřené teploty je zde žhavicí proud žárovky. Přístroje pracují v rozmezí $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ s použitím porovnávacího zdroje (jas pyrometrické žárovky se mění pomocí elektrického obvodu) – pyrometr pracuje nejčastěji s vlnovou délkou $\lambda = 0,65\text{ }\mu\text{m}$, což je oblast v horní citlivosti oka;
- *přístroje se stálým jasem porovnávacího zdroje* (pyrometrická žárovka svítí stálým jasem a mezi ní a dopadající záření se vsouvá šedý filtr s nastavitelnou absorbcí) – posouváním nebo pootáčením šedého klínu měníme intenzitu záření zdroje přicházejícího do okuláru tak dlouho, až splyne s vláknem srovnávací žárovky. Teplota je úměrná posunutí (pootočení) šedého klínu.



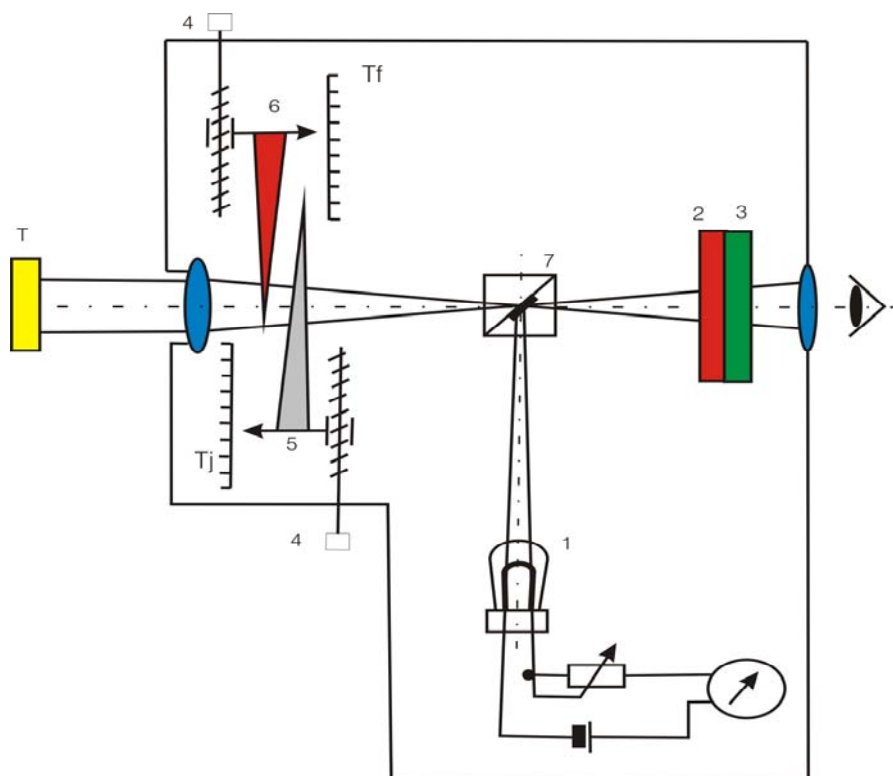
Obr. č. 31 Schéma jasového pyrometru [17]

