

# Měření neelektrických veličin

## Část I

Studijní opora

Ing. Libor Kupka, Ph.D.



# Měření neelektrických veličin

## Téma 1: Úvod do předmětu

### Studijní cíl

Principy převodu neelektrických veličin na elektrický signál, základní vlastnosti a rozdělení senzorů neelektrických veličin, popis měřicího řetězce a jeho nejdůležitějších částí, příklady standardních měřicích řetězců.

### Doba nutná k nastudování

2 hodiny

### Klíčová slova

Čidlo, snímač, senzor, převodník, zesilovač, inteligentní senzor, smart senzor, MEMS senzor, měřicí řetězec

## 1 Úvod do měření neelektrických veličin

Galileo Galilei: **Měřte vše měřitelné, a neměřitelné učíte měřitelným.**

Měření představuje souhrn činností vedoucích k určení hodnoty nějaké veličiny blízké skutečné (správné) hodnotě. Skutečná hodnota není známá a nelze jí zcela přesně určit. Elektrická měření se dělí na dva základní obory:

- měření elektrických veličin (napětí, proud, odpor, frekvence, fázový posuv);
- měření neelektrických veličin (teplota, výchylka, síla, tlak, zrychlení, otáčky, průtok) s využitím elektrických měřicích prostředků.

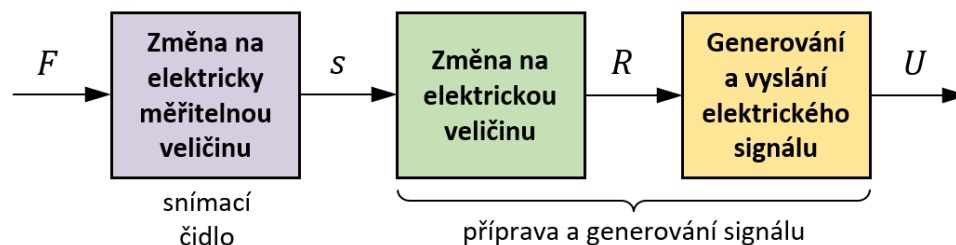
Mezi základní měřicí prostředky lze zařadit následující prvky. 1. míra (měřidlo), které slouží k reprodukci hodnoty měřené veličiny. 2. měřicí přístroj, který je určen k převodu měřené veličiny na signál nesoucí informaci o její hodnotě. 3. měřicí převodník, který slouží k transformaci vstupní veličiny (elektrické nebo neelektrické) na výstupní veličinu (typicky elektrickou). 4. měřicí řetězec, který je tvořen několika měřicími členy, jimiž prochází měřený signál. 5. snímač (senzor) představující první člen měřicího řetězce, na nějž měřená veličina působí. 6. signál představující časový průběh konkrétní veličiny (napětí, proud).

Signál může být analogový (spojitý) nebo číslicový (diskrétní). V případě analogového signálu může fyzikální veličina nabývat libovolných hodnot, obvykle z určitého intervalu. V případě číslicového signálu pak může fyzikální veličina nabývat izolovaných hodnot, obvykle z určitého

rozsahu, resp. diskretního intervalu (např. TTL logika, 0 až 0,8 V se interpretuje jako logická 0, 2 až 5 V jako logická 1, 0,8 až 2 V představuje zakázané pásmo). Obecně lze typ signálu, tj. jeho spojitost nebo diskretnost, rozlišit v amplitudě i v čase.

### 1.1 Základní vlastnosti a rozdělení senzorů neelektrických veličin

Senzor neelektrické veličiny slouží k přímému nebo nepřímému snímání neelektrické veličiny, k čemuž využívá některého z vhodných fyzikálních principů takovým způsobem, aby snímaná veličina byla převedena na veličinu měřitelnou měřicím přístrojem. Představuje tedy funkční prvek na vstupu měřicího řetězce, jehož citlivá část se obvykle označuje jako čidlo nebo snímač. Snímač je jako jediný člen měřicího řetězce v přímém kontaktu s měřeným objektem. Jde o nejdůležitější a zároveň nejslabší článek měřicího řetězce, který bývá jeho nejnákladnější částí. Snímá sledovanou fyzikální veličinu, kterou transformuje na veličinu měřenou. Z důvodu vysoké přesnosti, snadného přenosu signálu a širokým možnostem jeho zpracování se neelektrické veličiny převádí na elektrické.



Obr. 1 – Základní struktura senzoru – příklad měření síly, zdroj autor dle (Häberle, 2003)

Např. při měření síly se nejprve silový účinek  $F$  převede prostřednictvím elastické deformace na měření dráhy  $s$  (pohyb jezdce potenciometru) a měření dráhy následně na měření elektrického odporu  $R$  (napěťový dělič), který je nakonec převeden na změnu úbytku napětí  $U$ , viz obr. 1.

Mezi základní požadavky kladené na senzory patří především jednoznačná závislost výstupní veličiny na vstupní a s tím související vhodný tvar jejich přenosové funkce. Dále velká citlivost, požadovaná přesnost, časová stálost a pro danou aplikaci vhodná frekvenční charakteristika. Senzor by měl být co nejméně závislý na parazitních jevech, měl by minimálně zatěžovat měřený objekt a měl by být co nejjednodušší konstrukce, s minimálními požadavky na údržbu.

Senzory lze dělit podle nejrůznějších kritérií, nejčastěji např. podle:

- **měřené veličiny** na senzory mechanických veličin (výchylky, rychlosti, zrychlení, síly a mechanického napětí), teploty, tlaku a průtoku, senzory elektrických a magnetických veličin, senzory pro analýzu látek, kapalin a plynů aj.;
- **fyzikálního principu** na senzory odporové, kapacitní, indukčnostní, indukční, magnetické, piezoelektrické, fotoelektrické, optické vláknové, pyroelektrické, ultrazvukové aj.;
- **styku senzoru s okolím** na dotykové a bezdotykové (resp. taktilní a proximní);
- **transformace signálu** na aktivní (transformátorového typu, např. indukční a piezoelektrické) a pasivní (potřebují napájení);

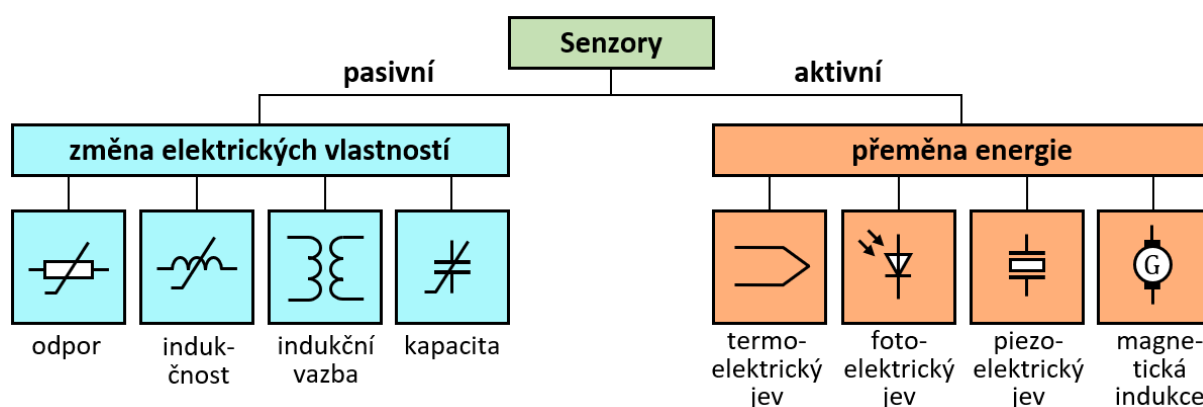
- **typu pohyblivé části** na lineární a úhlové;
- **povahy výstupní veličiny** na spojité (analogové) a nespojitě (diskrétní, resp. číslicové);
- **výrobní technologie** (mechanické, elektromechanické, elektrické, pneumatické, elektronické, elektrochemické, mikroelektronické, polovodičové aj.).

## 1.2 Pasivní a aktivní senzory

Senzory lze dle způsobu přeměny měřené neelektrické veličiny rozdělit z hlediska energetické bilance na pasivní a aktivní, viz schéma na obr. 2. **Pasivní senzory** (parametrické) mění vlivem působení neelektrické veličiny své základní elektrické vlastnosti (odpor, kapacitu nebo indukčnost). Např. vlivem teploty dojde ke změně odporu fotorezistoru nebo vlivem změny polohy jádra cívky se změní její indukčnost.

K vyhodnocování uvedených elektrických vlastností pasivních senzorů je nutný zdroj elektrické energie. Např. změna odporu u čidla pasivního senzoru se obvykle vyhodnocuje v kompenzačním měřicím můstku, který je napájen ze zdroje napětí.

**Aktivní senzory** (generátorické) přímo převádějí energii mechanickou, tepelnou, světelnou nebo chemickou na energii elektrickou. Jedná se tedy o zdroje elektrické energie (nejčastěji náboje, proudu či napětí) pracující na principu transformace. Mohou být založené na termoelektrickém, fotoelektrickém, piezoelektrickém, příp. elektrochemickém jevu, nebo na magnetické indukci.



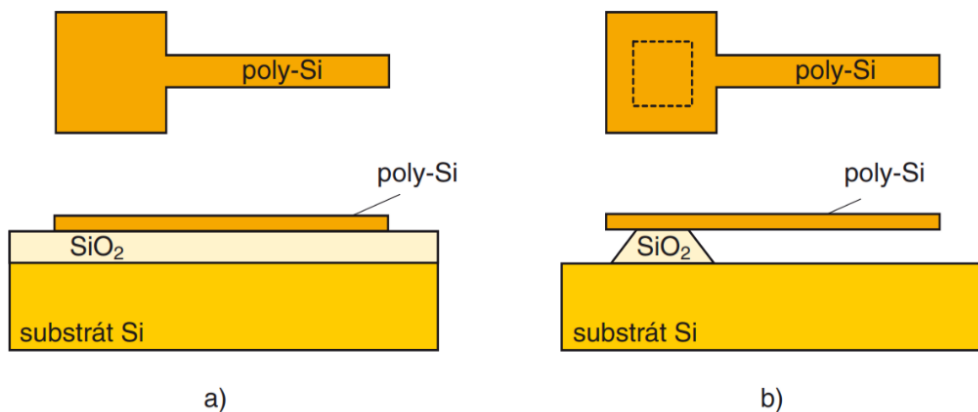
Obr. 2 – Rozdělení senzorů na pasivní a aktivní, zdroj autor dle (Häberle, 2003)

## 1.3 Technologie výroby senzorů

Klasické mechanické a elektromechanické senzory starší generace jsou dnes vyráběny již jen v menších sériích. Jejich výhodou je robustnost a obvykle precizní provedení, jsou ale poměrně drahé. Jejich využití je především ve speciálních aplikacích, všude tam, kde nelze z důvodu agresivity prostředí (vysoké teploty, silné magnetické pole, radiace) použít moderní typy senzorů.

Monolitické polovodičové senzory se vyrábí s využitím běžných postupů používaných při výrobě integrovaných obvodů na křemíkovém substrátu. Využívá se buď některá z tzv. Si technologií (oxidace povrchu, epitaxe, fotolitografie, iontová implantace nebo metalizace). Pro teploty nad 150 °C se používá technologie GaAs (arsenid gallitý).

Integrované senzory se vyrábí **tenkovrstvou technologií**, která umožňuje vytváření monokrystalických, polykrystalických nebo amorfních vrstev křemíku, izolantů a kovů o tloušťce od 1 nm až 1 μm. Jednotlivé vrstvy jsou nanášeny pomocí vakuového nebo katodového napařování na základní skleněnou, ocelovou nebo plastovou vrstvu. Prvky pasivní sítě obvodu senzoru jsou pak vytvářeny fotolitograficky nebo technologií selektivního leptání, viz např. realizace mikronosníku leptáním na obr. 3. Jednoduše lze zahrnout i další potřebné integrované obvody. Pomocí tenkovrstvé technologie výroby lze integrovaný senzor vyrobit s velmi vysokou přesností (využívá se nastavování pomocí laseru) při velmi malých rozměrech. Jejich výhodou je mimo miniaturního provedení a nízké hmotnosti zejména vyšší spolehlivost, stabilita, rychlá odezva a nízká cena v případě sériové výroby větších objemů.



**Obr. 3 – Postup vytváření mikronosníku povrchovým mikroobráběním: a) výchozí struktura, b) struktura po odleptání, zdroj (Husák, 2008)**

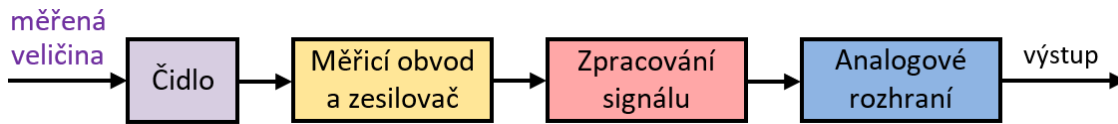
Při výrobě vodičů, rezistorů a kapacitorů se používá tzv. **silnovrstvá technologie** založená na nanášení speciální pasty na keramickou nebo umělohmotnou vrstvu s následným vysoušením a vypalováním.

#### 1.4 Generace senzorů

Senzory lze dělit podle technologie jejich výroby na jednotlivé generace. Zmiňované rozdělení se v dostupné odborné literatuře často liší, ale nejčastěji je celkem uváděno čtyři nebo pět generací senzorů. 1. generaci senzorů představují jednoduché převodníky, založené na základních fyzikálních jevech, jejichž vývoj byl již v podstatě ukončen. Patří mezi ně senzory odporové, kapacitní, indukční, indukčnostní, termoelektrické, piezoelektrické apod.

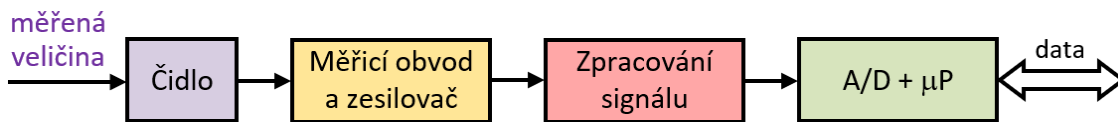
2. generace senzorů je založena na polovodičových technologiích. Senzory této generace mají výrazně lepší parametry, tj. především vyšší citlivost a přesnost, menší rozměry a lepší dynamické vlastnosti.

Senzory 3. generace (někdy též označované jako dvaapůlté, viz obr. 4) jsou integrované. Sensor i vyhodnocovací obvody jsou umístěny obvykle v jednom pouzdře. Polovodičová technika umožňuje konstrukci senzorů řadových nebo maticových. Vývoj této generace senzorů stále probíhá, hledají se nové materiály a zkouší se použití jiných fyzikálních jevů.



Obr. 4 – Blokové schéma senzoru 3. generace, zdroj autor

Senzory 4. generace (někdy též 3. generace), označované jako inteligentní, resp. smart, přímo vychází z předchozí generace senzorů a jsou doplněny o A/D převodník a mikroprocesor (obr. 5). Objevují se u nich zcela nové funkce: kompenzace, linearizace, zajištění nulové počáteční hodnoty, autokalibrace a autodiagnostika a mají digitální komunikační rozhraní.



Obr. 5 – Blokové schéma senzoru 4. generace, zdroj autor

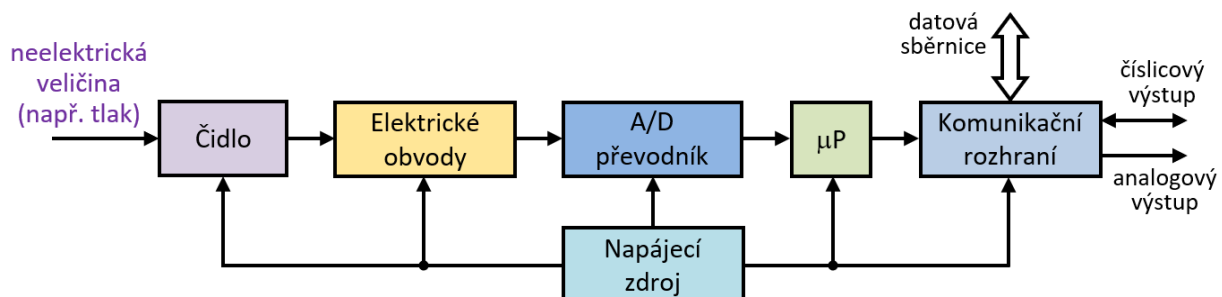
5. generace senzorů je označována jako MEMS (mikro-elektro-mechanické systémy). Citlivá část senzoru i vyhodnocovací obvody jsou u nich umístěny na jednom čipu.

## 1.5 Aktuálně používané typy senzorů

V současnosti jsou vyráběny a běžně se využívají prakticky již jen senzory 4. a 5. generace. Využití senzorů nižších generací, u nichž byl již vývoj v zásadě ukončen, je v oblastech, ve kterých nelze moderní typy senzorů použít. Nejčastěji se jedná o použití v agresivních prostředích.

### 1.5.1 Inteligentní senzory

Základní blokové schéma inteligentního senzoru (často se označuje také jako chytrý – smart – senzor) je na obr. 6 (Kupka, 2019). Jeho součástí je čidlo (citlivá část), elektrické obvody určené ke zpracování a úpravě signálu, A/D převodník, mikroprocesor pro následné zpracování a analýzu a obvody pro komunikaci s okolím.



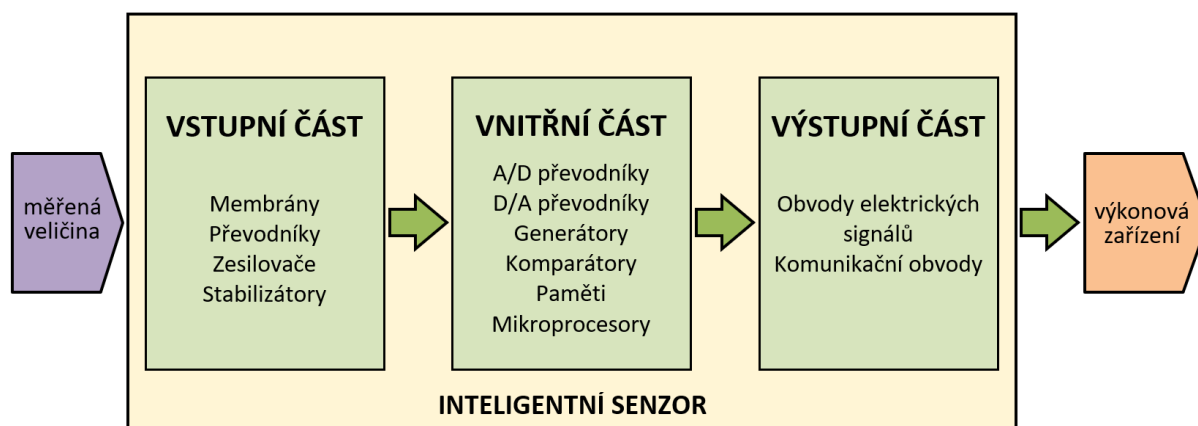
Obr. 6 – Blokové schéma inteligentního senzoru, zdroj autor dle (Maixner, 2006)

Inteligentní senzory se skládají ze tří hlavních základních částí, z nichž každá má specifickou funkci a skládá se z několika dílčích částí, viz obr. 7.

**Vstupní část** inteligentního senzoru slouží ke vstupu měřených veličin, které v případě potřeby převádí na elektrické, ideálně v normovaných rozsazích. Zajišťuje také ochranu senzoru proti vnějším nežádoucím vlivům a obvykle obsahuje převodníky, zesilovače a stabilizátory. V rámci jednoho senzoru s inteligentní funkcí může být integrováno více čidel různých veličin.

**Vnitřní část** slouží k dalšímu zpracování vstupního signálu. Může zajišťovat kompenzaci okolních vlivů, nastavení nulové počáteční hodnoty, příp. linearizaci, autokalibraci a autodiagnostiku. Tvoří ji A/D a D/A převodníky, generátory, komparátory, paměti, mikroprocesory a příp. prvky umělé inteligence.

**Výstupní část** slouží především k zajištění komunikace senzoru s dalšími zařízeními. Dále může provádět signalizaci funkce a aktuálního stavu a některých případech převod číslicového signálu na normalizovaný analogový signál (používají se napěťové či proudové signály  $0 \div 10\text{ V}$ ,  $0 \div 20\text{ mA}$  a  $4 \div 20\text{ mA}$ ). Může také poskytovat řídicí signál pro výkonová zařízení a umožňovat místní i dálkové ovládání. Zajišťuje také ochranu před nežádoucími vlivy na výstupu (zkrat, přepětí, nechtěné odpojení).



Obr. 7 – Základní části inteligentního senzoru, zdroj autor

Inteligentní senzory poskytují oproti běžným sensorům **mnoho výhod**. Jelikož se u nich využívá číslicového přenosu informace, jsou rušivé vlivy (např. vliv teploty, vibrací, rušení při přenosu atd.) omezeny nebo kompenzovány. Sensory mají kompaktní konstrukci s jedním napájením a s normalizovaným signálem na výstupu. Dalším přínosem je faktický přesun úlohy zpracování dat do místa senzoru, tj. předzpracování a testování platnosti naměřených údajů (linearizace, meze, trendy, jednoduchá filtrace atd.). Dálková diagnostika sensorů pomocí obousměrné komunikace po sběrnících usnadňuje rozšíření těchto sensorů do automobilového a leteckého průmyslu a robotiky (diagnostika sensorů na těžko přístupných místech). Výhodou je také možnost zapojení do sítě, kdy lze jednotlivé senzory prostřednictvím přidělených adres centrálně ovládat a testovat jejich činnost.

**Nevýhodou** inteligentních sensorů je jejich vyšší cena a omezené možnosti použití v náročných podmínkách (agresivní prostředí, vysoké teploty, magnetické pole atd.).

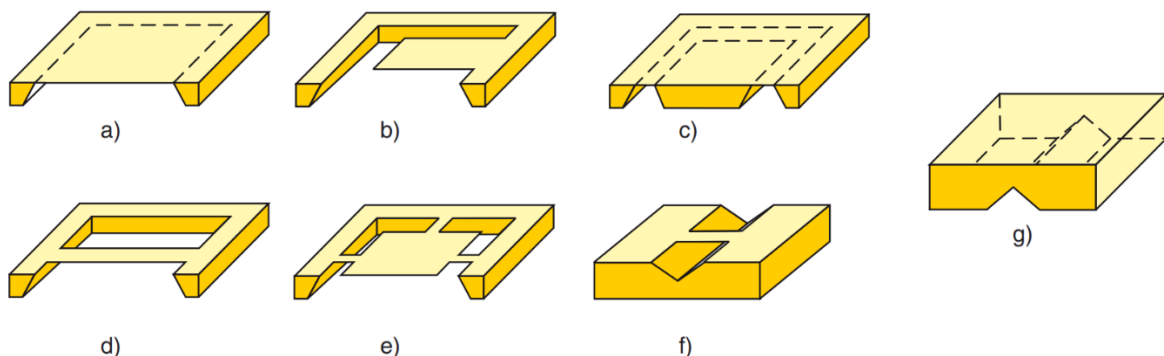
### 1.5.2 MEMS senzory

Velikost senzorů je díky neustálému pokroku ve vývoji v oblasti elektrotechniky, resp. mikroelektroniky, a především z důvodu zdokonalování výrobních procesů, stále menší. Miniaturizace již dosáhla takové úrovně, že se u integrovaných senzorů pohybujeme v řádech mikrometrů ( $10^{-6}$  m). V současnosti je již možné osadit do jednoho pouzdra nejen samotný snímač, ale i ostatní potřebnou elektroniku. Zkratka MEMS (micro-electro-mechanical systems, resp. česky mikro-elektro-mechanické systémy) vychází právě z této skutečnosti, i když jsou aktuálně ve vývoji systémy s velikostí řádově menší, pohybující se ve stovkách až desítkách nanometrů – tzv. nanosystémy (např. procesory).

Integrované snímače neelektrických veličin (typicky např. vibrací) jsou stále vyráběny o rozměrech jednotek až stovek  $\mu\text{m}$ , tedy jako tzv. mikrosystémy. Jejich předností je především zmiňovaná miniaturizace, ale také malý příkon, monolitická nebo hybridní integrace, vysoká spolehlivost, snadná opakovatelnost výrobního procesu, a tedy možnost výroby ve velkých sériích vedoucí ke snížení ceny, začlenění nových funkcí a možnost integrace do jiných integrovaných obvodů. Senzory jsou běžně navrženy tak, aby mohly snímat i více neelektrických veličin. Vnitřní uspořádání mikrosystémů odpovídá vzájemnému spojení bloků pracujících s různými signálovými doménami (též energetickými – mechanickými, magnetickými, elektrickými, teplotními, biochemickými a se zářením). Mikrosystémy lze pak např. dle (Husák, 2008) rozdělit na základě disjunkce různých signálových domén na systémy:

- MEMS – mikroelektromechanický systém;
- MOES – mikrooptoelektrický systém;
- MOMS – mikrooptomechanický systém;
- MOEMS – mikrooptoelektromechanický systém;
- BIOMEMS – mikrobioelektromechanický systém.

MEMS senzory, jsou senzory vyráběné na základě společné integrace mechanických a elektrických struktur do miniaturních integrovaných obvodů. Integrované na jednom křemíkovém čipu jsou konkrétně mechanické části, snímače, řídicí a vyhodnocovací elektronika, ale i např. akční členy.



**Obr. 8 – Příklad mikrostruktur realizovaných povrchoým mikroobráběním: a) uzavřená membrána, b) mikronosník, c) membrána se seismickou hmotou, d) mikromůstek, e) zavěšená membrána, f) mikrokáálek, g) kryt, zdroj (Husák, 2008)**



Běžně se jako MEMS vyrábí akcelerometry, gyroskopy, inklinometry, senzory tlaku, průtoku a IR a biometrické senzory, ale i mimo oblast senzorů různé mikropohony, mikročerpadla, oscilátory a rezonátory.

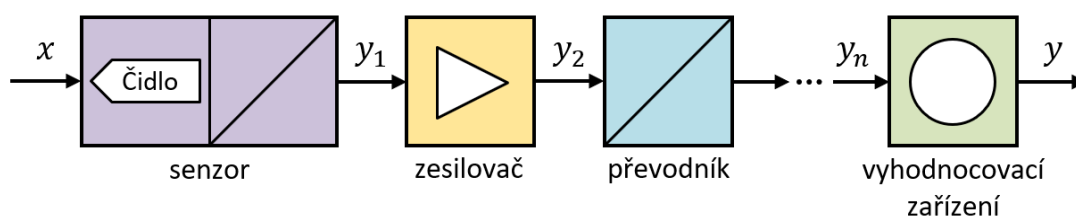
Pro výrobu MEMS senzorů se stejně jako u běžných integrovaných obvodů využívá křemíkový substrát, i výrobní proces je obdobný. Používají se různé mikroobráběcí procesy, nejčastěji povrchové leptání, ale i jiné moderní způsoby založené na optické, UV či elektronové litografii (více viz Husák, 2008). Příklady typických struktur realizovaných povrchovým mikroobráběním a používaných v senzorech jsou na obr. 8.

## 2 Měřicí řetězec

Citlivá část (čidlo, detektor) senzoru, resp. snímače, snímá časový průběh měřené veličiny a převádí jej na jinou fyzikální (měronosnou) veličinu – je tedy součástí měřicího a diagnostického řetězce, v němž má funkci vstupního členu. Měronosná veličina je pak obvykle převedena na nějakou elektrickou veličinu (např. odpor), která je dále transformována na elektrické napětí nebo proud, viz obr. 1 a příklad měření síly výše. Elektrický signál je obvykle třeba ještě zesílit, přičemž je nutné zajistit dostatečný odstup signálu od šumu a příp. od dalších parazitních vlivů (působení zemních smyček, rušení okolním elektrickým, magnetickým či elektromagnetickým polem). Za tímto účelem je potřeba vhodně sestavit měřicí řetězec. Používají se v něm speciální zapojení zesilovačů, frekvenční omezení, modulace přímo neelektrické veličiny s následnou synchronní demodulací či dalším číslicovým zpracováním signálu, nebo modulace elektrického signálu. Dále je signál zpracován dalšími analogovými obvody (filtrace), příp. pomocí A/D převodníku převeden na číslicový a zpracován následnou číslicovou technikou s mikroprocesorem.

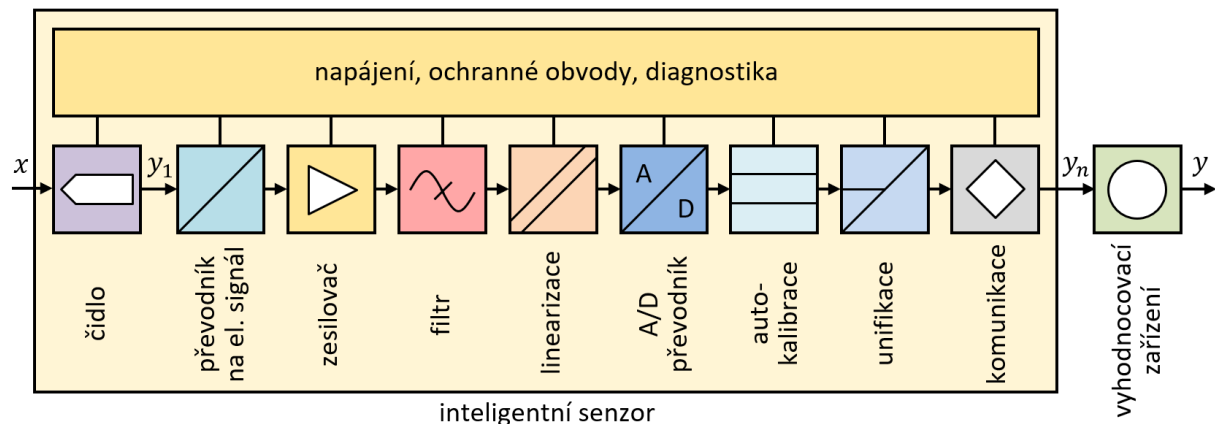
Výhodou použití elektrických signálů je, že s nimi lze bez potíží provádět libovolné matematické a signálové operace, mezi které patří běžné aritmetické operace, derivace, integrace, analogová nebo číslicová filtrace, unifikace signálů za účelem zpracování nebo přenosu, frekvenční analýza (pomocí rychlé Fourierovy transformace – FFT), autokalibrace a další.

**Senzory klasické koncepce** se zařazují do měřicích řetězců obdobných tomu na obr. 9. Hodnoty měřených neelektrických veličin se nejčastěji snímají analogovou citlivou částí snímače (čidlo) a převádí na odpovídající hodnoty spojitého elektrického signálu. Po zesílení je signál pomocí A/D převodníku transformován na číslicový a před případným dalším výpočtem, resp. vyhodnocením, může být ještě zpracován (filtrace, unifikace atd.).



Obr. 9 – Měřicí řetězec s klasickým snímačem, zdroj autor dle (Formánek, 2014)

Stále více se dnes používají tzv. inteligentní senzory, viz obr. 10, které již obsahují potřebné obvody pro zpracování a analýzu signálu integrované spolu s čidlem na jednom čipu.



Obr. 10 – Měřicí řetězec inteligentního snímače, zdroj autor dle (Formánek, 2014)

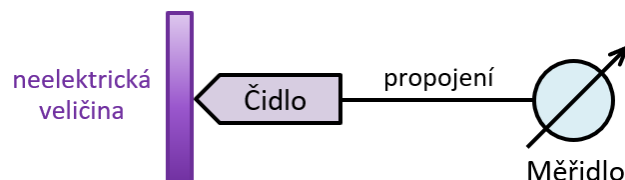
Senzory mohou také přímo poskytovat číselný výstupní signál, který je často přímo v podobě číselného kódu (např. Greyova) snímané veličiny, např. výchylky (ARC snímač).

**Chytré (smart) senzory** předávají údaj o naměřené hodnotě v číselné podobě navíc předzpracovaný a zkontrolovaný. Obsahují totiž, jak již bylo uvedeno výše, integrované obvody, příp. mikroprocesor, pro kontrolu správné funkce senzoru, autokalibraci, příp. umožňují dálkové nastavení senzoru s využitím některé z průmyslových sběrnic (CAN, Profibus, Modbus aj.) nebo průmyslové verze Ethernetu.

Speciální skupinu senzorů tvoří tzv. **binární snímače** (s nespojitou funkcí – limitní, mezní nebo bodové), které vyhodnocují, zda je měřená veličina pod nebo nad zvolenou prahovou úrovní, příp. ve zvoleném pásmu apod.

## 2.1 Příklady standardních měřicích řetězců

Příklady standardních používaných měřicích řetězců jsou na obr. 11 až obr. 14. Na obr. 11 je historicky nejstarší řešení s přímým propojením analogového čidla a měřidla, nejčastěji v podobě pružiny, bimetallického prvku apod. spojeného s ručkou ukazatele hodnoty. V nejjednodušším případě se tedy jedná o přímoukazující přístroj, příp. zapisovač.



Obr. 11 – Spojitý (analogový) řetězec, zdroj autor

Na obr. 12 je již modernější koncepce, v rámci níž, je analogový signál z čidla zesílen a převeden na unifikovaný signál (napětový 0 až 10 V nebo proudový 0 až 20 mA, příp. 4 až 20 mA) a dále pomocí A/D převodníku převeden do číselné podoby a zobrazen např. pomocí displeje (základního číselného nebo i s možností grafického zobrazení).



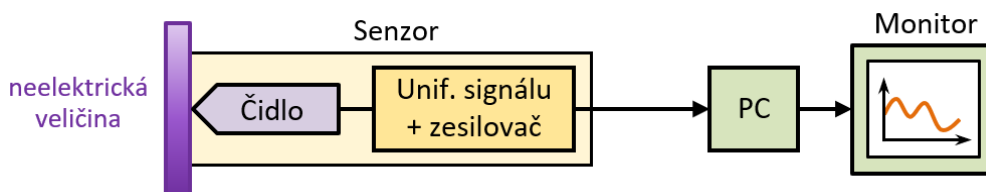
Obr. 12 – Nespojitý (digitální) řetězec bez PC, zdroj autor

Varianta měřicího řetězce na obr. 13 navíc obsahuje mikropočítač, který může sloužit k zajištění komunikace s osobním počítačem (PC), který je určen pro zobrazení a případné další zpracování naměřených dat. Ke zpracování naměřených dat může také sloužit přímo mikropočítač, na kterém pak běží potřebný software, přičemž propojení s PC je realizováno pomocí sériové komunikace (RS-232 nebo RS-235), příp. pomocí Ethernetu.



Obr. 13 – Nespojitý řetězec s mikropočítačem, zdroj autor

Na obr. 14 je uvedena v současnosti poměrně běžná varianta měřicího řetězce, kdy je buď přímou součástí PC zásuvná jednotka (měřicí karta), nebo je k PC připojena měřicí karta externí. V obou případech karta disponuje vstupy pro připojení jednoho či více čidel a jejím základem je měřicí zesilovač a A/D převodník. Zobrazení naměřených hodnot a jejich případné další zpracování probíhá přímo v PC.



Obr. 14 – Nespojitý řetězec s PC, zdroj autor

### 3 Otázky a úkoly

- 1) Jaká jsou základní kritéria pro dělení senzorů?
- 2) Jaký je rozdíl mezi pasivními a aktivními senzory? Uvedte u každé ze skupin několik příkladů senzorů.
- 3) Nakreslete blokové schéma inteligentního (smart) senzoru a stručně popište jednotlivé bloky.
- 4) Co jsou to MEMS senzory a jaké jsou základní technologie jejich výroby?
- 5) Nakreslete schéma čtyř různých standardních měřicích řetězců.

## 4 Použitá literatura

FORMÁNEK, Josef, 2014. Výukové texty pro předmět Měřicí technika: základní charakteristika a demonstrování základních principů měření veličin. Plzeň: ZČU, Fakulta strojní. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvvyuka/Data/ivk-mt-soubory/01-F.pdf>

HÄBERLE, Heinz a kol., 2003. *Průmyslová elektronika a informační technologie*. Praha: Europa-Sobotáles. ISBN 978-80-86706-04-4

HUSÁK, Miroslav, 2008. MEMS a mikrosystémové technologie. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **14**(11), 8-11. ISSN 1210-9592.

KUPKA, Libor, 2019. *Základy mechatroniky: výukový materiál*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

MAIXNER, Ladislav a kol., 2006. *Mechatronika*. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-1299-3.

### Seznam zkratek

A/D	analogově digitální
ARC	absolute rotary coder
BIOMEMS	mikrobioelektromechanický systém
CAN	controller area network (sběrnice)
D/A	digitálně analogový
FFT	fast Fourier transform (rychlá Fourierova transformace)
MEMS	mikroelektromechanický systém
MOES	mikrooptoelektrický systém
MOMS	mikrooptomechanický systém
MOEMS	mikrooptoelektromechanický systém
PC	personal computer (osobní počítač)
Si	sillicium (křemík)
TTL	transistor-transistor-logic (tranzistorově-tranzistorová logika, 5voltová)
UV	ultraviolet (ultrafialový)
ZČU	Západočeská univerzita
μP	mikroprocesor

## Rejstřík

čidlo, 2, 5, 7, 8  
detektor. viz čidlo  
diskrétní. viz číslicový  
fyzikální veličina, 1  
chytrý. viz smart  
komunikační rozhraní, 5  
logická 0, 2  
logická 1, 2  
měřená veličina, 1, 9  
měřicí karta, 10  
měřicí převodník, 1  
měřicí přístroj, 1  
měřicí řetězec, 1, 8  
měřidlo. viz míra  
míra, 1  
PC zásuvná jednotka. viz měřicí karta  
převodník, 1, 5, 10  
    A/D, 5, 6, 8, 9, 10  
    D/A, 6, 11  
regulace, 1  
senzor, 1, 4, 5  
    1. generace, 4  
    2. generace, 4  
    3. generace, 5  
    4. generace, 5  
    5. generace, 5  
    aktivní, 3  
    integrovaný, 4  
    MEMS, 1, 5, 6, 7, 10, 11  
    pasivní, 3  
    polovodičový, 4  
    smart, 1, 5, 9  
sériová komunikace, 9  
signál, 1  
    analogový, 6, 9, 11  
    číslíkový, 8, 9  
silnovrstvá technologie, 4  
snímač, 1, 2, 6, 9  
spojitý. viz analogový  
tenkovrstvá technologie, 4  
TTL logika, 2

# Měření neelektrických veličin

## Téma 2: Základy metrologie

### Studijní cíl

Základní pojmy z oblasti metrologie, statické a dynamické charakteristiky měřících přístrojů a senzorů. Chyby měření a nejistoty měření dle ČSN EN ISO/IEC 17025.

### Doba nutná k nastudování

2 hodiny

### Klíčová slova

Statická charakteristika, dynamická charakteristika, chyba měření, standardní nejistota, nepřímé měření, přechodová charakteristika, frekvenční charakteristika, dynamická chyba

## 1 Základní pojmy z oblast metrologie

Proces měření a měřicí techniku obecně lze rozdělit podle charakteru měření na dvě základní skupiny. První z nich je **vědecká měřicí technika** sloužící především k získávání nových vědeckých poznatků a k rozvoji nových technických disciplín. Lze ji dále dělit na další oblasti podle typu měření na měření:

- **Výzkumná a vývojová** – potřebná k získávání nových znalostí a k měření důležitých parametrů vyvíjeného zařízení. Při těchto měřeních se zpravidla používá speciální měřicí technika, senzory i další prvky měřicího řetězce. Důraz je kladen na přesnost a reprodukovatelnost měření a co nejlepší dynamické vlastnosti senzorů a snímačů.
- **Laboratorní** – je potřebná především k ověřování a kalibraci pracovních měřících přístrojů, normálů a etalonů.

Druhou skupinou je **průmyslová měřicí technika**, která se dále dělí na měření:

- **Průmyslová** – potřebná pro hospodárny a bezporuchový provoz technologických celků a zařízení za účelem dosažení požadovaných vlastností produktů a výrobků. Nejdůležitější je zde především vysoká provozní spolehlivost provozních měřících přístrojů a senzorů, při zajištění dostatečné přesnosti.
- **Záruční** – potřebná pro ověřování, zda technologické zařízení nebo výrobek vykazuje parametry, které udává (garantuje) jeho výrobce. V tomto případě je nezbytně nutné, aby všechny použité měřicí přístroje a senzory měly platné atesty. Jelikož nejčastěji jde

o rozsáhlé soubory měření většího počtu veličin, musí se volit adekvátní a efektivní způsoby zpracování naměřených výsledků.

Původní doménou měřicí techniky byla zejména věda. Měření bylo již od počátků kulturní historie lidstva jedním z nejdůležitějších prostředků pro vytváření a ověřování nových vědeckých teorií. O něco později došlo k jeho rozšíření do oblasti průmyslu a obchodu, což s sebou neslo potřebu zavedení jednotné soustavy jednotek fyzikálních veličin a vědní obor metrologie se zaměřil na neustálý vývoj nových a zlepšování statických i dynamických vlastností stávajících prvků měřicího řetězce, tj. senzorů, převodníků a vyhodnocovacích a přenosových členů.

### 1.1 Uspořádání a příprava realizace měřicího experimentu

Aby výsledky měření byly použitelné k účelu, pro který byl experiment realizován a současně bylo měření reprodukovatelné, je nezbytně nutné dodržovat nejen správný postup při vlastním měření, ale i při jeho přípravě a i při vyhodnocování výsledků měření a rozboru chyb. Během přípravy měřicího experimentu je dle (Jenčík, 2003) zejména vhodné:

- a) Správně zvolit druh a počet měřených veličin s ohledem na jejich významnost a skutečnou potřebu.
- b) Vhodně zvolit potřebnou přesnost měření. Měření by mělo být tak přesné, jak je pro jeho účel nezbytné, nikoliv tak přesné, jak jen je to možné.
- c) Vybrat vhodné měřicí metody s ohledem na požadovanou přesnost a následnou možnost zpracování naměřených hodnot.
- d) Vhodně navrhnout celý měřicí řetězec z hlediska účelu měření a požadované přesnosti.
- e) V souvislosti s předchozími body zvolit odpovídající senzory s ohledem na jejich statické i dynamické vlastnosti.
- f) Zvolit vhodná místa měření z pohledu správného zabudování potřebných senzorů, i s ohledem na jejich dostupnost.
- g) Návrh ochrany jednotlivých částí měřicího řetězce z důvodu omezení či eliminace rušivých vlivů (tlaku, teploty, vlhkosti, vibrací, působení různých polí) a také z pohledu bezpečnosti.
- h) Provést předběžný rozbor nejistot a chyb měření s ohledem na požadovanou přesnost měření.

### 1.2 Senzory s elektrickým výstupním signálem

Současné měřicí technice dominují senzory s elektrickým výstupním signálem umožňující snadné zpracování měřených hodnot a dálkový přenos. To je výhodné z důvodu jejich využití při řízení technologických procesů a prakticky již nezbytné pro jejich zahrnutí do regulačních

obvodů s dnes již téměř výhradně číslicovými regulátory. Měřicí technika plní v oblasti řízení procesů a automatizaci dvě základní klíčové úlohy při získávání informací o:

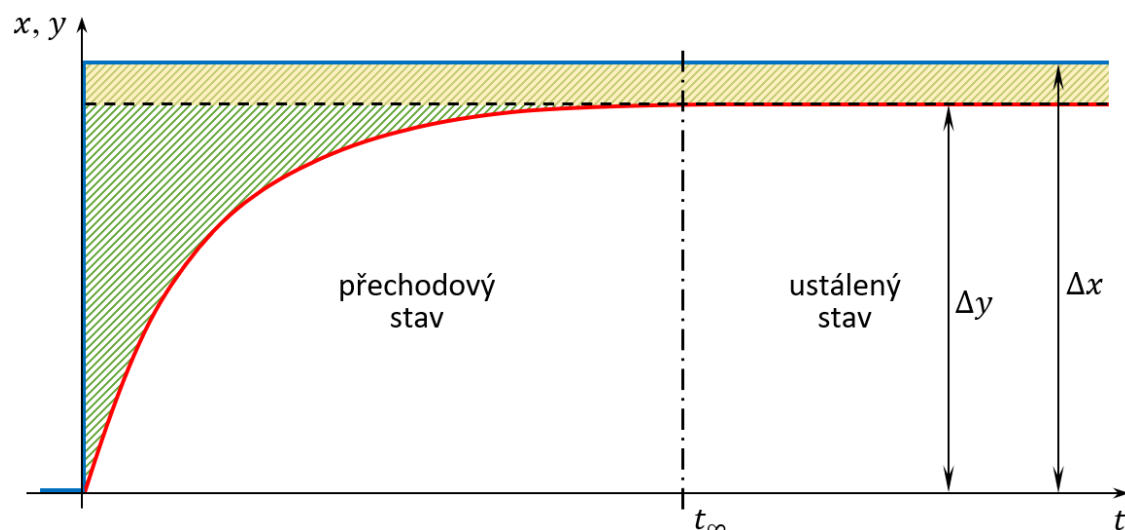
- jednotlivých **základních členech regulačního obvodu**, potřebných pro jeho návrh, realizaci řídicího systému a seřízení parametrů regulátoru;
- **chování řízeného technologického procesu**, aby mohla automatická regulace vůbec probíhat.

(Jenčík, 2003)

Základní vlastnosti sensorů, včetně jejich rozdělení a stručného přehledu technologií jejich výroby, byly probrány již v rámci první studijní opory. Na stejném místě byl podrobněji popsán měřicí řetězec a byly také uvedeny příklady standardním měřících řetězců. V rámci této studijní opory bude v následujících kapitolách věnována pozornost charakteristikám sensorů a v poslední řadě také nejistotám měření.

## 2 Charakteristiky sensorů

Vlastnosti měřících přístrojů a sensorů je nutné posuzovat z hlediska jejich přechodového nebo ustáleného stavu. Jeden z možných průběhů reakce na skokovou změnu měřené veličiny je na obr. 1. Pozor na snad poněkud matoucí označení „měřená veličina“ (zde vstupní signál), které může evokovat měřenou regulovanou veličinu (výstupní signál regulované soustavy) v regulačním obvodu. Poznamenejme, že se zároveň jedná o jednu z dynamických charakteristik – buď o přechodovou (je-li hodnota měřené veličiny v čase  $t \geq 0$  rovna jedné), nebo o obecnější odezvu na skokovou změnu. V tomto konkrétním případě její průběh odpovídá přechodové charakteristice (resp. odezvě) systému 1. řádu.



Obr. 1 – Odezva senzoru na skokovou změnu měřené veličiny, zdroj autor dle (Jenčík, 2003)

Přechodný stav trvá až do dosažení okamžiku kdy  $t = t_{\infty}$ . Od tohoto okamžiku se hodnota výstupu senzoru již nemění – je v ustáleném stavu. Průběh změny výstupu senzoru je určen jeho dynamickými vlastnostmi a lze jej popsat např. diferenciální rovnicí.



Rozlišují se **statické vlastnosti senzoru** (statická charakteristika, citlivost, dynamický rozsah, reprodukovatelnost, rozlišitelnost a nejistoty měření) a dále **dynamické vlastnosti senzoru** (přechodové a frekvenční charakteristiky).

## 2.1 Statické vlastnosti senzorů

### 2.1.1 Statická charakteristika

Obecně se jedná o graf závislosti ustáleného stavu výstupní veličiny  $y(\infty)$  na ustáleném stavu vstupní veličiny  $x(\infty)$ . Vstupní veličinou je u senzoru měřená veličina a výstupní veličinou je jeho výstupní signál. V obecném případě může být statická charakteristika nelineární funkcí

$$y = f(x) \quad (1)$$

resp. přesněji s uvažováním ustálených stavů vstupu a výstupu

$$x(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_\infty$$

$$y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_\infty$$

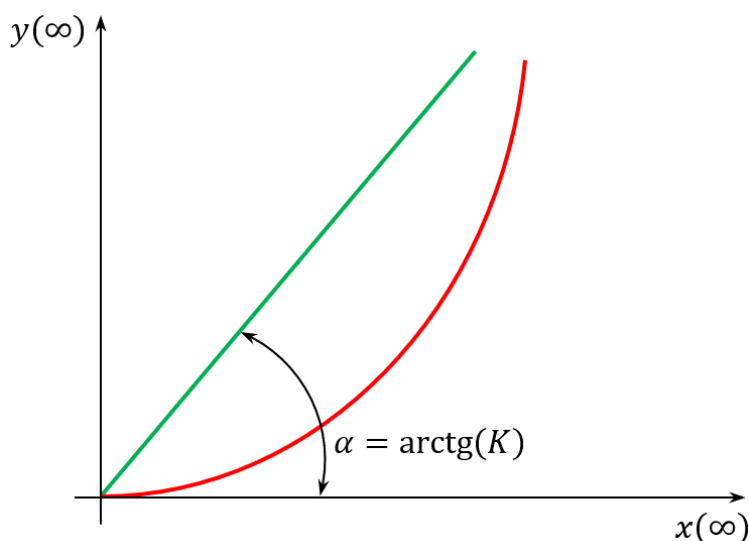
bude

$$y(\infty) = f(x(\infty)) \quad (2)$$

V některých konkrétních případech určitých typů senzorů, může být tato závislost také lineární (zřídka), nebo spíše lineární v nějakém omezeném rozsahu, příp. linearizovaná v pracovním bodě. Pak ji lze popsat rovnicí přímky

$$y(\infty) = Kx(\infty) \quad (3)$$

kde  $K$  představuje citlivost senzoru (zesílení) a současně konstantu jeho obrazového přenosu ve standardním tvaru (viz dynamické vlastnosti senzorů dále).