Barvové pyrometry

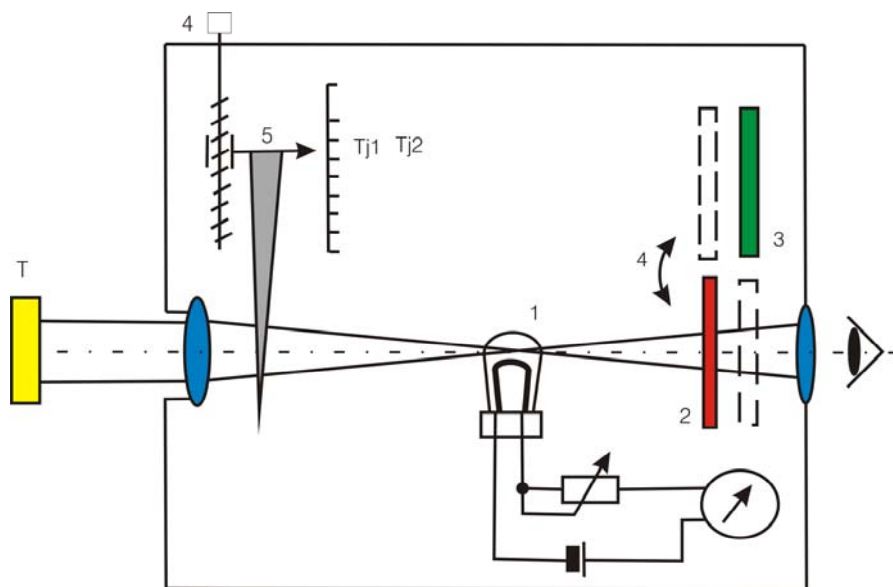
Barvové pyrometry pracují na podobném principu jako pyrometry jasové, avšak nepotřebují přesné udání poměrné spektrální emise ε – stačí interval, ve kterém se nacházejí. Tyto pyrometry jsou zejména vhodné pro zjišťování teploty objektů, u kterých se během měření emisivita mění. Měřicí rozsah barvových pyrometrů bývá od $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8].

Podle konstrukce dělíme tyto pyrometry na:

- *porovnávací* – pracují na základě jasového pyrometru se dvěma pracovními vlnovými délkami. Nejčastěji je to červená $\lambda_1 = 0,65\text{ }\mu\text{m}$ a $\lambda_2 = 0,55\text{ }\mu\text{m}$ (obě vlnové délky jsou doplňkové, což znamená, že se doplňují na bílou barvu);
- *poměrové* – využívající měření dvou intenzit záření při dvou vlnových délkách λ_1, λ_2 . Záření měřeného tělesa jde do přístroje přes objektiv a přes polopropustný hranol se rozdělí na dva rovnoběžné svazky. Oba svazky prochází přes filtry (první filtr je zelený a druhý je červený). Poměr lze stanovit dvěma spektrálními pyrometry, z nichž jeden měří na vlnové délce 1 a druhý na vlnové délce 2. Poměr naměřených intenzit by měl odpovídat barvové teplotě;
- *automatické* – barvový pyrometr rozdělí pomocí hranolů dopadající záření na dvě shodné cesty přes různě barevné filtry. Oba paprsky jsou přerušovány rotující clonou a střídavě dopadají na fotocitlivý prvek v elektronickém měřicím obvodu.



Obr. č. 32 Schéma barvového pyrometru – porovnávací [8]

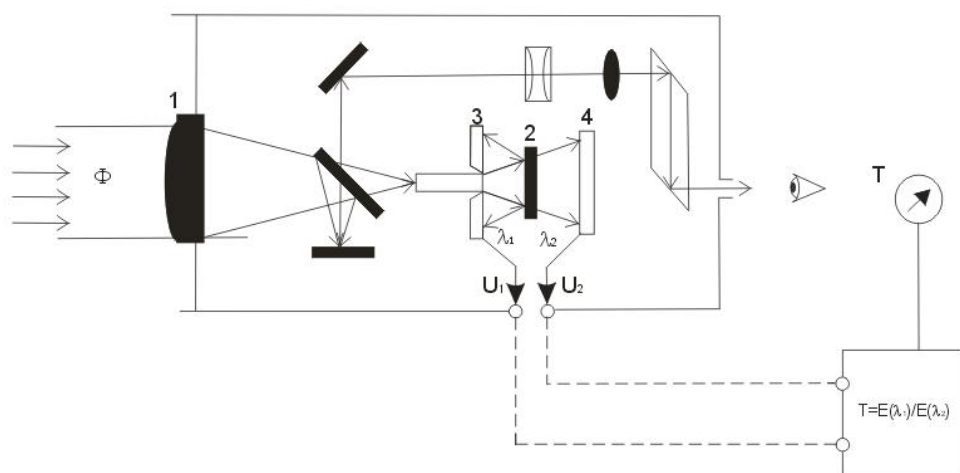


Obr. č. 33 Schéma barvového pyrometru – poměrový

Vysvětlivky obr. č. 32 a 33: T – měřený objekt, 1 – pyrometrická žárovka, 2 – červený filtr, 3 – zelený filtr, 4 – ovládání, 5 – klínový šedý filtr, 6 – klínový červený filtr, 7 – polopropustný hranol, Tf – indikátor barevné teploty, Tj – indikátor jasové teploty [8]

4.1.5 Dvoupásmové pyrometry

Dvoupásmové (poměrové) pyrometry vyhodnocují teplotu na základě poměru dvou září při dvou vlnových délkách λ_1 , λ_2 . Pyrometry jsou kalibrovány při tzv. teplotě spektrálního složení, tj. při teplotě černého tělesa, při níž je poměr září pro dvě vlnové délky stejný jako poměr září u měřeného tělesa při skutečné teplotě. Prakticky existuje celá řada dvoupásmových pyrometrů, pro příklad je uveden následující.



Obr. č. 34 Dvoupásmový pyrometr

Princip: pomocnou optikou (1) se záření soustřeďuje na polopropustný filtr (2), který zachová pouze tepelné záření o vlnových délkách λ_1 , λ_2 (zbytek je pohlcen). Zároveň toto záření filtr oddělí, takže může být detekováno samostatnými detektory (3, 4). Tímto vzniknou dva elektrické výstupní signály U_1 , U_2 , jejichž poměrem je měřená teplota [3].

4.2 Termovizní systémy – termovize

Termovizní systémy jsou systémy pro bezdotykové měření teplotních polí. Obvykle se tyto systémy nazývají jako termovize. Je to skupina přístrojů využívající vyzařování objektů v infračervené oblasti spektra. Povrch objektu je sledován speciální kamerou s detektorem infračerveného záření. Teplotní pole se zobrazuje jako termogram v různých barevných odstínech, nebo v odstínech šedé barvy. Rozlišení bývá až 0,2 °C a měřicí rozsah je –30 °C až +1 200 °C [1].

Tyto systémy lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

- bez rozkladu obrazu;
- s rozkladem obrazu.

4.2.1 Bez rozkladu obrazu

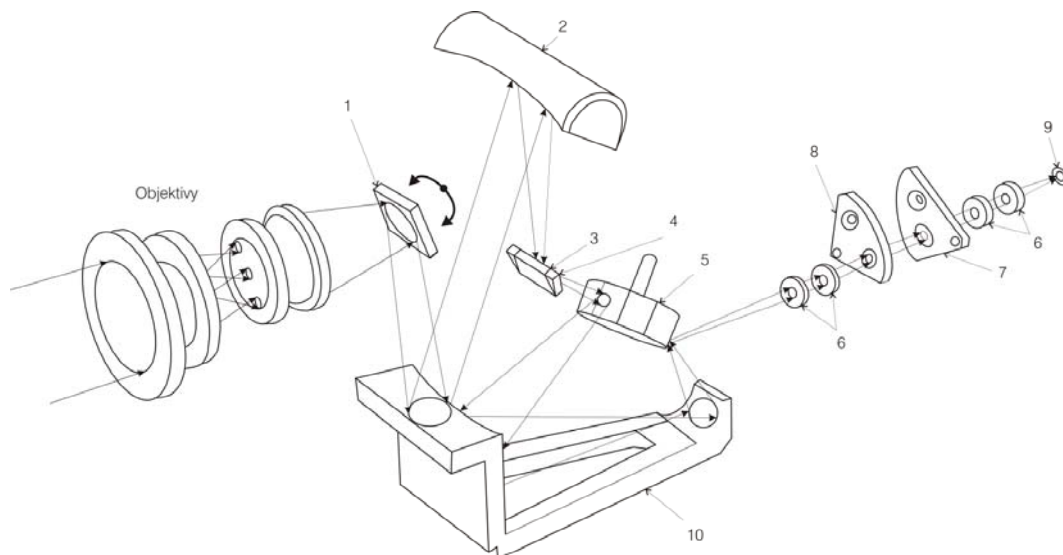
Tyto systémy jsou obrazové měniče, u nichž se tepelný obraz vytvoří optikou na fotokatodě. Ozáření fotokatody způsobí fotoemisi elektronů, jejichž tok je zesílen fotonásobičem a usměrněn na luminiscenční stínítko, kde se vytvoří odpovídající viditelný obraz. Systémy bez rozkladu obrazu fungují do vlnových délek 1 μm [1].