Obr. 2 – Příklady statických charakteristik, zdroj autor

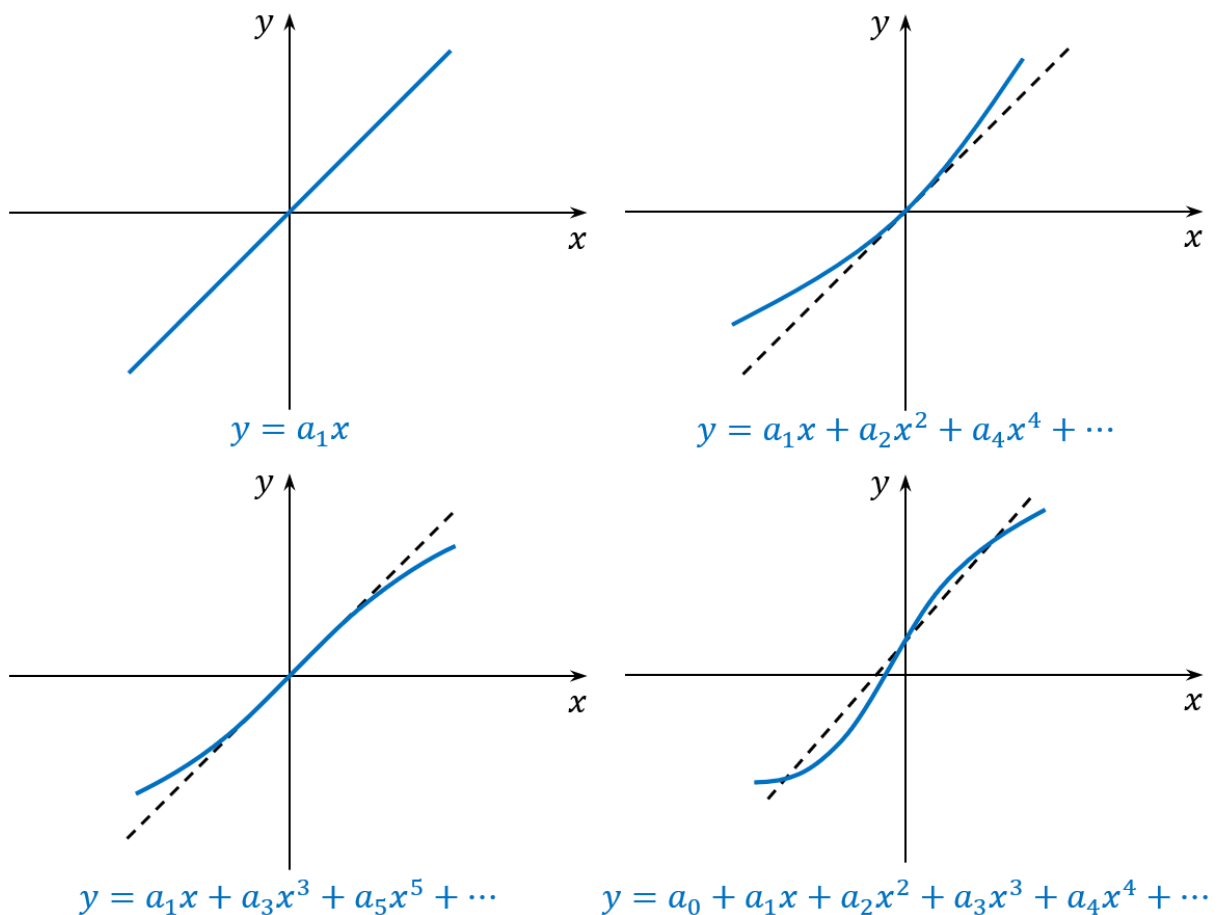
Statická charakteristika senzoru bývá také označovaná jako jeho **převodní charakteristika**. Obecněji vzato, nemusí převodní charakteristika, ať už lineární či nelineární, procházet počátkem souřadného systému. Pak např. pro lineární průběh bude platit

$$y = Kx + q \quad (4)$$

kde  $q$  odpovídá posunu v ose závisle proměnné. Příklady lineární (zelený průběh) a nelineární (červený průběh) statické charakteristiky jsou na obr. 2. Průběh nelineární statické (převodní) charakteristiky je většinou možné popsat s dostatečnou přesností polynomiální funkcí

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (5)$$

Variantně lze v závislosti na typu průběhu charakteristiky vypustit některé členy lichých nebo sudých mocnin, viz obr. 3.



Obr. 3 – Základní typy statických charakteristik senzorů, zdroj autor

### 2.1.2 Citlivost senzoru

Citlivost senzoru vyjadřuje jeho schopnost reakce na měřenou veličinu za stanovených podmínek (Jenčík, 2003). Minimální citlivost se vyjádří

$$c = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (6)$$

Z rovnice statické charakteristiky a příp. z jejího průběhu lze pak citlivost vypočítat

$$c = \frac{dy}{dx} = K = \operatorname{tg}(\alpha) \quad (7)$$

z čehož zároveň plyne, že **odpovídá statickému zesílení senzoru**. U senzorů s lineární převodní charakteristikou je citlivost konstantní v celém rozsahu měření. U senzorů s charakteristikou nelineární tomu ale tak není. Např. senzor s kvadratickou převodní charakteristikou vykazuje v okolí nulové hodnoty měřené veličiny nulovou citlivost, takže jej nelze použít pro měření od nuly.

### 2.1.3 Práh citlivosti, dynamický rozsah, reprodukovatelnost a rozlišitelnost

**Práh citlivosti** je definován jako hodnota měřené veličiny, při níž výstup senzoru odpovídá střední kvadratické chybě šumu. Např. pro výstupní napěťový signál je určen směrodatnou odchylkou šumového napětí  $u_n$

$$u_p = \sqrt{u_n^2} \quad (8)$$

**Dynamický rozsah** senzoru je definován intervalem vymezeným prahem citlivosti a maximální hodnotou měřené veličiny.

**Reprodukovatelnost** je určena odchylkou měřených hodnot od krátkodobě neměnné měřené veličiny (v krátkém časovém úseku měření) a neměnných rušivých vlivech okolí.

**Rozlišitelnost** (rozlišení senzoru) představuje nejmenší možnou změnu naměřené hodnoty  $y$  odpovídající chybě senzoru (absolutní či relativní). V případě analogového signálu

$$R_a = \frac{1}{\frac{y_{\max} - y_{\min}}{2(\Delta y)_{\max}} + 1} \cong 2\delta_s \quad (9)$$

kde  $(\Delta y)_{\max}$  je maximální absolutní chyba měření a  $\delta_s$  je relativní chyba senzoru.

V případě převodu analogové veličiny na číslicový signál pak

$$R_d = \frac{1}{2^n - 1} \cong \frac{1}{2^n} \quad (10)$$

přičemž  $n$  je počet bitů. (Kreidl, 2005) a (Bejček, 2009)

### 2.1.4 Základní chyby měření

**Absolutní chyba** měření je definovaná jako absolutní hodnota rozdílu naměřené hodnoty  $y_n$  a správné hodnoty  $y_s$

$$\Delta_y = |y_n - y_s| \quad (11)$$

Je vždy kladná a jejím rozměrem je rozměr měřené veličiny, resp. jí příslušná jednotka [J].

**Relativní chyba** měření je dána podílem absolutní chyby a správné hodnoty měřené veličiny

$$\delta_y = \frac{\Delta_y}{y_s} \quad (12)$$

Je bezrozměrná [–] nebo ji lze vyjádřit v procentech, příp. v ppm. Relativní chybu senzoru (obvykle bývá shodná s třídou přesnosti TP) lze vyjádřit

$$\delta_s = \frac{(\Delta_y)_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (13)$$

příp. u senzorů častěji vzhledem ke vstupní měřené veličině

$$\delta_s = \frac{(\Delta_x)_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (14)$$

### 2.1.5 Aditivní a multiplikativní chyby senzorů

Teoreticky lze chyby měření dělit podle závislosti chyby měření  $\Delta_y$ , resp.  $\Delta_x$  na naměřené hodnotě na závislé – chyby aditivní a nezávislé – chyby multiplikativní.

Příčinou **chyby aditivní** je posun jmenovité lineární statické charakteristiky, viz obr. 4. Hodnota absolutní chyby  $\Delta_y$  měření je konstantní a nezávislá na naměřené hodnotě. Relativní chyba měření  $\delta_y$  vykazuje hyperbolickou závislost na měřené veličině  $x$ .

V praxi je příčinou aditivní chyby nejčastěji posun nulové či počáteční hodnoty způsobený vlivem teplotního, časového, napájecího nebo jiného driftu či offsetu. Bude-li maximální posuv definován jako maximální možná tolerance absolutní chyby měření  $(\Delta_y)_{\max}$ , je potom možné chyby určené touto definicí označit také za aditivní. Jsou to např. tyto takto definované aditivní chyby:

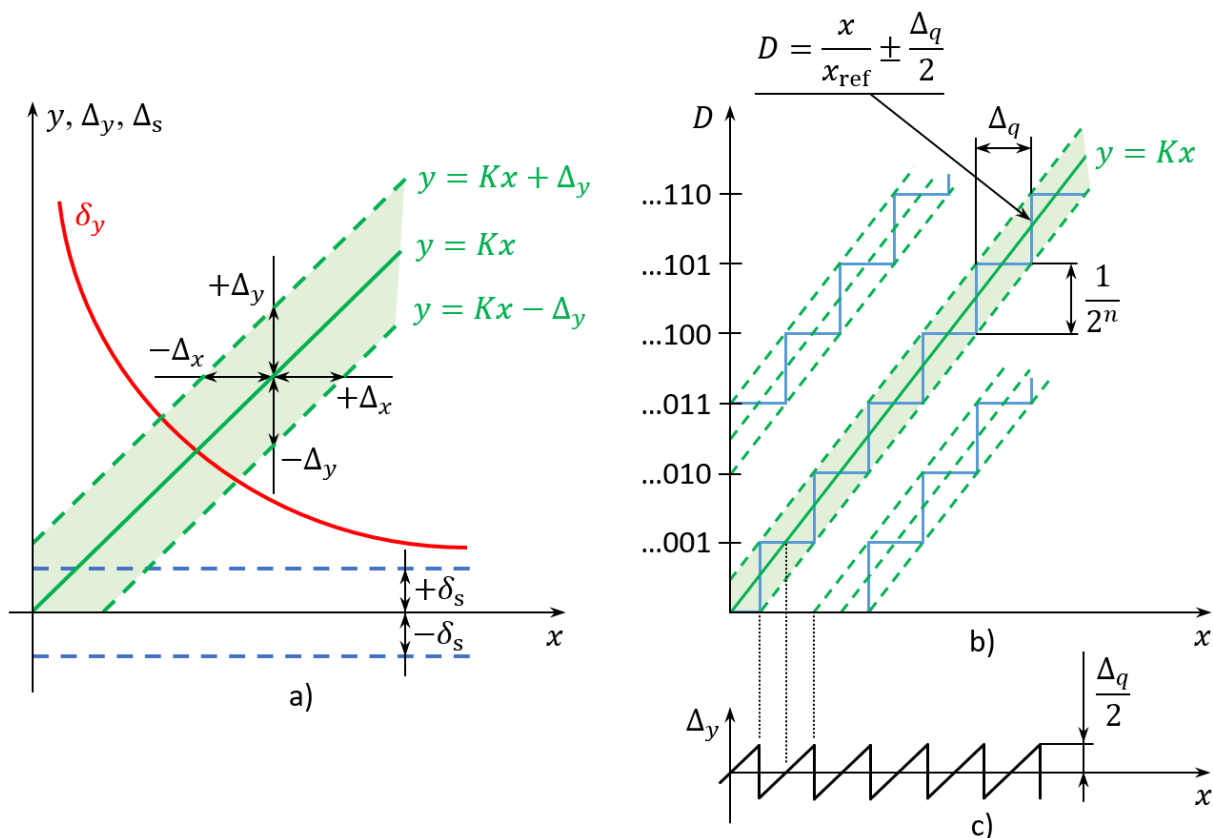
- relativní chyba senzoru (označovaná také jako přesnost, nebo chyba rozsahu);
- třída přesnosti analogového přístroje;
- chyba linearity (označovaná také jako linearita či nelinearita, nebo jako integrální nelinearita);
- kvantovací chyba;
- počet digitů s nejmenší vahou (číslic na posledním místě).

V případě spojitého výstupu (obr. 4a) je interval neurčitosti vymezen rovnoběžnými přímkami  $y = Kx \pm \Delta_y$ , v nichž kvocient odpovídá velikosti absolutní chyby.

V případě číslicového výstupu (obr. 4b) bude ideální kvantovací převodní charakteristika ohraničena teoretickou maximální hodnotou kvantovací chyby. Pro absolutní chybu měření lze psát

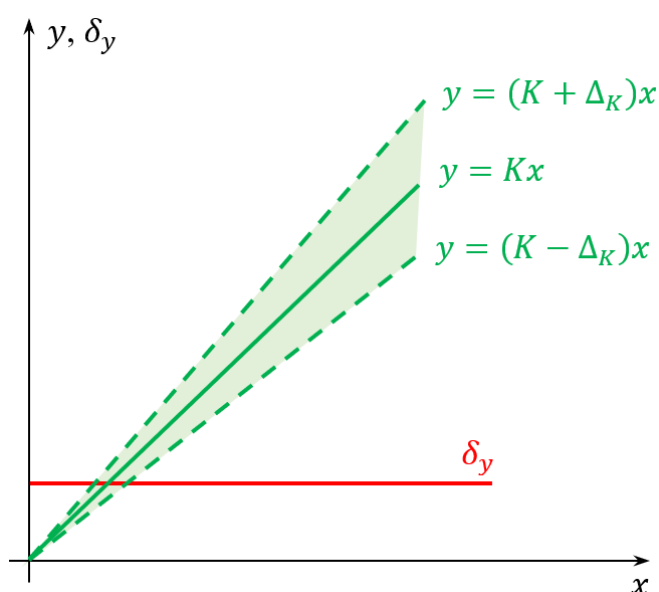
$$(\Delta_y)_{\max} = \frac{1}{2} \frac{1}{2^n} x_{\max} \cong \frac{\Delta_q}{2} \quad (15)$$

přičemž  $\Delta_q = x_{\max}/2^n$  je šířka pásma kvantovací chyby.



**Obr. 4 – Aditivní chyby: a) při analogovém vstupním signálu, b) při číslicovém vstupním signálu a c) kvantizační šum, zdroj autor dle (Bejček, 2005)**

Je-li číslicové slovo  $D$  vyjádřeno v přirozeném binárním kódu, potom analogové váže nejméně významného bitu (LSB, Least Significant Bit) odpovídá šířka pásma  $\Delta_q$ . Proto se také chyby senzorů s číslicovým výstupem vyjadřují v celých násobcích  $1/2$  LSB, viz také rozlišitelnost a vztah (10).



**Obr. 5 – Multiplikativní chyba a odpovídající interval neurčitosti, zdroj autor dle (Bejček, 2005)**

Relativní chybu senzoru s číslicovým výstupem lze vyjádřit

$$\delta_s = \frac{(\Delta_y)_{\max}}{x_{\max}} = \frac{1}{2} \frac{1}{2^n} \quad (16)$$

**Chyba multiplikativní** je způsobená změnou citlivosti senzoru, takže jeho statická charakteristika potom vykazuje odlišný sklon, než jmenovitá statická charakteristika, viz obr. 5. Multiplikativní chyba může být způsobena vlivem parazitních veličin (např. tlaku nebo teploty).

V tomto případě je hodnota absolutní chyby  $\Delta_y$  závislá na naměřené hodnotě, není tedy konstantní, a platí

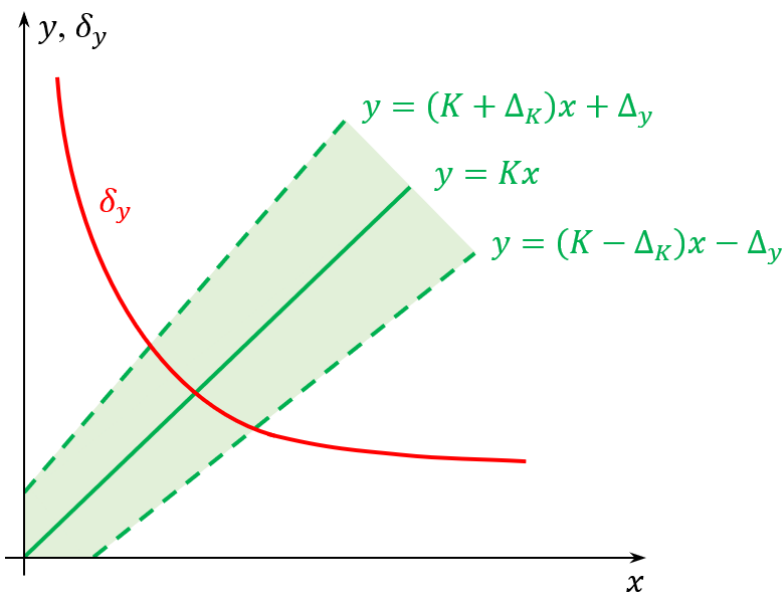
$$\Delta_y = \Delta_K x \neq konst \quad (17)$$

Naopak relativní chyba se v závislosti na měřené veličině  $x$  nemění a tedy

$$\delta_y = \frac{\Delta_y}{y} = \Delta_K \frac{x}{y} = \frac{\Delta_K}{K} = konst \quad (18)$$

neboť  $\Delta_K$  a  $K$  jsou konstanty. Interval neurčitosti je v tomto případě vymezen různoběžnými přímkami  $y = (K \pm \Delta_K)x$ .

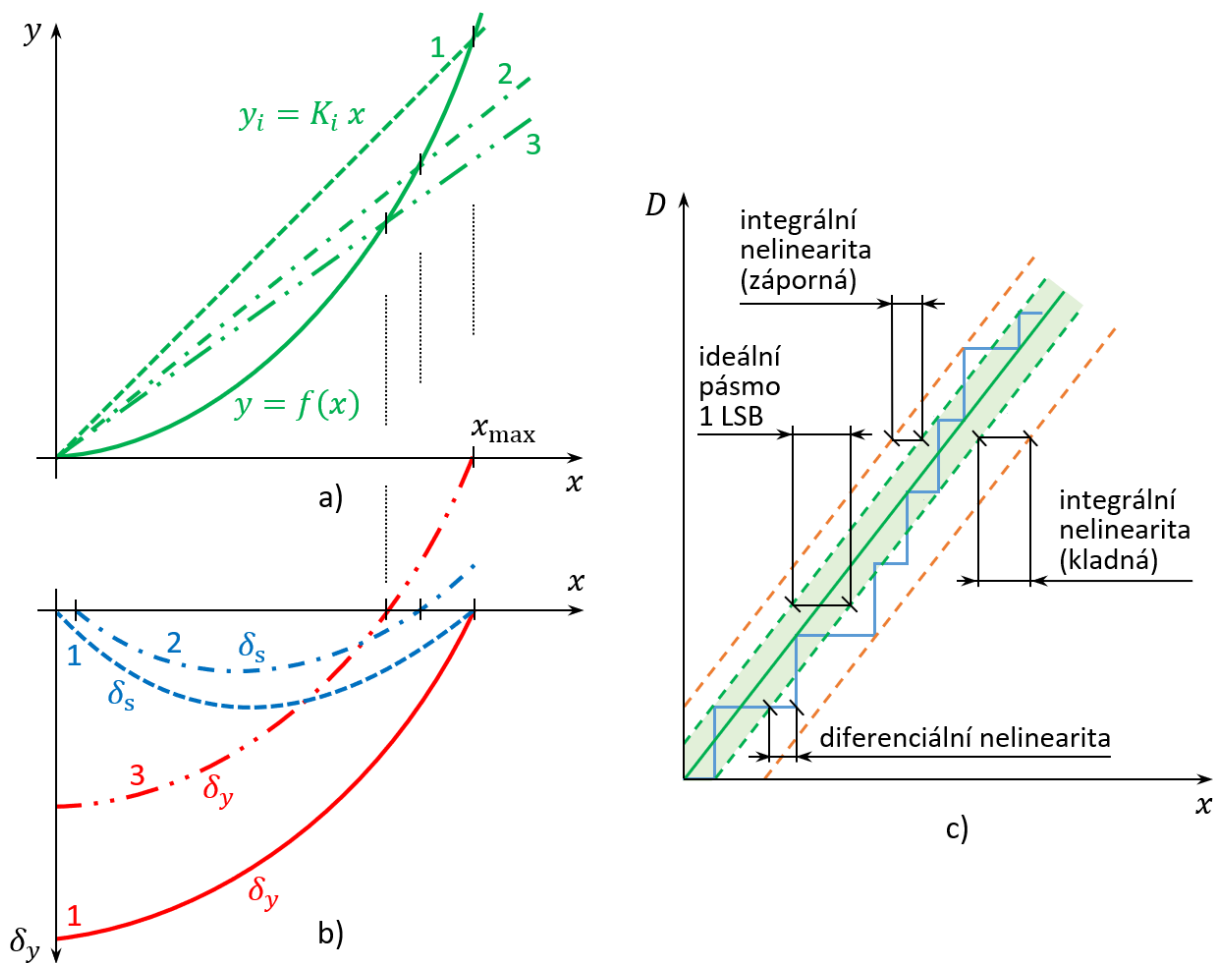
V praxi bývají senzory a měřicí přístroje zatíženy kombinovanou chybou, kterou lze vyjádřit součtem aditivní a multiplikativní chyby. Interval neurčitosti má pak tvar na obr. 6.



Obr. 6 – Kombinovaná chyba a odpovídající interval neurčitosti, zdroj autor

### 2.1.6 Chyba linearity

Chyba linearity představuje odchylku od ideální lineární charakteristiky (spojité analogové, viz obr. 7b, nebo kvantové obr. 7c). Na obr. 7a jsou průběhy tří statických charakteristik lišících se navzájem různými konstantami  $K_i$ . Odpovídající průběhy chyby nelinearity jsou na obr. 7b. V případě číslicového výstupu jsou pak chyby nelinearity definovány jako tzv. integrální a diferenciální, viz obr. 7c.



Obr. 7 – Chyby linearity: a) statické charakteristiky 1, 2 a 3, b) odpovídající průběhy chyby nelinearity a c) integrální a diferenciální nelinearita, zdroj autor dle (Ďaďo, 1996)

**Integrální nelinearita** je určena maximální odchylkou skutečné kvantovací charakteristiky od ideální. **Diferenciální nelinearita** je definována obdobně, ale v určitém bodě charakteristiky (nejedná se tedy o nelinearitu maximální v rámci celého rozsahu).

Chyba linearity senzoru je matematicky vyjádřitelná vztahem ve tvaru

$$\delta_L = \left( \frac{y_N - y_L}{y_{\max} - y_{\min}} \right)_{\max} \quad (19)$$

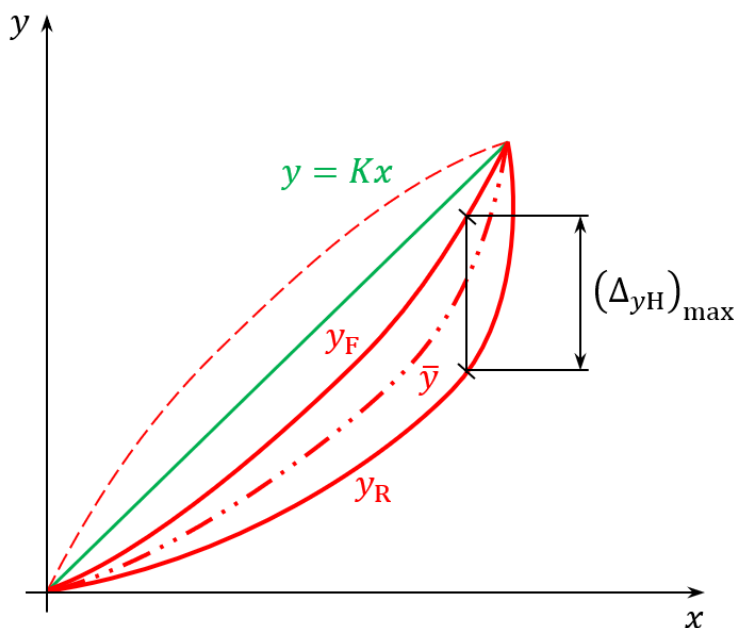
v němž hodnota  $y_L$  je určena průběhem ideální lineární funkce  $y = Kx$  nebo  $y = K_1x + K_0$ . Parametry  $K$ ,  $K_0$  a  $K_1$  je možné vypočítat s využitím lineární regrese.

### 2.1.7 Chyba hystereze

Speciálním případem nelineární statické (převodní) charakteristiky je charakteristika s hysterezí. Chyba hystereze ilustrovaná na obr. 8 se stanovuje dle vztahu

$$\delta_{yH} = \left( \frac{y_R - y_F}{y_{\max}} \right)_{\max} = \left( \frac{\Delta_{yH}}{y_{\max}} \right)_{\max} = \left( \frac{y - \bar{y}}{y_{\max}} \right)_{\max} \quad (20)$$

kde  $\bar{y}$  představuje střední hodnotu mezi vzestupnou  $y_R$  a klesající  $y_F$  hodnotou závislosti.



Obr. 8 – Ilustrace chyby hystereze, zdroj autor dle (Ďaďo, 1996)

## 2.2 Nejistoty měření

Výše uvedený způsob vyjádření přesnosti provedeného měření s využitím relativních chyb sensorů (obecněji měřicích přístrojů) a absolutních a relativních chyb měření je v současné době již nahrazen tzv. nejistotou měření dle ČSN EN ISO/IEC 17025 „Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří“ v aktuálně platné verzi z dubna 2018.

Připomeňme, že absolutní chyba měření byla definována jako rozdíl mezi naměřenou hodnotou a (konvenčně) správnou hodnotou měřené veličiny. Relativní chyba je potom dána podílem absolutní chyby měření a naměřené hodnoty. Relativní chyba senzoru (měřicího přístroje) je podílem maximální absolutní chyby měření a měřicího rozsahu.

Chyby měření byly dále rozdělovány podle příčiny jejich vzniku na chyby:

- **Systematické** (jinak také soustavné) – způsobené nepřesnostmi jednotlivých prvků měřicího řetězce, nepřesnou měřicí metodou nebo chybou pozorovatele (obsluhy), tj. s často uváděným podrobnějším členěním na chyby:
  - přístroje;
  - metody;
  - obsluhy.

Při opakovaném měření za stejných podmínek je hodnota chyby stálá. Tyto chyby jsou buď částečně nebo zcela odstranitelné korekcí, kompenzací atp.

- **Náhodné** (nahodilé či statistické) – vznikají v důsledku náhodných rušivých vlivů (např. změnami teploty, tlaku, vlhkosti, působením různých polí, vibrací, radiace atd.) a vlivem nedokonalosti smyslů lidské obsluhy. Nelze je zcela odstranit. Lze je postihnout s využitím statistických metod zpracování výsledků měření.



- **Hrubé** – způsobené závadou některého prvku měřicího řetězce, špatně zvolenou, resp. nevhodnou měřicí metodou nebo hrubou nepozorností obsluhy. Výsledky zatížené hrubou chybou by měly být ze souboru měření pokud možno odstraněny, jinak je vždy měření třeba opakovat.

Všechny shora uvedené pojmy byly nahrazeny jediným oficiálně povoleným pojmem nejistota měření. Ta je označována jako  $u$  (z anglického uncertainty) a týká se nejen výsledků měření, ale i senzorů, měřicích přístrojů a všech dalších bloků měřicího řetězce (filtrů, převodníků, zesilovačů a jiných částí a elektrických obvodů), dále i hodnot používaných konstant, korekcí atp.

**Nejistota měření je parametr přiřazený k výsledku měření, charakterizující rozptyl hodnot, které lze důvodně (racionálně a s určitou pravděpodobností) přiřazovat k měřené veličině** (Kreidl, 2005). Jinými slovy se jedná o parametr, který charakterizuje rozptyl hodnot okolo naměřené hodnoty, tj. vlastně interval, ve kterém může s určitou pravděpodobností skutečná (správná, resp. pravá) hodnota ležet. **Standardní nejistotou** se označuje nejistota určená směrodatnou odchylkou veličiny, pro kterou je udávána. Při samotném vyjádření přesnosti měření nejistotou měření se předpokládá, že již byly vyloučeny hrubé chyby a dle technických možností (např. korekcí nebo kompenzací) odstraněny chyby systematické. Korektněji vyjádřeno, že byly již vyloučeny odstranitelné systematické jevy. (Kreidl, 2005)

Nejistoty měření se podle způsobu, kterým jsou vyhodnocovány dále dělí do skupin:

- **standardní nejistota typu A** označovaná  $u_A$ ;
- **standardní nejistota typu B** označovaná  $u_B$ ;
- **kombinovaná standardní nejistota typu C** označovaná  $u_C$ ;
- **rozšířená nejistota** označovaná  $U(x)$ .

Nejistoty lze, podobně jako původně používané relativní chyby, **vyjádřit v relativním tvaru** vydělením jejich hodnoty hodnotou výběrového aritmetického průměru nebo naměřenou hodnotou (Kreidl, 2005).

### 2.2.1 Standardní nejistota typu A

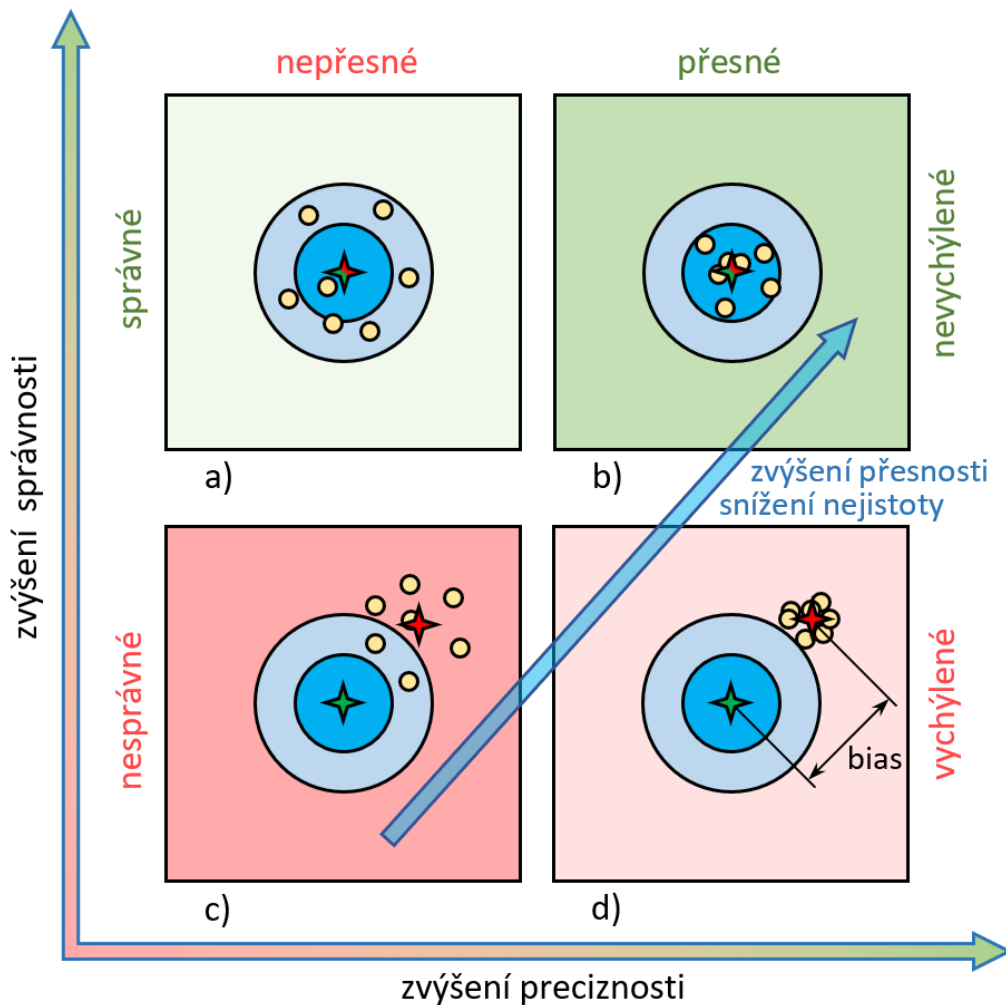
Tento typ nejistoty se stanovuje statistickým zpracováním naměřených hodnot. Na začátku se na základě za stejných podmínek minimálně desetkrát opakovaného měření veličiny  $X$  a výpočtu jejího **výběrového aritmetického průměru** pro  $n$  měření

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (21)$$

stanoví **odhad hodnoty**  $x$ .

V důsledku opakovaného měření stejné veličiny stejným způsobem, senzorem a za stejných podmínek, mohou nastat čtyři základní situace, viz obr. 9. Správná hodnota je vyznačena

zelenou hvězdičkou. Oblast neurčitosti je vymezena modře vyplněnou kružnicí s průměrem dle přesnosti. Naměřené hodnoty jsou vyznačeny žlutými puntíky a střední hodnota množiny dat je vyznačen červenou hvězdičkou.



Obr. 9 – Schéma vzájemného vztahu preciznosti, správnosti a nejistoty měření, zdroj autor dle (Senft, 2012), (Křemenáková, 2013), (Milde, 2019) a (Kocourek, 2015)

Situaci na obr. 9 si lze také představit jako střelbu na cíl. Mohou nastat čtyři základní varianty:

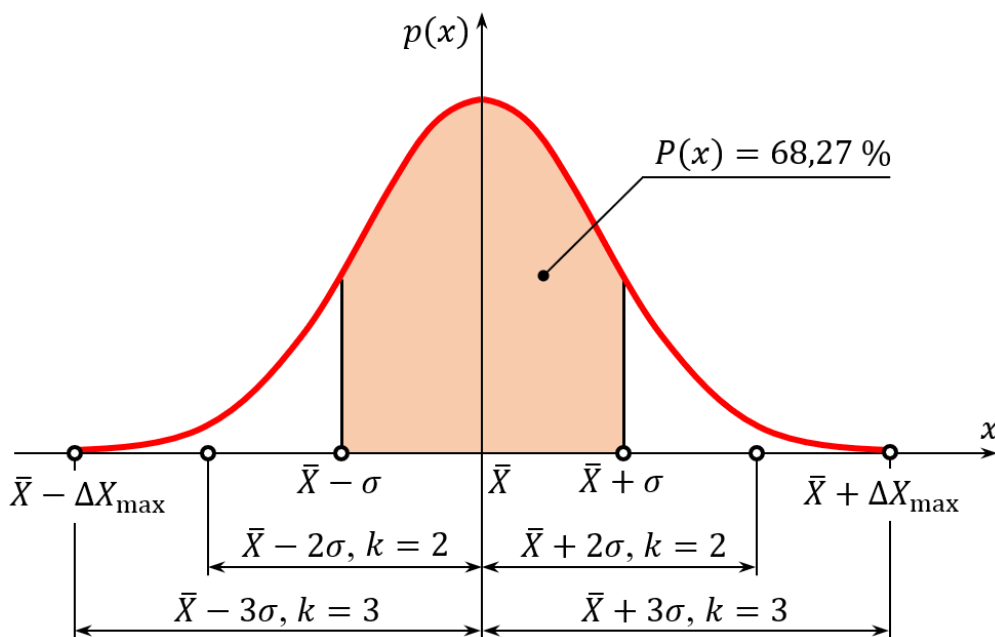
- Měření je správné, nevychýlené, ale nepřesné – množina naměřených dat se nachází v širším okolí správné hodnoty (vykazuje vyšší rozptyl). Chybu lze korigovat opakováním měření a zvyšováním jeho přesnosti.
- Měření je správné, nevychýlené a přesné – jedná se o nejlepší možnou variantu, množina naměřených dat se nachází v blízkém okolí správné hodnoty (vykazuje nízký rozptyl).
- Měření je nesprávné, vychýlené a nepřesné – jedná se o nejhorší variantu, střední hodnota naměřených dat je mimo oblast v okolí správné hodnoty a navíc vykazují naměřené hodnoty větší rozptyl.
- Měření je přesné, ale nesprávné a vychýlené – střední hodnota naměřených dat je mimo oblast v okolí správné hodnoty, ale jinak přesné. Chybu lze korigovat zohledněním výchyly – biasu.

Standardní nejistota  $u_A(x)$  k odhadu  $x$  je výběrovou směrodatnou odchylkou aritmetického průměru

$$u_a(x) = \sigma(\bar{X}) = \sqrt{D(\bar{X})} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (22)$$

kde  $D(\bar{X})$  je výběrový rozptyl (resp. disperze) aritmetického průměru.

Rozložení (statistické rozdělení) odchylek od výběrového průměru, resp. rozptyl naměřených hodnot, v praxi nejčastěji odpovídá Gaussovu normálnímu rozdělení.



Obr. 10 – Průběh hustoty pravděpodobnosti Gaussova normálního rozdělení, zdroj autor dle (Kreidl, 2005)

Hustota pravděpodobnosti  $p(x)$  normálního rozdělení (viz obr. 10) je definována

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{X})^2}{2\sigma^2}} \quad (23)$$

Plocha vymezená na obr. 10 vodorovnou osou  $x$  a přímkami  $x = -\sigma$  a  $x = +\sigma$  odpovídá pravděpodobnosti  $P(x)$ , že odchylka od výběrového průměru  $\bar{X}$  nabude hodnoty z intervalu  $(-\sigma; +\sigma)$ . To znamená, že pro  $\bar{X} \pm k\sigma$  plocha vymezuje pro  $k = 1$  pravděpodobnost 68,27 %, pro  $k = 2$  pravděpodobnost 95,45 % a pro  $k = 3$  pravděpodobnost 99,73 %, že správná hodnota bude v tomto intervalu ležet. (Kreidl, 2005)

### 2.2.2 Standardní nejistota typu B

Tento typ nejistoty zahrnuje všechny ostatní zdroje nejistot, mimo ty, které jsou již zahrnuty ve standardní nejistotě A. Vyhodnocování nejistoty typu B není založeno na statistických metodách, ale vzhledem k dalšímu zpracování je přesto nutné tuto nejistotu vyjádřit ve tvaru směrodatné odchylky nebo rozptylu.

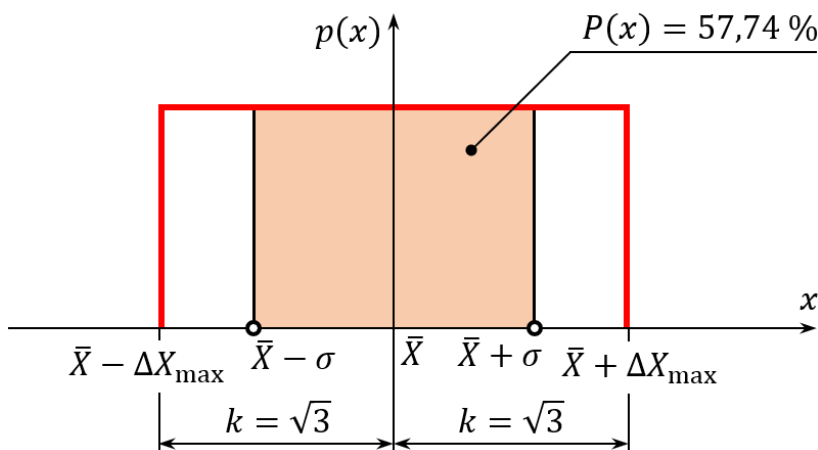
Standardní nejistoty typu B jsou stanovovány na základě informací vycházejících z technických parametrů a certifikací měřicího zařízení, tolerancí senzorů a měřicích přístrojů a tolerancí dalších součástí měřicího řetězce udávaných výrobcí (katalogy, produktové a technické listy, kalibrační protokoly, referenční hodnoty, atd.). Dále zahrnuje vlivy stárnutí senzorů, součástek a použitých elektronických obvodů (časová nestabilita), dynamických vlastností senzorů, vnějších podmínek, měřicích metod a nejistot daných linearizací charakteristik, aproximacemi a korekcemi, interpolací a extrapolací při vyhodnocování naměřených hodnot.

Postupuje se tak, že pro každý uvažovaný zdroj nejistoty  $Z_1, Z_1, \dots, Z_m$  se stanoví nebo odhadne pravděpodobný interval odchylek  $\langle -\Delta z_{i,\max}; +\Delta z_{i,\max} \rangle$  od nominální hodnoty  $z_j$ . Poté se dle rozptylu (směrodatné odchyly či disperze) odhadne hustota pravděpodobnosti odchylky od aritmetického průměru. Z maximální odchylky  $\Delta z_{i,\max}$  a pravděpodobnostního rozdělení (viz obr. 10 a obr. 11) lze potom získat koeficient  $k$ , na základě čehož je možné vypočítat tomu odpovídající směrodatnou odchylku.

Pro standardní nejistotu typu B platí při uvažování jednoho zdroje nejistoty s maximální odchylkou

$$u_B(z) = \frac{\Delta z_{\max}}{k} \quad (24)$$

V případě volby normálního rozdělení (obr. 10) se zvolí  $k = 2$  nebo  $k = 3$ . Pro rovnoměrné rozdělení, které se při stanovování standardních nejistot používá nejčastěji (Kreidl, 2005), se zvolí  $k = \sqrt{3}$ . Mimo těchto dvou zmiňovaných, se někdy používají i rozdělení trojúhelníková, lichoběžníková, logaritmická či exponenciální.



Obr. 11 – Průběh hustoty pravděpodobnosti symetrického rovnoměrného rozdělení, zdroj autor dle (Kreidl, 2005)

Pro rovnoměrné rozložení na obr. 11 jsou dány rozptyl

$$D(\bar{X}) = \frac{[\Delta X_{\max} - (-\Delta X_{\max})]^2}{12} = \frac{\Delta X_{\max}^2}{3} \quad (25)$$

a směrodatná odchylna

$$\sigma(\bar{X}) = \sqrt{D(\bar{X})} = \frac{\Delta X_{\max}}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

V tomto případě se v intervalu  $\langle -\Delta x_{\max}; +\Delta x_{\max} \rangle$  nachází správná hodnota s pravděpodobností 100 %.

Jednotlivé složky nejistoty typu B pro  $m$  jejich zdrojů se v případě jejich vzájemné statistické nezávislosti (bez vzájemné korelace) sčítají níže uvedeným způsobem

$$u_B(x) = \sqrt{A_{x,z_j}^2 \sum_{j=1}^m u_{B,z_j}^2} \quad (27)$$

přičemž  $A_{x,z_j}$  jsou citlivostní koeficienty určující přenos nejistoty odhadnuté do nejistoty měřené veličiny  $X$ . Je-li známa závislost

$$x = f(z_1, z_2, \dots, z_m) \quad (28)$$

bude pro výpočet citlivostních koeficientů platit

$$A_{x,z_j} = \frac{\partial f(z_1, z_2, \dots, z_m)}{\partial z_j}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (29)$$

Jsou-li jednotlivé složky nejistoty vzájemně korelovány, je nutné buď znát, nebo z koeficientů korelace výpočtem určit kovariance (míra vzájemné statistické závislosti dvou veličin) mezi nimi a použít pro výpočet složitější vztahy. (Kreidl, 2005)

V případě dvou vzájemně závislých složek (zdrojů nejistot  $Z_j$  a  $Z_k$ ) tedy

$$u_B(x) = \sqrt{A_{x,z_j}^2 \sum_{j=1}^m u_{B,z_j}^2 + 2A_{x,z_j}^2 A_{x,z_k}^2 \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m C(z_j, z_k)} \quad (30)$$

kde  $C(z_j, z_k)$  je vzájemná kovariance zdrojů nejistot  $Z_j$  a  $Z_k$ . (Misák, 2017)

### 2.2.3 Kombinovaná standardní nejistota typu C

Nejistota  $u_C(x)$  je složená z předešlých dvou typů základní nejistot dle vztahu

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (31)$$

Je-li současně jeden z typů nejistoty výrazně nižší než druhý, lze jej zanedbat.

### 2.2.4 Rozšířená nejistota

Nejistota  $U(x)$  slouží pomocí koeficientu rozšíření  $k$  ke zvýšení pravděpodobnosti, že se naměřená hodnota nachází v intervalu vymezeném standardní nejistotou

$$U(x) = k u_C(x) \quad (32)$$

S uvažováním normálního rozdělení, se hodnota koeficientu rozšíření volí z intervalu  $c \in \langle 2, 3 \rangle$ , viz obr. 10. Ve většině případů se v technické praxi nejčastěji volí  $c = 2$  (Kreidl, 2005; Misák, 2017), který v případě normálního rozdělení odpovídá pravděpodobnosti 95,45 %.

### 2.2.5 Stanovení nejistoty při nepřímém měření

V případě, že hodnota hledané veličiny je stanovena nepřímo výpočtem z hodnot jiných přímo měřených veličin, je jejich funkcí

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (33)$$

a protože správné (pravé) hodnoty přímo měřených veličin  $X_1, X_2, \dots, X_m$  nejsou známy a není známa ani správná hodnota veličiny  $Y$ , pracuje se dále s odhady hodnot těchto veličin  $y$  a  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , jež lze buď odhadnout na základě přímých měření nebo stanovit z jiných možných zdrojů (korekce, konstanty atp.). Potom

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (34)$$

K výpočtu nejistoty se v tomto případě použije tzv. zákon šíření nejistot. V případě vzájemné nezávislosti veličin  $x_i$ , pro  $i = 1, 2, \dots, m$ , se použije vztah

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2} \quad (35)$$

Pokud ale vykazují veličiny vzájemnou závislost, nebo nelze-li u nich korelační koeficienty nabývající hodnot z rozsahu  $\langle -1; 1 \rangle$  zanedbat, musí se použít rozšířený vztah

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m A_i A_j C(x_i, x_j)} \quad (36)$$

v němž  $C(x_i, x_j)$  je kovariance mezi navzájem korelovanými veličinami  $x_i$  a  $x_j$ . V případě standardní nejistoty typu A platí, že

$$C_A(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j) \quad (37)$$

U standardní nejistoty typu B je kovariance určena

$$C_B(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) u_B(x_i) u_B(x_j) \quad (38)$$

tedy na základě korelace  $r(x_i, x_j)$ . (Kreidl, 2005)

Problematika určení vzájemné kovariance při závislosti veličiny v případě nejistoty typu B je obecně složitější. Její podrobnější výklad by ale již přesahoval rozsah této studijní opory a lze jej dohledat v doporučené literatuře.

Výsledná nejistota výsledku měření se vždy zaokrouhuje na jednu, maximálně na dvě platné číslice a uvádí se společně s výsledkem takovým způsobem, aby opravovala jeho poslední platnou číslici, viz příklady zápisu v tab. 1. Naopak při dílčích výpočtech se pracuje s vyšší přesností, takže se u mezivýsledků nejčastěji zaokrouhuje na dvě platné číslice. Za platnou číslici se považují všechny číslice 0, 1, 2, ..., 9, tj. včetně nuly, ale jen v tom případě, je-li nula uprostřed nebo na konci čísla. Počet platných číslic není přímo úměrný počtu desetinných míst. Zjednodušeně řečeno se nejdříve provede zaokrouhlení nejistoty na jednu platnou číslici a dle toho se upraví výsledek, přičemž je někdy nutné jej doplnit o nulu zprava, viz 1. příklad v tab. 1.

Tab. 1 – Příklady správného a nesprávného zápisu výsledku měření a nejistoty

Vypočtená hodnota	Vypočtená nejistota	Správný zápis výsledku	Příklady nesprávného zápisu výsledku
16,5	0,021	16,50 ± 0,02	16,5 ± 0,021; 16,5 ± 0,02
0,86	0,23	0,9 ± 0,2	0,86 ± 0,23; 0,9 ± 0,23
0,4321	0,0467	0,43 ± 0,05	0,4321 ± 0,0467; 0,4 ± 0,05
856,2	9	856 ± 9	856,2 ± 9; 856,2 ± 9,0
278,7	7,56	279 ± 8	278,7 ± 7,56; 279,0 ± 7,6
731 000	20 000	$(7,3 \pm 0,2) \cdot 10^5$	710 000 ± 20000; $(7 \pm 0,2) \cdot 10^5$
56,57	3,78	57 ± 4	56,57 ± 3,78; 57 ± 3,8; 56,6 ± 3,8

Zápis výsledku měření veličiny  $X$  se uvádí jako odhad  $x$  s uvedením kombinované nejistoty typu C a měl by být uveden vč. jednotky  $J$  ve tvaru

$$X = [x \pm u_c(y)] J \quad (39)$$

### 2.2.6 Některé zdroje standardní nejistoty typu B

Většinu níže uvedených zdrojů nejistot typu B byl již věnován prostor v odstavcích 2.1.4 až 2.1.7, v nichž je uveden jejich podrobnější popis. Zdroje standardní nejistoty typu B mohou být následující:

- a) **Třída přesnosti TP** používaná u analogových měřicích přístrojů udává číslem z definované řady (0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5), kolik procent ze zvoleného rozsahu činí maximální možná chyba. Specifikuje tedy vlastně mezní hodnotu nejistoty a do celkové nejistoty měření se zahrnuje prostřednictvím standardní nejistoty typu B

$$u_B(y) = \frac{TP}{100} M \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (40)$$

kde  $M$  je měřicí rozsah přístroje (nejvyšší hodnota daného rozsahu). Měřicí rozsah je běžně udáván jako  $X_{\max} - X_{\min}$ . Hodnota  $1/\sqrt{3} \approx 0,5774$  odpovídá symetrickému rozdělení (pravděpodobnost  $P(x) = 57,74 \%$ , viz obr. 11). Při praktických výpočtech se tak často maximální chyba přístroje násobila zjednodušeně zaokrouhlenou hodnotou 0,6.

b) **Relativní chyba číslicového měřicího přístroje** je výrobcí stále ještě uváděna v několika historicky zavedených variantách. Používá se většinou předpis ve tvaru  $\pm\%FS \pm\%R$ , v němž FS (Full Scale) značí měřicí rozsah  $M$  a R (Read) naměřenou (čtenou) hodnotu. Případně předpis ve tvaru  $\pm\%R \pm n \text{ digit}$ , v němž digit, dig, nebo příp. count, ct, představuje  $\pm n$  násobek rozlišitelnosti  $R$  blíže popsané v odstavci 2.1.3.

V souladu se zde zavedeným značením se jedná o:

- relativní chybu  $\delta_1$  z naměřené hodnoty  $X$  a relativní chybu  $\delta_2$  z měřicího rozsahu  $M$ ;
- relativní chybu  $\delta_1$  z naměřené hodnoty  $X$  a hodnotu *digit* (násobek rozlišitelnosti  $R$ );
- relativní chybu  $\delta_2$  z měřicího rozsahu  $M$ .

Výrobcí uvedené relativní chyby uvádí jako mezní, a jako takové je možné je vyjádřit pomocí standardních nejistot typu B

$$u_B(x) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{\delta_1}{100} X + \frac{\delta_2}{100} M \right) \quad (41)$$

$$u_B(x) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{\delta_1}{100} X + \text{digit} R \right) \quad (42)$$

$$u_B(x) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{\delta_2}{100} M \right) \quad (43)$$

c) **Relativní přesnost (chyba) senzoru** je výrobcí stále ještě udávána v podobě vztahu (14), jako maximální chyba z měřicího rozsahu. Mezní nejistotu je také možné vyjádřit ve tvaru relativním, takže pro výpočet standardní nejistoty typu B se použije

$$u_B(x) = \frac{\delta_s (X_{\max} - X_{\min})}{\sqrt{3}} \quad (44)$$

d) **Chyba linearity** (linearita, resp. nelinearita) je definována jako odchylka od lineární (spojité či kvantované) statické převodní charakteristiky senzoru s využitím vztahu (19). Standardní nejistotu typu B pak lze vyjádřit

$$u_B(y) = \frac{(Y_N - Y_L)_{\max}}{\sqrt{3}} \quad (45)$$

e) **Chyba hystereze** byla definována pomocí vztahu (20). Standardní nejistota typu B je potom dána vztahem

$$u_B(y) = \frac{1}{2\sqrt{3}} (\Delta_{yH})_{\max} = \frac{(Y - \bar{Y})_{\max}}{\sqrt{3}} \quad (46)$$



f) **Chyba způsobená kvantováním signálu** je vyjádřena pomocí maximální absolutní chyby s využitím vztahu (15). Standardní nejistota typu B pak může být vyjádřena

$$u_B(y) = \frac{\Delta_q}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{2^n} \frac{X_{\max}}{\sqrt{3}} = \frac{X_{\max}}{N\sqrt{3}} \quad (47)$$

kde  $\Delta_q = x_{\max}/2^n$  je šířka pásma kvantovací chyby a  $N = 2^n$  udává počet kvantizačních úrovní.