4.2.2 S rozkladem obrazu

S opticko-mechanickým rozkladem obrazu

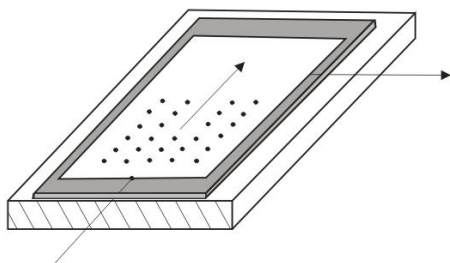
Infračervené záření procházející výměnným objektivem je zaostřeno dalším objektivem na vertikálně kmitající zrcadlo, jehož posláním je vertikální rozklad obrazu. Od vertikálního zrcadla se infračervené záření odráží na první plochu pevného trojitého zrcadla, tzv. tripletu. Odtud je zářivý tok odrážen na asférické zrcadlo a dále potom na rovinné zrcadlo, na jehož stranách jsou zabudovány nízko a vysokoteplotní referenční zdroje záření. Od rovinného zrcadla postupuje zářivý tok na horizontální zrcadlo, které se otáčí rychlostí 24 000 ot/min. a na které také dopadá synchronizovaně záření od obou

referenčních zdrojů. Pohyby vertikálního a horizontálního zrcadla jsou řízeny a současně měřeny prostřednictvím mikroprocesorového bloku kamery. Odražené záření z horizontálního zrcadla dopadá na druhé zrcadlo tripletu, z něhož tok pokračuje na třetí zrcadlo tripletu a pak zpět na horizontální zrcadlo. Takto zpracovaný paprsek toku dále prochází přes čočky, nastavitelnou clonu a filtr na senzor záření.



Obr. č. 35 Princip termovizní kamery s opticko-mechanickým rozkladem obrazu firmy Agema, 1 – kyvné zrcadlo, 2 – asférické zrcadlo, 3 – rovinné zrcadlo, 4 – zdroje referenčního záření, 5 – rotační horizontální zrcadlo, 6 – optika, 7 – filtry, 8 – clony, 9 – detektor, 10 – trojitě zrcadlo (triplet) [1]

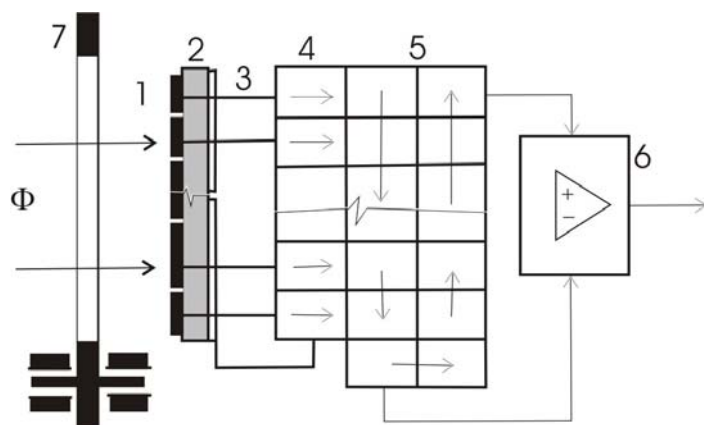
Pro detekci se může použít např. kvantový detektor na bázi telluridu rtuťnokatodemnatého (HgCdTe) na safírové podložce (viz. obrázek č. 35).



Obr. č. 36 Kvantový detektor na bázi HgCdTe [1]

S elektronickým rozkladem obrazu

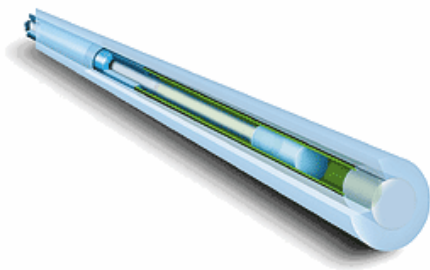
Tyto systémy využívají k zaznamenání a následnému zobrazení teplotního pole buď pyroelektrické senzory, nebo kvantové infračervené senzory.



Obr. č. 37 Princip pyroelektrického CCD řádkového senzoru, 1 – čelní elektroda, 2 – pyroelektrikum, 3 – zadní elektroda, 4 – vstupní obvody CCD, 5 – posuvný registr CCD, 6 – diferenční výstupní obvod, 7 – přerušovač [1]

4.3 Optovláknové snímače teploty

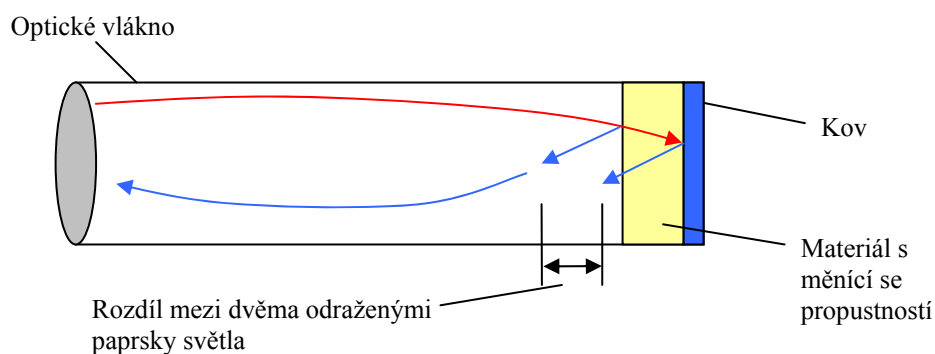
K měření teploty se využívá světlo, které je bezpečné pro použití v nebezpečných prostorech a navíc je konkrétně vymezena jeho oblast působení a jeho vedení prostřednictvím optického kabelu. Základním principem uvedených senzorů je změna některé z vlastností světla, vysílaného zdrojem do optického vlákna, vlivem působící změny teploty v měřeném místě. Měnit se může amplituda světla, jeho fáze, vlnová délka a tím i spektrum světla nebo časové zpoždění vysílaných impulsů. Oblasti použití jsou např. měření teploty v nebezpečných prostředích (atomová elektrárna), měření teploty ve výbušných a vznětlivých prostředích (uhelné elektrárny, teplárny), měření na velké vzdálenosti od vyhodnocovací elektroniky (stovky metrů až po kilometry), monitorování teploty mechanických částí strojů, např. letadel.



Obr. č. 38 Optovláknový snímač [5]

Parametry vysílaného světla se mění dvěma základními způsoby:

- *přímou změnou parametrů optického vlákna vlivem změny teploty* – využívá se parazitních vlastností vláken, např. změna rychlosti šíření světla, disperze, optický útlum. Používá se k plošnému měření teploty;
- *nepřímou změnou vlastností materiálu na konci optického vlákna* – nejčastěji se zde využívá změny odrazu nebo rozptylu světla na odrazné plošce na konci optického kabelu, optický kabel se tedy využívá jen pro přenos světla. Vhodné pro bodové místní měření teploty.