### 2.3 Dynamické vlastnosti senzoru

Jelikož se měřená veličina  $X$  neustále mění s časem, musí senzory, které mohou být součástí regulačních obvodů či mohou indikovat mezní stavy, zkonstruovány takovým způsobem, aby výstupní signál  $Y = Y(t)$  sledoval vstupní signál  $X = X(t)$  s minimálním zpožděním a co nejmenším zkreslením. Dynamické chování senzoru lze za jistých zjednodušení a po případné linearizaci popsat pomocí **lineární diferenciální rovnice s konstantními koeficienty**

$$a_n Y^{(n)} + \dots + a_2 Y'' + a_1 Y' + a_0 Y = b_m X^{(m)} + \dots + b_2 X'' + b_1 X' + b_0 X \quad (48)$$

Aby byla splněna podmínka fyzikální realizovatelnosti systému musí být  $m \leq n$ , tj. stupeň nejvyšší derivace výstupní veličiny musí být větší nebo roven stupni nejvyšší derivace vstupní veličiny. Obrazový přenos  $G(s)$  je pak definován jako poměr Laplaceova obrazu výstupní veličiny k Laplaceově obrazu vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách. Diferenciální rovnici (48) lze s využitím pravidel Laplaceovy transformace a při splnění výše uvedených podmínek transformovat

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (49)$$

a případně upravit do tvaru s časovými konstantami

$$G(s) = K \frac{(1 + sT_{b1})(1 + sT_{b2}) \dots (1 + sT_{bm})}{(1 + sT_1)(1 + sT_2) \dots (1 + sT_n)} \quad (50)$$

#### 2.3.1 Přechodové charakteristiky

V technické praxi obvykle postačuje dynamické vlastnosti senzorů popsat rovnicemi prvního a druhého řádu, jen výjimečně řádu vyššího. V grafickém podobě se dynamické vlastnosti senzorů vyjadřují pomocí **přechodových charakteristik**, viz průběhy pro 1. a 2. řád na obr. 12. Přechodová charakteristika je reakcí systému na jednotkový skok. Velké množství senzorů vykazuje dynamické chování systémů se zpožděním 1., 2. nebo 3. řádu, zcela výjimečně řádu vyššího. Jejich přechodové charakteristiky lze bez potíží aproximovat charakteristikou 1. řádu nebo příp. charakteristikou 1. řádu s dopravním zpožděním. Výrobci senzorů udávají nezávisle na řádu statické zesílení  $K$  a časovou konstantu  $T$  resp.  $\tau$  (odpovídá 63,2 % ustálené odezvy), nebo tzv. **dobu odezvy**, tj. čas, za nějž odezva senzoru dosáhne 90 nebo 95 % ustálené hodnoty. (Kreidl, 2005) a (Kupka, 2007)

Analytické vyjádření průběhu přechodové charakteristiky 1. řádu v normovaném tvaru je

$$\frac{Y(t)}{Y_{\max}} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad (51)$$

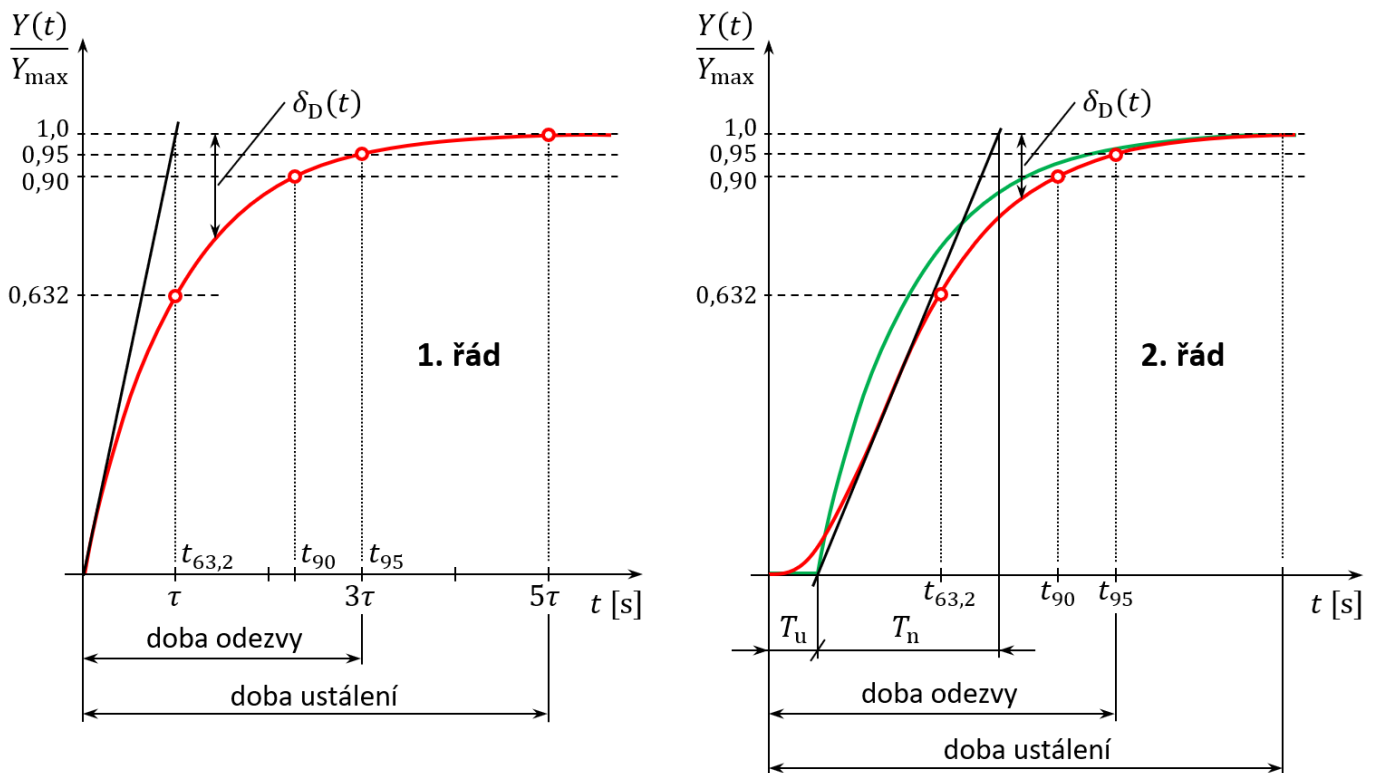
V případě přechodové charakteristiky 1. řádu lze **dynamickou odchylku**  $\delta_D(t)$  od správné (zde ustálené) hodnoty dále vyjádřit

$$\delta_D(t) = \frac{Y(t) - Y_{\max}}{Y_{\max}} = \frac{Y(t)}{Y_{\max}} - 1 \quad (52)$$

Jak již bylo řečeno, přechodové charakteristiky systémů vyšších řádů je možné aproximovat přenosem

$$G_a(s) = \frac{K}{T_S + 1} e^{-sT_d} \quad (53)$$

Na základě odečtu dob průtahu  $T_u$ , náběhu  $T_n$  (viz obr. 12 vpravo) se nejčastěji volí  $T = T_n$  a  $T_d = T_u$ , nebo příp.  $T_d = t_{63,2}$ . Průběh aproximační funkce je v grafu zelenou barvou.



Obr. 12 – Přechodové charakteristiky systémů 1. a 2. řádu, zdroj autor dle (Kreidl, 2005)

### 2.3.2 Frekvenční charakteristiky

K posouzení vlastností senzorů i dalších členů měřicího řetězce se používají také **frekvenční charakteristiky**. Jsou-li na vstup systému zavedeny harmonické kmity  $X(t)$  o určité frekvenci, tak po určité době nutné k utlumení přechodového děje se objeví na výstupu tohoto systému harmonické kmity  $Y(t)$  se stejnou frekvencí, ale obecně s jinou amplitudou a s fázovým posunem. Utlumení přechodového děje nastane vždy, pokud je systém stabilní.

Jelikož lze harmonický pohyb znázornit v komplexní rovině vektorem s konstantní amplitudou, který se otáčí v kladném smyslu (ve směru hodinových ručiček) úhlovou rychlostí  $\omega$ , lze rovnici vstupních kmitů zapsat ve tvaru

$$\mathbf{X} = X_0 e^{j\omega t} \quad (54)$$

a rovnici výstupních kmitů

$$\mathbf{Y} = Y_0 e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (55)$$

kde  $x_0$  a  $y_0$  jsou amplitudy vstupních a výstupních kmitů a  $\varphi$  je fázový posuv výstupních kmitů vůči vstupním. S výjimkou derivačních členů (systémů s neminimální fází) je  $\varphi < 0$ , tj. výstupní kmitů jsou zpožděny za vstupními.

Poměr výstupních kmitů ke vstupním je možné vyjádřit

$$G(j\omega) = \frac{\mathbf{Y}}{\mathbf{X}} = \frac{Y_0}{X_0} e^{j\varphi} \quad (56)$$

Komplexní funkce  $G(j\omega)$  udává, jak se mění výstupní kmitů  $Y(t)$  co do amplitudy a fáze v závislosti na frekvenci, je-li udržována amplituda vstupních kmitů konstantní. Modulem funkce  $G(j\omega)$  je poměr amplitud vstupních a výstupních kmitů

$$|G(j\omega)| = \frac{Y_0}{U_0} = A(\omega) \quad (57)$$

a jejím argumentem je fázový posuv

$$\arg[G(j\omega)] = \varphi(\omega) \quad (58)$$

Funkce  $G(j\omega)$  je tzv. **frekvenční přenos**. Lze jej získat také z přenosu obrazového, dosazením za  $s = j\omega$ , tedy

$$G(j\omega) = \frac{b_m(j\omega)^m + \dots + b_2(j\omega)^2 + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + \dots + a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + a_0} \quad (59)$$

Po rozdělení výrazů v čitateli a ve jmenovateli přenosu  $G(j\omega)$  na reálnou a imaginární část bude

$$G(j\omega) = \frac{e(\omega) + jf(\omega)}{c(\omega) + jd(\omega)} \quad (60)$$

kde

$$\begin{aligned} c(\omega) &= a_0 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots \\ d(\omega) &= a_1\omega - a_3\omega^3 + a_5\omega^5 - \dots \\ e(\omega) &= b_0 - b_2\omega^2 + b_4\omega^4 - \dots \\ f(\omega) &= b_1\omega - b_3\omega^3 + b_5\omega^5 - \dots \end{aligned}$$

Po vynásobení čitatele i jmenovatele přenosu  $G(j\omega)$  členem  $[c(\omega) + jd(\omega)]$ , tedy výrazem komplexně sdruženým (konjugovaným) ke jmenovateli přenosu, lze  $G(j\omega)$  zapsat přímo jako komplexní číslo – ve složkovém popř. v exponenciálním tvaru

$$G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega)e^{\varphi(\omega)} \quad (61)$$

Z výše uvedeného dále plyne, že:

- $P(\omega) = A(\omega) \cos \phi(\omega)$  je reálná část frekvenční charakteristiky;
- $Q(\omega) = A(\omega) \sin \phi(\omega)$  je imaginární část frekvenční charakteristiky;
- $A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}$  je amplitudová frekvenční charakteristika;
- $\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}$  je fázová frekvenční charakteristika.

**Frekvenční charakteristika** systému v komplexní rovině je geometrické místo, které opíše koncový bod vektoru  $G(j\omega)$  v komplexní rovině při změně frekvence vstupního harmonického signálu v rozsahu  $-\infty \leq \omega \leq \infty$ . Tato charakteristika se někdy označuje jako tzv. **amplitudo-fázová** a je též grafickým zobrazením přenosu  $G(j\omega)$  v komplexní rovině. Větev charakteristiky pro záporné frekvence je souměrná podle reálné osy s větví pro frekvence kladné a zpravidla se neuvádí.

**Amplitudovou**  $A(\omega)$  a **fázovou**  $\varphi(\omega)$  frekvenční charakteristiku je vhodné znázorňovat v logaritmických souřadnicích. Z toho důvodu jsou často tyto charakteristiky označovány jako **logaritmické frekvenční charakteristiky**. U amplitudové charakteristiky bývá zvykem vynášet absolutní hodnotu (modul) velikosti přenosu v decibelech [db]. Hodnota veličiny v decibelech se vypočte jako dvacetinásobek dekadického logaritmu této veličiny. Na logaritmické stupnici pro frekvenci  $\omega$  se interval mezi určitou frekvencí a jejím desetinásobkem nazývá **dekádou**. V praxi se často přesné charakteristiky nahrazují asymptotami. U asymptot se pak hovoří o poklesu resp. vzrůstu vztaženém právě na dekádu. (Kupka, 2007)

### 2.3.3 Dynamická chyba měření

**Dynamická chyba měření** je dána rozdílem mezi dynamikou chování ideálního a reálného senzoru (Ďaďo, 1996). V prostoru obrazů po aplikaci Laplaceovy transformace pro **absolutní dynamickou chybu**

$$\Delta_D(s) = G(s)X(s) - KX(s) = X(s)[G(s) - K] \quad (62)$$

a pro **relativní dynamickou chybu**

$$\delta_D(s) = \frac{\Delta_D(s)}{KX(s)} = \frac{G(s)}{K} - 1 \quad (63)$$

Časovou funkci dynamické chyby  $\Delta_D(t)$  lze získat zpětnou Laplaceovou transformací

$$\Delta_D(t) = \mathcal{L}^{-1}\{\Delta_D(s)\} \quad (64)$$

Bude-li dále provedena aproximace dynamiky senzoru diferenciální rovnicí 1. řádu ve tvaru

$$TY'(t) + Y(t) = KX(t) \quad (65)$$

s odpovídajícím přenosem

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (66)$$

a časový průběh vstupní veličiny  $X(t)$  bude odpovídat průběhu s jedinou harmonickou složkou, pak pro absolutní dynamickou harmonickou odchylku lze ve frekvenční oblasti odvodit

$$\Delta_D(j\omega) = X(j\omega)[G(j\omega) - K] \quad (67)$$

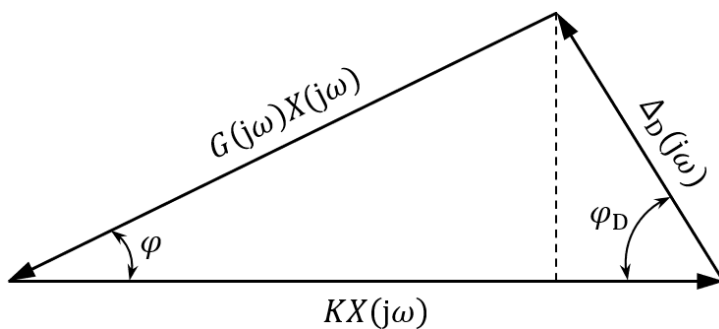
a znázornit ve fázorovém diagramu na obr. 13. S využitím kosinové věty lze z fázorového diagramu odvodit vztah pro modul chyby  $\Delta_D(j\omega)$

$$|\Delta_D(j\omega)| = \sqrt{|KX(j\omega)|^2 + |G(j\omega)X(j\omega)|^2 - 2|G(j\omega)X(j\omega)||KX(j\omega)| \cos \varphi} \quad (68)$$

a pro její fázi

$$\varphi_D(j\omega) = \arctg \frac{|G(j\omega)X(j\omega)| \sin \varphi}{|KX(j\omega)| - |G(j\omega)X(j\omega)| \cos \varphi} \quad (69)$$

Chyba  $\Delta_D(j\omega)$  má harmonický průběh a její amplituda i fáze jsou závislé na frekvenci. (Kreidl, 2005) a (Ďaďo, 1996).

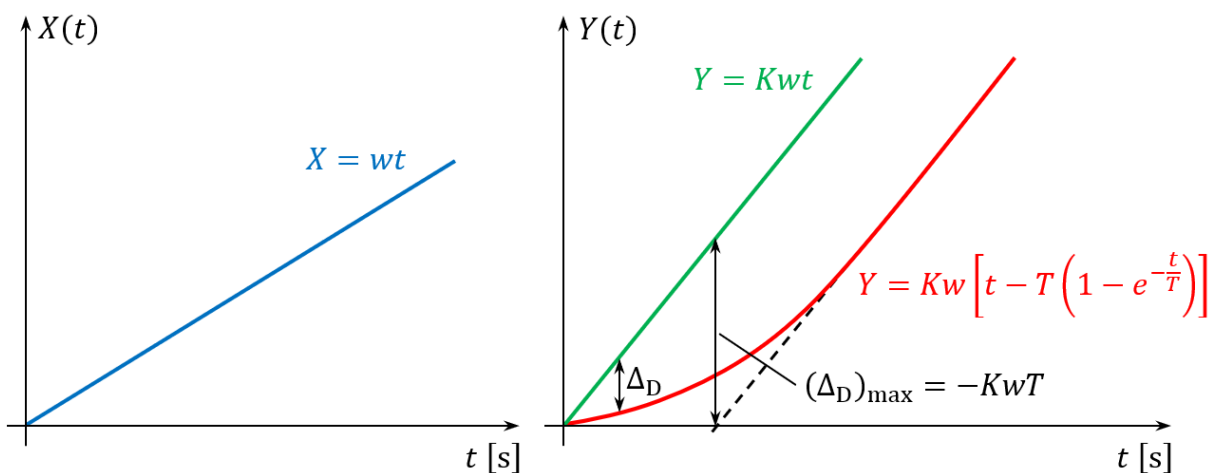


Obr. 13 – Fázorový diagram, zdroj autor dle (Kreidl, 2005)

K výpočtu standardní nejistoty typu B se použije vztah

$$u_B(y) = \frac{|\Delta_D(j\omega)|_{\max}}{\sqrt{3}} \quad (70)$$

V praxi se k výpočtu nejistoty spíše použije vhodnější rychlostní charakteristika na obr. 14.



Obr. 14 – Rychlostní charakteristika 1. řádu, zdroj autor dle (Kreidl, 2005)

K odhadu maximální chyby pak postačuje určit maximální možnou rychlost  $w$  změny vstupní veličiny senzoru a standardní nejistotu typu B vypočítat

$$u_B(y) = \frac{(\Delta_D)_{\max}}{\sqrt{3}} = \frac{-kwT}{\sqrt{3}} \quad (71)$$

Vykazuje-li senzor dynamické vlastnosti systému vyššího řádu, použijí se ve výpočtech i další časové konstanty. V praxi se poměrně často lze setkat s tím, že se vstupní veličiny mění konstantní rychlostí. Pak pro přenos senzoru jakožto systému  $n$ -tého řádu

$$G(s) = \frac{K}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)\dots(1 + sT_n)} \quad (72)$$

je možné odvodit pro dynamickou absolutní chybu vztah

$$\Delta_D(s) = \frac{w}{s^2} [G(s) - K] \quad (73)$$

Po aplikaci limitní věty

$$[\Delta_D(t)]_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta_D(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s\Delta_D(s) = -wK(T_1 + T_2 + \dots + T_n) \quad (74)$$

Pokud se v dynamice senzoru navíc projeví dopravní zpoždění  $T_d$ , vztah (74) se upraví do tvaru

$$[\Delta_D(t)]_{\max} = -wK(T_d + T_1 + T_2 + \dots + T_n) \quad (75)$$

Dynamická chyba senzoru se zvýší, pokud je analogový signál následně číslicově zpracováván. Nárůst dynamické chyby je v tomto případě způsoben kvantováním. Při uvažování vzorkovací periody  $T_v$  a při předpokladu, že je vždy větší, než doba převodu analogového signálu na číslicový, platí s ohledem na (15) podmínka

$$T_v = \frac{\frac{X_{\max}}{2^n + 1}}{\left| \left( \frac{dX}{dt} \right)_{\max} \right|} \quad (76)$$

v níž  $(dX/dt)_{\max}$  představuje maximální přípustnou rychlost vstupní veličiny, takovou, aby přídatná dynamická chyba nepřekročila hodnotu kvantovací chyby. (Đađo, 1996) a (Kreidl, 2005)

### 3 Otázky a úkoly

- 1) Jakým způsobem posuzujeme základní statické a dynamické vlastnosti měřicích přístrojů a senzorů?
- 2) Vysvětlete rozdíl mezi aditivními a multiplikativními chybami senzorů.
- 3) Vyjmenujte nejistoty měření podle ČSN EN ISO/IEC 17025 „Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří“.
- 4) Uveďte přenos a typický průběh přechodové a frekvenční charakteristiky systému 2. řádu.
- 5) Napište několik příkladů korektního zápisu výsledku měření a odpovídající nejistoty.

## 4 Použitá literatura

BEJČEK, Ludvík, 2009. *Senzory neelektrických veličin: pomocné texty k přednáškám*. Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně.

ĎAĎO, Stanislav a Marcel Kreidl, 1996. *Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT. 315 s. ISBN 978-80-01-02057-6.

JENČÍK, Josef a Jaromír Volf, 2003. *Technická měření*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 978-80-01-02138-6.

KOCOUREK, Vladimír, 2015. *Kvalita v laboratorní a kontrolní praxi – část 3: chyby a hodnocení výsledků měření* [studijní opora]. VŠCHT v Praze.

KREIDL, Marcel, 2005. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN, 240 s. ISBN 978-80-730-0145-4.

KŘEMENÁKOVÁ, Dana a Jiří Militký, 2013. *MHJ 1 – Textilní metrologie* [studijní opora]. TU v Liberci, Fakulta Textilní, Katedra materiálového inženýrství.

KUPKA, Libor a Josef Janeček, 2007. *Matlab & Simulink: řešené příklady*. 224 s. TG tisk a SOŠ a SOU Lanškroun. ISBN 978-80-239-9532-9.

MILDE, David, 2019. *Metrologie v chemii* [studijní opora]. Univerzita Palackého v Olomouci.

MISÁK, Petr, 2017. *Zkušební metody a jejich validace: vyjadřování nejistot měření v kvantitativním zkoušení* [studijní opora]. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.

SENF, Václav, 2012. *Analytické vlastnosti metod* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://postudium.cz/mod/resource/view.php?id=4978>>

### Seznam zkratk

ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
FS	full scale (měřicí rozsah)
IEC	International Electrotechnical Commission (Mezinárodní elektrotechnická komise)
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
LSB	least significant bit (nejméně významný bit)
ppm	parts per milion (částic na milion, miliontina)
R	read (čtený, resp. zobrazovaný údaj senzoru)
TP	třída přesnosti

## Rejstřík

- citlivost senzoru, 6
- diferenciální nelinearita, 11
- diferenciální rovnice, 22
- dynamická chyba, 25, 27
- dynamické vlastnosti senzoru, 4
- dynamický rozsah, 7
- frekvenční charakteristiky, 25
- frekvenční přenos, 24
- hustota pravděpodobnosti, 16
- charakteristika, 1, 4, 5, 10, 12, 22, 25, 27
  - frekvenční, 4
  - frekvenční amplitudová, 25
  - frekvenční fázová, 25
  - přechodová, 22
  - převodní, 5, 8
  - rychlostní, 26
  - statická, 4, 10
- chyba hystereze, 12, 21
- chyba linearity, 11, 21
- chyba měření, 12
  - absolutní, 7, 8, 10, 12, 21
  - aditivní, 8
  - hrubá, 13
  - multiplikativní, 8
  - náhodná, 13
  - relativní, 7, 8, 10, 20, 21
  - systematická, 13
- chyba způsobená kvantováním signálu. viz kvantovací chyba
- integrální nelinearita, 11
- kovariance, 17, 18, 19
- kvantovací chyba, 8, 9, 21, 27
- LSB, 9, 28
- měřená veličina, 3, 4, 22
- měřicí přístroj
  - analogový, 20
  - číslicový, 20
- měřicí rozsah, 20, 28
- měřicí řetězec, 2, 3
- nejistota měření, 13
  - kombinovaná standardní nejistota typu C, 18
  - rozšířená nejistota, 18
  - standardní nejistota typu A, 14
  - standardní nejistota typu B, 16, 21
- oblast neurčitosti, 14
- odhad hodnoty, 14



počet platných číslic, 19  
práh citlivosti, 7  
přechodný stav, 4  
přesnost měření, 2  
relativní chyba, 8, 12, 20  
relativní přesnost, 21  
reprodukovatelnost, 7  
rozdělení, 3, 15, 16, 17, 18, 20, 24  
    normální, 16  
    rovnoměrné, 16  
rozlišitelnost, 7  
senzor, 1, 2, 3, 10, 22, 28  
statické vlastnosti senzoru, 4  
statické zesílení, 6  
třída přesnosti, 20  
výběrový aritmetický průměr, 13, 14

# Měření neelektrických veličin

## Téma 3: Tenzometry I

### Studijní cíl

Teoretická východiska odporové tenzometrie. Konstrukce tenzometrů, rozdělení na typy a jejich základní vlastnosti. Způsoby umístění na měřený objekt.

### Doba nutná k nastudování

2 hodiny

### Klíčová slova

Odporový tenzometr, polovodičový tenzometr, osová deformace, ohyb, krut, měrný odpor, piezorezistivní jev

## 1 Úvod do použití tenzometrů

Tenzometry se používají v celé řadě aplikací. Jmenovitě ve stavebnictví při měření deformací objektů, mostních i jiných konstrukcí, stožárů apod. Při měření vibrací u strojů a zařízení v továrnách, při měření napětí spojů (lepených či svařovaných) a v mnoha dalších oblastech strojírenského průmyslu, i v leteckém a automobilovém průmyslu. Jsou také součástí integrovaných senzorů síly, tlaku a zrychlení.

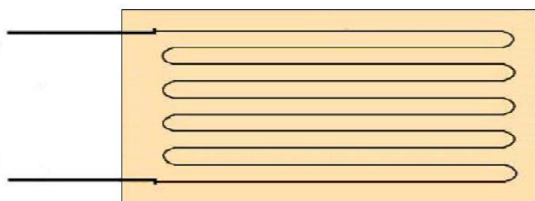
**Oblasti použití** elektrických tenzometrů, jak je uvedeno např. v (Wikipedie, 2006) nebo (Vojáček, 2005), tedy jsou:

- Analýza namáhání konstrukčních prvků (jednotlivých dílů i celých konstrukcí), např. svařovaných dílů (tlakových nádob, rámů strojů, karoserií vozidel, mostních konstrukcí apod.), ve dvou specifických případech:
  - ve vývoji a konstrukci při praktickém ověřování návrhu (při simulaci i v reálných podmínkách);
  - v reálném provozu při ověřování skutečného zatížení konstrukcí.
- Využití v jiných přístrojích, např. při měření síly tenzometrickými siloměry nebo tlaku deformačními tlakoměry a také v senzorech určených k diagnostice poruch.

Tenzometry mohou být různé konstrukce. Mohou být **kovové** – drátkové nebo fóliové, nebo **polovodičové**. Polovodičové tenzometry mají až 60krát větší citlivost než kovové, ale vyznačují se nelinearitou. Zmiňovaná nelinearita ovšem nepředstavuje výrazný problém, jelikož ji lze v rámci integrovaného senzoru bez potíží kompenzovat. Kovové tenzometry jsou sice přesnější

a navíc lineární, ale z důvodu jejich nižší citlivosti vyžadují složitější a tím i dražší vstupní obvody (zesilovače a A/D převodníky) v měřicím řetězci.

První tenzometry (anglicky strain gauge – měřidlo napětí), tj. vlastně převodníky deformace na změnu odporu, se začaly objevovat na přelomu 20. a 30. let 20. století (Vlk, 2003). Jako prvotní způsoby měření deformace aplikující princip změny měrného odporu vodiče při jeho deformaci se v té době používaly především uhlíkové odpory nalepené přímo na deformovanou součást a vzájemně spojené do můstkových obvodů a volné odporové dráty, které se deformovaly spolu s měřeným objektem (základní princip je ilustrován na obr. 4 dále v textu). Problémem uhlíkových odporů bylo, že se jejich odpor neměnil jen s deformací, ale i v průběhu času (tzv. inherentní nestabilita) a i se změnou teploty a vlhkosti. Tenzometry tvořené volným odporovým drátem zase nevykazovaly příliš velkou citlivost.



**Obr. 1 – Drátkový tenzometr, zdroj (Wikipedie, 2022)**

První kovové drátkové tenzometry (vodič ve tvaru meandru) byly vynalezeny v letech 1936 až 1938 v USA na California Institute of Technology a na Massachusetts Institute of Technology. Byly použity při měření síly u rázových zkoušek, při návrhu konstrukcí odolných zemětřesení a později při měření deformací dílů lokomotiv. Původně byly drátkové tenzometry s izolační vrstvou na povrchu vodiče (de facto drát odmotaný z běžného drátkového odporu) lepeny přímo na povrch měřeného tělesa. Později, pro snazší manipulaci, byly nejprve nalepeny na papírovou podložku, viz obr. 1, a teprve poté aplikovány (patent z roku 1939). Ve 40. letech pak drátkové tenzometry začaly hojně využívat zejména letečtí konstruktéři.

### 1.1 Teoretická východiska odporové tenzometrie

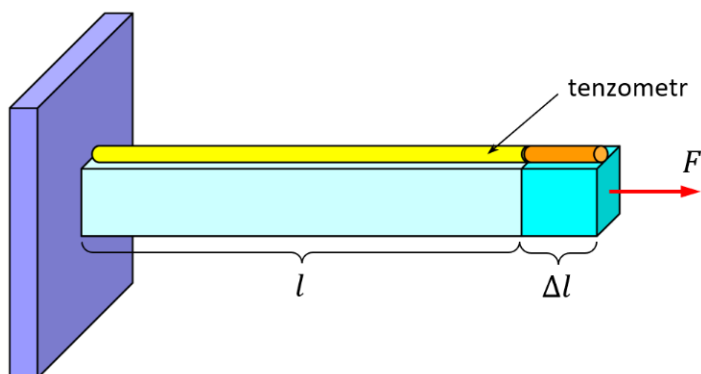
Princip funkce tenzometru spočívá v tom, že pokud na objekt, jehož deformaci vzniklou vlivem působení síly  $F$  chceme měřit, pevně připevníme vodič, tak se bude deformovat spolu s měřeným objektem (viz obr. 2). Lze tedy měřit změnu odporu vodiče, která je úměrná deformaci.

Uvažujeme pouze pružnou deformaci, tj. deformaci způsobenou silami, které působí pouze v mezích platnosti Hookova zákona a po jejichž odeznění deformace zmizí.

Při deformaci (protažení, průhybu) se při současném zmenšení průměru vodiče zvětšuje jeho délka a mění se i jeho měrný odpor (rezistivita). V tomto případě platí známý vztah pro výpočet odporu vodiče o délce  $l$ , průřezu  $S$  a měrném odporu  $\rho$ , který experimentálně zjistil již v roce 1843 britský vědec Ch. Wheatstone

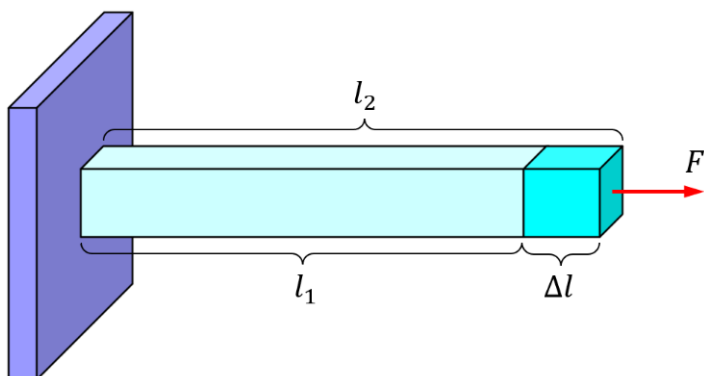
$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

Fyzikální podstatu, na níž je založen princip odporových tenzometrů, tj. závislost měrného odporu vodiče na jeho prodloužení, objevil v roce 1856 lord Kelvin (původně jménem William Thomson). Tento objev ale zůstal dlouho nevyužit, první pokusy praktického využití, jak již bylo řečeno výše, se datují až do konce 20. let 20. století.



Obr. 2 – Principiální schéma tenzometru, upraveno dle (Lufinka, 2012)

Změna měrného odporu je způsobena mikrostrukturálními změnami v materiálu vodiče. Měrný odpor u kovových odporových tenzometrů je obvykle nezávislý na deformaci, tj.  $\rho = konst.$  Naopak u polovodičových odporových tenzometrů se projevuje piezorezistivní jev a měrný odpor je výrazně závislý na mechanické deformaci.

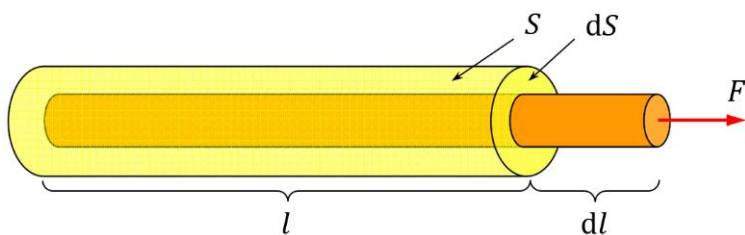


Obr. 3 – Schéma deformace tělesa vlivem působení síly, upraveno dle (Lufinka, 2012)

Při působení síly  $F$  na těleso dochází k jeho prodloužení z délky původní  $l_1$  na délku novou  $l_2$ , viz obr. 3. Rozdíl obou délek je označován jako absolutní prodloužení  $\Delta l = l_2 - l_1$ , přičemž relativní prodloužení  $\varepsilon$  se vyjádří jako absolutní prodloužení vztahované k původní délce, tj. dle vztahu

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_1} \quad (2)$$

Jak již bylo uvedeno, viz vztah (1), tak deformací vodiče (obr. 4) probíhají geometrické změny – mění se jednak jeho délka (o hodnotu  $dl$ ) a průřez (o  $dS$ ), ale vlivem mikrostrukturálních změn v materiálu i jeho měrný odpor (o  $d\rho$ ).



Obr. 4 – Schéma k odvození změny odporu vodiče vlivem deformace, upraveno dle (Lufinka, 2012)

Při odvození vycházíme z totálního diferenciálu, který vyjadřuje míru změny jednotlivých parametrů při deformaci, ve tvaru

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial S} dS \quad (3)$$

Po dosazení jednotlivých parciálních derivací vztahu (1)

$$dR = \frac{l}{S} d\rho + \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho l}{S^2} dS \quad (4)$$

a po následném vydělení odporem  $R$ , resp. pravou stranou výrazu (1) a úpravách obdržíme

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (5)$$

Změnu průřezu lze stanovit pomocí vztahu

$$\frac{dS}{S} = -2\mu \frac{dl}{l} = -2\mu\varepsilon \quad (6)$$

kde  $\mu$  je Poissonova konstanta udávající poměr zúžení a prodloužení vodiče. Změna měrného odporu  $\rho$  je závislá na Youngově modulu pružnosti a piezorezistivní konstantě materiálu a lze ji vyjádřit

$$\frac{d\rho}{\rho} = \kappa\varepsilon \quad (7)$$

Dosazením (6) a (7) do rovnice a s ohledem na (2), je-li  $\varepsilon = dl/l$ , dostáváme pro kovové tenzometry

$$\frac{dR}{R} = \kappa\varepsilon + \varepsilon - 2\mu\varepsilon = (1 - 2\mu + \kappa)\varepsilon = k\varepsilon \quad (8)$$

Obecněji, a pro jiné než kovové tenzometry, lze závislost poměrné změny odporu na poměrné deformaci vyjádřit jako polynom

$$\frac{dR}{R} = c_1\varepsilon + c_2\varepsilon^2 + c_3\varepsilon^3 + \dots \quad (9)$$

Pro velmi malé deformace a při použití vhodných materiálů s minimálními mikrostrukturálními změnami při deformaci je možné vyšší členy ve vztahu (9) zanedbat a uvažovat výše odvozený vztah (8).  $k$  se označuje jako tenzometrická konstanta, nebo někdy též jako součinitel, resp. koeficient deformační citlivosti.

Pro polovodičové tenzometry je ale nutné uvažovat závislost nelineární při použití prvních dvou členů vztahu (9)

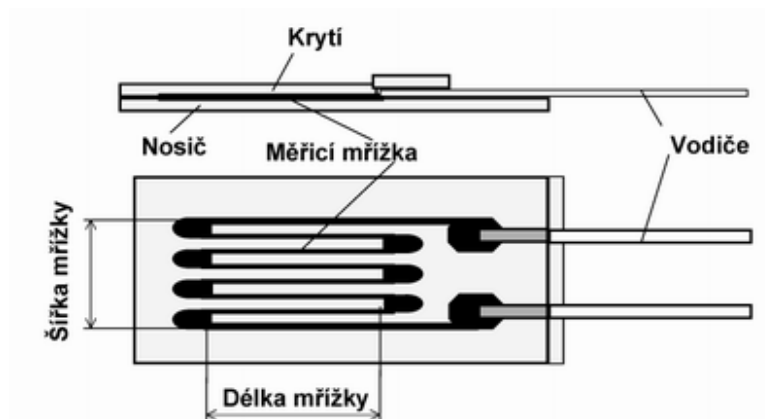
$$\frac{dR}{R} = c_1 \varepsilon + c_2 \varepsilon^2 \quad (10)$$

Tenzometrickou konstantu  $k^*$  polovodičového tenzometru lze s ohledem na výše uvedené vyjádřit

$$k^* = c_1 + c_2 \varepsilon \quad (11)$$

## 2 Kovové tenzometry

Základem kovových odporových tenzometrů je nejčastěji **vodič vyrobený z konstantanu**, který vykazuje malou teplotní závislost. V závislosti na požadavcích na vlastnosti tenzometru (vyšší teploty, vyšší namáhání) se ale používají i jiné materiály, např. karna (slitina chromu a niklu). Aby byla změna odporu co největší, je vodič tvarován do meandru.



Obr. 5 – Kovový fóliový tenzometr, zdroj (Vojáček, 2005)

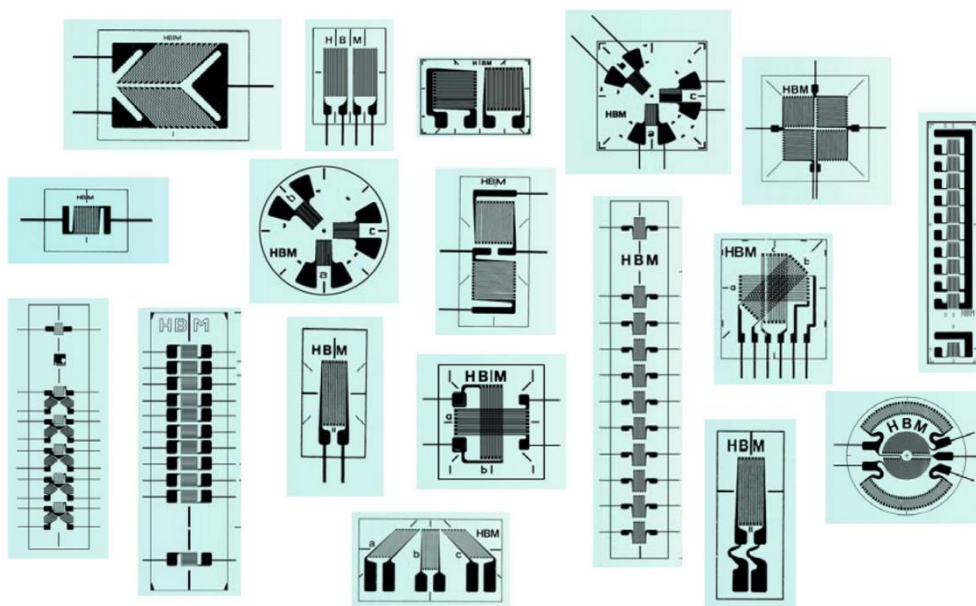
Tenzometry mohou být:

- **drátkové** (historické řešení, viz obr. 1) – drátek o průměru 0,01 až 0,05 mm je lepením připevněn k nevodivé podložce vyrobené ze speciálního papíru nebo umělé hmoty;
- **fóliové** (nejčastější provedení, viz obr. 5) – kovová vrstva tloušťky 1 až 6  $\mu\text{m}$ , která je fotolitograficky nanесena na nosnou podložku z polyimidu tloušťky 20 až 50  $\mu\text{m}$ ;
- **vrstvé** (jen pro speciální aplikace) – kovová vrstva nanесena přímo na materiál (vakuově nebo naprašováním).

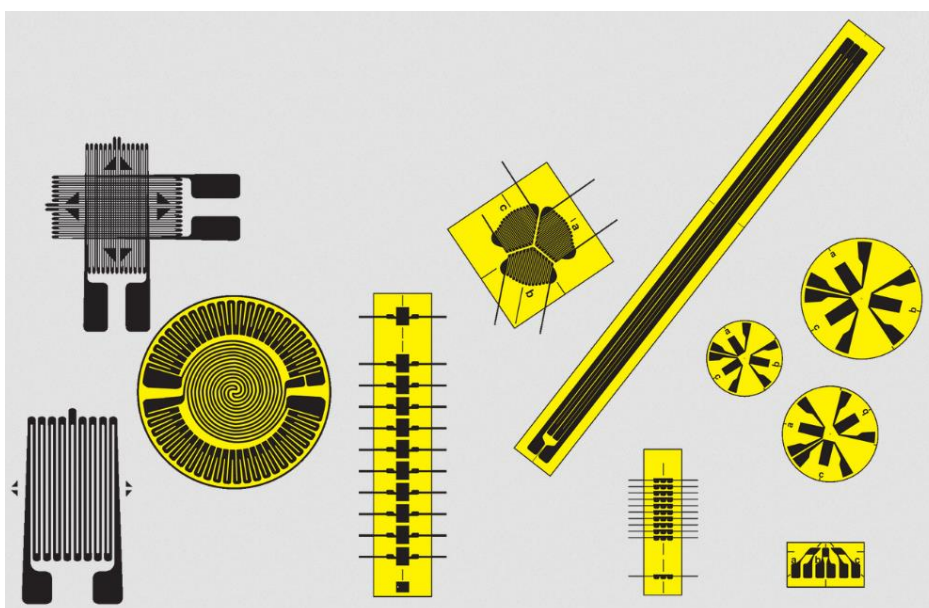
Nejčastějším typem jsou dnes tenzometry fóliové. Na obr. 6 a obr. 7 jsou uvedeny nejběžnější typy těchto tenzometrů vyráběné společnostmi HBM a Omega.

Základní provedení fóliového tenzometru (obr. 5) má na izolační vrstvě (podložka, nosič) tloušťky cca 20 až 50  $\mu\text{m}$  vyrobené z polyimidu, nebo dnes častěji polyimidu, upevněnu měřicí mřížku (odporový meandru) o tloušťce cca 1 až 6  $\mu\text{m}$ , dané délky, šířky a jmenovitého

(klidového) odporu, obvykle 100, 120, 350, 700 nebo 1000  $\Omega$ . Mřížka je na podložku nanášena fotolitografickou cestou a je provedena v podobě kovové fólie z konstantanu (nebo jiného materiálu). Mřížka je pokryta vrstvou tloušťky cca 30  $\mu\text{m}$ . Tenzometr je osazen buď pájecími ploškami nebo může mít vyvedeny vodiče. Běžné délky tenzometrů mohou být od 0,6 až do 150 mm. Tenzometrická konstanta u kovových fóliových tenzometrů (součinitel deformační citlivosti) bývá obvykle přibližně  $K = 2$  (dle materiálu kovové vrstvy). Provozní deformace  $\varepsilon_p = \pm 0,15\%$  a maximální deformace u speciálních typů tenzometrů až  $\varepsilon_{\max} = \pm 0,5\%$ . Minimální deformace s ohledem na citlivost tenzometru obvykle cca  $\varepsilon_{\min} = 1 \mu\text{m/m}$ . Životnost je zpravidla více jak 10 mil. cyklů při deformacích pohybujících se v rozmezí do  $\pm \varepsilon_{\max}$  rozměru tenzometru.

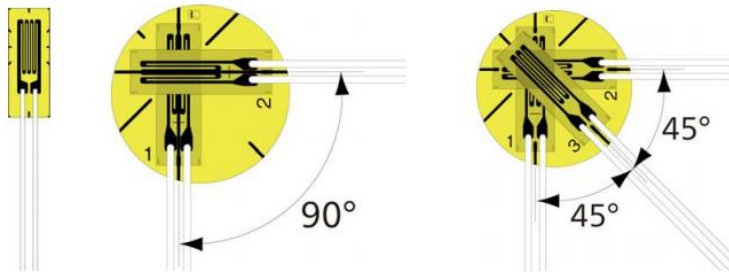


Obr. 6 – Příklad provedení tenzometrů firmy HBM, zdroj (HBM, 2022)



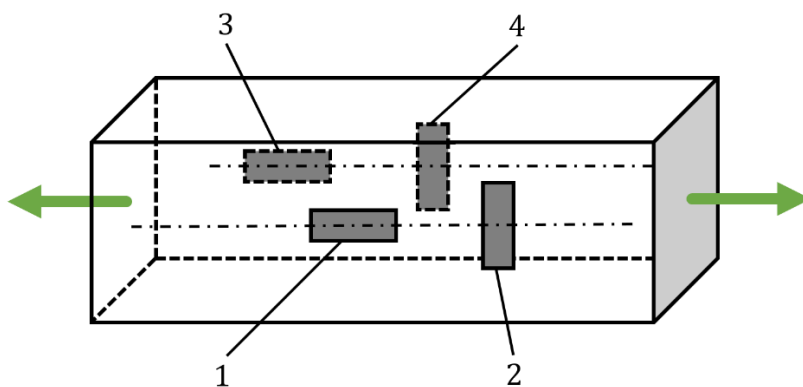
Obr. 7 – Příklad provedení tenzometrů firmy Omega, zdroj (Omega Engineering, 2022)

Jednoosé tenzometry je nutné správně natočit do předpokládaného směru působení deformace. Je-li potřeba měřit deformaci ve více směrech, lze použít tenzometry složené z více navzájem natočených měřicích mřížek. Může se jednat o tenzometrický kříž nebo o trojúhelníkovou nebo vrstvenou růžici (obr. 8).

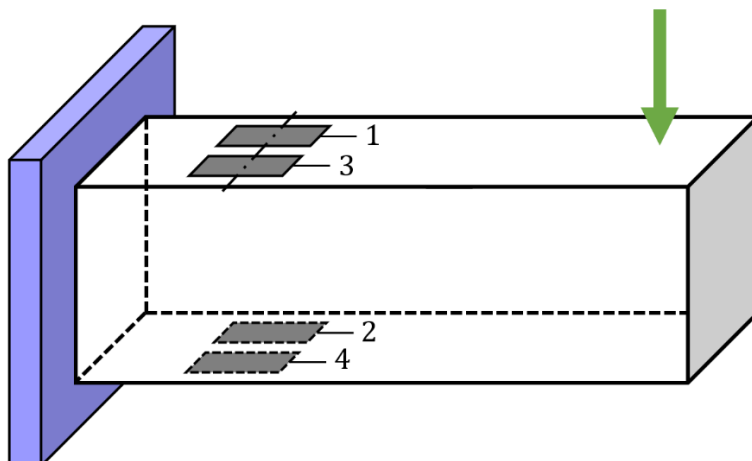


Obr. 8 – Tenzometry jednoosé, dvouosé a vrstvená růžice, zdroj (HBM, 2022)

Tenzometry je před vlastním měřením nutné vhodným způsobem na měřený objekt připevnit. K tomu účelu lze využít speciální lepidla a tmely dodávané přímo výrobcem tenzometrů. Lepidla nesmí zvyšovat chybu měření vlivem své teplotní roztažnosti. Termistory se podle potřeby měření umísťují na měřené objekty v určité konfiguraci. Na obr. 9 je příklad umístění 4 tenzometrů zapojených do můstku při měření osové deformace. Na obr. 10 je příklad umístění tenzometrů při měření ohybu nosníku a na obr. 11 pak příklad umístění dvou o 45° pootočených křížových tenzometrů při měření torzní deformace (krutu).

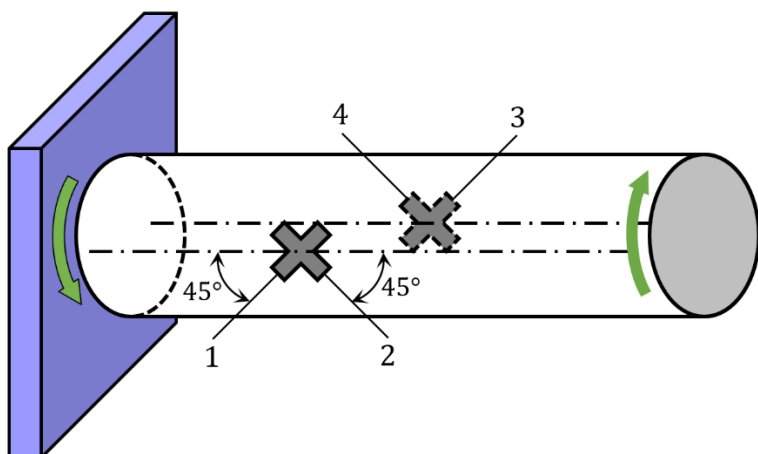


Obr. 9 – Umístění tenzometrů při měření osové deformace, zdroj autor dle (Vojáček, 2005)



Obr. 10 – Umístění tenzometrů při měření ohybu nosníku, zdroj autor dle (Vojáček, 2005)





Obr. 11 – Umístění tenzometrů při měření torzní deformace (krutu), zdroj autor dle (Vojáček, 2005)

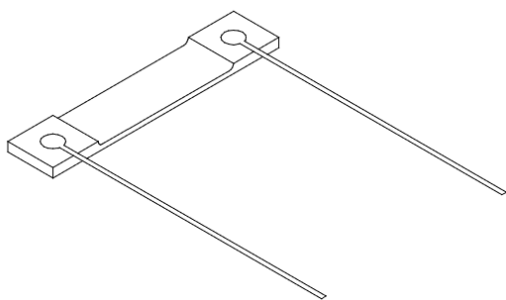
### 3 Polovodičové tenzometry

Je známou skutečností, že polovodiče jsou schopny měnit svoji vodivost v širokém rozmezí (změna může být o 6 až 8 řádů). Změna vodivosti může být zapříčiněna vnějšími jevy (změnou teploty, tlaku, osvětlení) nebo přidáním příměsí. Funkce polovodičových tenzometrů je založena na **piezorezistivním jevu**, tj. na změně elektrického odporu vlivem deformace polovodiče (např. monokrystalu křemíku či germania). Podle struktury použitého materiálu je lze rozdělit:

- monokrystalické (výřez křemíkového krystalu)
  - lepené (klasické);
  - difundované do substrátu;
- polykrystalické (naprašované, nebo napařované)

Jak již bylo uvedeno, je citlivost polovodičových tenzometrů až 60x větší než u kovových. Lze tedy konstruovat senzory kompaktních rozměrů současně při jejich vysoké tuhosti. Polovodičové tenzometry pracují v širokém frekvenčním rozsahu, od statických hodnot až po frekvence v jednotkách kHz. Mohou také pracovat až do 300 °C, neboť křemík se do této teploty deformuje bez měřitelné hystereze. Jsou také přetížitelné až do 200 % jmenovitého rozsahu při vysoké životnosti, která může být až  $10^9$  cyklů při plném zatížení. Mají ale nelineární průběh statické charakteristiky a výraznou teplotní závislost. Hodnota lineárního koeficientu deformační rovnice  $c_1$  je přibližně 120, kvadratického koeficientu  $c_2$  pak cca 4000, resp. hodnota tenzometrické konstanty  $k^*$  dosahuje hodnot od 50 až do 175. Maximální deformace polovodičových tenzometrů  $\varepsilon_{\max}$  je  $\pm 0,3$  %.