Obr. č. 39 Optovláknový senzor teploty se změnou odrazu světla na konci vlákna [12]

5 Závěr

V mé bakalářské práci byl poskytnut přehled v oblasti měření teploty a její stanovení pomocí teploměrů a přístrojů. V oblasti dotykového měření největším zdokonalením prošly elektrické teploměry, které se v dnešních dobách používají prakticky všude, ať už v laboratorních podmínkách či v průmyslu nebo v běžném provozu. Jejich rozsah je z dotykových teploměrů největší, zvláště pak u termočlánků, kde se pohybují rozsahy od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+2\text{ }800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

U bezdotykového měření jsou stále ve větší oblibě infračervené pyrometry a termovize. Jejich hlavní výhodou je, že umožňují měřit teplotu v širokém rozmezí, bezdotykově, v reálném čase a na těžko přístupných místech. Neopomenutelnou vlastností je, že jejich doba reakce je kratší než 1 ms. S infračervenými pyrometry a termovizemi se dnes setkáme téměř všude, ve strojním, chemickém, farmaceutickém, potravinářském průmyslu apod. U přístrojů pro bezdotykové měření je nutné mít určitou znalost jejich správného použití při měření teploty.

Dále bych chtěl zmínit inteligentní snímače teploty, kde došlo k vývoji nových čidel na bázi křemíku. To umožnilo integraci měřicích převodníků s obvody pro zpracování signálu do jednoduchého a kompaktního pouzdra se standardním napájením a malou spotřebou energie. V praxi se od sebe liší pouze uspořádáním a vybavením.

Tato bakalářská práce může být použita jako vstupní materiál do problematiky měření.

6 Použitá literatura

- [1] Senzory a měřicí obvody, S. Ďado, M. Kriedl, ČVUT, 1996
- [2] Laboratorní cvičení z TZB, K. Mauer, B. Pelikán, J. Šejnoha, J. Štěchovský, SNTL, 1983
- [3] Internetové stránky VŠCHT: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>
- [4] Internetové stránky: <http://home.howstuffworks.com>
- [5] Internetové stránky: www.automatizace.cz
- [6] Internetové stránky: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>
Diagnostika a měření na textilních strojích, Ing. Miroslav Novák, Ph.D.
- [7] Internetové stránky: www.tzb-info.cz
- [8] Internetové stránky: www.kod.tul.cz, Principy snímačů teploty a možnosti ich aplikácie v textile - Vargová Helena
- [9] Internetové stránky: www.vutbr.cz, Technická měření, Ing. F. Vdoleček, CSc.
- [10] Internetové stránky: www.autnt.fme.vutbr.cz
- [11] Internetové stránky: www.agema.cz
- [12] Internetové stránky: Měření teploty, Jan Novák,
http://autnt.fme.vutbr.cz/SZZ/2006/BP_Novak.pdf
- [13] Internetové stránky: <http://marcomplet.cz/index.php>
- [14] Internetové stránky: www.marsystems.cz
- [15] Internetové stránky: <http://www.its-90.com/its-90.html>
- [16] Internetové stránky: <http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/mmr/v031-Teplota.htm>
- [17] Internetové stránky: http://www.newport.cz/techinfo/PDF/techinfo_1.pdf,
Zpravodaj pro měření a regulaci, bezdotykové měření teploty
- [18] Internetové stránky: <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1149-Mereni-teploty-v-prumyslu.html>
- [19] Internetové stránky: <http://vetrani.tzb-info.cz>
- [20] Internetové stránky: <http://firing.wz.cz/zaromer.htm>

Firemní materiály: Omega, Wika, Greisinger, Fluke, Micronix, Agema.

Pozn. Internetové stránky 2008.

7 Přílohy

CD obsahující:

1. Bakalářskou práci s názvem: Přístroje pro měření teplot.
2. Přehled senzorů a přístrojů pro měření teplot.