Polovodičové tenzometry se vyrábí pouze v jednoosém provedení a mají drátkové vývody ze zlata typicky o průměru 0,05 až 0,07 mm, viz obr. 12. Běžné délky těchto tenzometrů jsou v rozsahu od 2 do 10 mm. Křemíkové pásky, které tvoří základ tenzometru, nutně nevyžadují nosnou podložku. Elektrická izolace od měřeného objektu se řeší použitím speciálního tvrzeného lepidla na bázi epoxidové pryskyřice o tloušťce cca 0,03 mm.

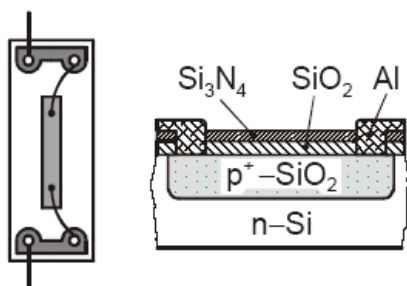


**Obr. 12 – Základní konstrukční provedení polovodičového tenzometru, zdroj (Vojáček, 2006)**

Piezorezistence polovodičů byla objevena americkým fyzikem Ch. S. Smithem v roce 1954. Tento jev mohl být prakticky využit až po nalezení potřebných technologií, takže první germaniové tenzometry se na trhu objevily až v roce 1957. Křemíkové tenzometry, které mají v pro oblast tenzometrie z důvodu lepších vlastností větší význam, se začaly vyrábět až v roce 1959, v bývalém Československu dokonce až od roku 1979.

### 3.1 Technologie pro výrobu polovodičových tenzometrů

Polovodičové tenzometry se vyrábí nejčastěji pomocí difúze příměsí do tenké vrstvy (cca 15 nm) křemíku. Křemík se používá především z toho důvodu, že vykazuje zanedbatelnou mechanickou a krystalografickou hysterezi a oproti germaniu je použitelný pro širší teplotní rozsah. Nejprve je potřeba z dotovaného monokrystalu křemíku mechanicky oddělit potřebné množství materiálu, který je dále povrchově opracován do požadovaného rozměru a tvaru a poté ještě ošetřen chemicky. Aktivní délka (mezi zlatými vývody) polovodičových pásek je 2 až 10 mm, šířka 0,2 až 0,4 mm a tloušťka 0,01 až 0,03 mm. Základní struktura integrovaného tenzometru je na obr. 13.

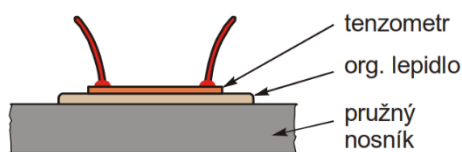


**Obr. 13 – Základní struktura integrovaného tenzometru, zdroj (Vojáček, 2006)**

Typické hodnoty odporu polovodičového tenzometru v nezátíženém stavu (jmenovitého) jsou 120, 350 nebo 1000  $\Omega$ . Velmi často se používají v senzorech pro měření tlaku.

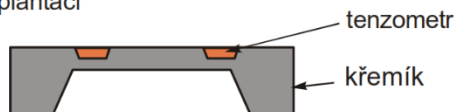
Možností realizace tenzometrických měřicích členů s polovodičovými tenzometry je však více. Tenzometry vyrobené v podobě pásek vzniklých rozřezáním výbrusu křemíkového monokrystalu mohou být na pružný nosník nalepeny pomocí speciálního organického lepidla nebo již popisovanou difúzní technologií, kdy je tenzometr vytvořen iontovou implantací. Mezi další způsoby, viz obr. 14, patří realizace tenzometru i izolační vrstvy s využitím tenkovrstvých technologií (napařování nebo napařování), příp. epitaxní růst na substrátu.

#### Lepené tenzometry:



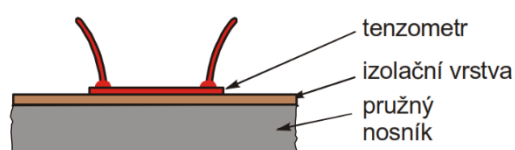
#### Difúzní technologie:

tenzometr je vytvořen iontovou implantací



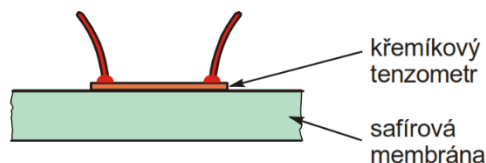
#### Tenkovrstvá technologie:

tenzometr a izolační vrstva jsou vytvořeny napařováním



#### Epitaxní technologie:

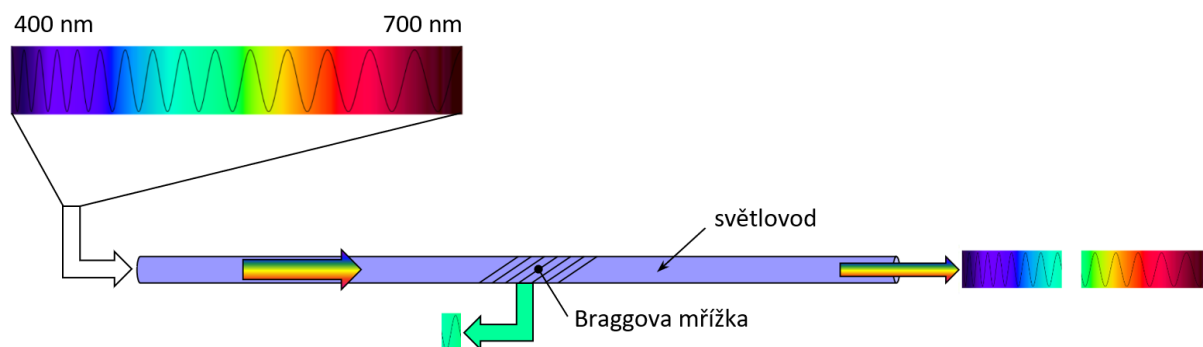
tenzometr vzniká epitaxním růstem na substrátu



Obr. 14 – Přehled možností realizace měřicích členů s polovodičovými tenzometry, zdroj (Kadlec, 2008)

## 4 Optické tenzometry

Pracují na principu odrazu světla na Braggově mřížce. Ta se obvykle vytvoří velmi přesným rytím nebo laserem uvnitř světlovodivého vlákna. Rozteč mřížky je úměrná konkrétní vlnové délce světla, takže světlo shodné vlnové délky se odrazí a zbylé světlo projde. Deformací mřížky mechanickým namáháním nebo vlivem změny teploty se změní její rozteč a pak dojde k odrazu jiné části spektra světla, viz obr. 15.



Obr. 15 – Schéma principu optického tenzometru, upraveno dle (Lufinka, 2022)

Dle potřeby mohou být optické tenzometry v provedení s jednou nebo s více mřížkami na jednom optickém vlákně. V případě více mřížek je každá z nich naladěna na jinou oblast spektra. V místě mřížky se nachází buď ploška k nalepení na povrch měřeného dílu nebo je mřížka přímou součástí vlákna, které se přímo instaluje do měřeného dílu (např. kompozity nebo betonové konstrukce). K vyhodnocení velikosti deformace je nutné speciální zařízení funkčně na bázi spektrometru.

Výhodou optických tenzometrů je, že vláknem prochází světlo, nikoliv elektrický proud. V důsledku toho nedochází k rušení elektromagnetickým polem. Hlavní výhodou je, že optické

tenzometry lze použít ve výbušném prostředí. Nevýhodou pak potřeba cenově náročné speciální vyhodnocovací elektroniky.

## 5 Otázky a úkoly

- 1) Jaké jsou hlavní oblasti použití tenzometrů?
- 2) Jakým způsobem lze u tenzometrů vyjádřit závislost poměrné změny odporu na poměrné deformaci? Jak se vztah bude modifikovat pro tenzometry kovové a polovodičové?
- 3) Načrtněte vhodné umístění tenzometrů pro měření osově deformace, ohybu a torzní deformace (krutu).
- 4) Jaké jsou základní technologie výroby polovodičových tenzometrů?
- 5) Na jakém principu pracují optické tenzometry?

## 6 Použitá literatura

HBM, GmbH, 2022. *Strain Gauges: First Choice for Strain Measurements*. [online]. (Hottinger Baldwin Messtechnik, GmbH) [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW:

<<https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/S01265.pdf>>

KADLEC, Karel, 2008. *Příprava na laboratorní práci Měření a regulace tlaku, kalibrace tlakoměrů*. Praha: VŠCHT, Fakulta chemicko-inženýrská.

LUFINKA, Aleš, 2012. Snímače pro měření deformace. In: *Experimentální metody – přednášky*. Liberec: TU, Fakulta strojní.

LUFINKA, Aleš, 2022. Tenzometry. In: *Experimentální metody – přednášky*. Liberec: TU, Fakulta strojní.

OMEGA ENGINEERING, Inc., 2022. Strain Gage Technical Data. In *Omega Engineering Homepage* [online]. [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW:

<<https://www.omega.com/en-us/resources/strain-gauge-technical-data>>

VLK, Miloš a kol., 2003. *Experimentální mechanika*. Brno: VUT, Fakulta strojní.

VOJÁČEK, Antonín, 2005. Fóliové tenzometry – princip, provedení, použití, historie. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW:

<<https://automatizace.hw.cz/clanek/2005111201>>

VOJÁČEK, Antonín, 2006. Polovodičové tenzometry – princip, provedení, použití, historie. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW:

<<https://automatizace.hw.cz/clanek/2006111601>>

WIKIPEDIE, 2022. Tenzometr. In *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [citováno 10. 12. 2022]. Dostupné z WWW:

<<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Tenzometr&oldid=20884064>>

## Seznam zkratek

A/D	analogově digitální
TU	technická univerzita
USA	United States of America
VUT	Vysoké učení technické

## Rejstřík

Braggova mřížka, 10  
citlivost tenzometru, 6  
deformace, 2, 3, 4, 7  
    mechanická, 3  
    osová, 7  
    pružná, 2  
    torzní, 7, 8  
Hookův zákon, 2  
měrný odpor, 3  
piezorezistivní jev, 1, 3  
Poissonova konstanta, 4  
prodloužení, 3, 4  
    absolutní, 3  
    relativní, 3  
rezistivita. viz měrný odpor  
tenzometrická konstanta, 4  
tenzometry, 1, 2, 5, 7, 9, 11  
    drátkové, 2  
    fóliové, 5  
    jednoosé, 7  
    kovové, 4  
    optické, 10, 11  
    polovodičové, 1, 8, 9, 11  
    složené, 7  
teplotní závislost, 5, 8  
Youngův modul pružnosti, 4

# Měření neelektrických veličin

## Téma 4: Tenzometry II

### Studijní cíl

Rušivé vlivy působící při měření s využitím tenzometrů, praktická aplikace tenzometrů a jejich nejčastější konstrukční provedení.

### Doba nutná k nastudování

2 hodiny

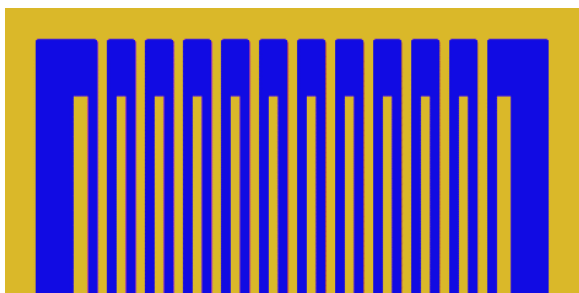
### Klíčová slova

Tenzometr, meandr, teplotní závislost, můstkové zapojení, kompenzace úbytku napětí

## 1 Rušivé vlivy působící při měření s využitím tenzometrů

1) Teplota – ovlivňuje nejen vodivost základního materiálu, ale při její změně dochází také k teplotní roztažnosti tenzometru. Vliv teploty lze dobře kompenzovat zapojením více tenzometrů do můstku. Musí být také voleno malé proudové zatížení tenzometru. V současnosti se vyrábí také fóliové samokompenzační tenzometry.

2) Příčná citlivost – nejvíce se projevuje u drátkových tenzometrů. Je nežádoucí především u víceosých tenzometrů. U fóliových tenzometrů ji lze snížit speciálním tvarováním meandru (zesílení na jeho koncích, viz obr. 1).



Obr. 1 – Speciální tvarování meandru, zdroj (Wikipedie, 2022)

3) Tečení (creep) – vlivem materiálových změn v samotném tenzometru i v použitém lepidlu, ztrácí konstantně zatěžený tenzometr citlivost. Jev lze částečně potlačit použitím polyamidových podložek v konstrukci fóliových tenzometrů a kvalitních tečení odolných lepidel.

4) Hystereze – tenzometry vykazují obvykle velmi malou hysterezi. Problém s hysterezí může způsobit měřený objekt. Lze jej částečně eliminovat použitím vhodného materiálu podložky a lepidla a samozřejmě také precizností nalepení tenzometru na objekt.

5) Vlhkost – nosná podložka tenzometru a některé typy lepidel mohou vlivem vlhkosti měnit své rozměry. Bezprostředně po nalepení tenzometru na měřený objekt je nutné použít spolehlivé krycí prostředky a důsledně dodržet podmínky pro jejich správnou aplikaci.

6) Elektromagnetické pole – vlivem působení pole může docházet k několika různým problémům. K magnetostrickci zkoumaného objektu, při níž dochází ke geometrickým změnám zkoumaného objektu, které se pak přenáší i na tenzometr. K magnetostrickci měřicí mřížky tenzometru, která vyvolá jeho zdánlivou deformaci. Dále k magnetorezistivitě měřicí mřížky tenzometru a v neposlední řadě ke vzniku parazitního elektrického napětí v samotném tenzometru a v jeho přívodech vlivem časově proměnného elektromagnetického pole. Magnetorezistivní jev lze u tenzometru eliminovat použitím vhodného materiálu, který je na tento jen málo citlivý. K potlačení ostatních jevů lze pak využít stínění měřicího obvodu, použití neinduktivních typů tenzometrů (poloviny měřicí mřížky jsou vinuty, resp. orientovány v navzájem opačném směru) a také přívodní kabeláž by měla být ideálně stíněná.

## 1.1 Teplotní závislost

Odpor vodivého materiálu (tenzometru, přívodních drátů) je funkcí teploty

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

kde  $\Delta\vartheta$  je rozdíl skutečné a vztažné teploty (obvykle 20 °C),  $R_0$  je odpor při vztažné teplotě a  $\alpha$  je teplotní součinitel odporu.

Dochází-li ke kolísání okolní teploty po aplikaci tenzometru na měřený objekt, kolísají pak i naměřené hodnoty deformace. Změna odporu tenzometru vlivem teploty (teplotní součinitel odporu je typicky  $\alpha_R = 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) může být někdy dokonce větší než změna způsobená deformací, velmi často je pak řádově srovnatelná. Konstanta tenzometru je také obecně závislá na teplotě ( $\alpha_k = 115 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ). Další chyby jsou způsobeny teplotní roztažností (dilatací):

- měřeného objektu – součinitel délkové roztažnosti  $\beta_s$  je pro:
  - materiály na bázi křemíku  $0,5 \cdot 10^{-6}$ ,
  - feritické oceli  $10,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,
  - slitiny titanu  $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,
  - slitiny molybdenu  $5,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,
  - austenitické oceli  $16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,
  - hliník a jeho slitiny  $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,
  - plastické hmoty  $70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;
- mřížky tenzometru – součinitel  $\beta_g$  je pro:
  - konstantan  $15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,
  - křemík  $3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ;

- příp. podložky tenzometru – součinitel  $\beta_d$  je od  $65 \cdot 10^{-6}$  do  $120 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  pro různé druhy používaných plastů.

Změnu odporu tenzometru způsobenou vlivem změny teploty  $\Delta\vartheta$  lze popsat vztahem

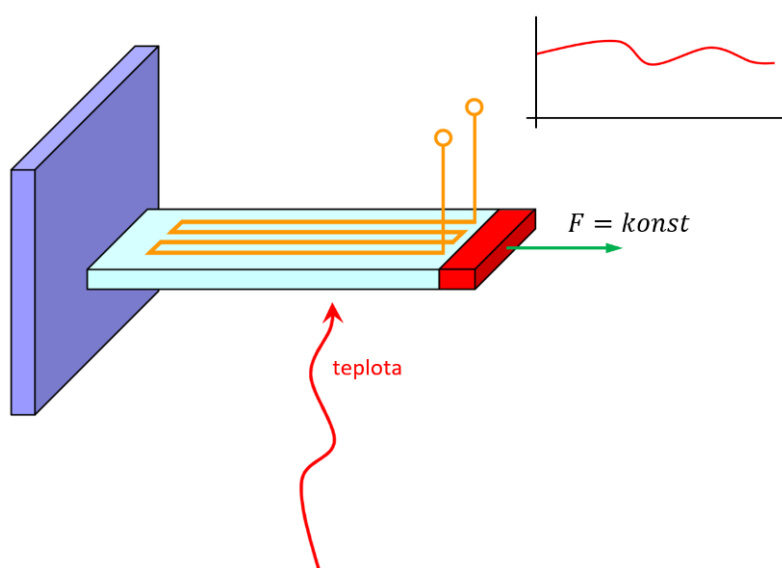
$$\frac{dR}{R} = k(\beta_s - \beta_g)\Delta\vartheta + \alpha_R\Delta\vartheta = k\varepsilon_\vartheta \quad (2)$$

a deformaci vyvolanou změnou teploty (tzv. zdánlivou deformaci) tedy vyjádřit ve tvaru

$$\varepsilon_\vartheta = \left(\frac{\alpha_R}{k} + \beta_s - \beta_g\right)\Delta\vartheta \quad (3)$$

Závislost zdánlivé deformace na teplotě je někdy uváděna výrobcí tenzometrů v podobě polynomu použitelného k výpočtu její korekce. Chyba způsobená zdánlivou deformací může být v některých případech značně velká liší-li se teplota okolního prostředí významně od vztažné teploty (obvykle pokojová teplota, resp.  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Na obr. 2 je uvedeno jednoduché schéma ilustrující vliv okolní teploty na měření deformace pomocí tenzometru při konstantním zatížení silou  $F$ . Vlivem působení teploty dochází k další dilataci materiálu, a tím ke změně odporu tenzometru i při neměnné sledované deformaci ( $F = \text{konst}$ ), a také ke změně  $k$  tenzometru.



**Obr. 2 – K teplotní závislosti tenzometru, upraveno dle (Lufinka, 2012)**

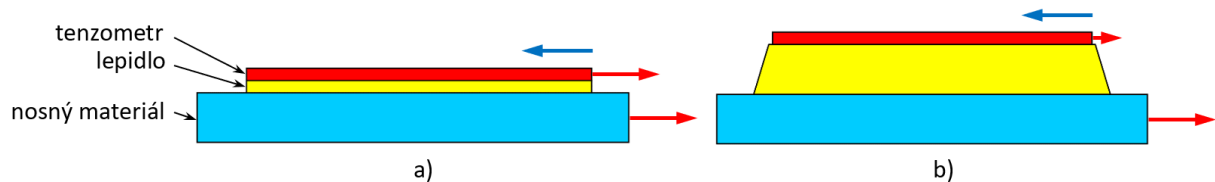
Řešením výše zmiňovaného problému s teplotní závislostí je výběr více teplotně nezávislého materiálu tenzometru, kompenzace teplotního vlivu vhodným zapojením, použití dalšího kompenzačního tenzometru umístěného na nezatěžované součásti při stejné teplotě nebo dnes nejčastěji použitím tenzometru vybaveného samokompensací.

Tenzometry se samokompensací jsou pouze fóliové. Princip kompenzace je založen na jednoduché myšlence, že o co se odpor tenzometru zvýší vlivem teplotní dilatace materiálu, tak o to se sníží vlivem vhodně zvoleného teplotního součinitele  $\alpha$  materiálu tenzometru.

Při lepení tenzometru je mimo volbu správného typu lepidla nutné přesně dodržet i technologii lepení tak, aby nemohlo dojít ke změně vlastností vlivem vrstvy lepidla. Na obr. 3



jsou uvedeny správný a nesprávný způsob nalepení tenzometru. V případě správného nalepení (obr. 3a) se teplotní dilatace materiálu plně přeneše na tenzometr a pomocí kompenzace výrobcem nastavené pro tento materiál (volíme k tomu určený tenzometr) dojde k jejímu vyrušení. Vlivem chyby v lepení (obr. 3b) se dilatace nepřeneše zcela na tenzometr, ale ten plně kompenzuje, jako by se dilatace zcela přenesla a tím dochází k chybě (dojde k překompenzování).



**Obr. 3 – Ilustrace vlivu techniky nalepení tenzometru: a) správně, b) nesprávně, upraveno dle (Lufinka, 2012)**

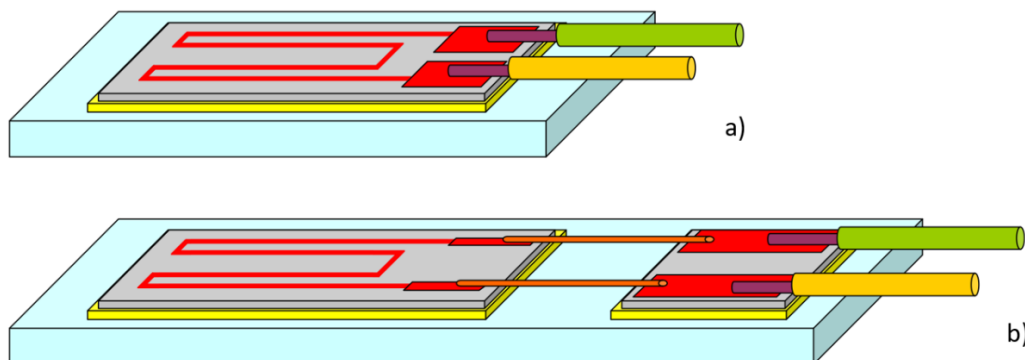
Samokompenzační tenzometry jsou výrobci nabízeny běžně pro feritickou ocel, hliník a jeho slitiny, plastické hmoty a na zvláštní objednávku pak také pro austenitickou ocel, slitiny titanu a molybdenu a materiály na bázi křemíku.

## 2 Praktická aplikace tenzometrů

### 2.1 Lepení tenzometrů

Před samotným nalepením tenzometru na místo určené pro měření je nejprve nutné toto místo zbavit případných nátěrů, rzi, okují a jiných hrubých znečištění, mechanicky vyrovnat a následně očistit, v případě potřeby dodatečně zdrsňit, odmastit. Je-li plánována aplikace polovodičových tenzometrů bez podložky, musí být na měřeném povrchu vytvořena izolační vrstva.

Nalepení tenzometru na zvolené místo měření může být realizováno různě. Za účelem krátkodobého měření při běžných teplotách lze použít speciální rychleschnoucí jednosložkové lepidlo na bázi kyanoakrylátu. U dlouhodobějších aplikací nebo při předpokladu vlivu vyšších teplot, se použije k nalepení tenzometru dvousložkové lepidlo na bázi epoxidu.



**Obr. 4 – Schéma aplikace tenzometrů s připojením vývodů: a) přímým, b) nepřímým, upraveno dle (Lufinka, 2012)**

Po nalepení tenzometru je vhodné připevnit drátové příklady tenzometru obvykle pomocí stejného lepidla tak, aby nemohly svým případným pohybem ovlivňovat experiment, nebo aby nedošlo k jejich uvolnění.

Drátové příklady mohou být připájeny přímo ke kontaktním ploškám tenzometru (viz obr. 4a). Případně mohou být ke kontaktním ploškám tenzometru umístěným u konce jeho aktivní části termokompresí přivařeny vývody ze zlata, které tenzometr spojují se samostatnou částí s kontaktními ploškami (obr. 4b).

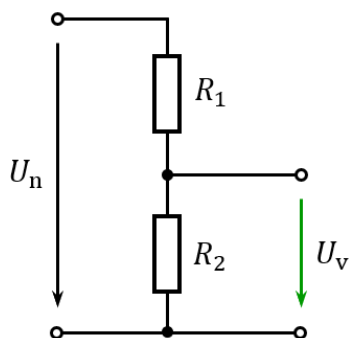
Připevněný tenzometr se po kontrole funkčnosti musí zakrýt vhodným materiálem z důvodu eliminace působení vnějších vlivů. Pro krytí se používají polyuretanové, nitrilové nebo silikonové laky, permanentní plastický tmel, průhledná silikonová pryž bez rozpouštědel, speciální vazelína, mikrokrytalické vosky, nebo se použijí samolepící pásky s hliníkovou fólií.

## 2.2 Způsoby zapojení a vyhodnocení signálů

Změna odporu  $\Delta R$  se nejčastěji převádí na změnu napětí, k čemuž lze využít napěťový dělič, viz obr. 5 a vztah pro výpočet výstupního napětí (4). Jelikož je ale změna odporu tenzometru velmi malá, prakticky výhradně se pro její vyhodnocení využívají můstky (běžně Wheatstoneův), defacto dva napěťové děliče (obr. 6a).

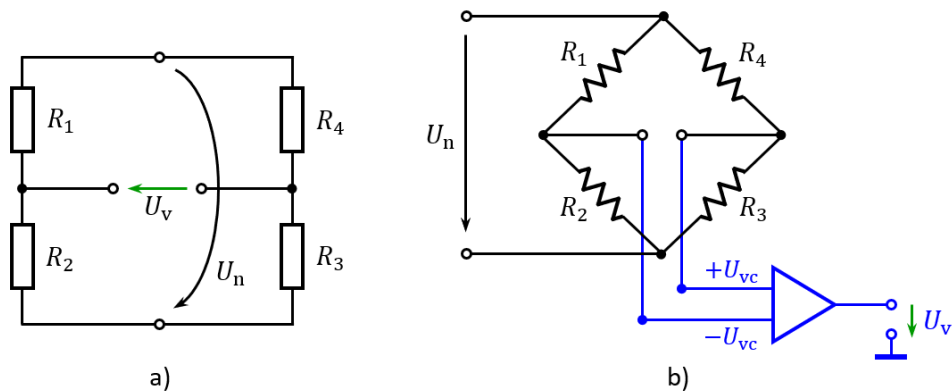
$$U_v = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_n \quad (4)$$

Wheatstoneův můstek je tvořen čtyřmi tenzometry, přičemž některé z tenzometrů lze v můstku nahradit rezistory – vznikne tak několik typicky používaných zapojení. V jedné diagonále můstku je připojen napájecí zdroj a v druhé se pak měří napětí. Vyhodnocení je obvykle realizováno pomocí diferenciálního zesilovače, viz obr. 6b. Vyžadován je stabilní a velmi přesný zdroj napájení.

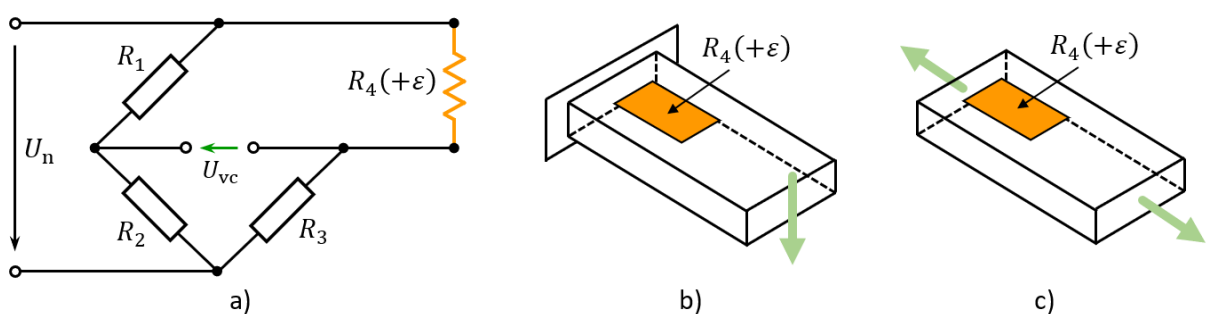


Obr. 5 – Napěťový (odporový) dělič, zdroj autor

Měření deformace je možné v nejjednodušší konfiguraci s jedním aktivním tenzometrem v tzv. čtvrtmůstku, viz obr. 7. Můstek je doplněn třemi pevnými rezistory. Uvedené zapojení žádným způsobem nekompensuje vliv teploty. Lze měřit jak ohyb, tak i tah nebo tlak.



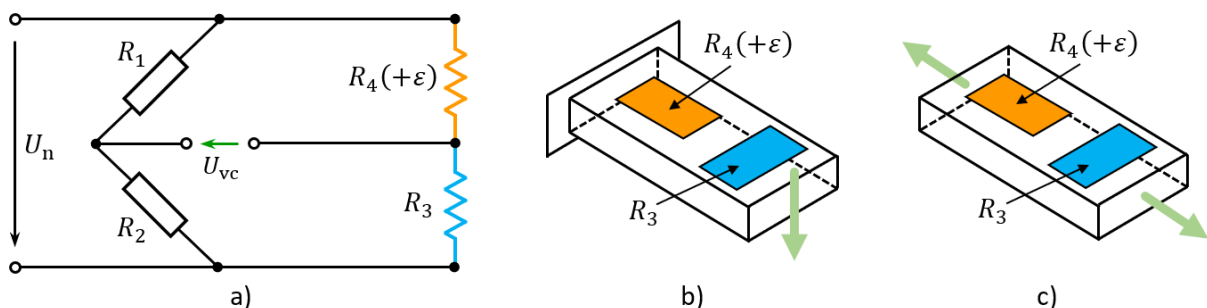
Obr. 6 – Wheatstoneův můstek: a) základní schéma (dva děliče), b) použití pro měření s tenzometry, zdroj autor



Obr. 7 – Čtvrtmůstek s jedním tenzometrem: a) zapojení, umístění tenzometrů pro: b) ohyb, c) tah nebo tlak, zdroj autor dle (Lufinka, 2022)

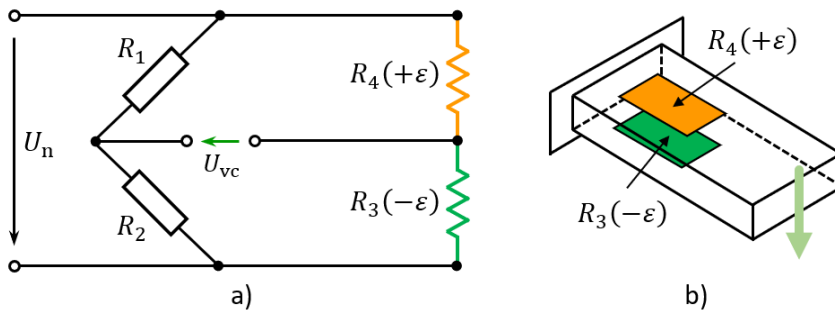
Zapojení na obr. 8 a obr. 9 jsou v tzv. půlmůstku. První varianta (obr. 8) je realizována s jedním aktivním tenzometrem (je na měřeném objektu umístěn v souladu se směrem deformace), který měří deformaci a jedním neaktivním tenzometrem pro kompenzaci (umístěn kolmo ke směru deformace). Kompenzační tenzometr může být ale takto ovlivněn příčnou deformací měřeného tělesa, což je nutné zahrnout do vyhodnocení (Poissonova konstanta).

Můstek je doplněn dvěma pevnými rezistory. Měřit lze ohyb nebo tlak, resp. tlak, a zapojení umožňuje kompenzaci vlivu teploty. Dilatace měřeného objektu je v obou směrech shodná. Oba tenzometry reagují na změny teploty stejně, a protože jsou zapojeny v jedné větvi můstku, změna se navzájem vyruší. Předpokladem samozřejmě je, že teplota je u obou tenzometrů shodná.



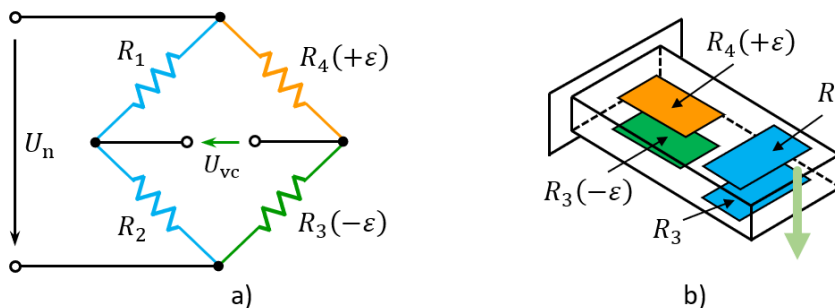
Obr. 8 – Polomůstek se dvěma tenzometry (jen jeden aktivní): a) zapojení, umístění tenzometrů pro: b) ohyb, c) tah nebo tlak, zdroj autor dle (Lufinka, 2022)

Na obr. 9 je druhá varianta zapojení v půlmůstku se dvěma aktivními tenzometry pro měření ohybu. Měření tahu nebo tlaku v tomto případě není možné. Můstek je stejně jako u předchozí varianty doplněn o dva pevné rezistory. Jeden z tenzometrů měří prodloužení a druhý zkrácení ohýbaného tělesa, takže výsledkem je dvojnásobná přesnost měření. I v tomto zapojení dochází obdobným způsobem ke kompenzaci vlivu teploty.

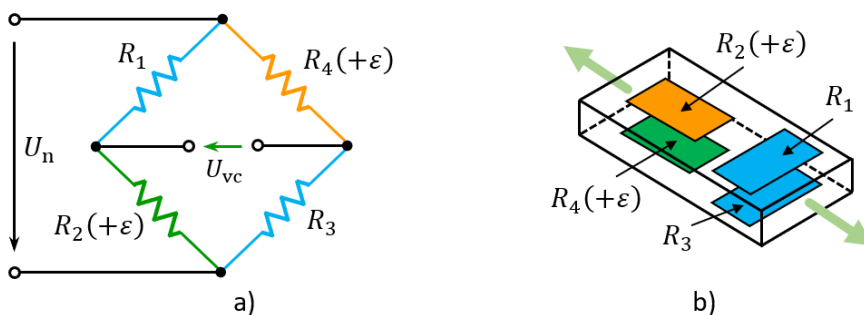


**Obr. 9 – Polomůstek se dvěma tenzometry (oba aktivní): a) zapojení, b) umístění tenzometrů pro ohyb, zdroj autor dle (Lufinka, 2022)**

Zapojení v plném můstku ve variantě se dvěma aktivními a dvěma kompenzačními tenzometry je pro měření ohybu na obr. 10 a pro měření tahu na obr. 11. U kompenzačních tenzometrů je třeba dávat pozor na jejich ovlivnění příčnou deformací a příp. zahrnout tento jev do vyhodnocení. V obou případech je dosaženo dvojnásobné citlivosti a je kompenzován vliv teploty.

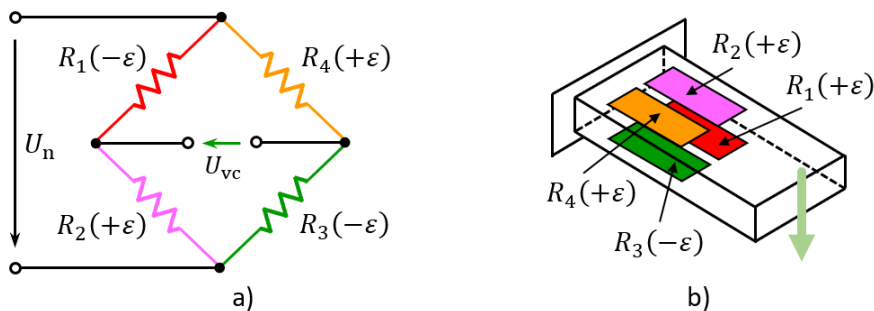


**Obr. 10 – Plný můstek se čtyřmi tenzometry (dva aktivní): a) zapojení, b) umístění tenzometrů pro ohyb, zdroj autor dle (Lufinka, 2022)**



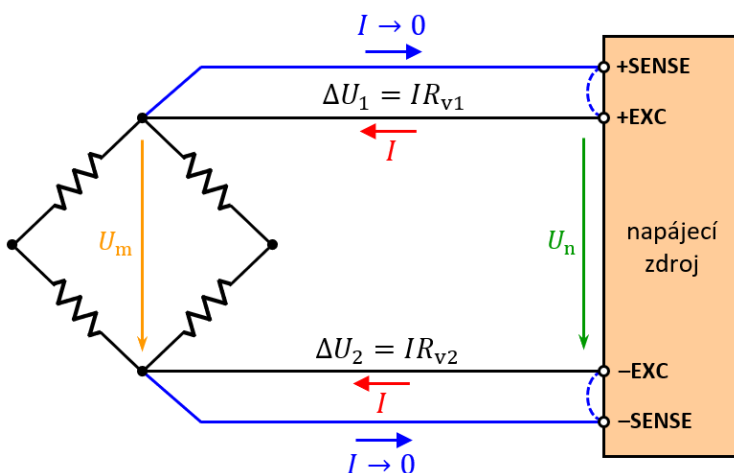
**Obr. 11 – Plný můstek se čtyřmi tenzometry (dva aktivní): a) zapojení, b) umístění tenzometrů pro tah, zdroj autor dle (Lufinka, 2022)**

Varianta plného můstku se čtyřmi aktivními tenzometry je na obr. 12. Zapojení umožňuje pouze měření ohybu ve čtyřnásobné citlivosti. Dva tenzometry měří prodloužení a dva zkrácení ohýbaného tělesa. Zapojení samozřejmě umožňuje kompenzaci vlivu teploty.



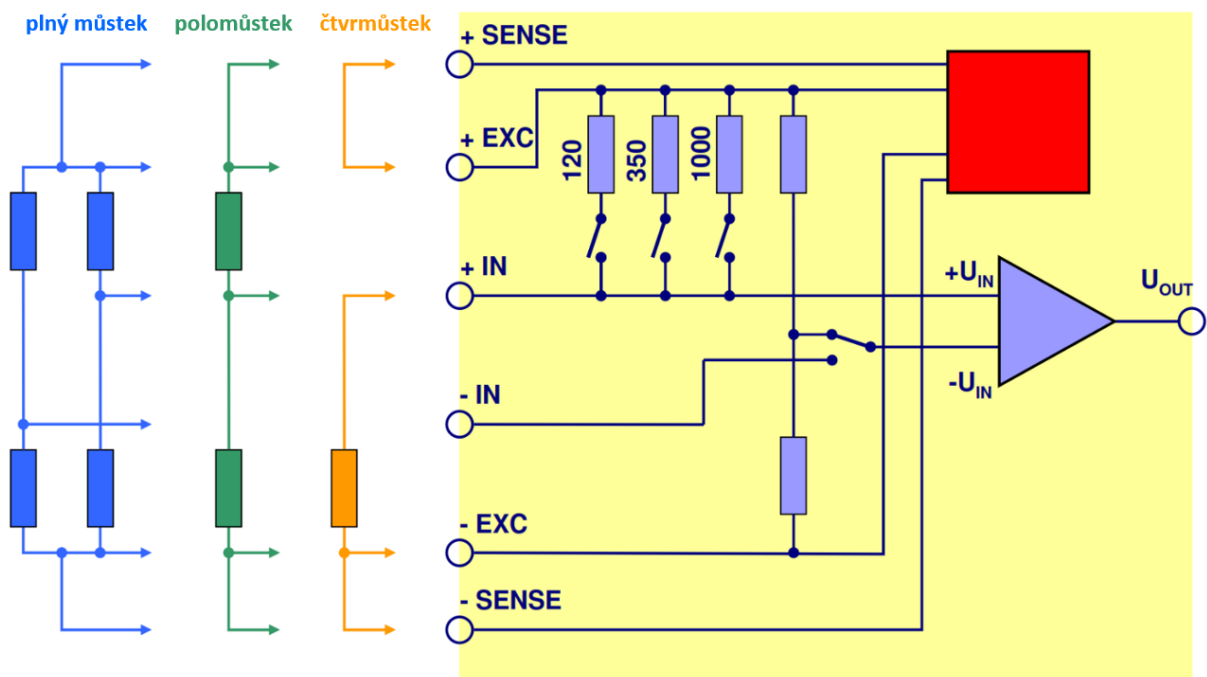
**Obr. 12 – Plný můstek se čtyřmi tenzometry (čtyři aktivní): a) zapojení, b) umístění tenzometrů pro tah, zdroj autor dle (Lufinka, 2022)**

Při připojení tenzometrů k napájecímu zdroji dochází za běžných podmínek (bez kompenzace) k úbytku napětí na připojovacích vodičích. Tento jev se obvykle kompenzuje zapojením na obr. 13. Napájecí zdroj současně odměřuje skutečné napětí na můstku  $U_m$ . V případě potřeby zdroj zvýší napětí  $U_n$  tak, aby na můstku bylo napětí přesně odpovídající požadovanému. Pak nejsou měřicí vodiče prakticky vůbec zatíženy proudem a úbytek napětí se blíží nule. Je ale nutné, aby byly vždy zapojeny i vstupy SENSE. Pokud se vůbec nepoužijí, je potřeba je propojit s výstupy napájení EXC.



**Obr. 13 – Kompenzace úbytku napětí na vodičích, zdroj autor dle (Lufinka, 2012)**

Moderní měřicí zařízení určené pro měření deformace za použití tenzometrů, jehož schéma je na obr. 14, je vždy vybaveno diferenciálním zesilovačem a rezistory pro případné doplnění můstku (viz také zapojení na obr. 7 až obr. 10). Jeho součástí je také výše zmiňovaný přesný napájecí zdroj s kompenzací úbytku napětí na připojovacích vodičích.

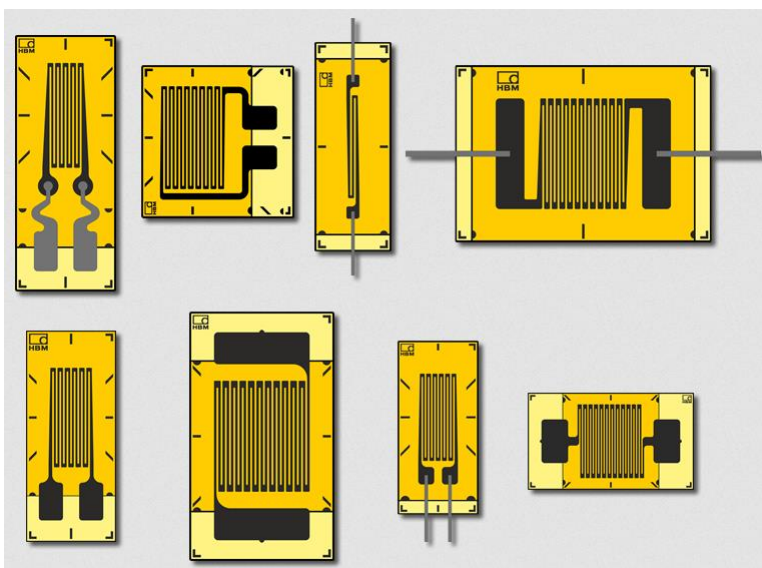


Obr. 14 – Schéma praktické realizace měřicího zařízení pro měření s tenzometry, upraveno dle (Lufinka, 2012)

### 3 Nejčastější konstrukční provedení tenzometrů

#### 3.1 Lineární

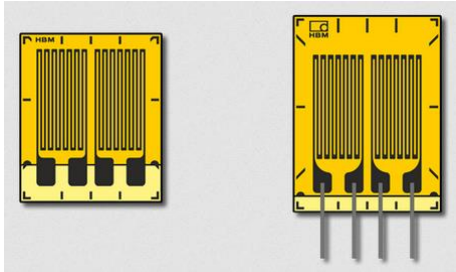
Tyto fóliové tenzometry jsou určeny primárně pro měření deformací v jednom směru. Vyrábí se celá řada velikostí a provedení s různým geometrickým uspořádáním, viz např. obr. 15. Tenzometry jsou standardně vybaveny teplotní samokompencací pro umístění na ocel, hliník nebo další typy materiálů. Jmenovitý odpor lineárních tenzometrů je 120, 350, 700 nebo 1000  $\Omega$ . Měřicí mřížka je vyráběna nejčastěji z konstantanu a podložka (nosič mřížky) je z polyimidu (pozor, neplést s polyamidem).



Obr. 15 – Lineární provedení tenzometrů, zdroj (HBM, 2022)

### 3.2 Paralelní lineární

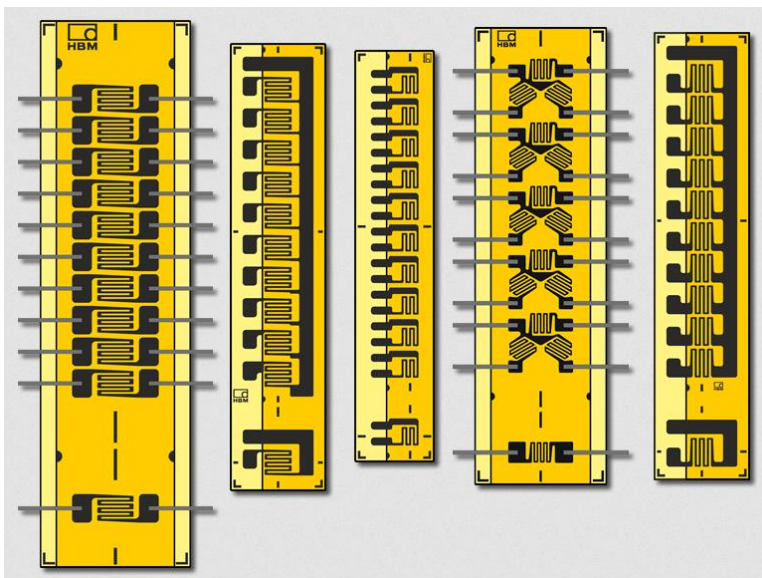
Jedná se o fóliové tenzometry se dvěma paralelními měřicími mřížkami určené především pro měření napětí při ohybu nosníků. Možné praktické provedení je na obr. 16. Tenzometry mají obvykle jmenovitý odpor 350  $\Omega$  a disponují teplotní samokompenzací pro ocel, hliník, nebo jiný materiál. Měřicí mřížky jsou vyrobeny z konstantanu a umístěny na polyimidové podložce.



Obr. 16 – Paralelní lineární provedení tenzometrů, zdroj (HBM, 2022)

### 3.3 Řetízkové provedení

Fóliové tenzometrické řetízky, viz např. obr. 17, se používají nejčastěji k měření gradientu napjatosti. Jsou složeny z 10 nebo 15 malých mřížek z konstantanu umístěných na ve stejné vzdálenosti na jednom nosiči. Na společném polyimidovém nosiči je navíc ještě jedna kompenzační mřížka. Vyrábí se obvykle s jmenovitým odporem 120  $\Omega$  a běžně disponují teplotní samokompenzací.

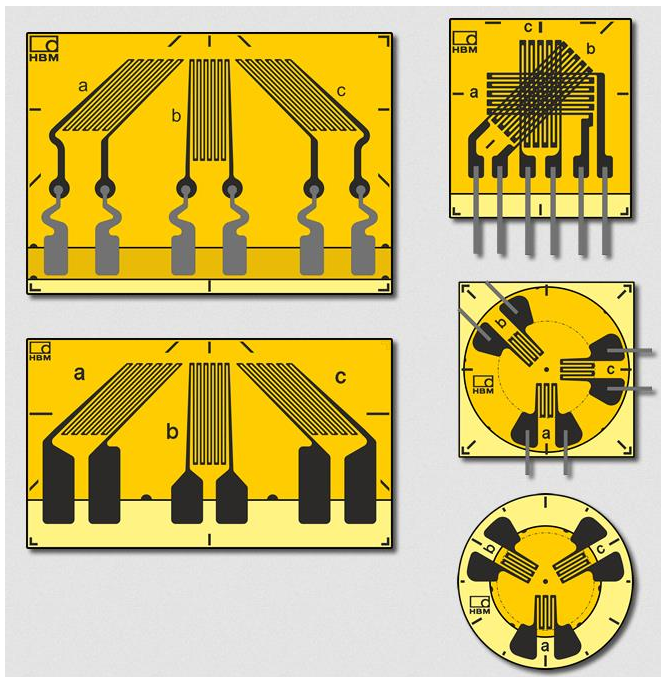


Obr. 17 – Řetízkové provedení tenzometrů, zdroj (HBM, 2022)

### 3.4 Růžice

Pro analýzu dvouosé napjatosti lze využít tenzometrické růžice, které obsahují vždy 3 měřicí mřížky ve vzájemném uspořádání 0°/45°/90°, 0°/60°/120° nebo 0°/120°/240°. Různá

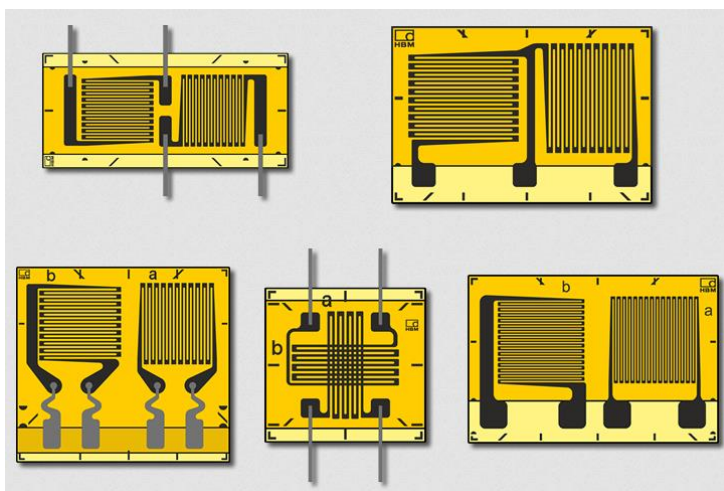
provedení trojúhelníkových a vrstvených růžic jsou na obr. 18. Bývají vyráběny se jmenovitým odporem 120 nebo 350  $\Omega$  a s teplotní samokompenzací. Jednotlivé mřížky jsou vzájemně galvanicky odděleny (izolovány) a jsou připraveny pro zapojení ve čtvrtinovém můstku.



Obr. 18 – Tenzometrické růžice, zdroj (HBM, 2022)

### 3.5 XY provedení (T růžice)

XY tenzometry typu T růžice, viz např. obr. 19, mají dvě navzájem o 90° pootočené měřicí mřížky nejčastěji vyráběné z konstantanu umístěné na polyimidové podložce. Vyrábí se v různých rozměrech a provedeních, běžně s teplotní samokompenzací, nejčastěji se jmenovitým odporem 120 nebo 350  $\Omega$ . Tyto tenzometry se používají ke dvuosému měření mechanického namáhání.



Obr. 19 – XY provedení tenzometrů, zdroj (HBM, 2022)



### 3.6 Provedení ve tvaru V

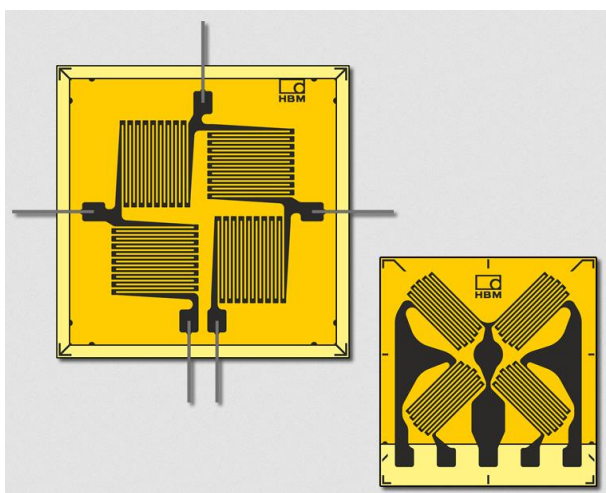
Tento speciální typ tenzometrů, viz např. obr. 20, disponuje dvěma měřicími mřížkami uspořádanými s úhlem 45° do tvaru V z konstantanu umístěnými na polyimidové podložce a je primárně určen k měření deformací na torzních tyčích a měření smykového napětí. Vyrábí se v různých rozměrech a provedeních, běžně s teplotní samokompenzací, nejčastěji se jmenovitým odporem 120, 350 nebo 700  $\Omega$ .



Obr. 20 – Provedení tenzometrů ve tvaru V, zdroj (HBM, 2022)

### 3.7 Můstkové provedení

Jedná se o speciální variantu tenzometru tvořeného čtyřmi mřížkami zapojenými do úplného můstku, viz např. obr. 21. Nejčastěji se používají k měření na torzních tyčích nebo k měření smykového napětí. Jsou běžně vyráběny z konstantanu s polyimidovou podložkou, disponují teplotní samokompenzací a nejčastěji mají jmenovitý odpor 120 nebo 350  $\Omega$ .



Obr. 21 – Můstkové provedení tenzometrů, zdroj (HBM, 2022)

### 3.8 Speciální provedení

Patří sem tenzometry různých velikostí a provedení (viz výše, tj. lineární, XY, růžice, tvar V), určené pro měření v jednom nebo více směrech, které jsou ale vyrobeny ze speciálních materiálů a umožňují tak použití **při vysokých teplotách** a/nebo **vyšší cyklickou výdrž** při současné **vyšší toleranci k větším namáháním**. Teplotní rozsahy použití jsou obvykle v pásmu  $-200$  až  $350$  °C s tomu odpovídající teplotní autokompensací. Mohou být zatěžovány více jak 10 mil. cykly při deformacích  $\pm 2000$   $\mu\text{m}/\text{m}$ . Jejich maximální prodloužení může být až  $15000$   $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Další skupinu speciálních tenzometrů představují tenzometry ve válcovém provedení **pro měření ve šroubech**. Ty lze po osazení do předvrtaného otvoru ve šroubu použít k měření tahu, síly a vibrací. Poskytují poměrně široký rozsah použití v oblasti teplot  $-200$  až  $140$  °C s dobrou teplotní kompenzací. Jmenovité odpory mají obvykle  $120$   $\Omega$  v lineárním provedení a  $1000$   $\Omega$  v provedení se dvěma mřížkami ve vzájemné konfiguraci  $0^\circ/90^\circ$ . Zapojení těchto tenzometrů je zpravidla v polovičním můstku.

## 4 Otázky a úkoly

- 1) Vyjmenujte a stručně popište nejvýznamější rušivé vlivy působící při měření s využitím tenzometrů.
- 2) Nakreslete schémata dvou praktických můstkových zapojení při použití dvou, resp. čtyř tenzometrů. Nezapomeňte uvést vhodnost zapojení pro měření tahu, tlaku či ohybu.
- 3) Vyjmenujte nejčastější konstrukční provedení tenzometrů.
- 4) Uveďte, jakým způsobem je možné provést kompenzaci úbytku napětí na vodičích při můstkovém zapojení tenzometrů. Pro ilustraci nakreslete schéma.
- 5) K čemu se používají tenzometrické růžice?

## 5 Použitá literatura

HBM, GmbH, 2022. *Strain Gauges: First Choice for Strain Measurements*. [online]. (Hottinger Baldwin Messtechnik, GmbH) [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/S01265.pdf>

LUFINKA, Aleš, 2012. Snímače pro měření deformace. In *Experimentální metody – přednášky*. Liberec: TU, Fakulta strojní.

LUFINKA, Aleš, 2022. Tenzometry. In *Experimentální metody – přednášky*. Liberec: TU, Fakulta strojní.

WIKIPEDIE, 2022. Tenzometr. In *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [citováno 10. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Tenzometr&oldid=20884064>

## Seznam zkratk

EXC	electronic cross connect (elektronické křížové propojení)
IN	input (vstup / vstupní)
OUT	output (výstup / výstupní)
TU	technická univerzita

## Rejstřík

creep. viz tečení  
deformace, 2, 3, 6, 9, 14  
    zdánlivá, 2, 3  
deformace vyvolaná změnou teploty. viz zdánlivá  
rušivý vliv, 1  
    elektromagnetické pole, 2  
    hystereze, 2  
    příčná citlivost, 1  
    tečení, 1  
    teplota, 1  
    vlhkost, 2  
tenzometr, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13  
    lineární, 9, 10  
    můstkový, 13  
    paralelní lineární, 10  
    růžice, 11  
    řetízkový, 10, 11  
    samokompenzační, 1  
    speciální, 1, 13  
    T růžice, 12  
    tvaru V, 12  
teplotní součinitel odporu, 2  
teplotní závislost, 2  
úbytek napětí na připojovacích vodičích, 8, 9  
Wheatstoneův můstek, 5, 6  
    čtvrtinový, 6  
    poloviční, 6, 7

# Měření neelektrických veličin

## Téma 5: Měření teploty I

### Studijní cíl

Používané teplotní stupnice a převody mezi nimi. Přehled, základní vlastnosti, konstrukce a praktické použití dotykových senzorů a indikátorů teploty.

### Doba nutná k nastudování

2 hodiny

### Klíčová slova

Měření teploty, teplotní stupnice, teploměr, dotykový senzor, deformační prvek, odporový snímač, polovodičový snímač, termočlánek, indikátor teploty

## 1 Úvod do měření teploty

Informace v kapitole 1 byly volně čerpány z (Anon., Metrologie teploty, b. r.), (Soukeník, 2000), (Svoboda, b. r.), (Wikipedie, 2022b), (Wikipedie, 2022c). Teplota, přesněji termodynamická teplota označovaná jako  $T$ , je skalární intenzivní stavová fyzikální veličina. Teplota úzce souvisí s vnitřní energií systému a charakterizuje stav jeho termodynamické rovnováhy. Udává tedy, jestli těleso je nebo není při tepelném kontaktu s jiným tělesem v tepelné rovnováze. Jinými slovy, zda bude teplo přijímat, odevzdávat nebo nebude k tepelné výměně docházet. Nedochozí-li mezi tělesy k tepelné výměně, mají stejnou teplotu.

Jednotkou teploty je Kelvin (K) patřící mezi základní jednotky soustavy SI. Povolenu, často používanou jednotkou, je pak stupeň Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ ). Teplota se měří pomocí teploměrů a nesmí být zaměňována s teplem, které se značí  $K$  a k jehož měření se používají kalorimetry.

Původ slova teplota je v latinském *temperature* – příjemný pocit. Vnímání teploty je značně subjektivní a může docházet ke smyslovému klamu. Logicky tedy vyvstává potřeba objektivního měření teploty. Měření teploty má velmi dlouhou a zajímavou historii, v tomto textu se omezíme jen na nejvýznamnější milníky.

### 1.1 Teplotní stupnice

Historicky bylo definováno několik teplotních stupnic. Nejpoužívanější jsou termodynamická stupnice (Kelvinova) a Celsiova stupnice. Mezi další, méně často používané stupnice, lze

zařadit stupnici Fahrenheitovu, Rankinovu a Reáumurovu. V minulosti byla definována i řada dalších stupnic, např. stupnice Newtonova, Rømerova nebo Delisleova. V roce 1990 byla stanovena mezinárodní teplotní stupnice (International Temperature Scale of 1990) označovaná jako ITS-90.

### **Termodynamická teplotní stupnice (Kelvinova)**

Je udávána v Kelvinech (základní jednotka teploty v soustavě SI) a je definována dvěma hodnotami. První je 0 K, počátek termodynamické stupnice, tzv. absolutní nula (nejnižší teplota, která je fyzikálně definována). Absolutní nula představuje takovou teplotu, při níž již nelze tělesu (látce) odebrat žádné další teplo, resp. se zastaví veškerý tepelný pohyb částic (ustane neuspořádaný pohyb molekul). Druhou je 273,16 K, což je teplota trojného bodu vody. Trojný bod odpovídá bodu fázového digramu, resp. udává teplotu a tlak, při kterých jsou v rovnováze současně tři skupenství (fáze) látky, obvykle pevná, kapalná a plynná. Protože empirické teplotní stupnice kapalinových teploměrů jsou závislé na konkrétní použité teplotoměrné látce, byla termodynamická stupnice definována na základě účinnosti Carnotova cyklu (vratný cyklický děj ideálního tepelného stroje složený ze dvou izotermických a dvou adiabatických dějů).

### **Celsiova teplotní stupnice**

Jednotkou je stupeň Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ ), přičemž  $0^{\circ}\text{C}$  přibližně odpovídá teplotě tání/tuhnutí vody a  $100^{\circ}\text{C}$  teplotě varu čisté vody při normálním tlaku (1 fyzikální atmosféra, tj. 101 325 Pa přesně). Přesněji je stupnice definována přiřazením  $-273,15^{\circ}\text{C}$  absolutní nule (0 K) a  $+0,01^{\circ}\text{C}$  teplotě trojného bodu vody (273,16 K). Uvedené definice jsou opakovaně postupně zpřesňovány, ale pro běžné praktické použití postačují v uvedené podobě. Teplotní rozdíl je u termodynamické i Celsiovy stupnice stejný, takže platí, že  $1\text{ K} = 1^{\circ}\text{C}$ . Rozdílné jsou jen počátky obou stupnic.

### **Fahrenheitova teplotní stupnice**

Jednotkou je stupeň Fahrenheita ( $^{\circ}\text{F}$ ), přičemž  $0^{\circ}\text{F}$  je nejnižší teplota, které se v roce 1727 podařilo německému fyzikovi G. Fahrenheitovi dosáhnout (cca  $-17,78^{\circ}\text{C}$ ) a  $98^{\circ}\text{F}$  je normální tělesná teplota člověka (cca  $36,67^{\circ}\text{C}$ ). Později byly uvedené referenční body změněny a nově se uvažuje  $32^{\circ}\text{F}$  pro bod tání/tuhnutí čisté vody a  $212^{\circ}\text{F}$  pro bod varu. Stupnice se používá především v USA, v omezené míře také v Kanadě a Velké Británii.

### **Réaumurova teplotní stupnice**

Jednotkou je stupeň Réaumura ( $^{\circ}\text{Ré}$ , někdy též jen  $^{\circ}\text{R}$ ), přičemž  $0^{\circ}\text{Ré}$  odpovídá bodu tuhnutí vody ( $0^{\circ}\text{C}$ ) a přírůstek teploty  $1^{\circ}\text{Ré}$  odpovídá zvětšení objemu 80% lihu v lihovém teploměru o  $1/1000$ , resp. teplota  $80^{\circ}\text{Ré}$  odpovídá bodu varu čisté vody při normálním tlaku ( $100^{\circ}\text{C}$ ).

Stupnice je o 12 let starší než stupnice Celsiova, ve své době byla velmi rozšířená, ale dnes se již prakticky nevyužívá.

### Rankinova teplotní stupnice

Jednotkou je stupeň Rankina ( $^{\circ}\text{R}$ , někdy též  $^{\circ}\text{Ra}$  nebo Rank), přičemž  $0^{\circ}\text{R}$  odpovídá absolutní nule a  $491,67^{\circ}\text{R}$  odpovídá teplotě tání/tuhnutí čisté vody. Dále platí, že  $1^{\circ}\text{R}$  odpovídá  $1^{\circ}\text{F}$ .

Převodní vztahy mezi výše uvedenými stupnicemi jsou uvedeny v tab. 1. Přehled významných bodů (absolutní nula, tání/tuhnutí, var atp.) je součástí tab. 2.

Tab. 1 – Převodní vztahy mezi teplotními stupnicemi

do \ z	Kelvinova $T[\text{K}]$	Celsiova $t[^{\circ}\text{C}]$	Fahrenheitova $t_{\text{F}}[^{\circ}\text{F}]$	Réaumurova $t_{\text{Ré}}[^{\circ}\text{Ré}]$	Rankinova $t_{\text{R}}[^{\circ}\text{R}]$
Kelvinova [K]	$T$	$t + 273,15$	$\frac{5}{9}(t_{\text{F}} + 459,67)$	$\frac{5}{4}t_{\text{Ré}} + 273,15$	$\frac{5}{9}t_{\text{R}}$
Celsiova [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T - 273,15$	$t$	$\frac{5}{9}(t_{\text{F}} - 32)$	$\frac{5}{4}t_{\text{Ré}}$	$\frac{5}{9}t_{\text{R}} - 273,15$
Fahrenheitova [ $^{\circ}\text{F}$ ]	$\frac{9}{5}T - 459,67$	$\frac{9}{5}t + 32$	$t_{\text{F}}$	$\frac{9}{4}t_{\text{Ré}} + 32$	$t_{\text{R}} - 459,67$
Réaumurova [ $^{\circ}\text{Ré}$ ]	$\frac{4}{5}(T - 273,15)$	$\frac{4}{5}t$	$\frac{4}{9}(t_{\text{F}} - 32)$	$t_{\text{Ré}}$	$\frac{4}{9}(t_{\text{R}} - 491,67)$
Rankinova [ $^{\circ}\text{R}$ ]	$\frac{9}{5}T$	$\frac{9}{5}t + 491,67$	$t_{\text{F}} + 459,67$	$\frac{9}{4}t_{\text{Ré}} + 491,67$	$t_{\text{R}}$

Tab. 2 – Významné body na různých teplotních stupnicích (definiční body tučně)

Bod \ stupnice	Kelvinova $T[\text{K}]$	Celsiova $t[^{\circ}\text{C}]$	Fahrenheitova $t_{\text{F}}[^{\circ}\text{F}]$	Réaumurova $t_{\text{Ré}}[^{\circ}\text{Ré}]$	Rankinova $t_{\text{R}}[^{\circ}\text{R}]$
Absolutní nula	<b>0</b>	-273,15	-456,67	-218,52	<b>0</b>
Fahrenheitova nula	255,372222	-17,7777	0	-14,2222	459,67
Bod tání/tuhnutí vody	<b>273,15</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>0</b>	<b>491,67</b>
Bod varu vody	373,15	<b>100</b>	<b>212</b>	<b>80</b>	371,67
Jednotkový rozdíl	1	1	1,8	0,8	1,8

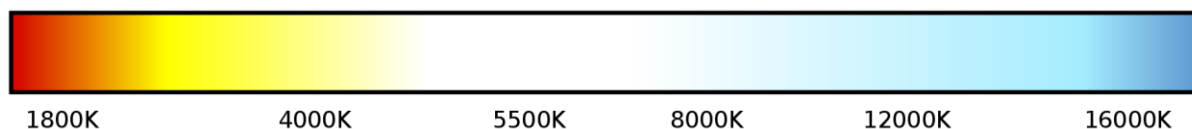
### Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90

Stupnice ITS-90 je definována pomocí základních čtyř rozsahů a dalších podrozsahů, kterých je dohromady 17. Uvažována je termodynamická teplota  $T_{90}$  s jednotkou [K], resp.  $t_{90}$  s jednotkou [ $^{\circ}\text{C}$ ]. V rozsahu mezi 0,65 K až 5,0 K se teplota definuje vztahy pro tlak sytých par  $^3\text{He}$  a  $^4\text{He}$ . V rozmezí 3,0 K až 24,5561 K (trojný bod neonu Ne) se teplota definuje heliovým

plynovým teploměrem pomocí třech pevných definičních bodů. V rozmezí 13,8033 K (trojný bod rovnovážného stavu vodíku  $e\text{-H}_2$ ) až 1234,93 K (teplota tuhnutí stříbra Ag) se teplota definuje pomocí platinového odporového teploměru, který je kalibrován v pevně daných bodech. Od teploty 1234,93 K vychází definice z pevných definičních bodů a Planckova vyzařovacího zákona. Uvedené základní rozsahy se dále dělí na navzájem se překrývající podrozsahy, které jsou vymezeny 17 pevnými body (např. trojný bod  $\text{O}_2$ , teploty tání ledu, Sn, Al, Au, Cu), přičemž jsou předepsány k tomu určené teploměry. Více informací lze nalézt např. v (4) a (5).

### Barevná teplotní stupnice

Barevná teplota, resp. též teplota chromatičnosti, označovaná  $T_C$ , s jednotkou [K], představuje fyzikální veličinu sloužící k vyjádření teploty světla se spektrem podobným tepelným zářičům. Jde o termodynamickou teplotu absolutně černého tělesa, při níž by vysílalo světlo vzbuzující v běžném zdravém lidském oku shodný barevný vjem jako má uvažovaný tepelný zářič. Odpovídající barevné spektrum je na obr. 1.



Obr. 1 – Barevné spektrum absolutně černého tělesa, zdroj (Wikipedie, 2022a)

Pro zajímavost lze uvést teploty chromatičnosti několika různých běžných světelných zdrojů: svíčka – 1900 K, žárovka a Slunce při východu a západu – 2700 K (tzv. teplá bílá), halogenová žárovka – 3400 K, zářivka – 4200 K (tzv. neutrální bílá), běžné denní světlo – 5000 K, standardizované denní světlo – 6500 K (tzv. studená bílá), zamračená obloha – 10000 K, světlo UV trubic v soláriu – 14000 K.

## 1.2 Základy měření teploty

Teplota patří mezi nejčastěji měřené fyzikální veličiny. Obor, který se měření teploty zabývá se nazývá termometrie. Princip měření teploty může být založen na celé řadě metod, obecně je lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

- **Dotykové (kontaktní)** – senzor musí být ve styku s měřeným objektem nebo látkou, využívá se zde přenosu tepla mezi dvěma objekty.
- **Bezdotykové (optické)** – senzor není v přímém styku s měřeným objektem nebo látkou, snímá se infračervené záření měřeného objektu.

Při konstrukci senzorů teploty se vychází z popisu vlivu působení teploty na různé fyzikální děje. Obecně tedy při měření teploty  $\vartheta$  měříme nějakou jinou fyzikální veličinu  $V$ , jež je na teplotě závislá dle určitého vztahu, tj.  $V = f(\vartheta)$ . Teploměry mohou být dilatační (např. plynové či kapalinové), elektrické (např. odporové nebo polovodičové), bezdotykové, resp.

optické (pyrometry). Širší přehled využívaných fyzikálních principů a souvisejících typů teploměrů podává tab. 3.

Tab. 3 – Základní přehled snímačů teploty, zdroj autor dle (VŠCHT, b. r.) a (Kadlec, 2016)

Skupina snímačů	Fyzikální princip	Provedení teploměru	Rozsah použití [°C]
Dilatační snímače	Změna tlaku	Plynový	-5 až +500
	Změna tlaku parní náplně	Tenzní	-40 až +400
	Objemová roztažnost	Kapalinový	-200 až +750
	Délková roztažnost	Kovový, bimetalový	-50 až +900
Elektrické snímače	Termoelektrický jev	Termočlánek	-200 až +2800
	Změna elektrického odporu	Odporový kovový	-250 až +1000
	Změna prahového napětí	Odporový polovodičový, diodový (s přechodem PN)	-200 až +400
Speciální snímače	Bod tání	Teploměrná tělíska	+100 až +1300
	Bod měknutí	Keramické žároměrky	+600 až +2000
	Změna barvy	Teploměrné barvy, pásky a tužky	+40 až +1350
Bezdotykové snímače	Zachycení veškerého teplotního záření	Širokopásmové pyrometry	-40 až +6000
	Zachycení úzkého svazku teplotního záření	Monokrystalické pyrometry	+100 až +3000
	Srovnání dvou svazků teplotního záření o různých vlnových délkách	Poměrové pyrometry	+700 až +2000
	Snímání teplotního obrazu tělesa	Termovize	-40 až +2000

V praxi je, mimo správnou volbu vhodného snímače teploty, důležité snímač zabudovat tak, aby poskytoval správné hodnoty a zároveň aby byly potlačeny nebo vhodným způsobem kompenzovány vnější rušivé vlivy.

## 2 Dotykové senzory teploty

Při měření teploty dotykovými snímači dochází ke styku měřicího senzoru s povrchem měřeného pevného tělesa, resp. styku senzoru se strukturou materiálu při jeho vložení do porézních pevných, kapalných nebo plyných látek. Princip dotykového měření je založen na přenosu tepla z materiálu snímaného tělesa přes pouzdro senzoru na jeho citlivou část. Výhodou dotykového způsobu měření je velmi malý vliv okolního prostředí. Dotykové senzory nejsou složité a lze je snadno používat. Jejich nevýhodou bývá obvykle menší rozsah měření



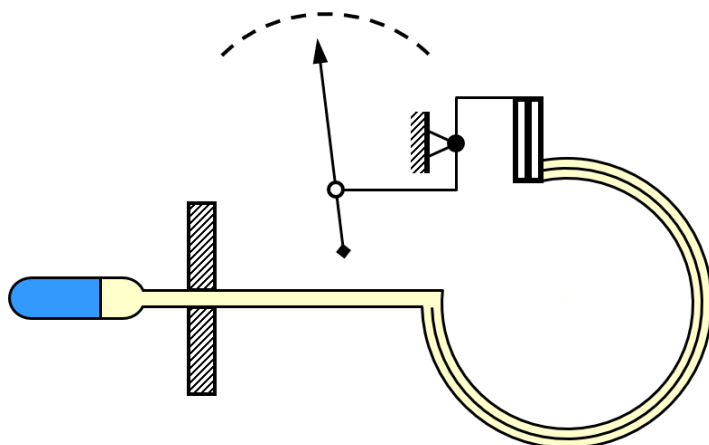
teploty (maximálně několik stovek °C) a rychlost měření, která závisí na tepelné vodivosti pouzdra a povrchu měřeného tělesa. Pouzdro senzoru, tj. vlastně typ senzoru, se musí vhodně zvolit s ohledem na vlastnosti měřeného tělesa. Může docházet k ovlivňování experimentu senzorem z důvodu odvodu tepla a hrozí také nebezpečí kontaminace objektu např. cizími látkami či bakteriemi z povrchu senzoru.

## 2.1 Dilatační a tenzní

Dilatační teploměry jsou založeny na principu objemové nebo délkové roztažnosti plynů, kapalných nebo pevných látek. **Teploměry plynové** využívají skutečnosti, že dle stavové rovnice  $pV = nRT$  (kde  $n$  je látkové množství a  $R$  je plynová konstanta) je za stálého objemu tlak plynu přímo úměrný teplotě

$$p = \frac{nR}{V}T = kT \quad (1)$$

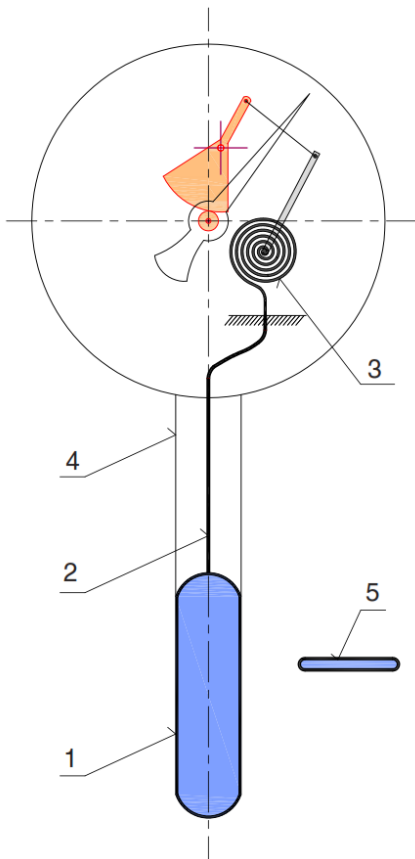
Teploměr (obr. 2) se skládá z jímky (nádoby) naplněné dusíkem, héliem nebo vzduchem (citlivá část), ze spojovací kapiláry a měřicího ústrojí provedeného nejčastěji v podobě deformačního tlakoměru. Vzhledem k vlivu okolní teploty je obvykle doplněn o bimetalový kompenzační prvek.



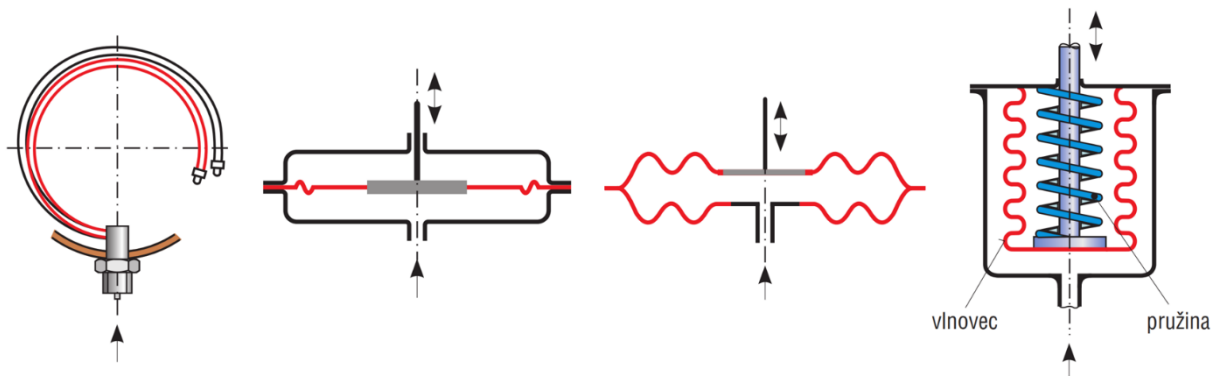
Obr. 2 – Schéma plynového teploměru s Bourdonovou trubicí a kompenzací bimetalovým prvkem, zdroj autor dle (VŠCHT, b. r.)

Schéma praktického provedení plynového teploměru s deformačním elementem ve tvaru šroubovice je uvedeno na obr. 3.

Princip činnosti deformačního tlakoměru je založen na pružné deformaci, resp. na změně tvaru vhodného tlakoměrného prvku vlivem působení tlaku. Tlakoměrnými prvky nejčastěji jsou (na obr. 4 postupně z levé strany) Bourdonova trubice, membrána, krabice a vlnovec. Nejčastěji se používají tlakoměrné prvky ve tvaru Bourdonovy trubice.



Obr. 3 – Schéma plynového teploměru: 1 – plynové tělísko, 2 – kapilára, 3 – deformační tlakoměrný prvek, 4 – stoněk, 5 – průřez trubice, zdroj (Vaculík, 2013)



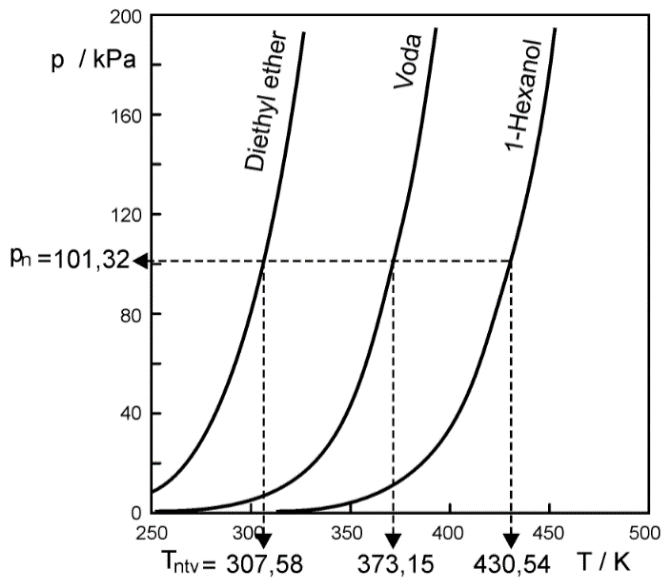
Obr. 4 – Deformační tlakoměrné prvky (Bourdonova trubice, membrána, krabice a vlnovec), zdroj (Kadlec, 2016b)

Za účelem převodu naměřené teploty, resp. jí úměrného tlaku na elektrický signál, se tlakoměrné prvky namísto přímého propojení s ukazatelem (ručkou) osazují tenzometry, příp. se využívá k měření výchylky principů kapacitních, indukčních nebo piezoelektrických.

**Teploměry tenzní** jsou založeny na vzájemné závislosti teploty a rovnovážného tlaku v jednosložkové soustavě s dvěma fázemi: kapalina – pára. Uvedenou závislost popisuje rovnice

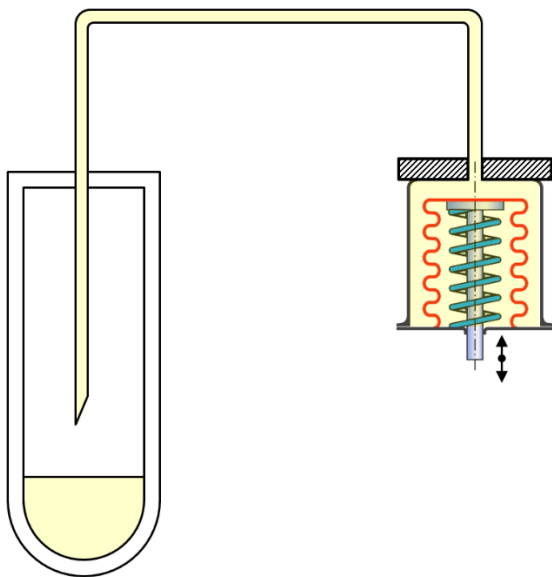
$$\log p = A - \frac{B}{T} + C \log T \quad (2)$$

v níž  $A$ ,  $B$  a  $C$  jsou charakteristické konstanty dané látky. Poslední člen v uvedené rovnici se uplatní pouze při uvažování širšího teplotního intervalu. Přípustný teplotní rozsah pro danou látku je konkrétně určen rozmezím mezi normálním bodem varu (při atmosférickém tlaku  $p_a = 101,325 \text{ kPa}$ ) a kritickou teplotou (v tomto okamžiku se hustota páry rovná hustotě kapaliny), nad níž se vyskytují již jen přehřáté páry (plyn). Závislost tlaku syté páry na teplotě (tzv. křivka syté páry) je nelineární a pro různé druhy látek má odlišný průběh, viz vybrané průběhy na obr. 5. V oblasti nad kritickou teplotou (v grafu není znázorněno) již tlak neroste exponenciálně, ale pouze lineárně s menší směrnicí.



Obr. 5 – Průběh závislosti tlaku na teplotě, zdroj (VŠCHT, 2011)

Normální teplota varu u vody je  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , resp.  $373,15 \text{ K}$ . U jiných látek je teplota varu nižší, např. u diethyletheru (ether etanolu) je  $307,58 \text{ K}$ , cca  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , nebo vyšší, např. u 1-hexanolu (alkanol, resp. alkohol odvozený od alkanů) je  $430,54 \text{ K}$ , cca  $158 \text{ }^\circ\text{C}$ , viz také obr. 5.



Obr. 6 – Základní schéma tenzního teploměru, zdroj autor dle (VŠCHT, b. r.)

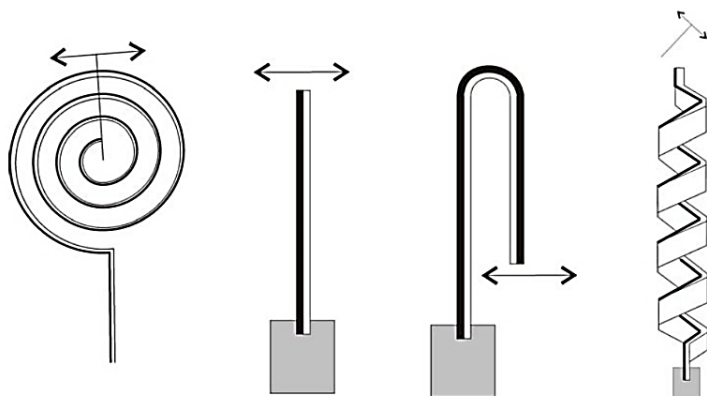
Tenzní teploměry se skládají z částečně kapalinou naplněné jímky malého objemu, do které je zasunuta až téměř ke dnu kapilára, která je spojena s tlakoměrným členem (obr. 6). Kapilára i tlakoměrný člen jsou zcela zaplněny kapalinou. S růstem teploty se postupně kapalina v jímkce vypařuje. Převod na elektrický signál je pak zajištěn elektrickým měřením výchylky na tlakoměrném členu (nejčastěji vlnovec).

**Teploměry kapalinové** pracují na principu změny objemu kapaliny s teplotou. Pro běžné účely (v domácnosti, v medicíně) jsou určeny teploměry skleněné naplněné rtutí (dnes se již nepoužívají), lihem nebo nejčastěji galiem, resp. směsí galia a india. Tyto teploměry jsou velmi přesné, levné a spolehlivé. Jsou ale křehké, někdy hůře čitelné, a především neumožňují převod měřené teploty na elektrickou veličinu. Změnu objemu kapaliny s teplotou lze popsat vztahem

$$V = V_0(1 + \beta\Delta\vartheta) \quad (3)$$

$V_0$  představuje objem kapaliny při vztažné teplotě ( $0\text{ }^\circ\text{C}$ , nebo jiný počátek stupnice),  $\beta$  je teplotní součinitel objemové roztažnosti kapaliny (typicky  $1 \cdot 10^{-4}$  až  $16 \cdot 10^{-4}\text{ K}^{-1}$ ) a  $\Delta\vartheta$  je rozdíl měřené a vztažné teploty  $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0$ .

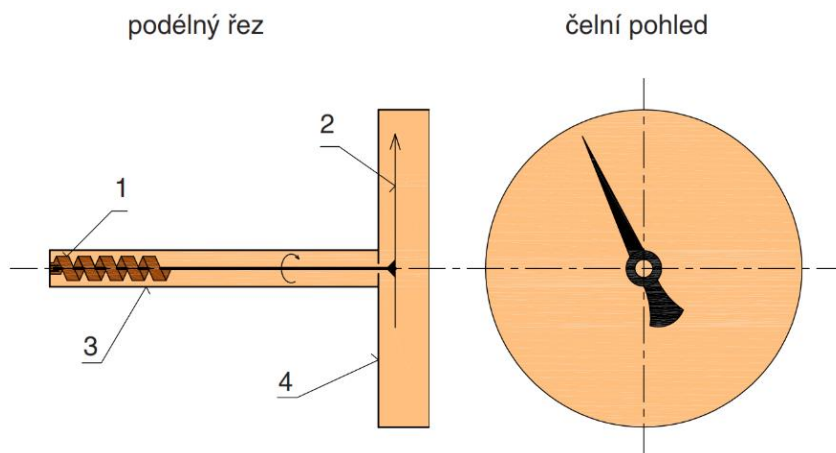
V provozní praxi se spíše používají teploměry s kovovou měřicí nádobkou, spojovací kapilárou a tlakoměrným členem, které jsou zcela vyplněny vhodnou kapalinou. Nejčastěji to bývá rtuť (použití pro teploty v rozmezí  $-38$  až  $+365\text{ }^\circ\text{C}$ ), xylen ( $-40$  až  $+400\text{ }^\circ\text{C}$ ) nebo metanol ( $-45$  až  $+150\text{ }^\circ\text{C}$ ). Z důvodu závislosti na kolísání okolní teploty se velmi často používají systémy s paralelní kompenzační kapilárou, která není spojena s měřicí nádobkou. Kompenzace může být provedena podobně jako u plynových teploměrů pomocí kompenzačního bimetalového prvku, viz obr. 2.



Obr. 7 – Provedení bimetalových elementů, zdroj (Horelica, 2008)

**Teploměry založené na roztažnosti pevných látek** pracují na principu založeném na různé délkové roztažnosti kovů. Nejčastěji se jedná o **teploměry bimetalové** tvořené dvěma pevně spojenými kovovými pásky s odlišným teplotním součinitelem roztažnosti. Praktické provedení bimetalu může být z důvodu větší citlivosti také ve formě šroubovice, tvaru U nebo spirály, viz obr. 7. Jeden konec bimetalu je pevně uchycen a ohyb druhého (volného) konce vlivem změny teploty je pak převáděn na ukazatel, resp. přímo ovládá nějaký další prvek či

zařízení. Sensory mohou být provedeny v klasické podobě, tj. bez elektrického výstupu (obr. 8), nebo se principu spíše dnes využívá v jiných aplikacích, např. u jističů při jejich vypínání jako nadproudové ochrany.



Obr. 8 – Schéma bimetalového teploměru: 1 – bimetalový deformační element, 2 – ručka, 3 – stonek, 4 – tělo ukazatele a ciferník, zdroj (Vaculík, 2013)

Dalším typem jsou **teploměry tyčové** pracující na principu dilatace kovové trubky dle vztahu

$$l = l_0(1 + \delta\Delta\theta) \quad (4)$$

Základem tyčového teploměru je trubka, nejčastěji vyrobená z materiálu s velkým teplotním součinitelem roztažnosti  $\delta$  (např. bronz nebo mosaz) s jedním volným koncem a s druhým koncem upevněným prostřednictvím tyče k mechanismu převodu na ukazatel. Tyč a mechanismus převodu musí být vyrobeny z materiálu s co nejmenším teplotním součinitelem roztažnosti (např. invar). Tyto snímače nemají příliš velkou citlivost. Jejich výhodou ale je, že jejich výchylka je realizována s velkou přestavnou silou, čehož lze využít při ovládání různých zařízení nebo u nespojitých regulátorů k ovládání jejich spínacích ústrojí.

## 2.2 Odporové senzory

Odporové senzory teploty se dělí podle typu odporového materiálu na kovové a polovodičové (bez PN přechodu). Polovodičové lze dále ještě rozdělit na termistory (negastory a pozistory) a poly- nebo častěji monokrystalické (křemíkové).

### 2.2.1 Kovové

Odpor kovového vodiče vzrůstá se zvyšující se teplotou. Závislost lze u čistých kovů vyjádřit pomocí vztahu

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta\theta + \beta(\Delta\theta)^2 + \gamma(\Delta\theta)^3 + \dots) \quad (5)$$

Hodnoty součinitelů  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  jsou tabelovány, pro platinový odporový teploměr jsou uvedeny ČSN EN 60751. V technické praxi často postačuje použití zjednodušeného vztahu (aproximace

složitější nelineární závislosti jednodušší nelineární závislostí 2. stupně), ve kterém se vynechají členy s vyššími mocninami

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta\vartheta + \beta(\Delta\vartheta)^2) \quad (6)$$

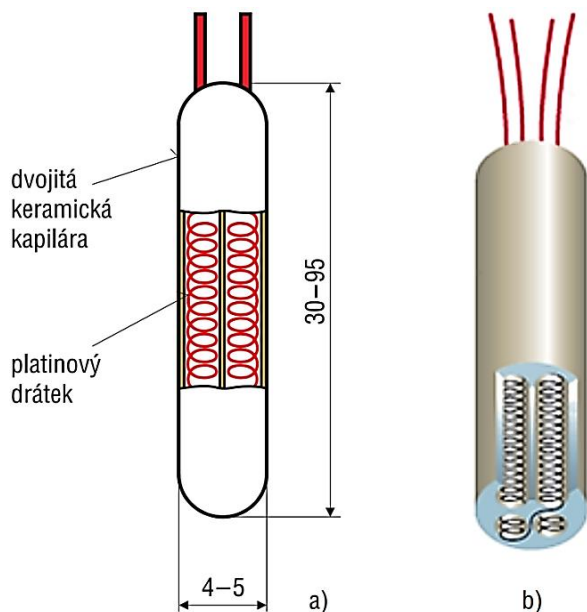
přičemž pro menší rozsahy měření teploty je možné využít následující lineární vztah

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta\vartheta) \quad (7)$$

$R_0$  je odpor při vztažné teplotě (nejčastěji 0 °C),  $\alpha$  je teplotní součinitel odporu a  $\Delta\vartheta$  je rozdíl měřené a vztažné teploty.

V konstrukci těchto snímačů se využívají čisté kovy s co největším teplotním součinitelem odporu a chemickou stálostí, nejčastěji platina ( $\alpha = 3,85$  až  $3,93 \text{ K}^{-1}$ , použití v rozsahu  $-200$  až  $+850$  °C) nebo nikl ( $\alpha = 6,17$  až  $6,70 \text{ K}^{-1}$ ,  $-60$  až  $+200$  °C), příp. měď ( $\alpha = 4,26$  až  $4,33 \text{ K}^{-1}$ ,  $-50$  až  $+150$  °C) nebo speciální slitiny.

Dříve byla citlivá část senzoru (tzv. měřicí rezistor) tvořena nejčastěji platinovým drátkem o průměru 0,05 mm navinutým na keramickém či skleněném tělísku, nebo spirálovitě stočeným a umístěným v keramické kapiláře (obr. 9)

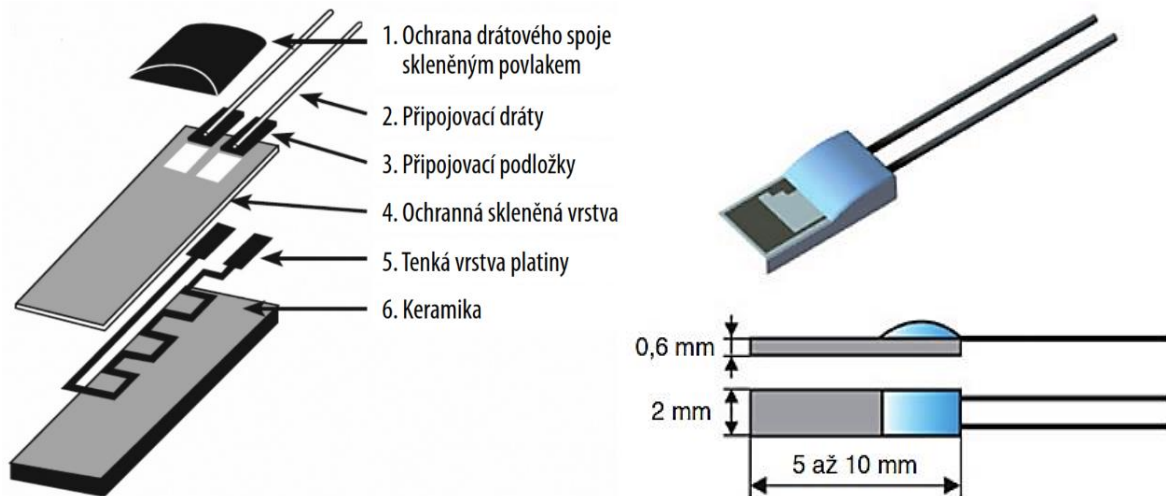


**Obr. 9 – Drátkový odporový senzor: a) základní schéma s rozměry, b) řez senzorem se čtyřvodičovým zapojením, zdroj (Kadlec, 2016a)**

Nejčastější hodnota odporu při 0 °C je  $R_0 = 100 \Omega$ , přičemž takový senzor má pak označení Pt100 a jeho teplotní rozsah je zpravidla od  $-200$  do  $+850$  °C.

Další, v současné době zřejmě nepoužívanější variantou provedení, je měřicí odpor vyrobený tenkovrstvou technologií ve tvaru meandru z platiny (obr. 10). Meandr se vytváří na keramické (korundové) destičce sítotiskem či technologií vakuového napařování nebo napařování přes masku a iontovým leptáním. Takové senzory jsou miniaturních rozměrů a oproti drátkovým mají rychlejší odezvu. Mohou být v provedení Pt100, ale i v jiných variantách Pt50, Pt500, Pt1000 či Pt2000, ale s menším rozsahem než u drátkových, obvykle  $-70$  do  $+400$  °C, někdy až

do +600 °C. Sensory mají oproti drátkovým příznivější dynamické vlastnosti a výbornou odolnost proti vibracím. Drátkové sensory jsou ale časově stářejší a vyrábí se s větším teplotním rozsahem.



Obr. 10 – Tenkovrstvé odporové čidlo, zdroj (Kadlec, 2016a a Maixner, 2006)

Citlivá část sensorů může být také vyráběna z niklu (rozsah –60 až +180 °C), mědi (–200 až +200 °C) nebo ze speciálních slitin (např. Rh-Fe, Pt-Co, vhodné pro nižší teploty již od –250 °C). Niklové se vyrábí nejčastěji v provedení Ni100, Ni200, Ni500, Ni1000 a Ni2000 a oproti platinovým mají rychlejší odezvu na změnu teploty (lepší dynamické vlastnosti) a vyšší citlivost při velmi malých rozměrech. Měděné se nepoužívají přímo v senzorech, ale mají využití při měření teploty vinutí elektromotorů.

### 2.2.2 Polovodičové – termistory

Využívají podobně jako kovové závislosti odporu na teplotě. Mohou mít záporný teplotní součinitel odporu – **negastory** (NTC), nebo součinitel kladný – **pozistory** (PTC). Mají značně nelineární statikou charakteristiku a omezený teplotní rozsah, cca –50 až +200 °C. Průběh charakteristik NTC a PTC v porovnání s charakteristikami platinových a křemíkových monokrystalických čidel je na obr. 11. Termistory se v praxi používají pro přesná měření v úzkých rozsazích a jako součást tepelných ochran.

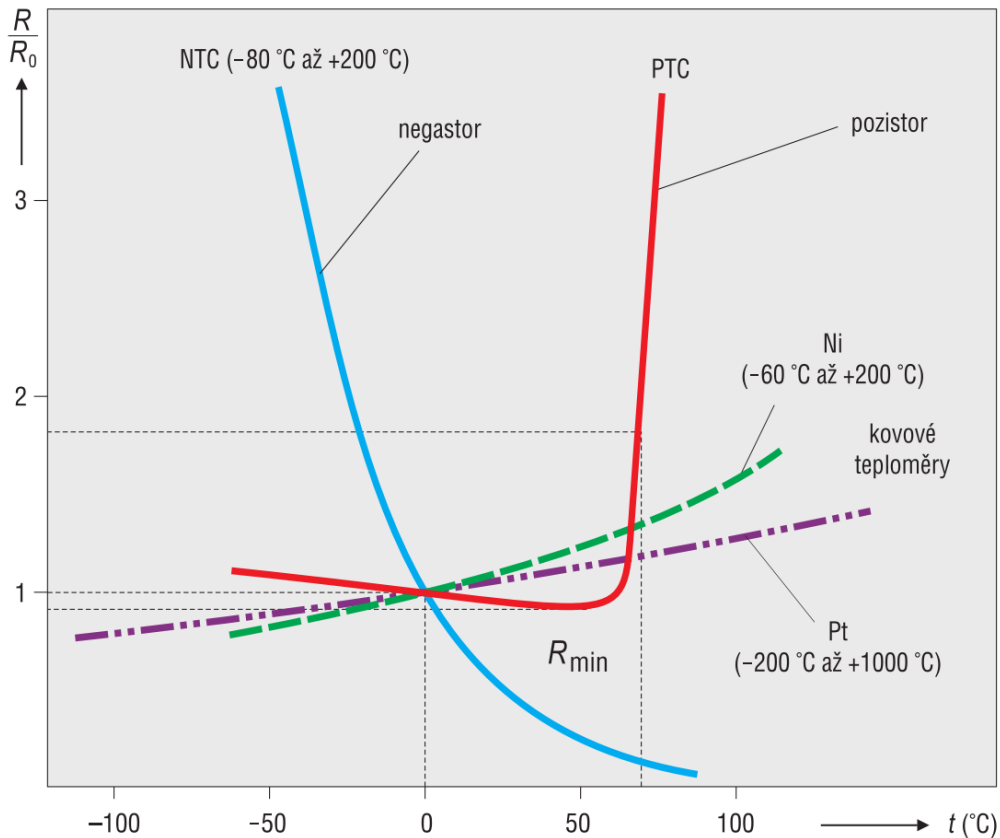
Negastory se vyrábí technologií spékání oxidů Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, BaO, MnO, NiO, CuO, CoO i jiných. Nelineární závislost odporu na teplotě (graf na obr. 11) lze popsat dle vztahu

$$R = R_0 e^{-B\left(\frac{1}{\vartheta} - \frac{1}{\vartheta_0}\right)} \quad (8)$$

kde  $B$  je veličina úměrná aktivační energii a je udávána výrobcem. Závisí nejen na složení a směsi oxidů termistoru, ale i na jeho teplotě. Nevýhodou je, že i mezi jednotlivými kusy termistorů stejného typu se parametr  $B$  liší a sensory je tak vždy nutné kalibrovat. V daném pracovním intervalu lze  $B$  určit na základě naměřených hodnot odporu termistoru při dvou teplotách a pak platí

$$B = \frac{\ln R_0 - \ln R}{\frac{1}{\vartheta_0} - \frac{1}{\vartheta}} \quad (9)$$

U termistorů se udává hodnota odporu při 25 °C a běžně jsou vyráběny v rozmezí hodnot od desetin  $\Omega$  až jednotky  $M\Omega$ . Používají se nejčastěji perličkové termistory o průměru 0,2 až 3 mm v běžném měřicím rozsahu od  $-60$  až do  $+200$  °C, výjimečně až do  $+400$  °C.



**Obr. 11 – Průběhy statických charakteristik odporových snímačů, zdroj (Kadlec, 2016a)**

Výhodou těchto snímačů je jejich velká citlivost, miniaturní rozměry a malá hmotnost. Nevýhodou pak jejich časová nestálost, kterou lze omezit vhodným výběrem snímače, příp. jeho umělým stárnutím. Nejběžnější provedení termistorů jsou na obr. 12.



**Obr. 12 – Běžná provedení termistorů, zdroj (Electrical Technology, 2023)**

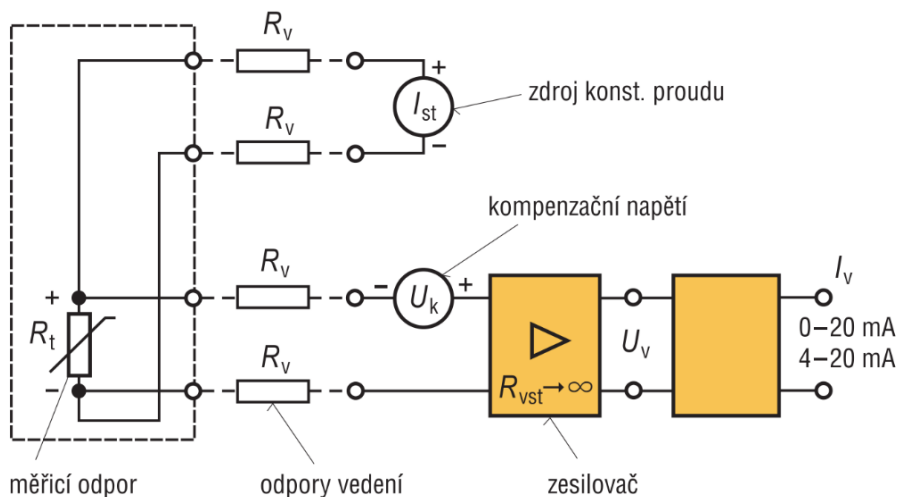
Pozistory se vyrábí z polykrystalické feroelektrické keramiky, např. titaničitanu barnatého  $BaTiO_3$ . Vzhledem k typickému průběhu jejich statické charakteristiky (obr. 11), která vykazuje



prudký růst (po dosažení Curieovy teploty) v úzkém intervalu, se využívají spíše jako dvoustavové senzory teploty, jako součásti tepelných ochran.

### 2.2.3 Realizace obvodů s odporovými teploměry

K vyhodnocení změny odporu odporového snímače se obvykle používá Wheatstoneův můstek napájený stejnosměrným stabilizovaným napětím, jehož velikost je nutné vhodně volit tak, aby nedocházelo k parazitnímu oteplování měřicího odporového členu. Další možností je použití čtyřvodičového zapojení na obr. 13. Měřícím odporem  $R_t$  protéká konstantní proud. Změna napětí na odporu se snímá měřícím zesilovačem s velkým vstupním odporem a vyhodnocuje na základě Ohmova zákona. Nulovou hodnotu lze nastavit změnou velikosti kompenzačního napětí  $U_k$ .



**Obr. 13 – Schéma čtyřvodičového zapojení odporového teploměru, zdroj (Kadlec, 2016a)**

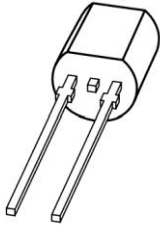
Změna odporu u odporových senzorů se v průmyslové praxi nikdy přímo nevyužívá k vyhodnocení naměřené teploty. Změna odporu (ale i napěťový signál termočlánek, viz dále) je pomocí převodníku převedena na unifikovaný proudový nebo napěťový signál.

### 2.2.4 Polovodičové monokrystalické

Tento typ senzorů se vyrábí z křemíku, germania nebo india, v průmyslové praxi se ale nejčastěji používají senzory křemíkové, které mají typický měřicí rozsah od  $-50$  do  $+150$  °C. Funkce senzoru je založena na změně pohyblivosti nosičů náboje (u typu polovodiče N nevlastní elektronovou vodivostí podmíněnou dotací polovodiče příměsí) se změnou teploty. S nárůstem teploty dochází ke snižování pohyblivosti nosičů, čímž klesá vodivost polovodiče a roste jeho odpor podle vztahu

$$R = R_0 + k(\vartheta - \vartheta_0)^2 \tag{10}$$

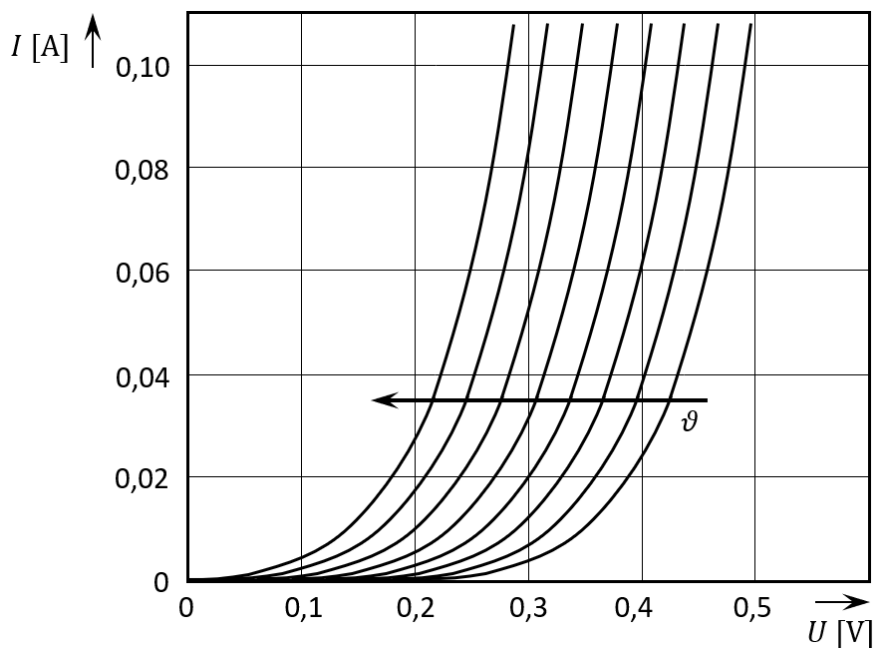
Senzory se vyrábějí ve formě součástky (různá pouzdra, např. TO92 na obr. 14). Jejich výhodou je lepší stabilita než u termistorů a nízká cena, mezi nevýhody lze zahrnout malý teplotní rozsah a menší citlivost než u termistorů. Z těchto důvodů se nejčastěji používají pro měření teplot při menších nárocích na citlivost. Bývají také často součástí CMOS integrovaných inteligentních senzorů.



Obr. 14 – Polovodičový křemíkový senzor v pouzdře TO92, zdroj (Direct Industry, 2022)

### 2.3 Monokrystalické křemíkové PN senzory

Využívá se u nich teplotní závislosti voltampérové charakteristiky PN přechodu v propustném směru, viz obr. 15. Mohou být založeny na bázi polovodičové diody nebo se u nich využívá PN přechodu báze-emitor bipolárního tranzistoru.



Obr. 15 – Závislost V-A charakteristiky diody na teplotě, zdroj autor

Senzory mohou být využity k měření teplot v rozsahu  $-50$  do  $+150$  °C. Prahové napětí se obvykle mění o cca  $2$  mV/K. Teplotní koeficient je záporný a podle struktury PN přechodu se obvykle pohybuje od  $-2,5$  až  $-2$  mV/K. Statická charakteristika senzoru je lineární. Mimo to je výhodou vysoká citlivost, dobré dynamické vlastnosti, časová stálost a snadná integrace (většinou v provedení s řídicí elektronikou na jednom čipu). Nevýhodou je poměrně úzký teplotní rozsah.

## 2.4 Termoelektrické senzory – termočlánky

Pracují na bázi termoelektrického jevu (Thomas Johann Seebeck jej objevil v r. 1821). Jedná se o aktivní snímače, jelikož teplotní gradient se mění přímo na elektrické napětí. Změna není příliš velká, řádově se jedná o  $\mu\text{V}$  na  $^\circ\text{C}$ . Prakticky termočlánek vznikne spojením dvou vodičů vyrobených z různých kovových materiálů, přičemž napětí je úměrné rozdílu teplot na jejich koncích, viz obr. 16.



Obr. 16 – Vznik termočlánu, zdroj: autor

Pro elektrické napětí generované termočlánekem zjednodušeně platí

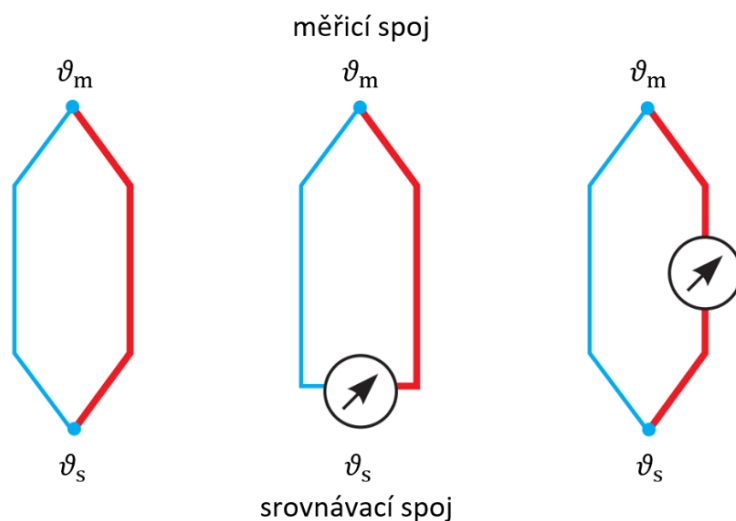
$$U = \alpha_1(\vartheta_1 - \vartheta_2) - \alpha_2(\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (11)$$

Vztah platí jen pro úzký rozsah teplot, pro větší rozsahy není závislost již lineární a používá se vztahu

$$U = \sum_{i=0}^n \alpha_i (\vartheta_1 - \vartheta_2)^i \quad (12)$$

kde  $n$  se položí rovno 2 až 14 v závislosti na požadované přesnosti a na typu termočlánu.

Základní princip zapojení termočlánu do obvodu je zřejmý z obr. 17. Bod spojení určený ke styku s měřeným objektem se označuje jako měřicí spoj a druhý (na studeném konci) jako srovnávací spoj. Generované termoelektrické napětí lze nejjednodušeji měřit pomocí měřidla umístěného v místě srovnávacího spoje, nebo v jedné z větví termočlánu. Avšak obě připojovací svorky měřidla musí mít shodnou teplotu, aby jeho zařazením do obvodu nedošlo ke změně napětí.



Obr. 17 – Obvod termočlánu, upraveno dle (Kadlec, 2016a)

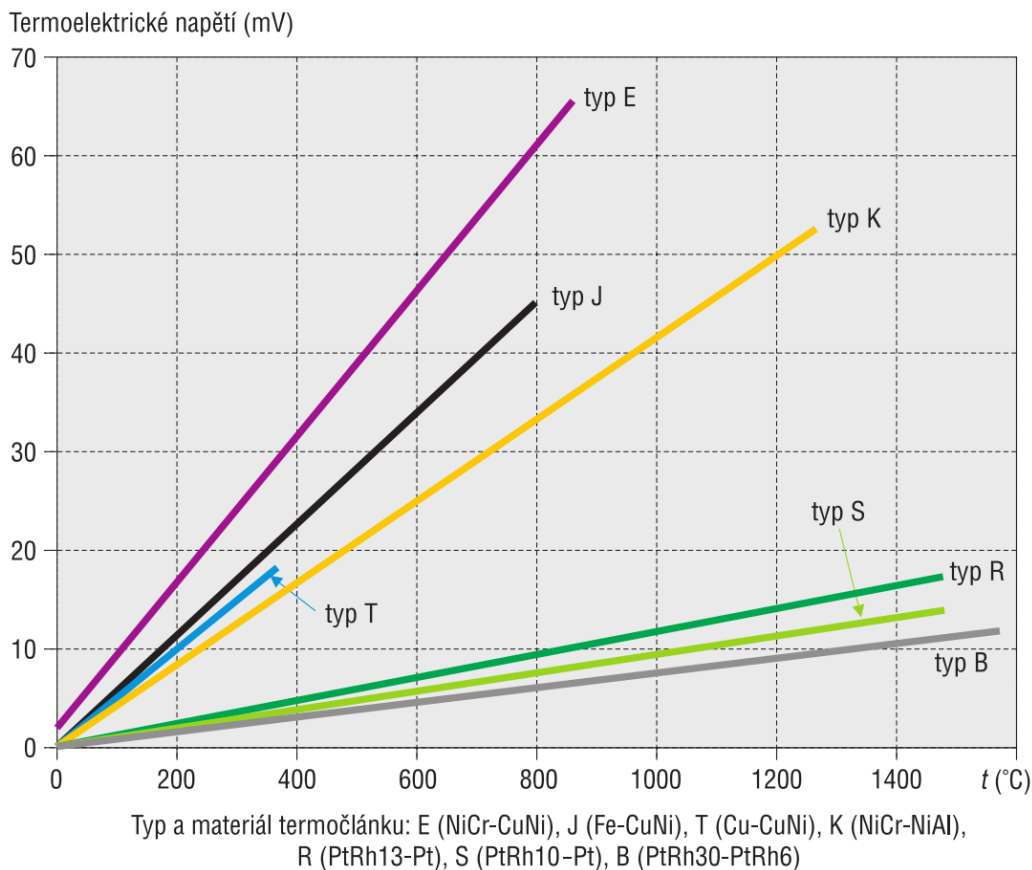
Existují osvědčené kombinace materiálů, které se označují velkými písmeny a používají se pro různé rozsahy teplot. Přehled používaných kombinací udává tab. 4. Převodní (statická) charakteristika je u daného typu vždy lineární ideálně v co největší oblasti rozsahu, viz obr. 18.

**Tab. 4 – Základní přehled snímačů teploty, zdroj autor dle (Lufinka, 2012)**

Typ	Kombinace slitin		Rozsah [°C]
	Vodič +	Vodič –	
<b>J</b>	Fe (železo)	Cu-Ni (konstantan)	0 až 750
<b>K</b>	Ni-Cr (nikl-chrom)	Ni-Al (nikl-hliník)	-200 až 1250
<b>T</b>	Cu (měď)	Cu-Ni (konstantan)	-200 až 350
<b>E</b>	Ni-Cr (nikl-chrom)	Cu-Ni (konstantan)	-200 až 900
<b>N</b>	Ni-Cr-Si (nicrosil)	Ni-Si-Mg (nisil)	-270 až 1300
<b>R</b>	Pt-13%Rh (platina-rhodium)	Pt (platina)	0 až 1450
<b>S</b>	Pt-10%Rh (platina-rhodium)	Pt (platina)	0 až 1450
<b>B</b>	Pt-30%Rh (platina-rhodium)	Pt-6%Rh (platina-rhodium)	0 až 1700
<b>G</b>	W (wolfram)	W-26%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320
<b>C</b>	W-5%Re (wolfram-rhenium)	W-26%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320
<b>D</b>	W-3%Re (wolfram-rhenium)	W-25%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320

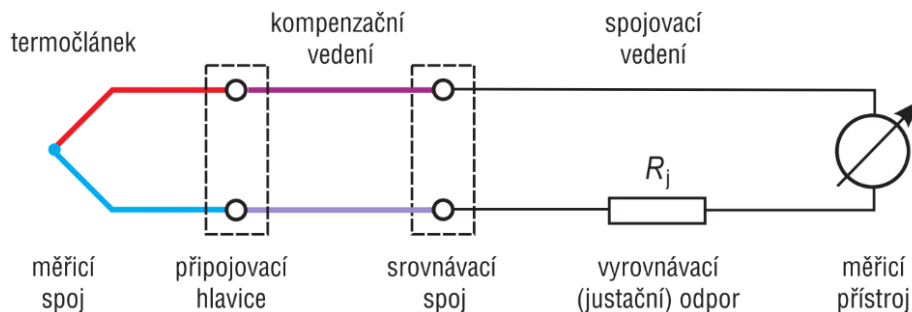
Ke spojení měřicího spoje termočlánu (místo měření) a srovnávacího spoje (měřicí přístroj) je nutné použít kompenzační vedení (schéma na obr. 19). Vedení je vyrobeno ze stejného materiálu jako termočlánek, nebo, u článků vyrobených ze vzácných kovů, z materiálu o stejných termoelektrických vlastnostech a bývá doplněno vyrovnávacím (tzv. justačním) odporem, běžně o velikosti 20 Ω.

Jelikož každé spojení dvou vodičů vytváří termočlánek, vzniknou připojením obou konců termočlánu (na obr. 16 kov 1 a kov 2) k měřicímu zařízení pomocí dalšího vedení, které pak představuje kov 3 – parazitní termočlánek 1–3 a 2–3. Nebylo-li by použito připojovací vedení, vzniknou zmiňované parazitní termočlánek v místě svorek měřicího zařízení, protože uvnitř něho jsou také vodiče.



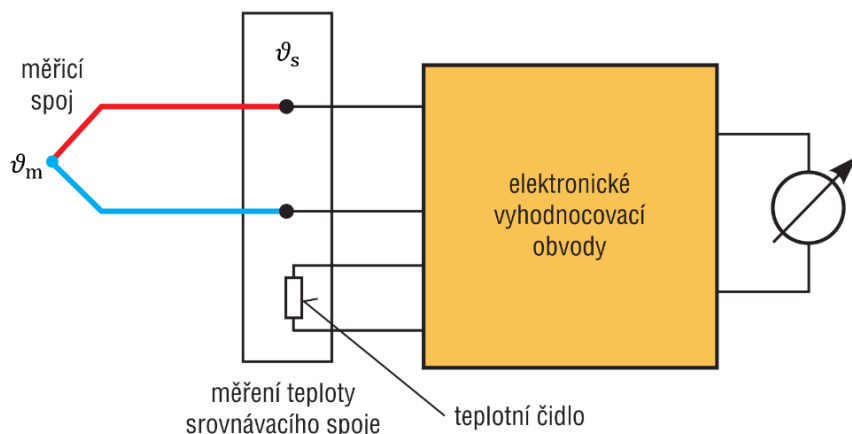
**Obr. 18 – Statické charakteristiky různých typů termočlánků, zdroj (Kadlec, 2016a)**

V minulosti se uvedený problém řešil vytvořením dalšího termočlánku (musí být tvořen stejnými vodiči, tj. kov 1 a kov 2) v jedné ze dvou větví a jeho umístěním do prostředí s přesně definovanou teplotou 0 °C (obvykle voda + tající led). Na svorkách přístroje pak vzniknou v každé větvi stejné parazitní termočlánky, které se pak navzájem kompenzují. V současnosti se již využívá sofistikovanějšího způsobu kompenzace studeného konce pomocí speciálního elektronického obvodu (kompenzátoru), viz obr. 20. Ten měří teplotu v místě parazitních článků a výstupní napětí upravuje tak, aby byl eliminován jejich vliv. Kompenzátor je určen vždy pouze pro konkrétní typ termočlánku a nelze jej tak použít s typem jiným.



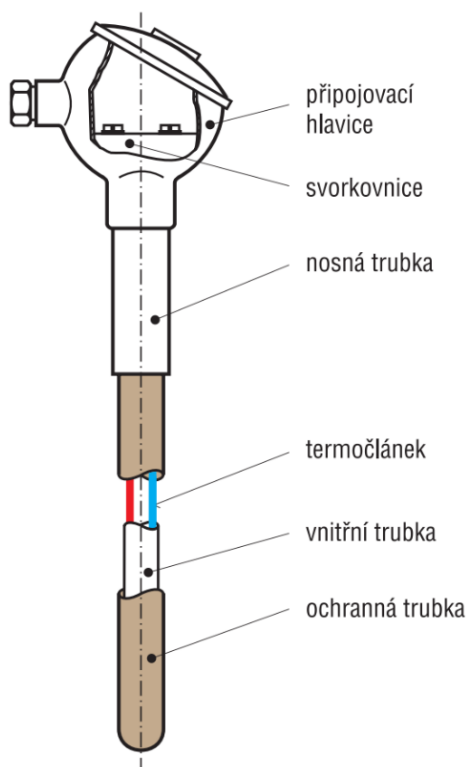
**Obr. 19 – Schéma zapojení termočlánku, zdroj (Kadlec, 2016a)**

Konkrétně v případě číslicového měřicího systému se běžně pro připojení termočlánku používá tzv. izotermická svorkovnice, jejíž teplota je měřena např. polovodičovým odporovým snímačem a potřebná korekce se pak vyhodnocuje číslicovými obvody.



**Obr. 20 – Schéma připojení termočláčku s automatickou kompenzací kolísání teploty srovnávacího spoje, upraveno dle (Kadlec, 2016a)**

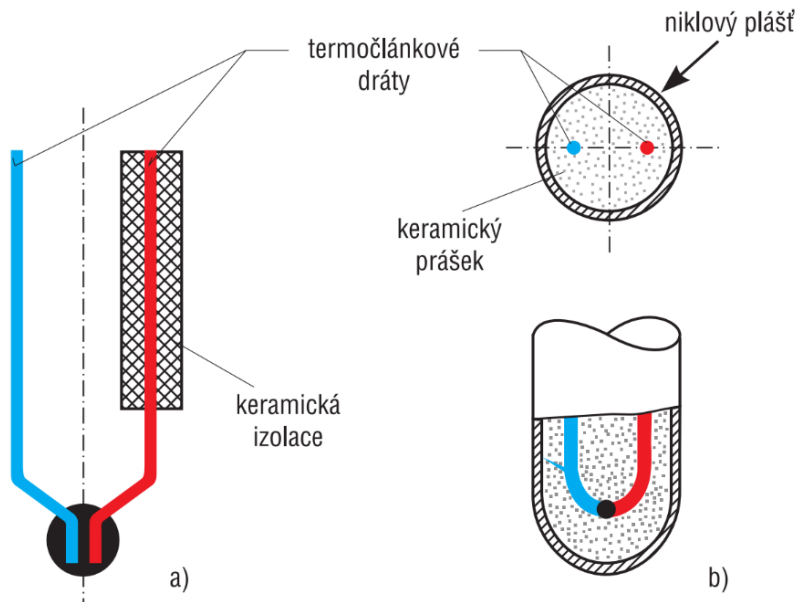
V průmyslové praxi je k dispozici celá řada různých provedení termočlámků, od těch nejjednodušších až po speciální zapouzdřené sondy (obr. 21). Volba typu termočláčku se provádí především podle rozsahu teplot (viz tab. 4 výše). Kompletní připojovací vedení, včetně konektorů, musí být vyrobeno z materiálů, které odpovídají danému termočláčku. Nelze opominout ani materiál izolace, který v konečném důsledku ovlivňuje použitelnost termočlámků ve zvolených aplikacích a jejich teplotní rozsah. Kompensátor může být případně doplněn i o zesilovač a o další obvody pro linearizaci převodní charakteristiky.



**Obr. 21 – Možné průmyslové provedení senzoru s termočláčkem, zdroj (Kadlec 2016a)**

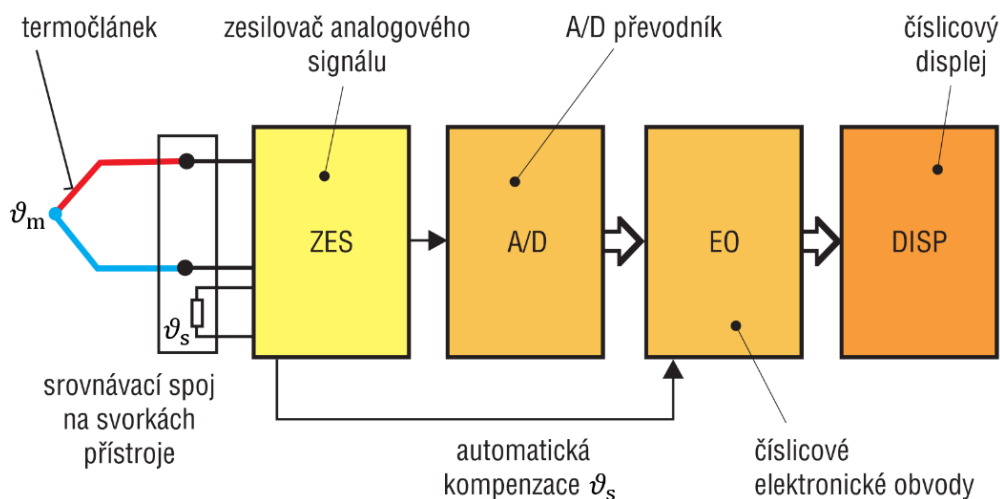
Senzor na obr. 21 představuje průmyslové provedení vhodné pro aplikace v různém prostředí, podle něhož se volí materiály ochranné armatury. Ta chrání citlivou část senzory před nepříznivými vlivy (mechanické poškození, různé fyzikální a chemické vlivy), ale zhoršuje

dynamické vlastnosti senzoru. Zajímavé řešení představují moderní tzv. plášťové termočlánky, u nichž jsou vodiče uloženy v tenké niklové nebo nerezové trubce s výplní práškovým  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{MgO}$  (obr. 22b). Lze je ohýbat, mají velmi dobré dynamické vlastnosti (velmi nízké časové konstanty) a lze jimi měřit i na hůře přístupných místech.



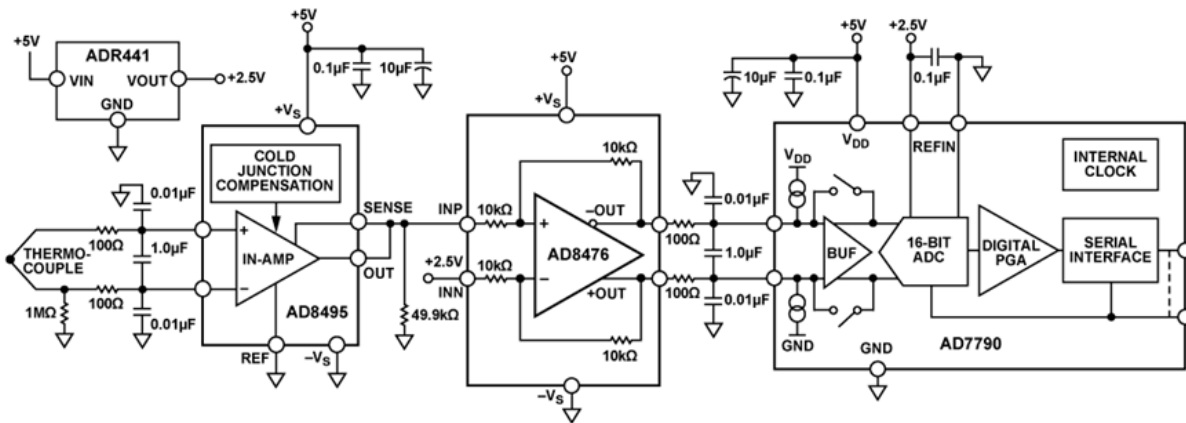
**Obr. 22 – Termoeltrický článek: a) detail běžného provedení, b) plášťový termočlánek, zdroj (Kadlec, 2016a)**

Moderní senzory na bázi termočlánků umožňují analogový signál z termočlánku převádět na číslicový výstupní signál, viz blokové schéma na obr. 23. Termočlánek je připojen k zesilovači pomocí izotermické svorkovnice. Po zesílení je analogový signál pomocí A/D převodníku převeden na číslicový. Další zpracování a automatickou kompenzaci vlivu změn teploty na straně srovnávacího spoje zajišťují číslicové elektronické obvody (obvykle je součástí mikroprocesor). Zmiňované obvody bývají v průmyslových provedeních snímačů přímou součástí hlavice senzoru. Vyhodnocování měření se provádí pomocí displeje. Moderní senzory jsou nezdřídka vybaveny také programovatelným převodníkem s komunikačním rozhraním (někdy i bezdrátovým) pro přenos naměřených dat.



**Obr. 23 – Teploměr s termočlánkem s kompenzací a číslicovým výstupem, upraveno dle (Kadlec, 2016a)**

Výše zmiňované řešení přináší např. obvod CN0271 (obr. 24) od spol. Analog Devices.



Obr. 24 – Zjednodušené schéma obvodu pro kompenzaci a převod napětí termočlánu na digitální signál CN0271, zdroj (Analog Devices, 2022)

Obvod CN0271 primárně určený pro termočlánu typu K se skládá z několika důležitých dílčích obvodů – kompenzátoru, zesilovače a A/D převodníku. Výstup z termočlánu je přiveden na vstup obvodu AD8495, což je vstupní zesilovač pro termočlánu s kompenzací studeného konce. Následuje rozdílový zesilovač AD8476 a 16bitový A/D převodník typu sigma-delta AS7790. Součástí CN0271 je také nízkošumový zdroj referenčního napětí ADR441. Pokud by bylo potřeba připojit termočlánek jiného typu, stačila by výměna vstupního zesilovače AD8495 za jiný vhodný. Např. pro termočlánek J by to byl AD8494 nebo AD8496 (Analog Devices, 2022).

## 2.5 Stručný přehled speciálních typů senzorů

Mezi speciální typy senzorů teploty lze zahrnout **krystalový teplotní senzor**, který pracuje na základě změny rezonanční frekvence křemenného výbrusu vlivem teploty. Měřicí rozsah bývá typicky od  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jeho výhodou je velká citlivost, resp. rozlišovací schopnost až  $10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mezi nevýhody patří horší stabilita a značná citlivost na okolní rušení.

Dále do této skupiny patří také **akustické teplotní senzory** (rezonanční nebo pulsní), které pracují na bázi změny rychlosti šíření zvuku vlivem teploty. Senzory tohoto typu jsou vhodné pro velmi nízké i vysoké teploty. **Šumové teplotní senzory** pracují na základě měření Johnsonova (tepelného) šumu, který je způsoben nahodilým pohybem elektronů v krystalové mřížce polovodiče. **Magnetické teplotní senzory** využívají změny paramagnetických solí (např. síran manganatý  $\text{MnSO}_4$  nebo síran hořečnatý  $\text{MgSO}_4$ ) vlivem teploty.

### 2.5.1 Indikátory teploty

Indikátory teploty se používají k přibližnému určení teploty měřeného tělesa. Teplota se v tomto případě určuje na základě znalosti kritické teploty, tj. teploty, při níž dojde k definované změně vzhledu indikátoru (většinou barvy nebo tvaru). Změna barvy může být

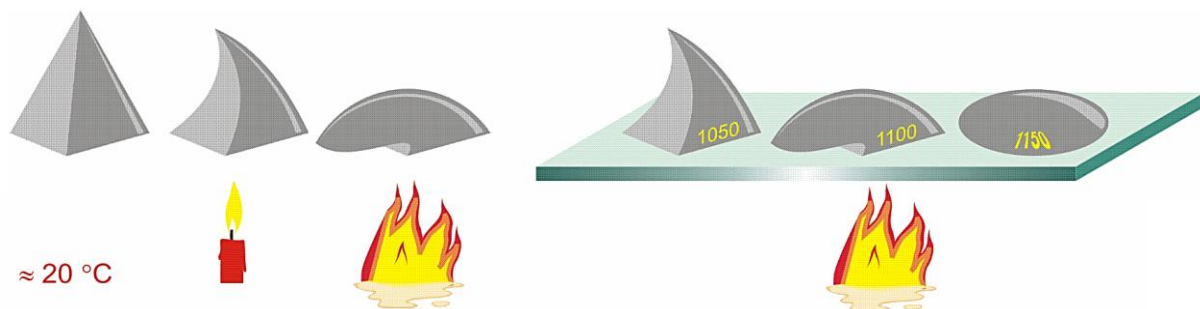


vratná (indikátor má po zchladnutí výchozí barvu) nebo nevratná a může docházet k jednomu barevnému zvratu (při jedné teplotě) nebo i k více zvratům (při více teplotách).

Mezi indikátory teploty patří **teploměrná (teploměrová) tělíška** vyrobená ze slitiny keramické hmoty s přesně definovaným bodem tání. Mívají tvar válce nebo hranolu a při dosažení sledované teploty dojde k jejich rychlému roztání.

**Keramické žároměrky** jsou indikátory nevratné, které jsou vyráběny z oxidů  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  s příměsemi jiných oxidů, např.  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  aj. Rozsah indikovaných teplot žároměrek je od  $600\text{ }^\circ\text{C}$  do  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ , běžně s odstupňováním po 10 až  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . Přesnost měření se pohybuje typicky v rozsahu  $\pm 15\text{ }^\circ\text{C}$ . Žároměrky se vyrábí nejčastěji ve tvaru trojbokých jehlanů nebo kroužků, u nichž se mění při růstu teploty průměr, případně ve tvaru tyčinek. Nejčastější aplikace jsou v keramickém průmyslu v pecích.

Keramické trojboké jehlany mají výšku od 25 do 60 mm. Měření probíhá tak, že po vložení na několik minut do pece začne při působení teploty jehlan tát a v důsledku toho dojde k jeho ohnutí. Ohnutý jehlan, který se ještě nedotýká špičkou podložky, udává teplotu, pro kterou je určen. Po překročení dané teploty dojde postupně k jeho roztátí (viz názorný příklad na obr. 25).

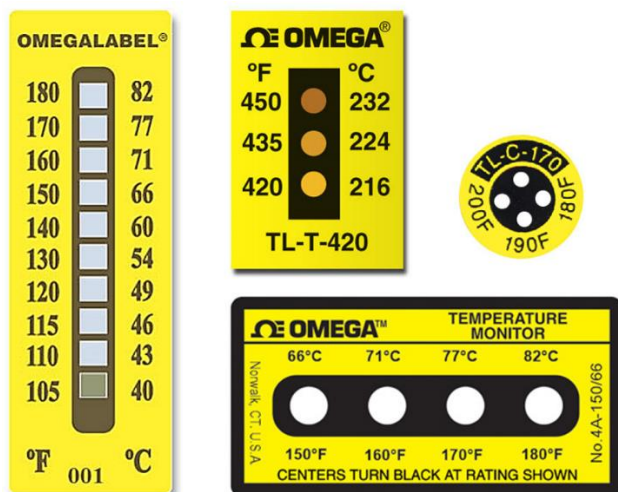


Obr. 25 – Ilustrace principu funkce žároměrek, zdroj (Zábranský, 2009)

Pro použití v keramickém průmyslu existuje 59stupňová sada číslovaných Segerových jehlánek pro měření teplot od  $600\text{ }^\circ\text{C}$  do  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ . Po vložení několika jehlánek do pece je po ohnutí příslušného jehláneku označeného číslem indikována teplota (např. 020  $\approx 670\text{ }^\circ\text{C}$  nebo 2a  $\approx 1120\text{ }^\circ\text{C}$ ).

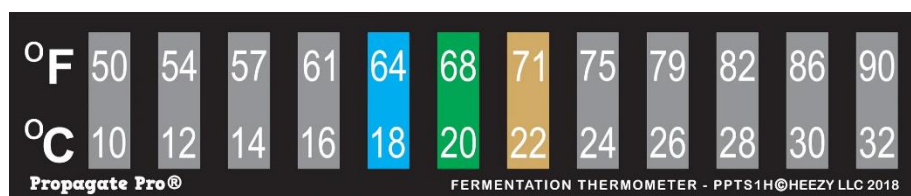
Další skupinu nevratných indikátorů tvoří **indikátory tavné**. Může se jednat o **teploměrné tablety** vyráběné lisováním keramických prášků, které se při dosažení kritické teploty roztaví. Dále se používají **teploměrné kapaliny**, tvořené keramickým práškem rozpuštěným v těkavé kapalině, která se nanese štětcem nebo nástřikem na měřený objekt. Při dosažení kritické teploty se značka rozteče. Variantně může jít o **teploměrné tužky**, u kterých je keramický prášek stmelen pojivem. Při kritické teplotě dojde k roztavení a ztmavnutí nanesené stopy.

K indikaci teplot se využívají také **teploměrné nálepky** s adhezivní vrstvou osazené jedním nebo řadou bílých indikačních kruhů nebo obdélníky na černém nebo oranžovém pozadí (obr. 26). Při dosažení určité teploty kruh nebo obdélník zčerná. Teplotní rozsah je omezen na teploty od  $38$  do  $316\text{ }^\circ\text{C}$ .



Obr. 26 – Příklady teploměrných nálepek, zdroj (Jakar Electronics, 2022)

Další skupinu tvoří **barevné indikátory teploty**. Mohou být v provedení **teploměrných barev nebo tužek** na bázi akrylových laků s teplotně citlivými anorganickými pigmenty. Kritická teplota je určena konkrétním chemickým složením nanášené barvy. Mohou být vratné i nevratné (pro více barevných zvrátů). Používají se také **teploměrné nálepky** s vratnými teploměrnými barvami pro snadnou aplikaci, ale pro nižší rozsah teplot (od 70 do 150 °C). Dále **teploměrné indikátory s kapalnými krystaly** nejčastěji v provedení nálepek s vrstvou tekutých krystalů s průhledným krytím s rozsahem měřených teplot od –30 do +120 °C.



Obr. 27 – Teploměrná nálepka s tekutými krystaly, zdroj (Propagate Pro, 2022)

Princip indikátorů s tekutými krystaly je založen na teplotní závislosti molekulární struktury ve stavu mezi pevnou a kapalnou fází, de facto kapaliny s molekulami ve tvaru tyčinek, které se volně pohybují, ale udržují si směrovost. Pro výrobu teploměrných tekutých krystalů existuje celá řada technologických postupů. Krystaly mohou být nematické, smektické, nebo nejčastěji cholesterické.

V úzkém teplotním rozsahu dochází vlivem změny anizotropie, fluidity a povrchové tenze ke změně spektrálního indexu lomu tekutého krystalu a ke s tím související změně odrazivosti bílého světla. Po dopadu bílého světla (s plným spektrem barevných složek) na krystal dojde k odrazu jen části spektra (např. modré barvy) a zbylá část spektra je krystalem pohlcena, takže lidské oko, resp. kamera s CCD senzorem zaregistruje modrou barvu indikátoru.

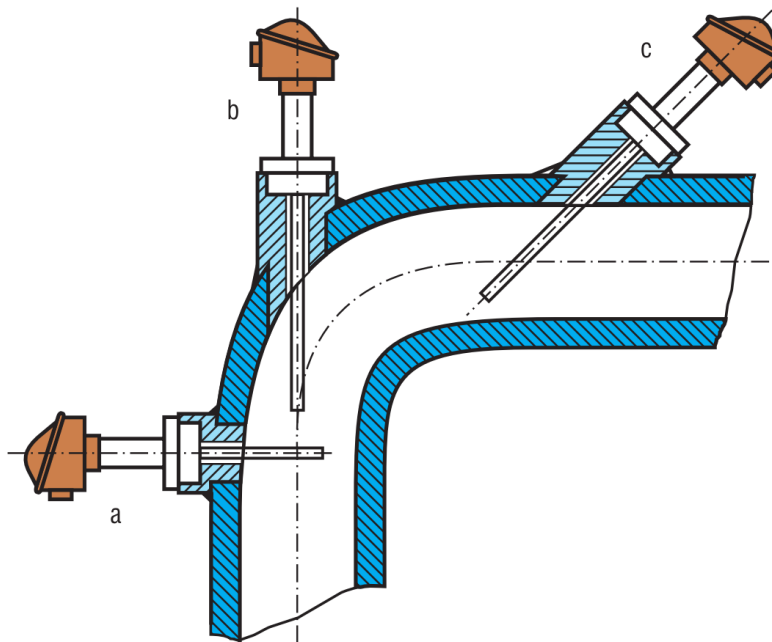
Výrobci teploměrných tekutých krystalů obvykle definují barevnou škálu krystalu od začátku červené do začátku modré. Dosažení jmenovité teploty odpovídá buď začátku barvy červené, nebo barvě středně zelené. Na teploměrné nálepce na obr. 27 se indikovaná teplota zobrazí zeleně, teplota nepatrně nižší modře a teplota nepatrně vyšší odstínem červené.

V praxi se využívají ještě také **luminiscenční indikátory** teploty, založené na principu změny luminiscence při dosažení kritické teploty. To se projevuje změnou barvy či jasu při osvětlení luminoforu ultrafialovým zářením.

### 3 Zabudování dotykových senzorů teploty

#### 3.1 Měření teploty v tekutinách

Pro zajištění správného měření teploty je nutné správné a precizní umístění senzorů teploty. Je třeba především zajistit správný přestup tepla, resp. dokonalý styk citlivé části senzoru s měřeným objektem. Místo měření musí být vhodně zvoleno také z důvodu snadné montáže, demontáže a údržby. Velmi záleží samozřejmě na účelu měření i na měřeném médiu, resp. objektu.



**Obr. 28 – Zabudování senzorů teploty do potrubí, zdroj (Kadlec, 2016a)**

Např. měření teploty plynů nebo proudících kapalin uvnitř potrubí se z důvodu zvýšení přestupu tepla z média na citlivou část (jímku) se senzor umístí do místa s vyšší rychlostí proudění, tj. přibližně do osy potrubí a vždy minimálně částečně proti směru proudění, viz obr. 28. U potrubí větších průměrů se senzor umísťuje téměř kolmo (situace a) na obr. 28), u potrubí o průměrech do 200 mm se senzor umísťuje pod úhlem 45 stupňů (situace c)) a v kolenech zcela proti směru proudění (situace b)). Umístění citlivé části senzoru do jímky jej chrání proti vlivům prostředí, ale zhoršuje zároveň jeho dynamické vlastnosti. Nespornou výhodou použití jímky je ale možnost demontáže senzoru bez porušení potrubí, nádrže atd., resp. bez nutnosti vypouštění systému. U plynů je navíc potřeba zajistit kompenzaci odvodu tepla sáláním, např. pomocí speciálních krytů citlivých částí senzorů. Při měření kapalin v nádržích nebo nádobách je nutné zajistit míchání měřené kapaliny, aby bylo dosaženo rovnoměrného teplotního rozložení.

### 3.2 Měření teploty tuhých těles

Měření teploty tuhého tělesa může být realizováno v jeho struktuře, což vyžaduje vyvrtání otvoru (tím se naruší mechanická struktura tělesa), nebo lze měřit pouze povrchově.

Při měření **uvnitř tělesa** platí obdobná pravidla jako při měření v tekutinách. Nejdůležitější je zajistit co nejlepší přestup tepla z tělesa do citlivé části senzoru, s minimem přestupu do okolí. To lze zajistit správnou šířkou a hloubkou vyvrtaného otvoru v návaznosti na zvolený typ snímače. Lepší variantou je zajištění možnosti měření během návrhu konstrukce, aby bylo možné snímač zabudovat již při montáži. Pro měření teploty tuhých těles jsou nejvhodnější plášťové termočlánky s izolovaným spojením.

Bude-li měření probíhat **na povrchu tuhého tělesa**, tak dotyk citlivé části senzoru způsobí změnu v teplotním přestupu mezi měřeným tělesem a okolím, což v konečném důsledku vede ke změně rozložení teploty uvnitř tělesa. Naměřená teplota se pak liší od skutečné teploty, která by v místě měření byla bez dotyku snímače.

Pro dotykové měření na povrchu tělesa jsou nejvhodnější termočlánky s co nejmenším průřezem a nízkým součinitelem tepelné vodivosti. Měřicí spoj termočlánku je možné připájet na tenkou kovovou destičku (vhodná je např. měď) a tu s povrchem tělesa pevně spojit, např. přišroubováním. Ještě lepším řešením je umístění termočlánku v drážce s následným překrytím destičkou ze stejného materiálu, z jakého je měřené těleso. Podrobnější popis techniky uvedených způsobů měření a s tím souvisejících omezení lze najít např. v (Kreidl, 2005).

## 4 Otázky a úkoly

- 1) Jaké jsou neznámější teplotní stupnice? Jak je definována mezinárodní teplotní stupnice ITS-90?
- 2) Pokuste se sestavit základní přehled senzorů teploty členěný podle fyzikálního principu, s uvedením přibližného rozsahu teplot pro praktické použití.
- 3) Co jsou to deformační tlakoměrné prvky? Uveďte alespoň tři příklady.
- 4) Načrtněte typické průběhy statických charakteristik odporových snímačů teploty.
- 5) Na jakém principu pracují termočlánky? Jak lze zamezit vzniku parazitních termočlánků?

## 5 Použitá literatura

ANALOG DEVICES, Inc., 2022. *CN0271 – Thermocouple Temperature Measurement System with Amplifier - Based Cold Junction Compensation* [online]. Wilmington (USA). [Citováno 15. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/CN0271.pdf>>

Anon. *Metrologie teploty: mezinárodní teplotní stupnice 1990 (ITS-90)* [online]. [Citováno 15. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://docplayer.cz/12042314-Metrologie-teploty-mezinarodni-teplotni-stupnice-1990-its-90.html>>

ARMATURENBAU GmbH., 2016. *Teploměry, ochranné trubičky, příslušenství: přehled typů* [katalog online]. [Citováno 15. 12. 2022]. Wesel–Ginderich. Dostupné z WWW: <<http://armaturenbaum.com>>

DIRECT INDUSTRY, Inc., 2022. *Silicon temperature sensor in TO 92 package* [obrázek online]. Dostupné z WWW: <[http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-g/silicon-temperature-sensor-integrated-circuits-33721-2285923.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/silicon-temperature-sensor-integrated-circuits-33721-2285923.jpg)>

ELECTRICAL TECHNOLOGY, 2022. *What is a Thermistor? Types of Thermistors and Applications* [online]. [citováno 16. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://www.electricaltechnology.org/2021/11/thermistor.html>>

HORELICA, Josef, 2008. *Přístroje pro měření teplot* [bakalářská práce]. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Pedagogická fakulta.

JAKAR ELECTRONICS, spol. s r. o., 2022. *Nevratné teplotní nálepky* [online]. [citováno 16. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://www.jakar.cz/nevratne-teplotni-nalepky>>

KADLEC, Karel, 2016a. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: měření teploty. *Listy cukrovarnické a řepařské*. **132**(7-8), 260-265. ISSN 1805-9708.

KADLEC, Karel, 2016b. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: měření tlaku. *Listy cukrovarnické a řepařské*. **132**(11), 360-365. ISSN 1805-9708.

KREIDL, Marcel, 2005. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN, 240 s. ISBN 978-80-730-0145-4.

LUFINKA, Aleš, 2012. *Snímače pro měření teploty. Experimentální metody – přednášky*. Liberec: TU, Fakulta strojní.

MAIXNER, L. a kol., 2006. *Mechatronika*. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-1299-3.

PROPAGATE PRO, 2022. *Stick On Thermometer Strips, Horizontal or Vertical Temperature Display for Fermenting, Brewing, Wine, Beer, Kombucha or Aquariums: Adhesive Stickers* [online]. [citováno 16. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://propagatepro.com/products/stick-on-thermometer-strips-horizontal-or-vertical-temperature-display-for-fermenting-brewing-wine-beer-kombucha-or-aquariums-adhesive-stickers>>

SOUKENÍK, Marek, 2000. *Přehled teplotních stupnic* [online]. [citováno 16. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<http://www.prevod.cz/popis.php?str=220&parent=y>>

SVOBODA, E. *Teplota (termodynamické a statistické pojetí): tepelná rovnováha, teplota, teplotní stupnice, teplota jako statistická veličina* [online]. [Citováno 15. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://docplayer.cz/9987373-Teplota-termodynamicke-a-statisticke-pojeti.html>>

VACULÍK, Jan, 2013. Plynové teploměry pro průmyslové použití. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **19**(3), 44-45. ISSN 1210-9592.

VŠCHT v Praze. Měření teploty. *Stránky ÚPŘT – Ústavu počítačové a řídicí techniky VŠCHT v Praze* [online]. [citováno 16. 12. 2022]. Dostupné z WWW:

<<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>>

VŠCHT v Praze, 2011. *Tenze par kapalin: laboratorní návod*. Dostupné z WWW:

<<https://docplayer.cz/storage/24/2880897/1669820214/bPMRiNKs2gYMKPAzn-0VrA/2880897.pdf>>

WIKIPEDIE, 2022a. Barevná teplota. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [citováno 15. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Barevn%C3%A1\\_teplota](https://cs.wikipedia.org/wiki/Barevn%C3%A1_teplota)>

WIKIPEDIE, 2022b. Teploměr. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [Citováno 15. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://cs.wikipedia.org/wiki/Teplom%C4%9Br>>

WIKIPEDIE, 2022c. Teplota. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [Citováno 15. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://cs.wikipedia.org/wiki/Teplota>>

ZÁBRANSKÝ, Jaroslav, 2009. *Korekce a kompenzace při měření teplot* [diplomová práce].

Brno: VUT, Fakulta strojního inženýrství. [Citováno 15. 12. 2022]. Dostupné z WWW:

<[https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15547](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15547)>

## Seznam zkratk

A/D	analogově digitální
CCD	charge-coupled device (zařízení s vázanými náboji, snímací technika)
CMOS	complementary meta-oxide-semiconductor
ČSN	Česká státní norma
DISP	displej
EN	Evropská norma
EO	elektronické obvody
ITS	international temperature scale (mezinárodní teplotní stupnice)
NTC	negative temperature coefficient
PN	positive-negative (přechod mezi polovodiči typu P a typu N)
PTC	positive temperature coefficient
VUT	Vysoké učení technické
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická
ZES	zesilovač

## Rejstřík

- A/D převodník, 22, 23
- absolutně černé těleso, 4, 5
- absolutní nula, 2, 3
- bimetal. viz bimetalový element
- bimetalový element, 11
- bod tání/tuhnutí vody, 4
- bod varu, 2
  - vody, 4
- Curieova teplota, 15
- čtyřvodičové zapojení, 13, 16
- deformační tlakoměr, 7
- indikátor teploty, 24
- indikátory teploty
  - barevné, 26
    - s kapalnými krystaly, 26
    - teploměrné akrylové tužky, 26
    - teploměrné barvy, 26
  - keramické žároměrky, 6, 24
  - luminiscenční, 26
  - tavné, 25
    - teploměrné kapaliny, 25
    - teploměrné nálepky, 25, 26
    - teploměrné tablety, 25
    - teploměrné tužky, 25
  - teploměrná (teploměrová) tělíska, 24
- Kelvinova teplotní stupnice. viz termodynamická
- NTC. viz negastor
- PN přechod, 12, 17
- PTC. viz pozistor
- regulace, 1
- senzor, 1, 5, 13, 17, 23, 27
  - bezdotykový, 5, 6
  - dotykový, 5, 6
  - odporový, 12
    - kovový, 12
  - polovodičový, 14
    - monokrystalický, 16
    - negastor, 12, 14
    - pozistor, 12, 14
    - termistor, 14
  - polovodičový s přechodem PN, 17
- speciální
  - akustický, 24
  - krystalový, 23
  - magnetický, 24

- šumový, 24
- termoelektrický, 18
- teploměr, 5, 6, 8, 10, 11, 28
  - bimetalový, 11
  - dilatační, 6
  - plynový, 7, 8
  - tenzní, 10
  - tyčový, 11
- teplota, 1, 5, 24, 29, 30
- teplota varu. viz bod varu
- teplotní stupnice
  - barevná, 4
  - Celsiova, 2, 3, 4
  - Fahrenheitova, 2, 3, 4
  - mezinárodní ITS-90, 4
  - Rankinova, 3, 4
  - Réaumurova, 3, 4
  - termodynamická, 2
- termočlánek. viz termoelektrický
- termodynamická teplota. viz teplota
- termoelektrické napětí, 18
- termoelektrický jev, 18
- tlakoměrný prvek, 7, 8
  - Bourdonova trubice, 7, 8
  - krabice, 7, 8
  - membrána, 7, 8
  - vlnovec, 7, 8, 10
- Wheatstoneův můstek, 16



# Měření neelektrických veličin

## Téma 6: Měření teploty II

### Studijní cíl

Základní principy bezdotykového měření teploty, teplotní senzory infračerveného záření, kvantové senzory infračerveného záření, pyrometry, termovizní technika, senzory s optickými vlákny.

### Doba nutná k nastudování

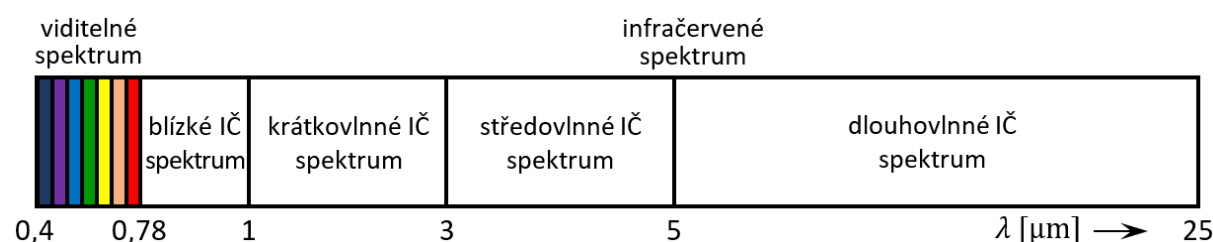
2 hodiny

### Klíčová slova

Spektrum záření, bezdotykové měření, bezdotykový senzor, termočlánek, bolometr, pyroelektrický senzor, kvantový senzor, diodový detektor, pyrometr, termokamera

## 1 Základní principy bezdotykového měření teploty

Základem bezdotykového měření teploty, tzv. pyrometrie, je převod infračerveného záření vyzařovaného objektem na elektrický signál. Bezdotykové senzory teploty nacházely původně uplatnění především při měření vysokých teplot a všude tam, kde není možné měřit teplotu přímým kontaktem citlivé části s měřeným objektem (v metalurgii, v chemickém a sklářském a keramickém průmyslu, v cementárnách a vápenkách). Postupem času se aplikace bezdotykových senzorů posunula směrem k nižším teplotám (i záporným) a oblast použití se tak rozšířila i do jiných odvětví (např. průmysl potravinářský, papírenský, farmaceutický, textilní a gumárenský). Další text kapitoly vychází především z pramenů (Kreidl, 2005), (Kadlec, 2016), (Vojáček, 2014), (VŠCHT, b. r.), (Sova, 2018), (Wikipedie, 2022a) a (Wikipedie, 2022b).



Obr. 1 – Spektrum elektromagnetického záření, zdroj autor

Bezdotykové senzory měří povrchovou teplotu na základě elektromagnetického záření vysílaného tělesem. Citlivá část senzoru přijímá záření o vlnové délce  $\lambda$  od 0,4 do 25  $\mu\text{m}$ , čemuž

odpovídají teploty v rozsahu od  $-40$  do  $10\,000$  °C, viz obr. 1. Oblast od  $0,4$  do  $0,78$   $\mu\text{m}$  odpovídá viditelnému spektru, od  $0,78$  do  $1$   $\mu\text{m}$  blízkému (NIR – Nearest InfraRed), od  $1$  do  $3$   $\mu\text{m}$  krátkovlnnému (SWIR – Short Wavelength IR), od  $3$  do  $5$   $\mu\text{m}$  středovlnnému (MWIR – Medium WIR) a od  $5$  do  $25$   $\mu\text{m}$  dlouhovlnnému (LWIR – Long WIR) infračervenému spektru.

Mezi výhody bezdotykového měření teploty patří především bezpečné měření i vysokých teplot, rychlost měření umožňující i měření rychlých změn teploty, zanedbatelný vliv senzoru na měřený objekt (včetně vyloučení rizika kontaminace), možnost měření teploty pohybujících se (i rotujících) objektů a v neposlední řadě možnost snímání celých povrchů měřených objektů.

Bezdotykový způsob měření přináší ale i několik nevýhod. Patří mezi ně základní předpoklad, že měřený objekt musí být pro senzor viditelný, přičemž optika senzoru musí být dobře chráněna proti nečistotám a měření teploty je navíc omezené jen na povrch objektu. Při bezdotykovém měření vznikají chyby vyplývající z nejistoty stanovení emisivity měřeného objektu, dále chyby způsobené propustností prostředí a zářením odraženým z okolí.

Bezdotykové senzory teploty se obvykle označují jako pyrometry a je možné je dále rozdělit do několika kategorií:

- širokopásmové (úhlné) – měří v širokém rozsahu vyzařovaného tepelného záření, nejčastěji se pro citlivé části senzorů využívají termočlánky, bolometry, pyroelektrické prvky nebo termistory;
- úzkopásmové (monochromatické) – pracují v poměrně úzkém rozmezí vlnových délek určeném účelem použití, pro citlivé části senzorů se používají kvantová čidla infračerveného záření (používají se fotočlánky, fotodiody, fototranzistory a fotoodpory);
- poměrové (dvoupásmové) – pracují na základě poměru tepelného záření o dvou vlnových délkách;
- s optickými vlákny – pracují na základě změny některé z vlastností světla emitovaného optickým vláknem (např. amplituda, fáze, vlnová délka).

Bezdotykové senzory teploty lze dle použité technologie rozdělit na:

- tepelné
  - termoelektrické;
  - bolometrické;
  - pyroelektrické;
- kvantové
  - PIN diody;
  - QWIP detektory.

## 1.1 Teoretické základy

Bezdotykové měření teploty vychází z vyhodnocování elektromagnetického záření měřeného tělesa. Schopnost tělesa vyzařovat elektromagnetické záření zároveň úzce souvisí s jeho schopností záření pohlcovat. Při konstantní teplotě, je-li v termodynamické rovnováze s okolím, pohlcuje těleso stejné množství energie jaké vysílá do svého okolí.

Absolutně (dokonale) černé těleso je teoretické těleso, které maximálně pohlcuje veškeré záření a zároveň maximálně vyzařuje. Intenzita vyzařování je integrálního charakteru a lze ji vyjádřit součtem příspěvků záření o jednotlivých vlnových délkách dle **Stefan-Boltzmannova zákona**

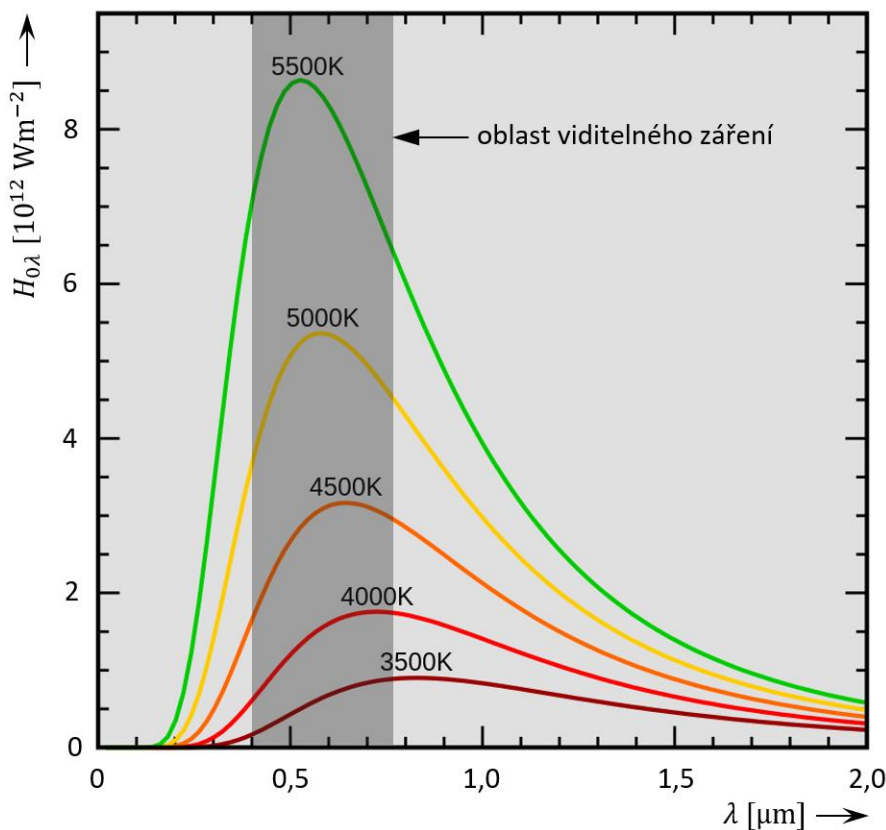
$$H_0 = \int_0^{\infty} H_{0\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (1)$$

Intenzita vyzařování absolutně černého tělesa  $H_0$  je závislá pouze na absolutní teplotě, resp. její čtvrté mocnině, přičemž  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  je Stefan-Boltzmannova konstanta. Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování  $H_{0\lambda}$  na vlnové délce  $\lambda$  a teplotě je pak dána

**Planckovým vyzařovacím zákonem**

$$H_{0\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda T}} \right)} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2)$$

přičemž  $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  je Planckova a  $k = 1,3805 \cdot 10^{-26} \text{ JK}^{-1}$  je Boltzmannova konstanta,  $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$  je rychlost světla ve vakuu. Po úpravě jsou pak hodnoty konstant  $c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$  a  $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ Km}$  (tzv. první a druhé vyzařovací konstanty). Zmiňovaná závislost je vyjádřena graficky na obr. 2, resp. v logaritmických souřadnicích a pro širší rozsah teplot na obr. 3. Maxima křivek se posouvají se vzrůstající teplotou podle **Wienova posunovacího zákona** směrem ke kratším vlnovým délkám.



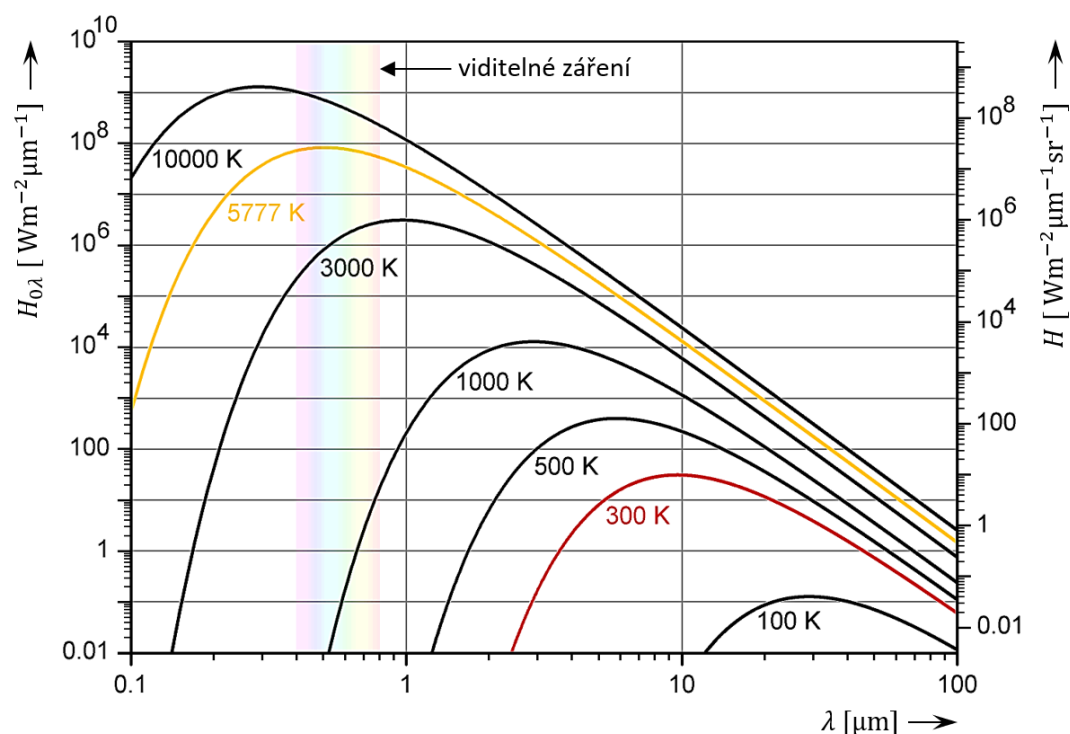
Obr. 2 – Závislost spektrální hustoty vyzařování na vlnové délce, autor dle (Wikipedie, 2022a)

Reálné těleso ale vyzařuje i pohlcuje méně než těleso absolutně černé a jeho spektrální hustota intenzity vyzařování je pak určena podle vztahu

$$H_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} H_{0\lambda} \quad (3)$$

ve kterém  $\varepsilon_{\lambda}$  představuje tzv. **emisivitu** a platí, že  $\varepsilon_{\lambda} < 1$ . Emisivita je obecně závislá na vlnové délce a na teplotě a samozřejmě také na materiálu měřeného objektu, kvalitě povrchu a pozorovacím úhlu.

Emisivita je definována jako poměr energie vyzařované tělesem ku energii absolutně černého tělesa při konstantní teplotě. Absolutně černé těleso má tedy  $\varepsilon_{\lambda} = 1,0$ ; emisivita pro vybrané povrchy je uvedena v tab. 1. Velikost hodnoty emisivity je závislá na typu materiálu, úpravě jeho povrchu a případné oxidaci povrchu.



**Obr. 3 – Logaritmičká závislost spektrální hustoty vyzařování na vlnové délce, upraveno dle (Wikipedie, 2022b)**

Povrchy reálných těles se samozřejmě nechovají jako absolutně černá tělesa, která pohlcují celý světelný tok  $\Phi_i$  dopadajícího záření a současně vyzařují maximální možné množství energie. Skutečná tělesa totiž absorbují jen část toku  $\Phi_i$ , určitou část odrážejí, příp. část propouštějí, viz obr. 4.

Platí tedy, že

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

Tělesem absorbovaná  $\Phi_a$ , odražená  $\Phi_r$  a propuštěná  $\Phi_t$  část toku záření je závislá nejen na vlnové délce, směru dopadu a teplotě, ale i na dalších vlastnostech povrchu tělesa. V některých případech mohou být určité složky toku  $\Phi_i$  nulové. Např. u zcela nepropustných

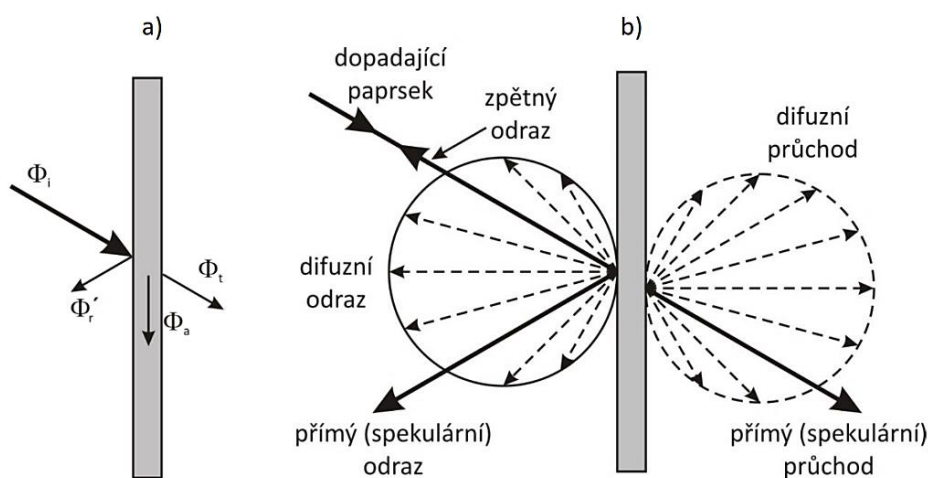
látek bude  $\Phi_t = 0$  a pro dokonalá zrcadla bude navíc také  $\Phi_a = 0$ . Obecně vyjadřují jednotlivé složky toku  $\Phi_i$  míru charakteristických vlastností – odrazivosti  $\rho$ , pohltivosti (absorptivity)  $\alpha$  a propustnosti  $\tau$ , přičemž platí

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

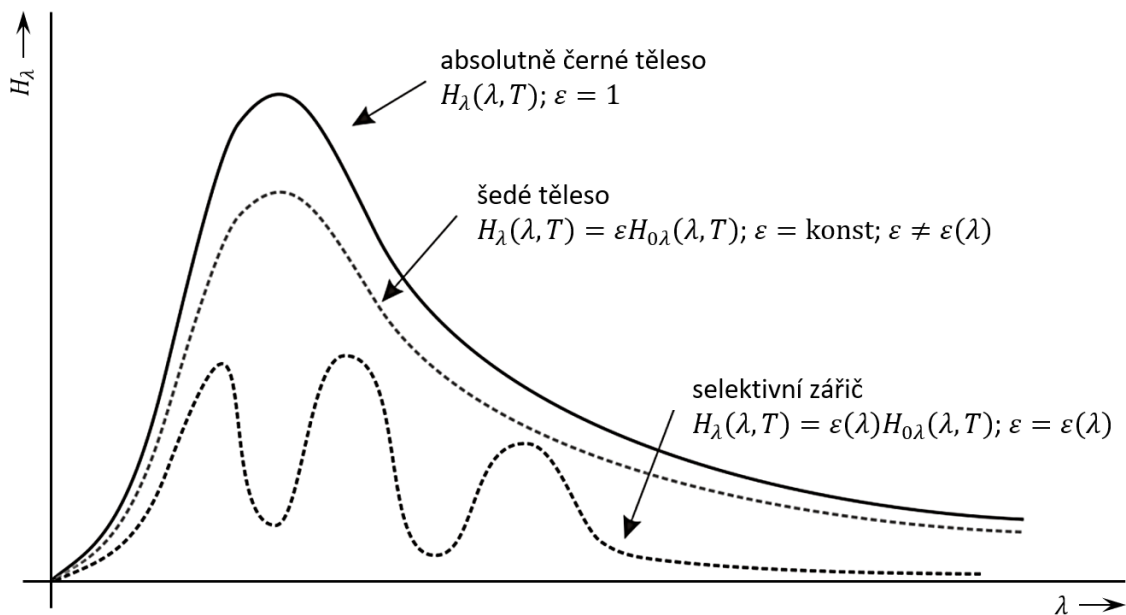
Tab. 1 – Emisivita vybraných povrchů

Povrch	$\epsilon_\lambda [-]$
absolutně černé těleso	1,00
černý matný lak	0,96 až 0,99
lidská pokožka	0,98
voda	0,95
cihly	0,85
hoblované dřevo	0,80 až 0,90
zoxidovaný ocelový plech	0,75
zoxidovaný hliník	0,55
lesklý ocelový plech	0,25
lesklý měděný plech	0,03

U absolutně černého tělesa platí podle Kirchhoffova zákona rovnost mezi pohltivostí a emisivitou, tj.  $\epsilon = \alpha$ . Jinými slovy je veškeré záření tělesem pohlcováno a zároveň vyzařováno (emitováno). Emisivitu lze tedy chápat jako vyjádření efektivity vyzařování. Nejvyšší emisivitu má absolutně černé těleso, nižší emisivitu má tzv. **šedé těleso**. V obou případech ale uvažujeme emisivitu za konstantní, tj. nezávislou na vlnové délce, viz obr. 5. Emisivita je ale ve skutečnosti vždy na vlnové délce závislá, takže všechny reálné objekty označujeme obecně jako **barevná tělesa**.

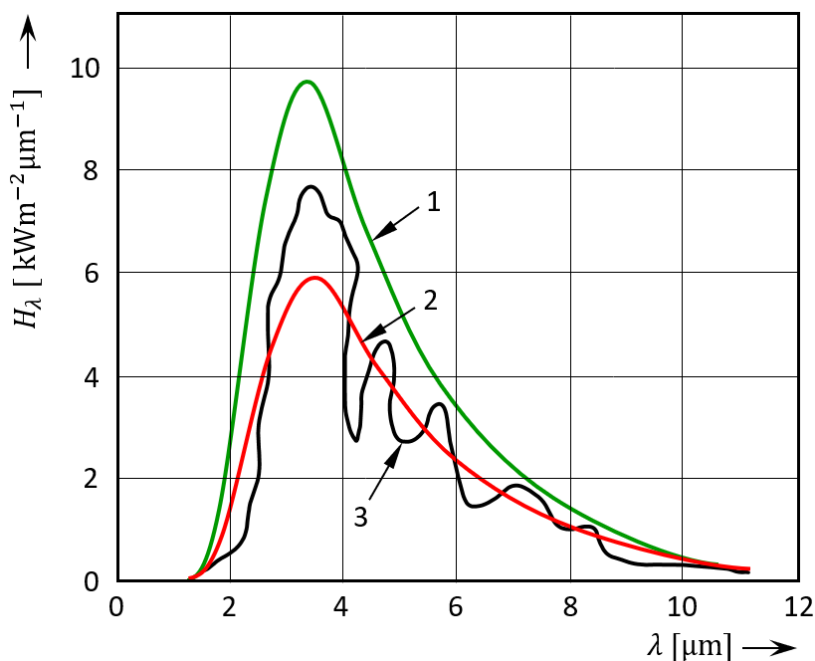


Obr. 4 – Schéma: a) světelných toků, b) zjednodušeného modelu odrazu paprsku od materiálu a průchodu paprsku materiálem, zdroj (Tesař, 2014)

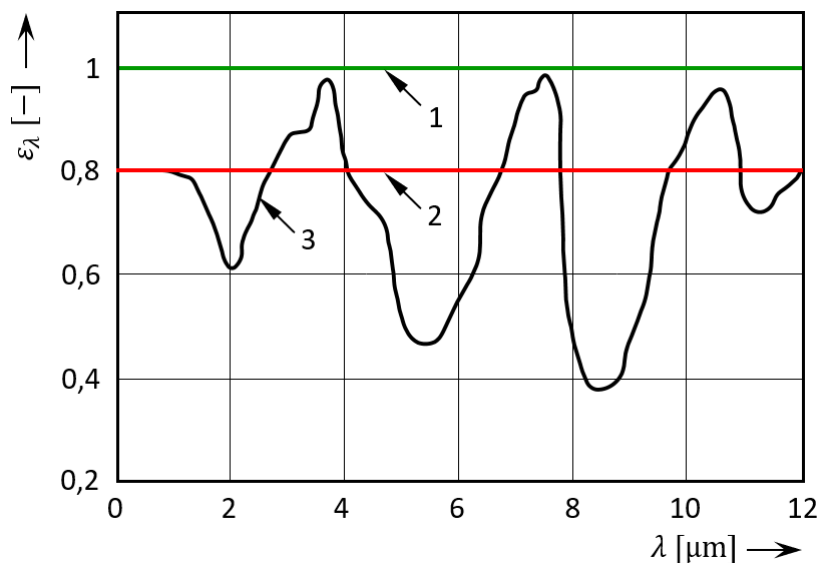


Obr. 5 – Průběh spektrálního vyzařování absolutně černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče při stejné teplotě, upraveno dle (Tesař, 2014)

Průběh intenzity záření reálného, tj. barevného tělesa, lze zjednodušeně aproximovat odpovídajícím průběhem intenzity záření šedého tělesa, viz obr. 6 a obr. 7. Mimo uvedené pojmy se můžeme setkat u reálného tělesa ještě s označením **selektivní zářič**. Průběh vyzařování takového tělesa, v případě, kdy je emisivita jeho povrchu závislá na vlnové délce záření, je na obr. 5.



Obr. 6 – Příklad charakteristického vyzařování základních druhů zářičů (1 – černé těleso, 2 – šedé těleso, 3 – barevné těleso), zdroj autor



Obr. 7 – Příklad průběhu emisivity základních druhů zářičů (1 – černé těleso, 2 – šedé těleso, 3 – barevné těleso), zdroj autor

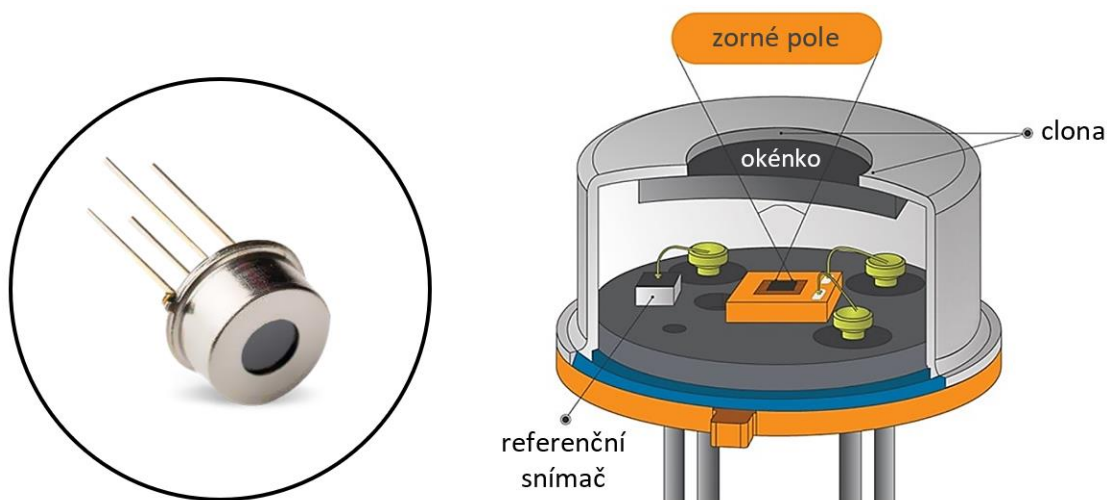
## 2 Bezdotykové senzory

### 2.1 Teplotní senzory infračerveného záření

Princip této skupiny tzv. neselektivních tepelných senzorů je založen na absorpci tepelného záření měřeného tělesa v širokém spektru vlnových délek. K tomu slouží speciální absorpční materiál – tzv. černý absorbér, který pohlcuje infračervené záření.

#### 2.1.1 Infračervené termočlánky

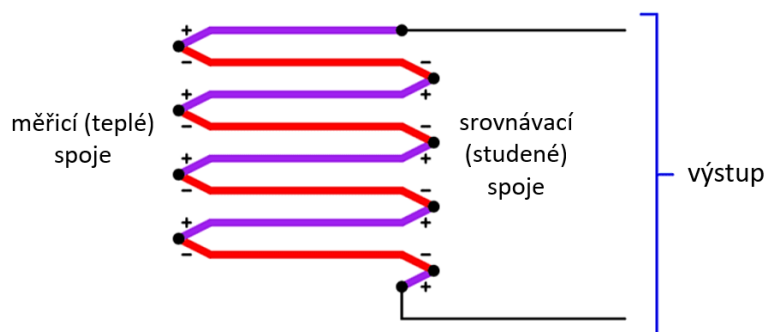
Základem těchto senzorů označovaných jako **thermopile** je skupina (baterie) termočlánků s aktivními konci soustředěnými do jednoho místa a pokrytými černým absorbérem.



Obr. 8 – Praktická realizace senzoru s baterií infračervených termočlánků, zdroj autor, upraveno dle (Theinstrumentguru, 2022)

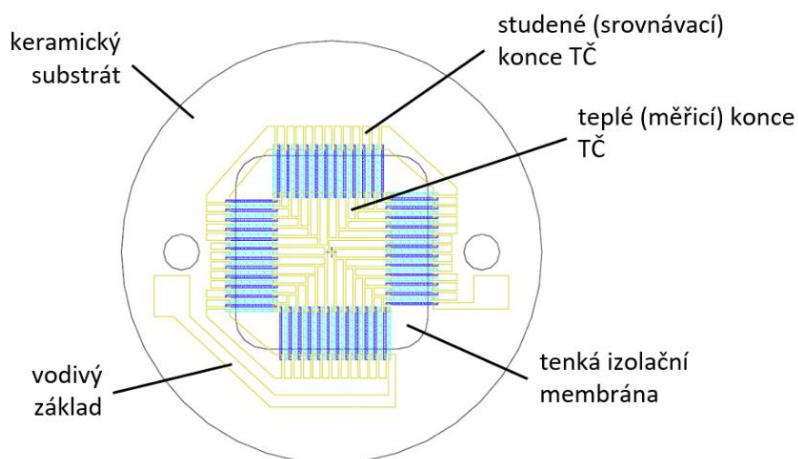
Záření prochází otvorem v pouzdru součástky (např. v provedení TO39), který vymezuje snímanou oblast a slouží zároveň jako optický filtr, viz obr. 8. Dopadající záření je převáděno na teplo, které je měřeno pomocí termočlánků a na výstupu senzoru je pak přímo napětí.

Princip funkce citlivé části senzoru je založen na sériovém spojení skupiny termočlánků, viz obr. 9, označovaných jako thermopile. Na jedné straně jsou měřicí (teplé) spoje a na druhé straně pak srovnávací (studené) spoje termočlánků. V praktickém provedení (obr. 10) se obvykle použijí čtyři skupiny termočlánků typu E. Termočlánky jsou vytvořeny buď z cca 0,03 mm tenkých kovových pásků, nebo častěji tenkovrstvou technologií, resp. jako výbrus z monolitického křemíku.



**Obr. 9 – Sériové spojení termočlánků (thermopile), upraveno dle (Theinstrumentguru, 2022)**

Typický měřicí rozsah těchto senzorů je od  $-100$  do  $+500$  °C, ale může se lišit s ohledem na typ použitých termočlánků. Hlavní výhodou je jednoduché a levné provedení senzorů a standardní napěťový výstup.



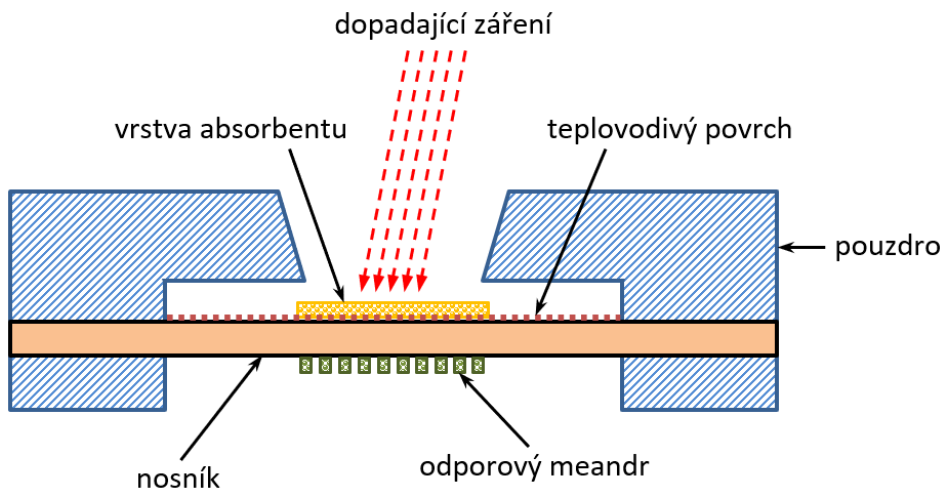
**Obr. 10 – Reálné provedení citlivé části thermopile senzoru, upraveno dle (Theinstrumentguru, 2022)**

### 2.1.2 Bolometry a mikrobolometry

Základním principem bolometru (z řeckého bole – paprsek) je změna elektrického odporu v závislosti na teplotě. Bolometry jsou určeny pro náročné měření teploty v případech, kdy

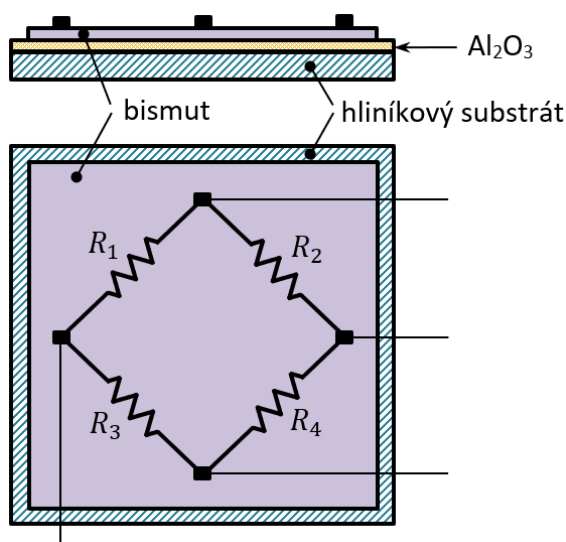


nelze použít infratermočláanky nebo pyroelektrické senzory. Mikrobolometry se používají především v přístrojích pro snímání infračerveného obrazu.



Obr. 11 – Schéma provedení bolometru, zdroj autor dle (Vojáček, 2005)

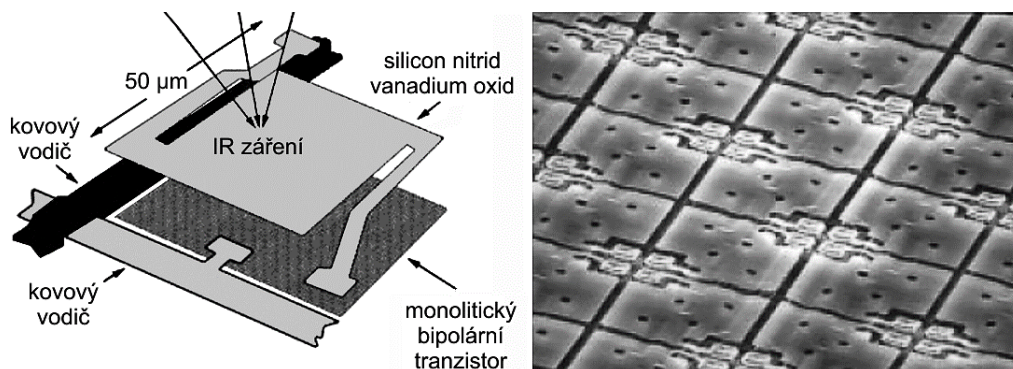
Princip jednoduchého bolometrického snímače infračerveného záření je na obr. 11. Absorpční vrstva senzoru pohlcuje až 95 % dopadajícího infračerveného záření, které ohřívá teplovodivý povrch i nosník na jehož spodní straně je napařený odporový meandr. Odpor meandru se mění lineárně s rostoucí teplotou. Základem **integrovaných bolometrů** je hliníkový substrát odizolovaný oxidem hliníku  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Na něm je v případě tzv. **termistorových bolometrů** na teplovodivé podložce z bismutu napařen odporový meandr (oxidy  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ), viz obr. 12, nebo u **vrstvených bolometrů** je použito chalkogenidové sklo. Používají se 4 elementy spojené do Wheatstoneova můstku, z nichž některé jsou zastíněny proti záření a používají se jako kompenzační, resp. referenční.



Obr. 12 – Integrovaný bolometrický můstek, zdroj autor dle (Vojáček, 2005)

Mikrobolometry, resp. mikrobolometrová pole, jsou tvořeny dvourozměrným polem (maticí) miniaturizovaných bolometrických detektorů (obr. 13). Detektory jsou citlivé na infračervené

záření, nejčastěji v pásmu vlnových délek od 7 do 14  $\mu\text{m}$ . Na obr. 13 vlevo je schéma jednoho mikrobolometru a vpravo je pak snímek rozmístění mikrobolometrů v poli (tzv. Focal Plane Array – FPA) pořízený elektronovým mikroskopem.



Obr. 13 – Mikrobolometr a mikrobolometrické pole, zdroj (Sova, 2018)

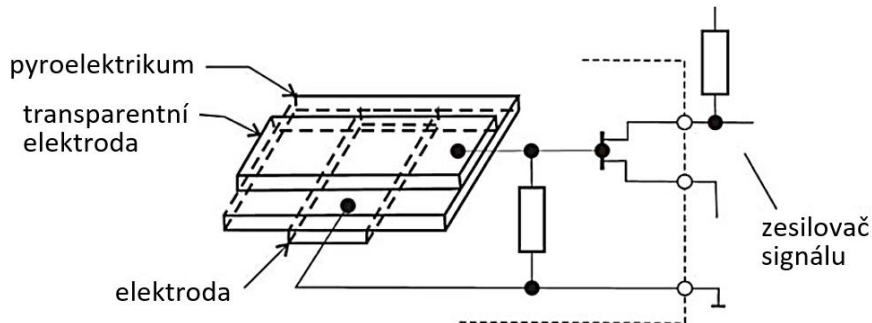
Mikrobolometrická pole jsou vyráběna na bázi monolitických křemíkových substrátů, podobně jako standardní integrované obvody. Ploška mikrobolometru o velikosti řádově v nižších desítkách  $\mu\text{m}$  a šířce v desetinách  $\mu\text{m}$  bývá vyrobena z oxidu vanadičitého nebo nitridu křemíku. Z důvodu tepelné izolace od substrátu je vyvýšena o cca 2,5  $\mu\text{m}$  pomocí ohnutých kontaktů. Vzájemné propojení jednotlivých mikrobolometrů je realizováno pomocí dvou navzájem kolmých kovových vodičů. Pod každou z plošek je z důvodu možnosti adresace zároveň implementován monolitický bipolární spínací tranzistor. Lze tedy adresovat jednotlivé mikrobolometry a z každého tak číst změnu teploty, resp. jí odpovídající napětí. Řídicí elektronika je u těchto sensorů obdobná jako u CCD obrazových snímačů nebo u paměti DRAM, u nichž se provádí adresace a čtení jednotlivých segmentů po řádcích. Navíc jsou obvykle na chipu integrovány další pomocné obvody pro analogové, resp. digitální zpracování signálů.

Pod výše zmiňovanou ploškou může být z důvodu snahy o dosažení vyšší účinnosti ještě nanесena reflexní vrstva. U některých typů sensorů mohou být mikrobolometry umístěny na Peltierově elementu, pomocí něhož lze zajistit udržování teploty na konstantní hodnotě s přesností až  $\pm 0,1$   $^{\circ}\text{C}$ . Výhodou bolometrů jsou především jejich malé rozměry, rychlá odezva a velká citlivost. Jsou ale velmi drahé a u některých typů je navíc vyžadováno chlazení. Pracovní rozsah bolometrických sensorů je poměrně široký, typicky od  $-200$  do  $+1000$   $^{\circ}\text{C}$ , některé snímače ale umožňují i měření teplot přes 1500  $^{\circ}\text{C}$ .

### 2.1.3 Pyroelektrické senzory

Princip funkce tohoto typu senzoru je založen na **pyroelektrickém jevu**, který představuje schopnost některých krystalů generovat při změně teploty elektrický náboj. Jedná se o obdobu piezoelektrického jevu, při kterém vzniká na povrchu deformovaného krystalu elektrický náboj. U vhodných typů látek vzniká mezi studenější a teplejší částí krystalu vlivem deformace krystalové mřížky elektrický náboj. Vznik pyroelektrického jevu je možný jen u některých piezoelektrických materiálů (např. PZT keramika,  $\text{LiTaO}_3$ ), protože je k tomu nutná výraznější asymetrie krystalu.

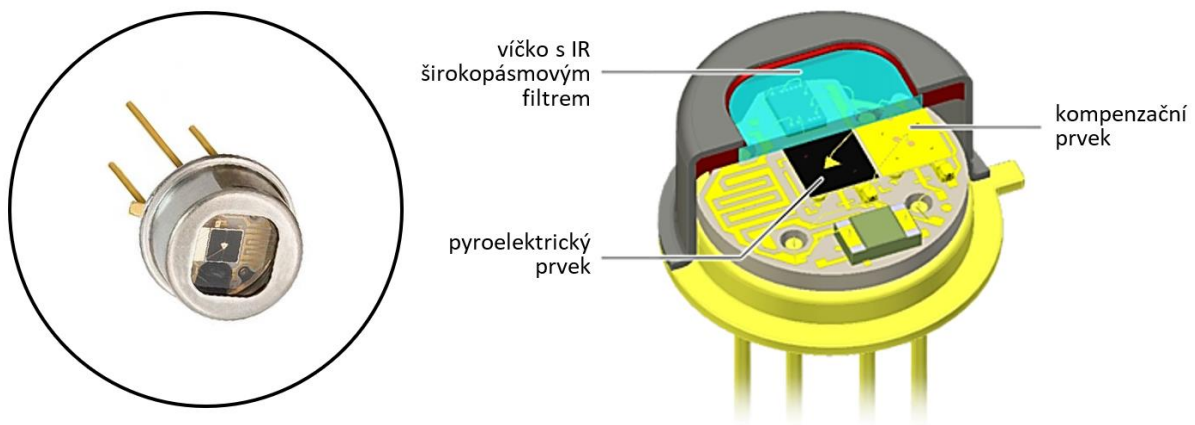
Snímač se skládá ze dvou elektrod, mezi nimiž je pyroelektrikum, strukturou se podobá deskovému kondenzátoru, viz obr. 15. Jedna z elektrod musí být transparentní. Dojde-li ke změně teploty, změní se zároveň polarizace pyroelektrika a na elektrodách se indukuje elektrický náboj. Změna je poté vyhodnocena následnými elektronickými obvody.



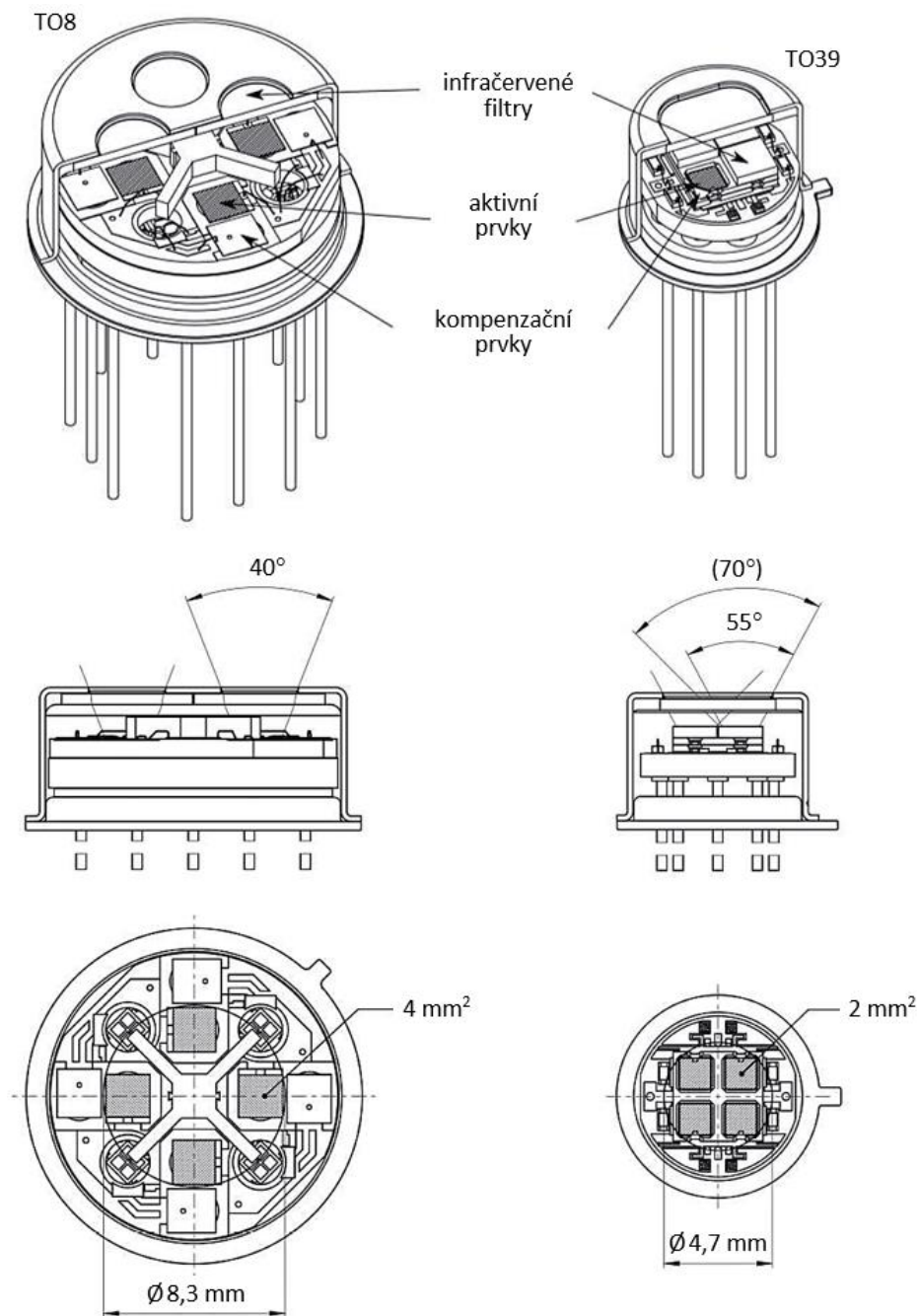
Obr. 14 – Schéma uspořádání pyroelektrického senzoru, zdroj (VŠCHT, b. r.)

Na obr. 15 je uvedeno reálné provedení jednobanového pyroelektrického senzoru v pouzdru TO39 se čtyřmi vývody. Horní část pouzdra je osazena okénkem se širokopásmovým infračerveným filtrem. Vedle pyroelektrického prvku, který je pokryt černým absorbérem, je doplněn ještě prvek kompenzační potažený vrstvou zlata. V některých aplikacích je totiž nutné kompenzovat teplotu krytu, který může být zahříván parazitním zdrojem tepla. Kompenzační prvky jsou v principu shodné s aktivními prvky, ale jsou opticky neaktivní.

Na trhu je k dispozici celá řada různých provedení. Senzory jsou charakterizovány provedením a velikostí zorného pole (běžně se v katalogích uvádí jako FOV – Field Of View). Např. na obr. 16 je schéma provedení dvou čtyřkanalových senzorů od firmy InfraTec se čtyřmi kompenzačními prvky v různých pouzdrích s různou velikostí pyroelektrických prvků (4 resp. 2 mm<sup>2</sup>). Konkrétně jde o provedení ve 12vývodovém pouzdru TO8 s FOV každého prvku o velikosti 40° a ve 4vývodovém pouzdru TO39 s FOV 55° případně až 70° dle vzdálenosti od měřeného objektu. Další různá provedení senzorů, jedno- i vícekanalových, s filtry odpovídajícími různým vlnovým délkám infračerveného záření (různé teplotní rozsahy) jsou na obr. 17.



Obr. 15 – Praktická realizace jednobanového pyroelektrického senzoru, zdroj autor, upraveno dle (Günther, 2017)



Obr. 16 – Praktické provedení čtyřkanálových senzorů v pouzdech TO8 a TO39, upraveno dle (Günther, 2017)

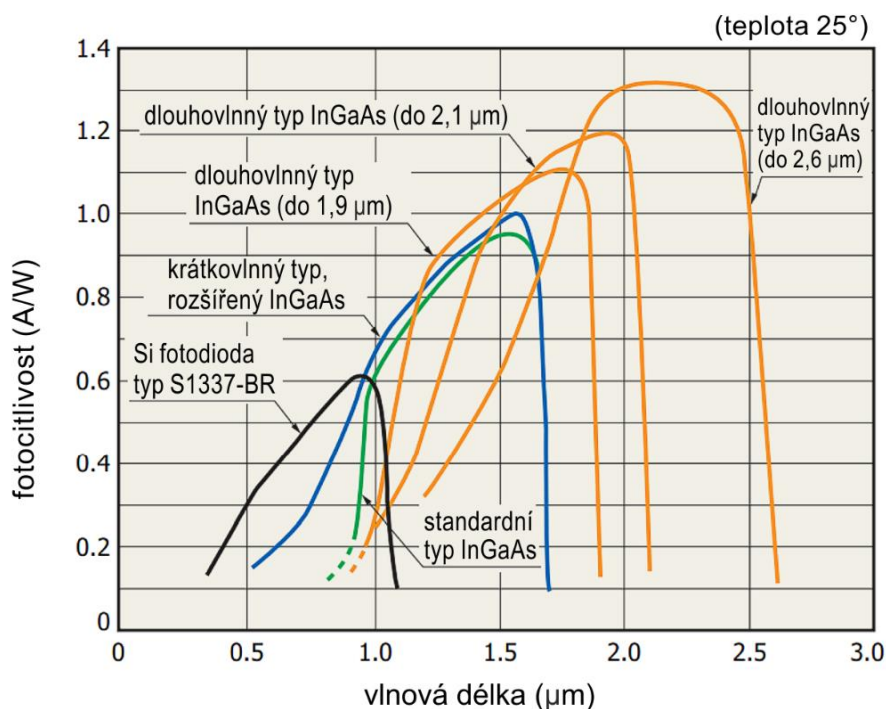


Obr. 17 – Různá provedení pyroelektrických senzorů, zdroj (Infratec, 2022)

## 2.2 Kvantové senzory infračerveného záření

Kvantové senzory se řadí mezi úzkopásmové bezdotykové senzory teploty a pracují na principu tzv. vnitřního fotoelektrického jevu. Vlivem dopadajícího záření se uvnitř polovodiče začnou uvolňovat elektrony – jsou excitovány z pásu valenčního do vodivostního a tím dojde ke zvýšení vodivosti polovodiče. Senzory tedy nejsou založeny na přeměně infračerveného záření na teplo, ale při působení záření poskytují přímo odpovídající elektrický signál. K tomu účelu se používají fotočlánky, fotodiody, fototranzistory nebo fotoodpory. Jedná se o tzv. selektivní (fotonové) detektory, které můžeme dělit podle typu použitého polovodiče na **intrinsické** a **extrinsické**, nebo dle typu, resp. režimu použití součástky na **fotovodivostní** (fotokonduktivní) a **fotovoltaičné**.

Určité omezení u těchto sensorů představuje fakt, že při běžných teplotách je užitečný výstupní signál zastíněn tzv. šumem detektoru. Ten je způsoben absorpcí fotonů při určitých vlnových délkách a vytvářením volných párů elektronů, které jsou pak detekovány jako elektrický proud. Protože je zmiňovaný šum úměrný teplotě, pracují kvantové detektory nejlépe při kryogenních teplotách. Z důvodu potřeby zajištění dostatečného odstupu signál-šum, je tedy vhodné senzory chladit s využitím kapalného dusíku (teploty až 77 K) nebo kapalného hélia (až 4 K). Potřeba chlazení je značnou nevýhodou, ale senzory jsou velmi přesné a citlivé (lze jimi detekovat i teplotní rozdíly menší než 0,01 °C).



Obr. 18 – Spektra různých variant InGaAs fotodiód, zdroj (Sova, 2018)

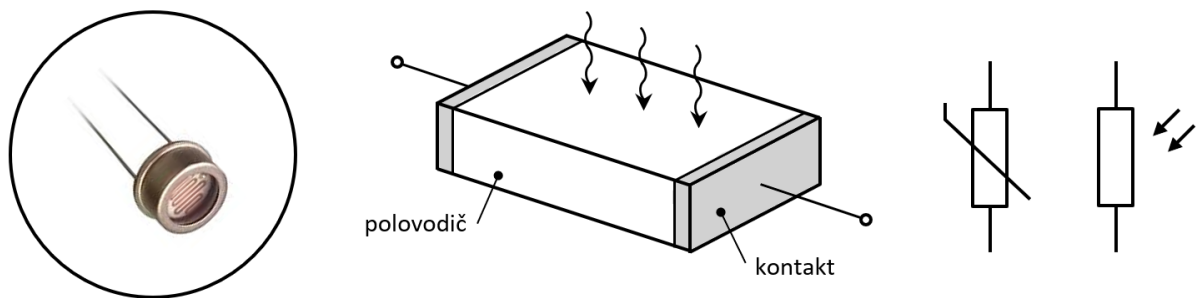
Citlivá část senzoru (detektor) se vyrábí z celé řady různých typů polovodičových materiálů, velmi často se také používá přechodu kov – polovodič. Nejčastěji se používá křemík Si, omezeně germanium Ge, a dále tellur Te, sulfid olovnatý PbS, antimonid inditý InSb, selenid olovnatý PbSe, arsenid galitý GaAs, arsenid galia-india InGaAs, telurid rtuti-kadmia CdHgTe a

telurid cínu-olova PbSnTe. Detektory se dále dělí na dle toho, jaký typ polovodiče obsahují, na intrinsické a extrinsické.

Senzory se používají k měření infračerveného záření o krátkých vlnových délkách (jednotky  $\mu\text{m}$ ), jemuž odpovídají teploty v řádech tisíců  $^{\circ}\text{C}$ . Pásmo citlivosti je závislé na použitém typu detektoru, viz průběhy spekter běžné fotodiody InGaAs na obr. 18, a je poměrně úzké.

### 2.2.1 Intrinsické detektory

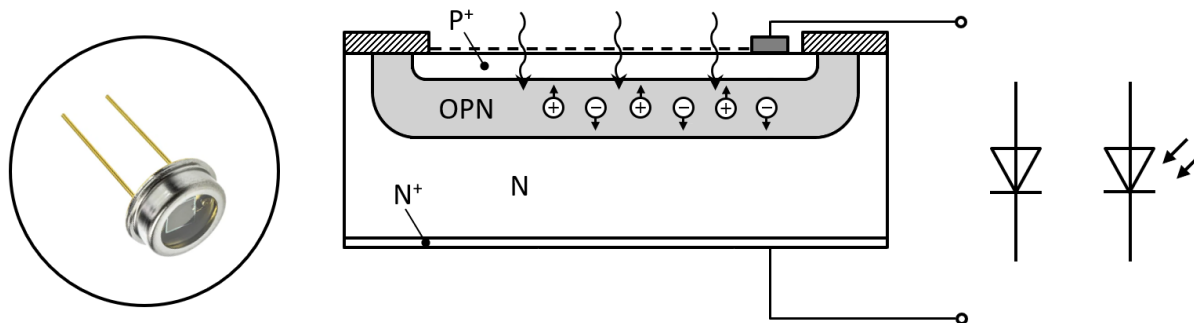
Tyto detektory (obr. 19) jsou vyráběny z čistého (vlastního) polovodiče a nejčastěji se jedná o fotorezistory. Při dopadu fotonů na polovodičovou vrstvu dochází ke změně pohyblivosti nosičů nábojů, resp. přesněji k jejich přímé excitaci (rychlému přechodu na vyšší energetickou hladinu), která se projeví zvýšením střední kvadratické rychlosti částic. Detektor pracuje v tzv. fotovodivostním (fotokonduktivním) módu, kdy vodivost je funkcí fotonového toku. Pro funkci detektoru je nutné vnější elektrické pole, které způsobí přenos nosičů náboje a následný průtok elektrického proudu.



Obr. 19 – Základní princip, značka a reálné provedení fotorezistoru, zdroj autor dle (Kreidl, 2005)

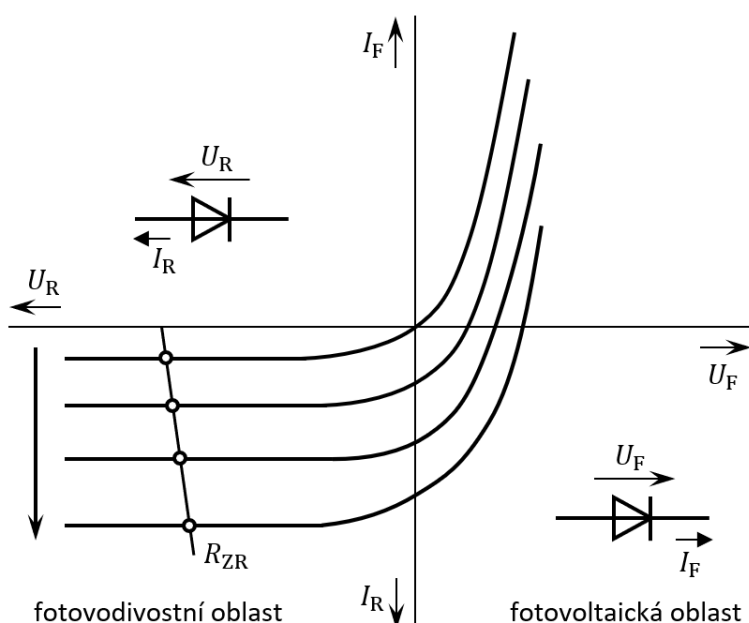
### 2.2.2 Extrinsické detektory

Struktura extrinsických detektorů je založena na nevlastních (příměsových) polovodičích PN, viz obr. 20. Oblast označovaná jako oblast prostorového náboje OPN je elektrickou dvojrůstvou nábojů a je výsledkem difúze na přechodu PN. Je-li absorbováno záření, v OPN nastane rozdělení párů elektron-díra, přičemž elektrony difundují do oblasti N a díry do oblasti P. Pracovní režim fotodiody lze rozdělit na dva primární módy, viz voltampérová charakteristika obr. 21. Při fotovodivostním režimu se dioda chová jako prvek, u něhož s rostoucí intenzitou ozáření roste vodivost, resp. klesá elektrický odpor, tj. jako proměnný rezistor. Polarizace fotodiody do závěrného směru nastává tehdy, je-li připojena ke zdroji napětí v sérii s rezistorem (tzv. fotovodivý režim s obráceným předpětím). Anoda je spojena se záporným pólem zdroje, zatímco katoda přes odpor s kladným pólem. Při fotovoltaičském režimu je naopak dioda polarizována v propustném směru.



Obr. 20 – Struktura, značka a reálné provedení fotodiodového detektoru, zdroj autor dle (Kreidl, 2005)

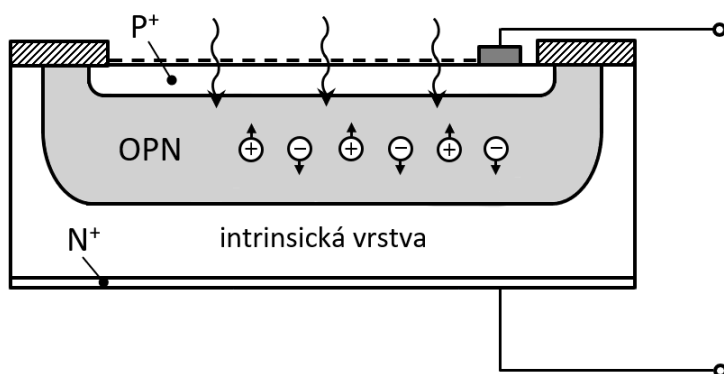
Voltampérová charakteristika fotodiody (obr. 21) má bez ozáření stejný průběh jako u obyčejné polovodičové diody. Jakmile ale dojde k nárůstu intenzity ozáření, dojde k jejímu posunutí a fotodioda se začne chovat jako světlocitlivý rezistor (fotovodivostní, resp. odporový režim, 3. kvadrant) nebo jako zdroj elektrické energie (fotovoltaický, resp. hradlový režim, 4. kvadrant).



Obr. 21 – Voltampérová charakteristika fotodiodového detektoru, zdroj autor dle (Kreidl, 2005)

Detektory pracující ve fotovoltickém režimu mají většinou nižší citlivost a menší odstup signálu od šumu než detektory pracující v režimu fotovodivostním. Reagují ale rychleji na náhlé změny intenzity ozáření a nejsou u nich takové požadavky na chlazení (viz výše).

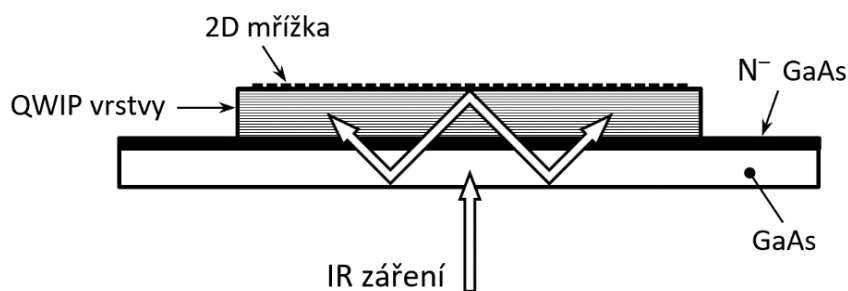
Při závěrné polarizaci PN přechodu diody má výsledné elektrické pole vyšší intenzitu, důsledkem čehož se volné elektrony rychleji pohybují směrem ke katodě a díry se rychleji pohybují směrem k anodě. Důvodem je především konstrukčně širší oblast PN přechodu než u běžných usměrňovacích diod. To vede v konečném důsledku k horšímu usměrňovacímu efektu diody, ale zároveň k jejímu rychlejšímu provozu. Za tímto účelem byly zkonstruovány speciální **PIN diody**, které disponují intrinsickou (téměř bezpříměsovou) oblastí (obr. 22), což ještě více umocňuje výše uvedený fakt. Jedná se tedy o velmi rychlé diody vhodné pro použití ve fotodetektorech.



Obr. 22 – Základní struktura PIN diody, zdroj autor dle (Kreidl, 2005)

### 2.2.3 QWIP detektory

Detektory označované QWIP (Quantum Well Infrared Photodetector) pracují v dlouhovlnném infračerveném pásmu (LWIR, viz kapitola 1). Jejich základem je substrát z arsenidu galitého GaAs na němž je velké množství (typicky více než 100) velmi tenkých vrstev arsenidu galia-hliníku AlGaAs (cca 5 nm) a GaAs (cca 50 nm). Vrstvy mají tzv. atomární šířku (udávanou v jednotkách Ångströmů, přičemž  $10 \text{ \AA} = 1 \text{ nm}$ ). Vyšší počet vrstev zvyšuje kvantovou detekční účinnost QWIP detektoru. Vlivem střídání atomárních vrstev GaAs a AlGaAs dochází ke vzniku tzv. studny či jámy (well) a interakce fotonů a s tím související excitace nosičů náboje se uskutečňuje mezi vodivostními pásy jednotlivých vrstev, což má vliv na spektrální citlivost detektoru. Na plošné mřížce se po průchodu tenkou vrstvou tok fotonů odrazí a dojde k jeho rozptýlení do všech směrů, viz obr. 23, neboť je nutné zajistit odlišný směr záření vůči normále k vrstvám. V jednotlivých vrstvách pak dochází k částečnému pohlcení a odražení světelného toku.

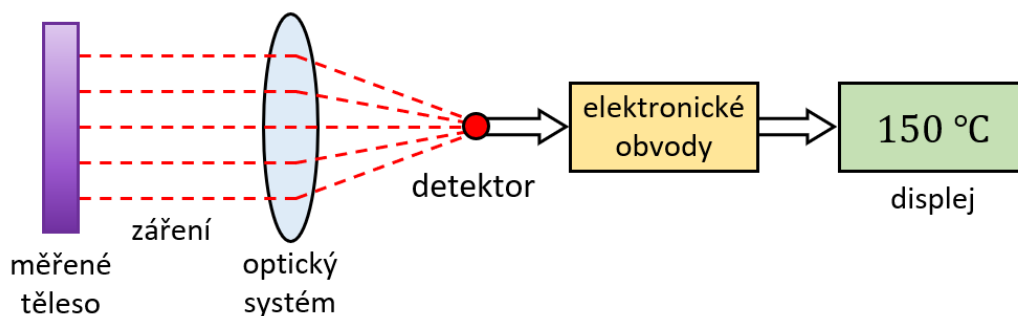


Obr. 23 – Struktura elementu QWIP detektoru, zdroj dle (Kreidl, 2005)

### 2.3 Pyrometry

Pyrometry (z řečtiny pyr – oheň a metrein – měřit) jsou bezdotykové senzory teploty, které pracují na základě zpracování elektromagnetického záření zkoumaného tělesa. Mohou měřit typicky v rozsahu  $-50$  až  $3500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Skládají se z optického systému, detektoru infračerveného záření, elektronických obvodů a displeje, viz obr. 24.





**Obr. 24 – Základní blokové schéma bezkontaktního teploměru, zdroj autor**

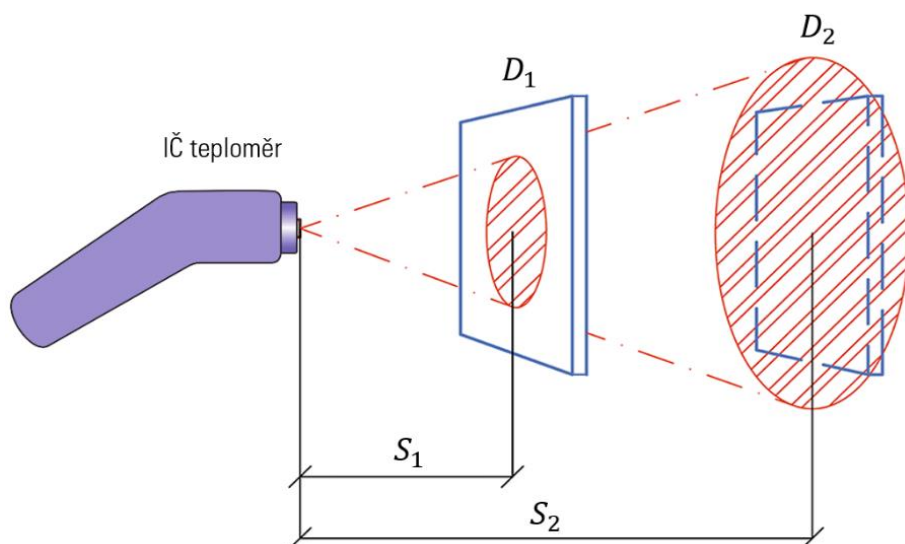
Aby byla zajištěna přesnost pyrometrů, je nutné provádět jejich kalibraci. K tomu účelu se vyrábí kalibrátory IR teploměrů, viz např. obr. 25. Jedná se o zařízení s přesně definovanou emisivitou, které modeluje absolutně černé těleso. Nejčastěji je součástí kalibrátoru dutina, resp. plocha opatřená speciálním černým nátěrem, jejíž emisivita je v rozsahu cca 0,98 až 0,995. Její teplota je udržována pomocí regulátoru na konstantní teplotě.

Pyrometry jsou výrobci kalibrovány na emisivitu absolutně černého tělesa. Při měření reálných těles, které mají emisivitu vždy nižší, ale obvykle umožňují její nastavení. Emisivitu je před zadáním nutné určit – např. z tabulek. Případně se při zahřátí tělesa na známou teplotu emisivita nastavuje tak dlouho, dokud pyrometr neukazuje stejnou teplotu. Uvedený postup lze modifikovat a teplotu tělesa změřit jinou přesnou metodou.



**Obr. 25 – Kalibrátor IR teploměrů, zdroj (D-Ex Instruments, 2022)**

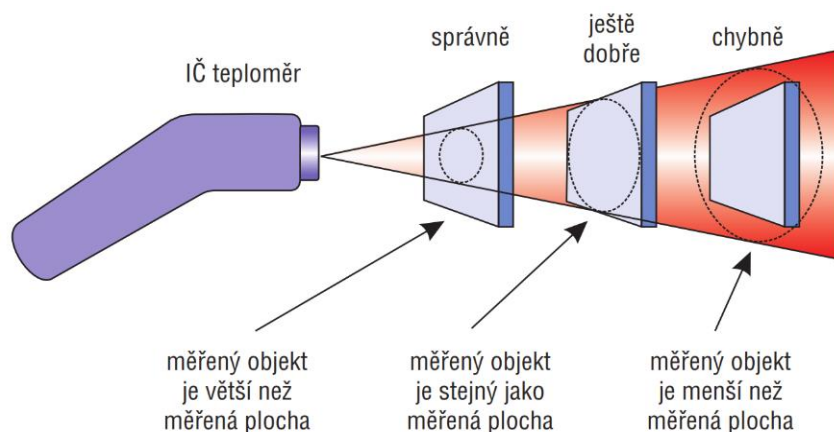
Optický systém snímá infračervené záření a zaostřuje jej pomocí soustavy čoček a zrcadel do detektoru. Proti poškození je chráněn okénkem s tenkou polyetylenovou fólií propustnou pro infračervené záření o určitých vlnových délkách. Měřené těleso je nutné správně zaměřit, viz obr. 26, tak, aby snímaná plocha nepřesahovala těleso. Za tímto účelem bývají pyrometry vybaveny laserovým zaměřováním, které může být bodové nebo kruhové.



Obr. 26 – Zaměření objektu, upraveno dle (Vavříčka, 2018) a (Kadlec, 2016)

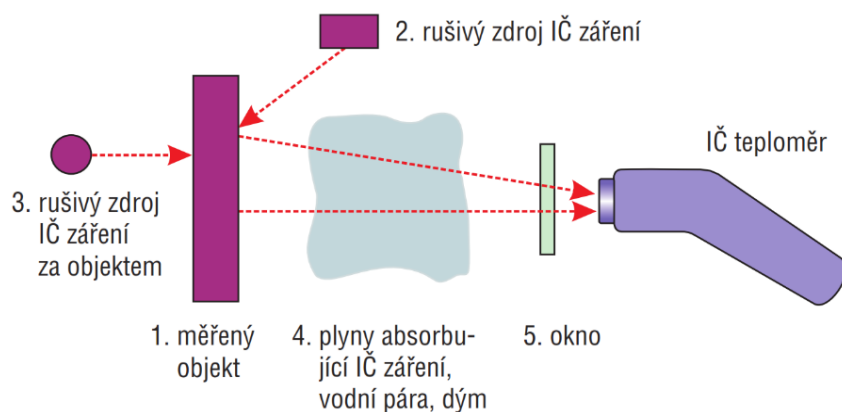
Optická charakteristika pyrometru je běžně udávána poměrem  $D:S$ , kde  $D$  je průměr měřené plochy a  $S$  vzdálenost pyrometru od měřeného tělesa. Z obr. 26 je zřejmé, že teplota tělesa ve vzdálenosti  $D_1$  bude změřena správně, ale teplota tělesa ve vzdálenosti  $D_2$  bude chybná, neboť půjde o průměr teploty tělesa a části snímaného pozadí.

Výrobci IČ teploměrů doporučují, aby snímaná plocha měřeného objektu přesahovala plochu zorného pole přístroje nejméně o 50 %. Pro správné měření je minimálně nutné, aby plocha měřeného objektu zcela vyplňovala zorné pole, viz obr. 27.



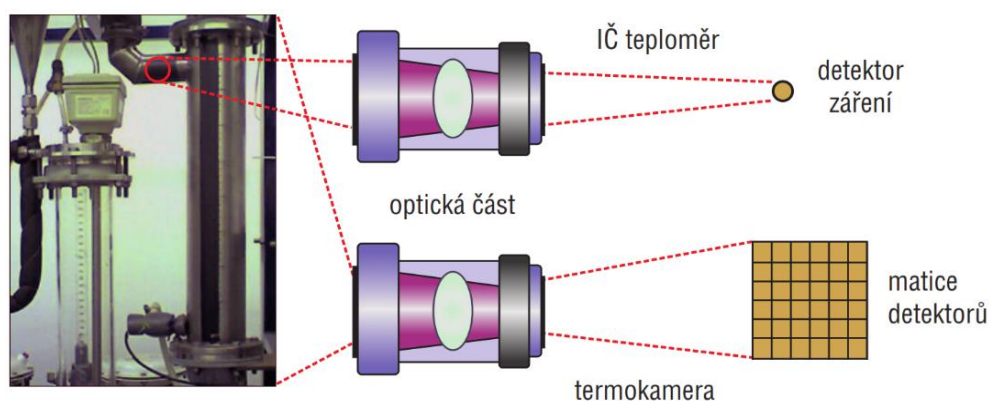
Obr. 27 – Vztah velikosti zorného pole IČ teploměru a velikosti povrchu objektu, zdroj (Kadlec, 2016)

Na obr. 28 jsou ilustrovány hlavní zdroje chyb při bezdotykovém měření teploty. 1. povrch měřeného objektu je zpravidla odlišný (barevný, lesklý, matný nebo drsný, příp. částečně propustný pro IČ záření) od černého tělesa na něj jsou IČ teploměry kalibrovány. 2. v okolí měřeného objektu se mohou nacházet parazitní zdroje záření (horké objekty, sluneční paprsky). 3. zdroj parazitního záření se může nacházet i za měřeným objektem. 4. mezi IČ teploměrem a měřeným objektem se může nacházet prostředí (vodní pára,  $\text{CO}_2$ , různé plyny a jejich páry) s různou propustností pro IČ záření. 5. v případě měření přes sklo okna dochází k pohlcování části záření, což lze korigovat nastavení emisivity na přístroji.



Obr. 28 – Významné zdroje chyb při bezdotykovém měření teploty, zdroj (Kadlec, 2016)

Chceme-li snímat teplotu v jednom konkrétním bodě (resp. v určité malé oblasti), bude k měření postačovat IČ teploměr (pyrometr) s jedním detektorem IČ záření. Ke snímání tepelného obrazu (termogramu, viz kapitola Termovize) se používají termokamery, které obsahují velký počet detektorů v maticovém uspořádání. Názorné srovnání je na obr. 30.



Obr. 29 – Měření teploty IČ teploměrem a termokamerou, zdroj (Kadlec, 2016)

**Subjektivní (optické) pyrometry** jsou založeny na subjektivní detekci teploty pomocí lidského oka. Pracují na principu porovnání záření měřeného tělesa se srovnávacím zářičem. V dnešní době se již používají jen zřídka, především z důvodu subjektivity měření (každý člověk vyhodnotí měření jinak) a nemožnosti automatizace měření (není elektrický signál). Subjektivní pyrometry jsou dvojího typu. Prvním typem jsou **jasové pyrometry**, které snímají záření na jedné vlnové délce  $0,65 \mu\text{m}$ , což odpovídá červené barvě. Jako srovnávací zdroj se u nich obvykle používá pyrometrická wolframová žárovka, používají se do  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  s přesností  $\pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pro vyšší teploty, až do  $3500 \text{ }^\circ\text{C}$ , lze za objektiv pyrometru zařadit tzv. šedý filtr.

Druhým typem jsou **barvé pyrometry**, u nichž se využívají dvě vlnové délky, nejčastěji  $0,5 \mu\text{m}$  a  $0,65 \mu\text{m}$ , které odpovídají zelené a červené barvě. Výsledná teplota se v tomto případě určí z poměru jasů nebo srovnáním záření. Práce s těmito pyrometry je poměrně náročná. Jsou vhodné k měření teploty těles, u kterých nelze odhadnout emisivitu. Rozsah použití je  $700$  až  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  s chybou měření okolo  $2 \%$ .

**Objektivní pyrometry** jsou založeny na principu detekce záření tělesa pomocí detektorů pracujících na různých principech (viz kapitoly 2.1 a 2.2). Mohou být úzkopásmové (monochromatické), dvoupásmové (poměrové), pásmové a širokopásmové (úhrnné).

### 2.3.1 Úzkopásmové pyrometry

Úzkopásmové (monochromatické) pyrometry jsou funkčně podobné jasovým pyrometrům, ale záření je u nich snímáno elektronickým detektorem, nejčastěji kvantovým (fotorezistory, fotodiody a fototranzistory). Zcela monochromatický pyrometr nelze vyrobit. Pyrometry pracují v úzkém rozmezí vlnových délek, které je určeno na základě spektrální propustnosti filtru, použité optiky a citlivosti detektoru. Varianta pyrometru s automatickou korekcí emisivity umožňuje měření teploty tělesa bez znalosti emisivity jeho povrchu. Měřené místo se obvykle zaměřuje pomocí laseru.

### 2.3.2 Pásmové pyrometry

Pásmové pyrometry využívají podstatně širší část spektra tepelného záření tělesa než pyrometry monochromatické, ale stále významně užší, než aby je bylo možné řadit mezi pyrometry celkového záření. Jde tedy o tzv. spektrálně selektivní pyrometry, které pracují ve stanoveném rozsahu vlnových délek od 10 nm do jednotek  $\mu\text{m}$ . Uvedené pásmo je dáno spektrální propustností optiky (vlastní optický systém, optické filtry a zrcadla) a spektrální citlivostí detektoru (obvykle je kvantový). Pyrometry mají nastavitelnou emisivitu a mohou být v přenosném (obr. 30) nebo průmyslovém (obr. 31) provedení. Mezi pásmové pyrometry se řadí většina vyráběných pyrometrů, u nichž se používají fotoelektrické detektory.



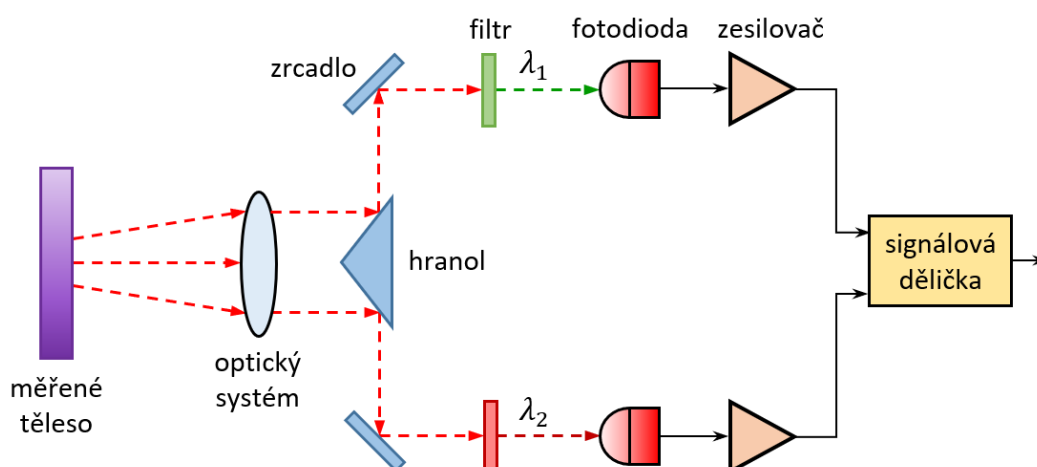
Obr. 30 – Pásmový pyrometr OmegaScope OS 520 s optickým zaměřovačem, zdroj (Gyorki, 2009)



Obr. 31 – Průmyslový pásmový pyrometr optria CTlaser 3M, zdroj (RS Components, 2022)

### 2.3.3 Poměrové pyrometry

Poměrové pyrometry pracují na základě vyhodnocení intenzity vyzařování při dvou různých vlnových délkách. Optický systém nasměruje záření měřeného tělesa pomocí hranolu na částečně propustné filtry, které propustí jen dva typy záření o dvou vlnových délkách – nejčastěji  $0,5\ \mu\text{m}$  a  $0,65\ \mu\text{m}$  (zelená a červená barva), viz obr. 32. Po detekci jsou vzniklé dvě hodnoty elektrického signálu zesíleny. Výsledná hodnota teploty se získá pomocí signálové děličky jako jejich vzájemný poměr. Z Planckova zákona lze totiž odvodit, že poměr vyzařování je pro každou teplotu různý, takže na jeho základě lze výslednou teplotu jednoznačně určit.



Obr. 32 – Základní princip poměrového pyrometru, zdroj autor dle (Kreidl, 2005)



Obr. 33 – Poměrový pyrometr Endurance E1RH, zdroj (TSI System, 2022)

Na obr. 32 je poměrový pyrometr v průmyslovém provedení. Tyto pyrometry se v praxi často používají k měření teploty proudu roztavené oceli během odpichu, měření teplot svárů při indukčním svařování nebo při tváření za tepla (např. výroba drátů, tyčoviny apod.).

#### 2.3.4 Radiační IR teploměry

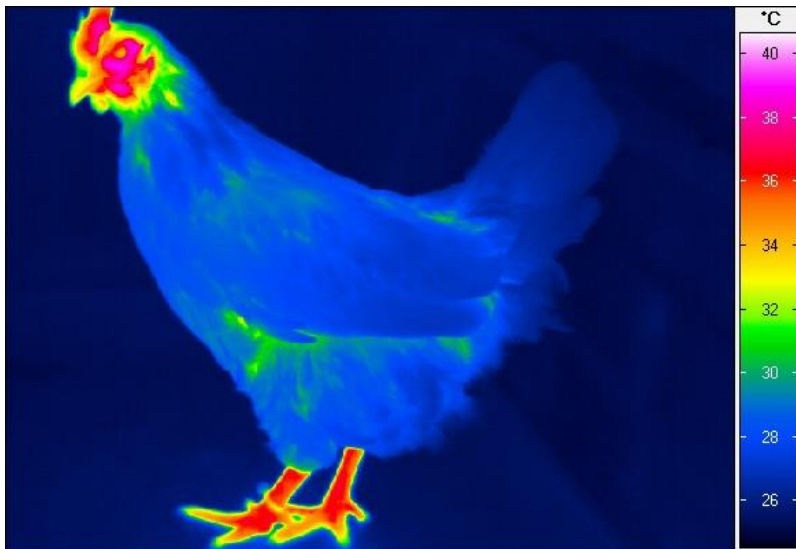
Tyto pyrometry jsou často také označovány jako širokopásmové, nebo jako pyrometry celkového záření (úhrnné). Vyhodnocují tedy tepelná záření v celém spektru jejich vlnových délek. Jako detektory lze u nich použít pouze tepelné, nejčastěji baterie termočlánků, příp. bimetalické spirály, pyroelektrické prvky nebo bolometry. Výsledná teplota měřeného objektu se stanovuje na základě Stefan-Boltzmannova zákona. Rozsah použití je běžně od  $-40$  do  $+2500$  °C. Radiační IR teploměry nacházejí uplatnění nejen v průmyslové praxi (dražší přístroje s kvalitním detektorem), viz např. obr. 34, ale i v domácnosti nebo lékařské praxi.



Obr. 34 – Typické provedení přenosného IR teploměru, zdroj (Conrad Electronics, 2022a)

#### 2.4 Termovize

Snímání tzv. teplotního obrazu tělesa se provádí pomocí termovize (resp. termovizní nebo IR kamery), což je zařízení, které vytváří obraz z infračerveného záření. Obyčejné kamery pracují v oblasti viditelného světla (tj. 400 až 780 nm), zatímco IR kamery pracují v oblasti infračerveného elektromagnetického záření. Obraz IR kamery je monochromatický, protože běžně používané senzory, které tvoří základ kamery (viz výše), nejsou schopny rozlišit vlnovou délku záření. Běžné IR kamery ale zobrazují v tzv. nepravých barvách (odlišných od barevného vnímání lidského oka), resp. v pseudobarevné podobě, viz např. obr. 35. Jednotlivým odstínům barev je přiřazena konkrétní teplota a součástí obrazu pak bývá odpovídající barevná teplotní stupnice. Detektory IR kamery nicméně neměří přímo teplotu, ale intenzitu dopadajícího infračerveného záření.



**Obr. 35 –** Infračervený snímek slepice v nepravých barvách (pseudobarevný obraz) s odpovídající teplotní stupnicí, zdroj (Wikipedie, 2022c)

Rozlišují se dva základní typy zobrazovacích systémů:

- **skenovací** (s opticko-mechanickým rozkladem obrazu);
- **neskenovací** (s maticovým detektorem).

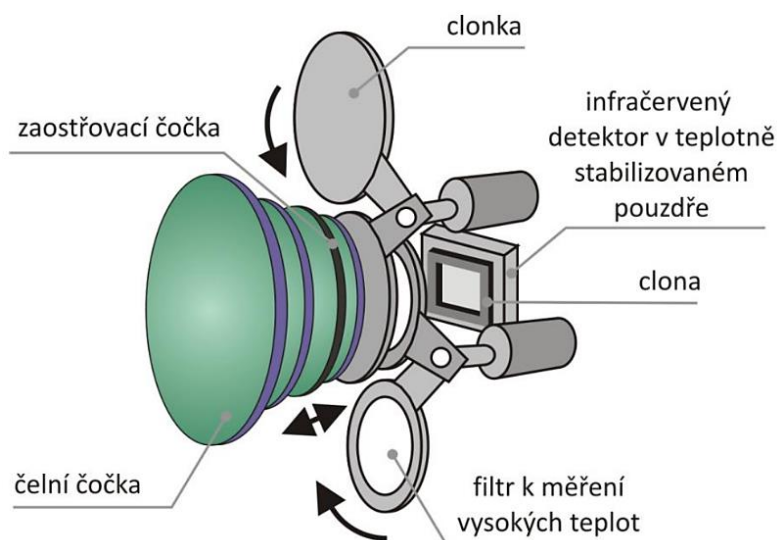
Skenovací systémy postupně pomocí rychle se pohybující optické soustavy snímají celé zorné pole – buď po řádcích (nejčastěji), nebo po sloupcích. Optický systém kamery postupně přivádí záření z celého zorného pole na detektor, který může být bodový, nebo může jít o skupinu více různě umístěných detektorů. Světelné záření je pomocí pohyblivého optického systému rozkládán a postupně prochází přes čočky, clonu a filtr k detektoru.

Neskenovací systémy jsou osazeny maticovým FPA detektorem pracujícím na různých principech (bolometrické, termoelektrické a pyroelektrické, viz text výše). Snímaná oblast je optickým systémem zaostřena a zaměřena na maticový detektor umístěný v jeho ohniskové rovině. Každý bod obrazu (pixel) je získán pomocí jednoho detektoru v matici. Popisované IR kamery se skládají ze tří hlavních částí:

- **Optické** – zaměřuje infračervené záření na detektor, v případě potřeby provádí optický rozklad záření a z důvodu potřeby teplotní reference v definovaných okamžicích zakrývá pomocí clonky optickou cestu.
- **Detektorové** – provádí převod záření na analogový elektrický signál.
- **Mikroprocesorové** – její součástí je A/D převodník pro převod analogového signálu z detektorové části na digitální, který je následně zpracován, převeden na odpovídající teploty a zobrazen.

Optická část IR kamery je svojí konstrukcí obdobná optice běžné kamery, ale s nutností použití jiných materiálů, které umožní propouštět infračervené záření. Objektiv IR kamery, viz obr. 36, se skládá z čoček z materiálu propustného s ohledem na konkrétní oblast záření. Může to být křemík (MWIR) nebo germanium (LWIR). Oba materiály mají velmi dobré mechanické vlastnosti, nejsou hygroskopické (nepohlcují vzdušnou vlhkost), bývají potaženy antireflexní

vrstvou a obvykle je u nich dosaženo velmi vysoké propustnosti IR záření blížící se 100 %. Vlastní konstrukce objektivu sleduje účinné potlačení optických vad, což je z důvodu mnohem širšího pásma vlnových délek než u běžných kamer komplikovanější.



Obr. 36 – Schéma objektivu IR kamery s maticovým mikrobolometrickým FPA detektorem, zdroj (Tesař, 2014)

Jako detektory v detektorové části IR kamery se používají především výše podrobněji popsané detektory kvantové (QWIP, fotodiody InGaAs a CdHgTe) a mikrobolometrické, integrované v FPA rozložení. Oblast detektorů bývá, z již výše uvedených důvodů, chlazena kapalným dusíkem nebo pomocí Stirlingova termoelektrického chladiče.



Obr. 37 – Typická provedení termokamery (vlevo standardní a vpravo kompaktní pistolové), zdroj (Conrad Electronics, 2022a) a (Promertech, 2022)

Signál z detektorové části musí být zesílen a pomocí A/D převodníku převeden do digitální podoby. Převodníky bývají dnes již běžně 14bitové (16 384 úrovní) nebo i 16bitové (65 536



úrovni). IR kamery mívají více výstupů, standardně video výstup k vizualizaci a digitální výstup pro další případné zpracování naměřených dat.

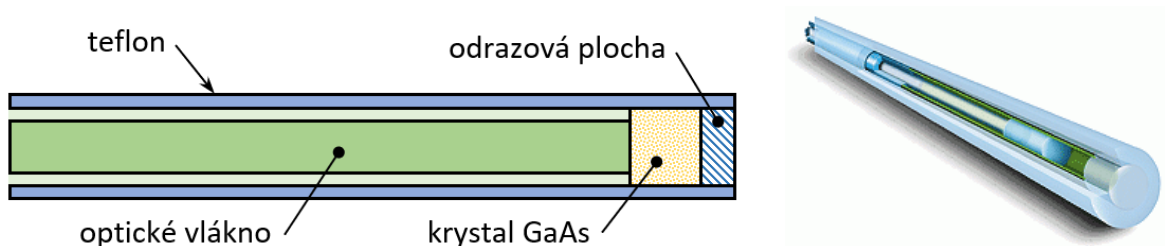
IR kamera (např. v provedení na obr. 37) nepřijímá pouze záření měřeného objektu, ale i záření z okolních zdrojů dále odražené povrchem měřeného objektu. Výsledné záření objektu je navíc ovlivněno omezenou propustností okolní atmosféry. Termografický software kamery obvykle již počítá s vlivem emisivity objektu, propustnosti okolní atmosféry a s odraženým zářením okolních zdrojů a zahrnuje je do algoritmu výpočtu teploty, a to nejen během měření, ale i po uložení získaného termogramu (termovizní, resp. infračervený snímek) měřeného tělesa. Velmi důležité je, mimo správného zaměření objektu, zadání správné hodnoty emisivity povrchu měřeného objektu, propustnosti okolní atmosféry (má vliv zejména při vzdáleném měření), v co největší míře odstínění okolních parazitních zdrojů nebo jejich korekce a správné zadání teploty okolí.

## 2.5 Senzory s optickými vlákny

Jsou vhodné pro měření za náročných podmínek, když nelze použít standardní metody, např. ve výbušných nebo snadno vznětlivých prostředích. Díky optickému vláknu je přesně vymezena oblast měření a zajištěno vedení záření. Princip senzoru je založen na změně některé z vlastností záření, které je vysíláno měřeným objektem do optického vlákna. Konkrétně může jít o amplitudu, fázi, vlnovou délku nebo o dopravní zpoždění. Používají se dva různé principy:

- přímá změna parametrů optického vlákna – metoda je vhodná pro plošná měření teploty, využívá se změnu vlastností optických vláken vlivem působení teploty (disperze, optický útlum, změna rychlosti šíření světla), které se v běžném použití považují za parazitní;
- nepřímá změna vlastností materiálu na konci optického vlákna – metoda je vhodná pro bodová měření, optické vlákno je zde pouze vodič záření, využívá se změna odrazu nebo rozptylu na odrazové ploše umístěné na jeho konci.

Samotný detektor záření může být založen na principu **absorpce záření krystalem** arsenidu galitého GaAs umístěného na konci optického vlákna před odrazovou plochou, viz obr. 38. Dochází ke změně spektra záření, neboť vrstva GaAs absorbuje záření o určitých vlnových délkách. Přenáší-li se optickým kabelem záření ve formě bílého světla se širokým spektrem vlnových délek, odražené záření bude mít spektrum již jiné a změřením jeho vlnové délky lze pak určit přesně teplotu.



Obr. 38 – Princip a praktické provedení senzoru teploty s optickým vláknem, zdroj autor a (Vojáček, 2017)

Další možností realizace detektoru je **využití luminoforu**. Záření, které projde optickým kabelem, dopadá na luminofor na jeho konci a způsobí excitaci nábojů luminoforu. Vlivem toho dojde zpětnému vyzáření části energie v podobě záblesku světla o určité vlnové délce a době trvání, který je úměrný konkrétní teplotě.

Na konci optického vlákna může být umístěn také **Fabry-Perotův interferometr**, který pracuje jako převodník změny teploty na změnu spektra záření. Princip je podrobněji popsán např. v (Vojáček, 2017).

### 3 Otázky a úkoly

- 1) Na čem je založeno bezdotykové měření teploty?
- 2) Na jakém principu pracují infračervené termočlánky? Co jsou to bolometry?
- 3) Vyjmenujte a stručně popište známé kvantové senzory infračerveného záření.
- 4) Co jsou a jak pracují pyrometry? Nakreslete schéma poměrového pyrometru.
- 5) Na jakých principech je založena termovize? Uveďte a stručně popište základní tři části infračervených kamer.

### 4 Použitá literatura

CONRAD ELECTRONIC Česká republika, spol. s r.o., 2022a *Fluke 566 infračervený teploměr* [online]. [citováno 14. 12. 2022]. Dostupný z WWW: <<https://www.conrad.cz/p/fluke-566-infracerveny-teplomer-optika-301-40-650-c-kontaktni-mereni-122370>>

CONRAD ELECTRONIC Česká republika, spol s r.o., 2022b. *FLIR C5 termokamera* [online]. [citováno 16. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://www.conrad.cz/p/flir-c5-wi-fi-termokamera-20-do-400-c-87-hz-msx-zabudovana-led-zarovka-integrovana-digitalni-kamera-wi-fi-2258834>>

D-EX INSTRUMENTS, s.r.o., 2022. *Fluke 4188 / 4181 Infračervený kalibrátor* [online]. [citováno 14. 12. 2022]. Dostupný z WWW: <<https://www.dex.cz/produkt/fluke-4188-4181-infracerveny-kalibrator/>>

GÜNTHER, A. a Martin Ebermann, 2017. Compact pyroelectric detectors based on micro-machined chip carriers. *AMA Conferences 2017 – SENSOR 2017 and IRS<sup>2</sup> 2017*. DOI 10.5162/irs2017/i4.5.

GYORKY, John R., 2009. Understanding the Infrared Temperature Sensor. [online]. [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://www.sensortips.com/temperature/infrared-temperature-sensor/>>

INFRATEC, GmbH, 2022. Types of Infrared Sensors and their Features [online]. [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://www.infratec-infrared.com/sensor-division/service-support/glossary/infrared-sensor/>>

- KADLEC, Karel, 2016. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: bezdotykové měření teploty. *Listy cukrovarnické a řepařské*. **132**(9-10), 303-307. ISSN 1805-9708.
- KREIDL, Marcel, 2005. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN, 240 s. ISBN 978-80-730-0145-4.
- PROMERTECH CZ, spol. s r.o., 2022. *Termokamera Fluke TIS60+* [online]. [citováno 16. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://promertech.cz/fluke-tis60-termokamera>>
- RS COMPONENTS, Sp. z o. o., 2022. *Infračervený snímač teploty*. [online]. [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://cz.rs-online.com/web/p/infracervene-snimace-teploty/2410260>>
- SOVA, Jan a Jana Pokorná, 2018. Bezdotykové měření teplotních polí – senzory. In *Aldebaran Bulletin* [online]. [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <[https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018\\_02\\_cam.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018_02_cam.php)>
- TESAŘ, Jiří, 2014. *Termografie v plasmových a laserových technologiích*. [Disertační práce.] Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd.
- THEINSTRUMENTGURU, 2022. *The Instrument Guru: Thermopile* [online]. [citováno 16. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://theinstrumentguru.com/thermopile/>>
- TSI SYSTEM, spol. s r.o., 2022. *Nový pyrometr Endurance*. [online]. [citováno 15. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<http://www.tsisystem.cz/novy-pyrometr-endurance/>>
- VAVŘIČKA, Roman a Jan Zelingr, 2018. Omezující okrajové podmínky použitelnosti u systémů bezkontaktního měření teplot – 2. část. *Topenářské instalace* **55**(8), 36-41. ISSN 1211-0906.
- VOJÁČEK, Antonín, 2014. Přehled principů el. měření teploty – 2. díl – bezdotykové. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/rehled-principu-el-mereni-teploty-2-dil-bezdotykov>>
- VOJÁČEK, Antonín, 2005. Co jsou bolometry a mikrobolometry. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 11. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2005111601>>
- VOJÁČEK, Antonín, 2017. Optické vláknové senzory pro náročná měření teploty. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 17. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/optovlaknove-senzory-pro-narocna-mereni-teploty.html>>
- VŠCHT v Praze. Měření teploty. *Stránky ÚPŘT – Ústavu počítačové a řídicí techniky VŠCHT v Praze* [online]. [citováno 16. 12. 2022]. Dostupné z WWW: <<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>>
- WIKIPEDIE, 2022a. Wienův posunovací zákon. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [Citováno 15. 12. 2022]. Dostupné z WWW:

[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Wien%C5%AFv\\_posunovac%C3%AD\\_z%C3%A1kon&oldid=19987911](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Wien%C5%AFv_posunovac%C3%AD_z%C3%A1kon&oldid=19987911)>

WIKIPEDIE, 2022b. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. BlackbodySpectrum loglog 150dpi en.png [obrázek online]. *Wikimedia Commons, the free media repository*. [Citováno 6. 12. 2022]. Dostupné z WWW:

[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:BlackbodySpectrum\\_loglog\\_150dpi\\_en.png&oldid=393946804](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_en.png&oldid=393946804)>

WIKIPEDIE, 2022c. Infračervené záření. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [Citováno 15. 12. 2022]. Dostupné z WWW:

[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Infra%C4%8Derven%C3%A9\\_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD&oldid=21864399](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Infra%C4%8Derven%C3%A9_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD&oldid=21864399)>

## Seznam zkratk

2D	dvoudimenzionální
A/D	analogově digitální
CCD	charge-coupled device (zařízení s vázanými náboji, snímací technika)
DRAM	dynamic random access memory (dynamická paměť s náhodným přístupem)
FOV	Field Of View (velikost zorného pole)
FPA	focal plane array (přeneseně rozmístění prvků v poli / na čipu)
IČ	infračervený
IR	infrared
LWIR	long wavelength infrared
MWIR	medium wavelength infrared
NIR	nearest infrared (blízké infračervené)
OPN	oblast prostorového náboje
PIN	polovodičová dioda s konfigurací polovodič P – intristická vrstva – polovodič N
PZT	piezoelektrická (keramika)
QWIP	quantum well infrared photodetector
SWIR	short wavelength infrared
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická
WIR	wavelength infrared

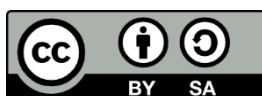
## Rejstřík

absolutně černé těleso, 4  
barevné těleso, 6  
bezdotykové měření teploty, 1, 2  
elektromagnetické záření, 2, 3, 19, 25  
emisivita, 4, 5, 6, 7, 19, 22, 23  
Fabry-Perotův interferometr, 29  
fotodioda, 2, 15, 16, 17, 22, 27  
fotokonduktivní. viz fotovodivostní  
fotoodpor. viz fotorezistor  
fotorezistor, 16, 22  
fototranzistor, 2, 15, 22  
FPA detektor, 26, 27  
IČ záření. viz infračervené záření  
infračervené záření, 8, 11, 20, 26  
IR kamera. viz termovize  
IR záření. viz infračervené záření  
Kirchhoffův zákon, 6  
luminofor, 29  
LWIR. viz dlouhovlnné infračervené  
MWIR. viz středněvlnné infračervené  
NIR. viz blízké infračervené  
oblast prostorového náboje, 16, 31  
odrazivost, 5  
PIN dioda, 3, 18  
Planckův vyzařovací zákon, 3  
PN přechod, 16, 18  
pohltivost, 5  
propustnost, 5, 22, 27, 28  
pseudobarevný obraz, 26  
pyroelektrický jev, 12  
pyrometrie. viz bezdotykové měření teploty  
selektivní zářič, 7  
senzor  
    bezdotykový, 1, 2, 3, 8  
    poměrový, 3, 22  
    s optickými vlákny, 1, 3  
    širokopásmový, 22, 25  
    širokopásmový, 2  
    úzkopásmový, 2, 15, 22  
IR záření, 8  
    bolometr, 9, 10  
    IR termočlánek, 8  
    kvantový, 15  
        extrinický, 16  
        fotodiodový detektor, 17

- fotovodivostní, 15, 17
- fotovoltaický, 15
- intristický detektor, 16
- QWIP detektor, 3, 18, 19, 27, 31
- mikrobolometr, 9, 10, 11, 30
- pyroelektrický, 11, 12, 13
- pyrometr, 19, 22, 23
- pásmový, 23
- poměrový, 24
- radiační IR teploměr, 25
- úzkopásmový, 22
- s optickými vlákny, 28
- spektrum elektromagnetického záření, 2
  - blízké infračervené, 2
  - dlouhovlnné infračervené, 2
  - krátkovlnné infračervené, 2
  - středněvlnné infračervené, 2
  - viditelné, 2
- Stefan-Boltzmannův zákon, 3, 25
- SWIR. viz krátkovlnné infračervené
- šedé těleso, 6, 7, 8
- termovize, 21, 25
  - neskenovací, 26
  - skenovací, 26
- termovizní kamera. viz termovize
- thermopile. viz IR termočlánek
- vlnová délka, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 22, 29
- Wienův posunovací zákon, 4

Vytvořeno v rámci projektu **Studijní program Automatizace (SPAUT)**  
na **Univerzitě Pardubice**, reg. č. NPO\_UPCE\_MSMT-16591/2022.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Financováno  
Evropskou unií  
NextGenerationEU



Národní  
plán  
obnovy

MS  
MIT  
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY