



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava



PRVKY ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ

učební text

Romana Garzinová

Ostrava 2012

Recenze: Prof. Ing. František Němec, Ph.D.
Doc. RNDr. Jana Kapounová, CSc.

Název: Prvky řídicích systémů
Autor: Romana Garzinová
Vydání: první, 2012
Počet stran: 148
Náklad: 20

Studijní materiály pro studijní obor Automatizace a počítačová technika v průmyslu fakulty metalurgie a materiálového inženýrství.
Jazyková korektura: nebyla provedena.

Určeno pro projekt:

Operační program Vzděláváním pro konkurenceschopnost
Název: Personalizace výuky prostřednictvím e-learningu
Číslo: CZ.1.07/2.2.00/07.0339
Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava
Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© Romana Garzinová
© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2581-6

OBSAH

1. KLASIFIKACE TECHNICKÝCH PROSTŘEDKŮ ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ	9
1.1. Technické prvky a prostředky automatizovaných systémů řízení technologických procesů	9
1.2. Prvky řídicích systémů	12
1.2.1. Informace.....	13
1.2.2. Měření technologických veličin	14
2. ODPOROVÉ SNÍMAČE	17
2.1. Kontaktní odporové snímače	18
2.1.1. Kontaktní systém	19
2.1.2. Použití kontaktních snímačů	20
2.2. Odporové snímače využívající stykového odporu	21
2.3. Odporové snímače polohy – potenciometry	22
2.4. Odporové snímače deformace – tenzometry	25
2.4.1. Kovové tenzometry	26
2.4.2. Polovodičové tenzometry	28
2.5. Odporové snímače teploty	30
2.5.1. Kovové teploměry	30
2.5.2. Polovodičové odporové teploměry	31
2.6. Odporové snímače vakua – odporový vakuometr	33
2.7. Odporové analyzátory plynů	34
2.7.1. Analyzátory vodivosti	34
2.7.2. Analyzátory termochemické	35
2.7.3. Analyzátory polovodičové	36
2.7.4. Termomagnetické analyzátory	36
2.8. Odporové snímače rychlosti prostředí (anemometry)	37
2.9. Odporové snímače záření	38
2.9.1. Odporové snímače světelného záření	38
2.9.2. Odporové snímače infračerveného záření (bolometry)	42
2.9.3. Odporové snímače jaderného a rentgenového záření.....	42
2.10. Odporové snímače magnetických veličin.....	42
2.11. Odporové snímače vlhkosti	43
2.11.1. Přímé metody měření vlhkosti.....	43
2.11.2. Nepřímé metody měření vlhkosti	43
2.12. Odporové snímače elektrolytické	45
3. IONIZAČNÍ SNÍMAČE	47
3.1. Ionizační snímače polohy	47
3.2. Ionizační snímače jaderného záření.....	48
3.3. Použití ionizujících snímačů záření.....	49
3.4. Ionizační snímač vakua termoemisní	51
4. INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE.....	53
4.1. Snímač s malou vzduchovou mezerou	54
4.2. Indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem.....	56
4.3. Indukčnostní snímač s potlačeným polem.....	56
4.4. Indukčnostní snímač bez feromagnetika	57
4.5. Použití indukčnostních snímačů	57
4.5.1. Měření úhlové výchylky.....	57
4.5.2. Oscilátorové snímače (snímač s číslicovým výstupem).....	58

4.5.3. Selsyny	59
4.5.4. Indukčnostní snímače rychlostní	59
4.5.5. Indukčnostní snímače momentu síly	60
4.5.6. Indukčnostní snímače síly	61
4.5.7. Indukčnostní snímače deformace	61
5. MAGNETICKÉ SNÍMAČE	62
5.1. Magnetoelastické snímače.....	62
5.2. Magnetoanizotropní snímače.....	64
5.3. Snímače využívající inverzi Wiedemannova jevu	65
6. KAPACITNÍ SNÍMAČE	68
6.1. Typy provedení.....	69
6.2. Použití kapacitních snímačů	70
7. HALLOVY SNÍMAČE	73
8. INDUKČNÍ SNÍMAČE (generátorové).....	75
8.1. Snímače elektomagnetické	75
8.1.1. Snímače přímočarého pohybu	76
8.1.2. Snímače úhlového pohybu	77
8.2. Snímače elektrodynamické.....	77
8.2.1. Snímače přímočarého pohybu	78
8.2.2. Snímače úhlové rychlosti	78
8.2.3. Elektrodynamický snímač vibrací	80
8.2.4. Indukční průtokoměr	80
8.3. Magnetostrikční snímače.....	82
9. PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE	84
10. PRŮMYSLOVÉ MĚŘENÍ TEPLOTY	88
10.1. Termočlásky.....	88
10.1.1. Materiál a vlastnosti termočlásku	89
10.1.2. Měření termočlásky a kompenzace srovnávacích spojů.....	91
10.2. Bezdotykové teploměry – pyrometry	94
10.2.1. Fyzikální principy pyrometrie	94
10.2.2. Pyrometry radiační	98
10.2.3. Pyrometry spektrální (pásmové, úzkopásmové).....	99
10.2.4. Pyrometry barvové (pyrometry poměrové, kvocienční)	101
10.3. Dilatační teploměry	101
10.3.1. Teploměry založené na roztažnosti pevných látek.....	101
10.3.2. Dilatační teploměry plynové	103
10.3.3. Dilatační teploměry kapalinové.....	104
10.4. Speciální teploměry	105
10.5. Zabudování dotykových teploměrů.....	106
10.6. Srovnání metod měření teploty	107
11. PRŮMYSLOVÉ MĚŘENÍ TLAKU	111
11.1. Kapalinové snímače tlaku (hydrostatické)	113
11.1.1. Trubice U.....	113
11.1.2. Sklonný manometr.....	114
11.1.3. Plovákový manometr.....	114
11.1.4. Prstencový manometr	115
11.2. Tlakoměry se silovým účinkem.....	116
11.2.1. Zvonový manometr	116
11.2.2. Pístový manometr	117

11.3. Deformační snímače tlaku	118
11.3.1. Bourdonův manometr	118
11.3.2. Membránový manometr	119
11.3.3. Křabicové tlakoměry	120
11.3.4. Vlnovcové tlakoměry	120
11.4. Provozní montáž manometrů	121
12. PRŮMYSLOVÉ MĚŘENÍ PRŮTOKU	123
12.1. Objemová měřidla	124
12.1.1. Membránový průtokoměr	124
12.1.2. Bubnový průtokoměr	125
12.1.3. Pístový průtokoměr	125
12.1.4. Průtokoměr s oválnými rotory	126
12.2. Průtokoměry měřící tlakovou diferencí	126
12.2.1. Průřezová měřidla	126
12.2.2. Rychlostní sondy	131
12.2.3. Kolenový průtokoměr	132
12.3. Rychlostní měřiče průtoku	133
12.3.1. Woltmanův měřič průtočného množství	134
12.3.2. Turbínový měřič	134
12.3.3. Lopatkový radiální průtokoměr	135
12.4. Rotametr	136
12.5. Volba vhodného typu průtokoměru	137
13. PRŮMYSLOVÉ MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY	139
13.1. Mechanické hladinoměry	139
13.1.1. Plovákové hladinoměry	139
13.1.2. Hladinoměry s ponorným tělesem	140
13.2. Hydrostatické hladinoměry	141
13.3. Elektrické hladinoměry	143
13.3.1. Ultrazvukové hladinoměry	143
13.3.2. Radarové hladinoměry	144
13.3.3. Izotopové hladinoměry	145
13.4. Výběr vhodného typu snímače hladiny	146
LITERATURA	148

POKYNY KE STUDIU

Prvky řídicích systémů

Pro předmět Prvky řídicích systémů semestru oboru Automatizace a počítačová technika v průmyslu jste obdrželi studijní balík obsahující

- integrované skriptum pro distanční studium obsahující i pokyny ke studiu
- CD-ROM s doplňkovými animacemi vybraných částí kapitol
- harmonogram průběhu semestru a rozvrh prezenční části
- rozdělení studentů do skupin k jednotlivým tutorům a kontakty na tutorý
- kontakt na studijní oddělení

PREREKVIZITY

Předmět je určen pro studenty oboru Automatizace a počítačová technika v průmyslu. Pro studium tohoto předmětu se předpokládá absolvování předmětů Teorie systémů a Fyziky I, II.

CÍLEM PŘEDMĚTU

Těžiště předmětu je v problematice metod elektrického měření neelektrických veličin tj. snímačů a převodníků. Účelem je seznámit posluchače s širokým spektrem fyzikálních principů měřicích metod a zdůraznit jejich vhodnost pro účely řízení technologických procesů zvláště pro řízení v metalurgii. Na tento předmět navazuje v dalším semestru předmět Technické prostředky řídicích systémů. Po prostudování modulu by měl student být schopen rozumět základním fyzikálním principům snímačů a zvolit vhodné postupy při měření neelektrických veličin v průmyslu. Modul je zařazen do bakalářského studia oboru Automatizace a počítačová technika v průmyslu studijního programu Ekonomika a řízení průmyslových systémů, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Průvodce studiem

Text, který upřesňuje neformální přiblížení studované kapitoly (části) a informuje o tom, co je důležité umět a co stačí jen přečíst informativně.



Čas ke studiu: 1 hodina

Na úvod kapitoly je uveden čas potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat ...
- definovat ...
- vyřešit ...

Ihned potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



VÝKLAD

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



Shrnutí pojmů 1

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



Odměna a odpočinek

V průběhu výkladu dostanete neformální komentář k textu, případně radu na rekapitulaci kapitoly.



Otázky 1

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



CD-ROM

Informace o doplňujících animacích, videosekvencích apod., které je možno vyvolat z CD-ROMu připojeného k tomuto materiálu.

Úspěšné a příjemné studium s touto učebnicí Vám přeje autor výukového materiálu

Romana Garzinová

1. KLASIFIKACE TECHNICKÝCH PROSTŘEDKŮ ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ



Průvodce studiem

V rámci výuky předmětu Prvky řídicích systémů je vhodné začlenit studované téma do oboru automatizace a počítačové techniky v metalurgii jako celku. Úvodní kapitola velmi stručně popíše význam a definici prvků řídicích systémů v automatizaci.

1.1. Technické prvky a prostředky automatizovaných systémů řízení technologických procesů



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

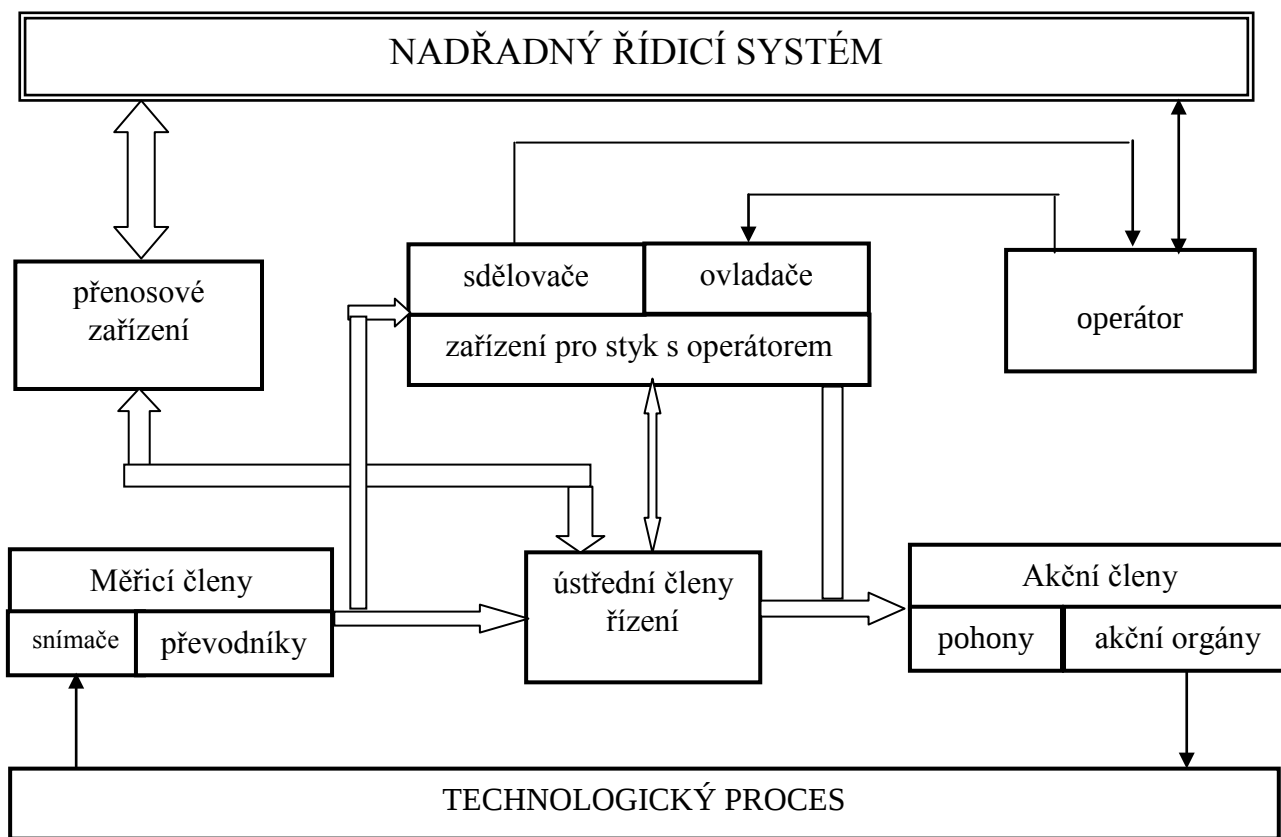
- definovat ASŘ TP
- vyčlenit základní úkoly řízení v ASŘ TP
- definovat jednotlivé části regulačního obvodu
- vyjmenovat metody měření neelektrických veličin



Výklad

Automatizovaným systémem řízení technologického procesu se rozumí systém řízení realizovaný pomocí výpočetní, automatizační a regulační techniky určený pro řízení podle předem stanovených kritérií, přičemž člověku patří aktivní úloha v procesu rozhodování.

Technické prvky a prostředky ASŘ TP představují celou řadu přístrojů a zařízení, které pracují na různých fyzikálních principech. V závislosti na stupních automatizace se využívají zařízení od jednoduchých přístrojů až po autonomní systémy na bázi samočinných počítačů. Tyto technické prostředky, jejichž struktura je dána základními úlohami automatického řízení technologických procesů, je možno postihnout následujícím blokovým schématem toku informací.



Obr.1.1. Blokové schéma toku informací v ASŘ TP

❑ Základní úkoly automatického řízení technologických procesů

- **kontrola stavu a průběhu procesů** (včetně záznamu, sledování a vyhodnocování provozních stavů procesu bilancování průtoků energií a hmot, redukce dat, výpočet souhrnných ekonomických a technologických ukazatelů),
- **stabilizace vybraných parametrů procesu** (zpravidla jde o regulaci na konstantní hodnotu, tj. dosažení invariantnosti parametrů vůči vnějším poruchám, můžeme se však setkat také s programovou nebo vlečnou regulací),
- **automatické najíždění a odstavování agregátů** (logické řízení kombinací nebo posloupností operací a přechodových stavů, programové řízení),
- **automatické zabezpečování při mimořádných**
- **provozních stavech** (havarijním odstavováním apod.),
- **optimalizace technologických procesů** (řízení podle ekonomických kritérií např. na minimální spotřebu paliv a energie, na maximální výtěžnost, na rovnoměrnou kvalitu, na nejkratší dobu procesu atp.),
- **optimalizace vlastního procesu řízení** (např. podle integrálních kritérií přechodového děje procesu, na minimum doby trvání přechodového děje, na minimum odchylky v ustáleném stavu atp.),
- **zabezpečení spojení operátora s obvodem řízení** (priorita operátora při zásahu, ochrana proti nebezpečným, nesprávným nebo nepovolaným zásahům, možnost operátorské změny parametrů řídicího systému, u rozvinutých. systémů možnost dialogu automatického řídicího systému s operátorem aj.),

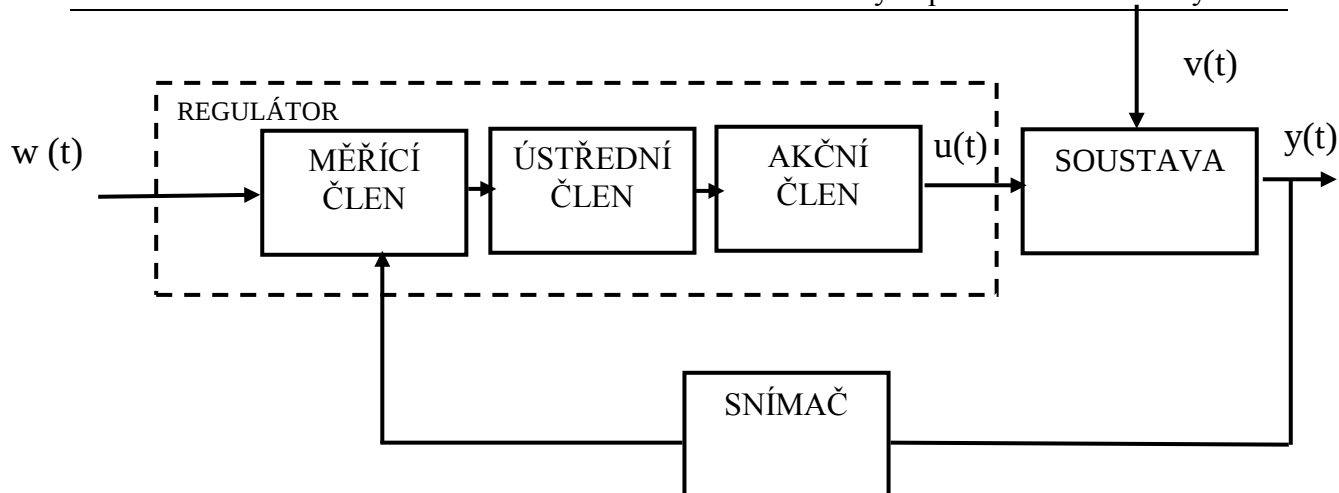
- **propojení jednotlivých procesů do automatizovaných systémů řízení** (zajištění funkce hierarchického systému řízení větších technologických celků, což předpokládá možnost předávání informací mezi jednotlivými systémy řízení, zvláště pak mezi různými stupni hierarchické struktury ASŘ).

□ **Hierarchické dělení řízení výrobních podniků**

- **dlouhodobé plánování a koncepční řízení** (koncepce rozvoje a orientace podniku, investice, obnova základních výrobních prostředků, průzkum trhu),
- **správa výrobní soustavy a vytváření základních souborů dat** (požadavky na odbyt, bilance materiálu a energií, statistické informace a mzdy),
- **zpracování zakázek a plánování jejich výroby** (plán výroby podle zakázek rozpracovaný až na směny, kontrola průchodnosti zakázek výrobou),
- **operativní řízení výroby** (realizace plánu po jednotlivých směnách),
- **řízení technologických procesů.**

□ **Dělení ASŘ TP z hlediska jejich funkce**

- **prostředky pro získávání informací z technologického procesu.** Charakteristickým rysem jinak velice různorodých zařízení je zajištění sejmутí okamžitých hodnot vybraných veličin procesu s požadovanou přesností a jejich převedení na signál vhodný pro další zpracování. V blokovém schématu tuto úlohu plní měřicí členy.
- **prostředky pro přenos informací.** Jejich úkolem je zajištění přenosu vstupních (získaných) informací do míst, kde budou dále zpracovány. V blokovém schématu můžeme vysledovat hned čtyři typy přenosu informací. Jednak jde o přenos informací z měřicích členů do ústředních členů řízení a k zařízení pro styk s operátorem, obdobný přenos informací můžeme pozorovat mezi ústředními členy řízení s akčními členy nebo z ovládačů k akčním členům. Jiný typ přenosu informací můžeme pozorovat mezi ústředními řídicími členy a zařízením pro styk s operátorem a konečně poslední přenos informací je zajišťován přenosovým zařízením k nadřazenému systému.
- **prostředky pro technické zpracování informací.** Tyto zajišťují, realizaci všech řídicích funkcí systému, a proto většinou jde o funkčně nejsložitější zařízení celého systému. Z blokového schématu je patrné, že jde o ústřední členy řízení. Ty pak vykonávají určité matematické nebo logické zpracování informací. Většinou to jsou klasické analogové regulátory, polohové regulátory, ale také řídicí počítače nebo mikroprocesorové systémy. Také zařízení pro styk a obsluhu tvoří určitý subsystém prostředků pro zpracování informací, kdy umožňuje komunikaci člověka se systémem.
- **prostředky pro využití informace.** Jejich úkolem je zajištění akčních zásahů do řízeného procesu. Zahrnují tedy zařízení jimiž je možno řídit tok hmoty a energie do řízeného systému. V našem blokovém schématu jde o akční členy.



Obr. 1.2. Schéma regulačního obvodu

1.2. Prvky řídicích systémů

Regulační obvod se skládá z několika důležitých částí (obr. 1.2.). Pro splnění cíle řízení je nutno zajistit správnou funkci jednotlivých prvků obvodu.

Regulátor je zařízení, kterým se uskutečňuje automatická regulace regulovaného systému (soustavy, technologického procesu).

Měřicí člen měří regulovanou veličinu pomocí snímače (čidla), porovnává ji se žádanou hodnotou, vytváří tak regulační odchylku a převádí ji na signál vhodný k dalšímu zpracování. Měřicí člen se zpravidla skládá ze snímače, převodníku a porovnávacího členu.

Snímač (čidlo) je v automatické regulaci měřicí zařízení, které získává informaci o stavu regulované soustavy, tzn. měří velikost dané fyzikální veličiny a převádí ji na jinou fyzikální veličinu, snáze zpracovatelnou či vhodnou k dalšímu přenosu.

Ústřední člen regulátoru je hlavní část regulátoru, sestavená z funkčních členů. Zde se vytvářejí žádané přenosové vlastnosti regulátoru (např. členů P, I, D a jejich kombinace).

Akční člen je koncová část regulátoru, kterou se nastavuje velikost akční veličiny, tedy vstupu do regulovaného systému. Akční člen se ještě dělí na pohon a regulační orgán.

Pohon regulačního orgánu je zařízení ovládající regulační orgán (např. jako pohon je používán servomotor).

Regulační orgán je zařízení, které mění akční veličinu regulované soustavy.

Uvedené členy nemusí být vždy všechny v regulátoru zastoupeny. Mezi snímač a porovnávací člen bývá často zařazen převodník.

Převodník je zařízení, které převádí výstupní veličinu ze snímače na signál vhodný ke zpracování v porovnávacím členu, nebo signál vhodný k přenosu mezi snímačem a porovnávacím členem.

1.2.1. Informace

Informace je jakékoliv směrované sdělení nebo zpráva o charakteristických stavech systému a procesu nebo jejich části.

Novější rozdělení automatizačních prostředků zavádí místo pojmu signál obecnější pojem informace, zahrnuje další přídavná zařízení i vyšší řídicí systémy. Podle toho rozlišujeme prostředky pro:

- získání informace,
- přenos informace,
- zpracování informace a vytvoření řídicí informace,
- záznam a pamatování informace,
- styk s operátorem,
- vytvoření akčního zásahu.

Dělení zařízení podle fyzikální veličiny, která je nositelem informace:

- elektrická,
- pneumatická,
- hydraulická,
- mechanická,
- kombinovaná.

Normalizované (unifikované) signály

Měřená veličina je snímačem převedena na jiný, lépe zpracovatelný druh fyzikální veličiny. Převodník tuto veličinu převede na normalizovaný signál. Zpravidla s rostoucí hodnotou vstupní veličiny roste výstupní signál převodníku. Jsou normalizovány proudové a napěťové elektrické signály (viz tab. 1.1.)

Jednotný signál		Zatěžovací odpor	Max. hodnota zvlnění	
			na vstupu	na výstupu
napěťový	0 – 10 V	min. 2400 Ω	1 %	0,25 %
	-10 – 0 – 10 V	min. 2400 Ω	1 %	0,25 %
proudový	0 – 20 mA	max. 500 Ω	10 %	0,25 %
	4 – 20 mA	max. 500 Ω	10 %	0,25 %

Tab. 1.1. elektrických unifikovaných signálů

Pneumatický unifikovaný signál je 20 – 100 kPa, napájecí tlak 140 kPa. Porovnání jednotlivých prostředků podle druhu použitého signálu je v tab. 1.2.

Druh	Výhody	Nevýhody
Elektrické	- nepotřebují zvláštní zdroj pomocné energie, - snadné vytváření složitějších řídicích systémů,	- nevýbušné provedení je nákladné, - dražší než pneumatické, - drahé servomotory,

	- dobře slučitelné s řídicími počítači.	
Pneumatické	- levnější regulátory než elektrické, - přirozeně nevýbušné, - levné servomotory	- potřebují zdroj tlakového vzduchu, - obtížná slučitelnost s řídicími počítači
Hydraulické	- výkonné servomotory	- jako pneumatické

Tab. 1.2. Porovnání automatizačních prostředků podle druhu signálu

1.2.2. Měření technologických veličin

Cílem měření je zjistit velikost vybrané technologické veličiny. Měření je:

- zdrojem informací o vlastnostech a chování systému i ostatních prvků obvodu,
- zdrojem informací o stavu probíhajícího technologického procesu,
- fyzikální veličina je číselné vyjádření (součin hodnoty a jednotky).

Měření neelektrických veličin

Snímače neelektrických veličin jsou takové prvky, které jsou schopny sledovat jiné neelektrické veličiny a v závislosti na nich dodávat na výstupu veličiny elektrické.

Požadavky na snímače neelektrických veličin:

- co největší přesnost sledování časového průběhu měřené veličiny a jeho jednoznačnost,
- vhodný průběh převodní charakteristiky,
- časová stálost vlastností,
- vhodná časová konstanta,
- malá závislost na okolních parazitních vlivech (např. magnetické pole),
- co nejmenší vliv na měřený obvod,
- spolehlivost,
- jednoduchost konstrukce.

Rozdělení snímačů

Z hlediska využitého principu působení:

- snímače aktivní (generátorové, vysílače)- působením měřené neelektrické veličiny se chovají jako zdroje signálu (např. termoelektrické, piezoelektrické, indukční aj.)
- snímače pasivní – působením měřené neelektrické veličiny mění některý ze svých parametrů, který je dále sledován převodníkem a měněn na signál (např. odporové, indukčnostní, kapacitní aj.)

Podle vstupních neelektrických veličin rozeznáváme snímače:

- mechanických veličin,
 - polohy, výchylky,
 - rychlosti,
 - deformace,
 - síly,
 - zrychlení,
 - vibrací,

- krouticího momentu,
 - tlaku,
 - vakua,
 - průtoku,
 - výšky hladiny,
- tepelných veličin,
 - teploty,
 - množství tepla,
 - hustoty tepelného toku,
- chemických veličin a vakua,
 - pro analýzu plynu,
 - pro analýzu kapalin,
 - pro analýzu pevných látek,
 - snímače vlhkosti,
 - snímače pH,
- záření,
 - světelného záření,
 - ultrafialového záření,
 - infračerveného záření,
 - ionizujícího záření,
- magnetických veličin,
- speciální.

Podle způsobu měření:

- bezdotykové,
- dotykové.

Podle principu, na kterém pracují:

- odporové,
- indukční,
- kapacitní,
- magnetické,
- indukčnostní,
- piezoelektrické,
- termoelektrické,
- optoelektronické,
- světelného záření - generátorové,
- hallovy,
- emisní,
- ionizační,
- polarografické,
- pyroelektrické,
- elektrokinetické.

Správná volba snímače při měření v automatizaci představuje obtížný problém. A je třeba vždy zvážit vhodnost vybraného snímače z mnoha hledisek (přesnost, citlivost, životnost, ekonomická náročnost aj.). Také mnohé snímače jsou vhodné pro snímání více různých veličin. Proto hlavní náplní předmětu Prvky řídicích systémů bude především vysvětlení a

definice jednotlivých fyzikálních principů, na kterých snímače pracují a pak příklady uvedených metod pro vybrané veličiny.



Shrnutí pojmů 1

Regulační obvod, snímač, regulátor, akční člen, pohon, měřicí člen.
Unifikované signály. Metody měření neelektrických veličin.



Otázky 1

1. Co to je snímač?
2. Vyjmenujte základní hlediska dělení snímačů.
3. Které neelektrické veličiny nejčastěji měříme?

2. ODPOROVÉ SNÍMAČE



Průvodce studiem

V následujících kapitolách budou vysvětleny základní metody měření dle principu, na kterém pracují. Je dobré se zaměřit na fyzikální podstaty jednotlivých metod a vždy na základě rovnice či charakteristiky vyvozovat možnosti použití. Smyslem není znát detailní specifika jednotlivých snímačů, ale orientovat se v široké možnosti jejich použití. Nebo naopak znát jejich omezení a parazitní vlivy, které jejich použití limitují.



Čas ke studiu: 8 hodin



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat princip odporových snímačů
- popsat konstrukci a použití odporových snímačů
- vysvětlit funkci odporových snímačů pro měření různých neelektrických veličin



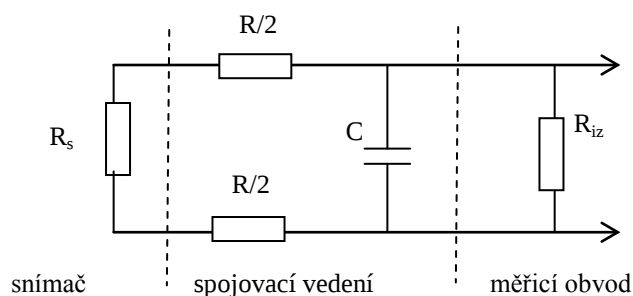
Výklad

Odporové snímače jsou pasivní snímače, které měřenou veličinu převádí na změnu elektrického odporu (jednotkou je 1 ohm).

Elektrický odpor je definován jako $R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega]$

Aby nebyla ovlivněna citlivost snímače a chyby způsobené vedením byly v přijatelných mezích (vliv má teplota, vlhkost, časová stálost apod.), musí platit odporová závislost mezi spojovacím vedením a snímačem jako

$$R \ll R_s \ll R_{iz}$$



R_{iz} – izolační odpor
 R_s – odpor snímače

$$R \ll R_s \ll R_{iz}$$

Obr. 2.1. Elektrické náhradní schéma odporového snímače

Výhody: levné, jednoduché měření, široké použití při měření většiny neelektrických veličin. Změna odporu může být skoková (kontaktní snímače) nebo plynulá.

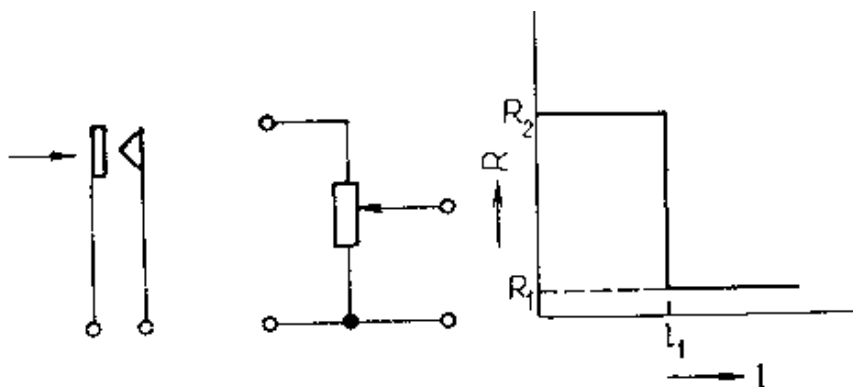


Průvodce studiem

Milí studenti, po tomto jednoduchém úvodu věřte, že máte již kus cesty za sebou. Obdobné schéma zapojení Vás čeká i v dalších kapitolách (indukčnostní, kapacitní snímače). Proto je vhodné pochopit jeho smysl hned na úvod a pro tuto kapitolu za rezistor R_s vždy dosazovat probíraný snímač (např. kontakt, potenciometr, tenzometr, odporový teploměr apod.). Také úvodní vztah elektrického odporu platí stále pro celou obsažnou kapitolu. Takže neváhejte nic, už teď máte hezký základ ☺.

2.1. Kontaktní odporové snímače

U kontaktních snímačů dochází ke změně elektrického odporu skokem z hodnoty přechodového odporu kontaktů na hodnotu blízkou nekonečnu. Nejde o měření vstupní veličiny, ale jen o indikaci při dosažení jedné nebo několika hodnot.



Obr. 2.2. Princip kontaktního snímače a závislosti odporu na posunutí kontaktu

Dělení podle uspořádání kontaktního systému:

- pevné (kovové),
- kapalinové (roztoky solí, rtuť).

Ovládání kontaktu:

- přímo (včetně mechanického nebo jiného převodu),
- nepřímo (změnou magnetického pole nebo změnou teploty).

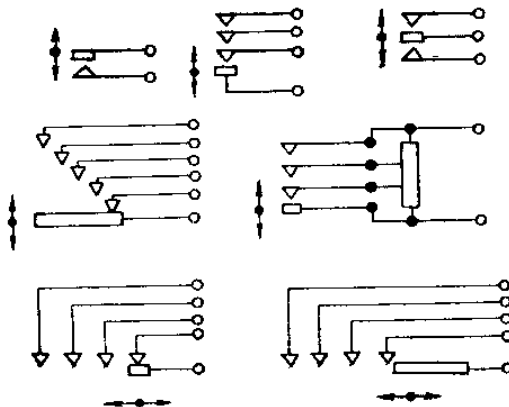
Zapínání, vypínání:

- vratné,
- nevratné (je třeba regenerovat).



CD-ROM

Animace spínání kontaktního odporového snímače.



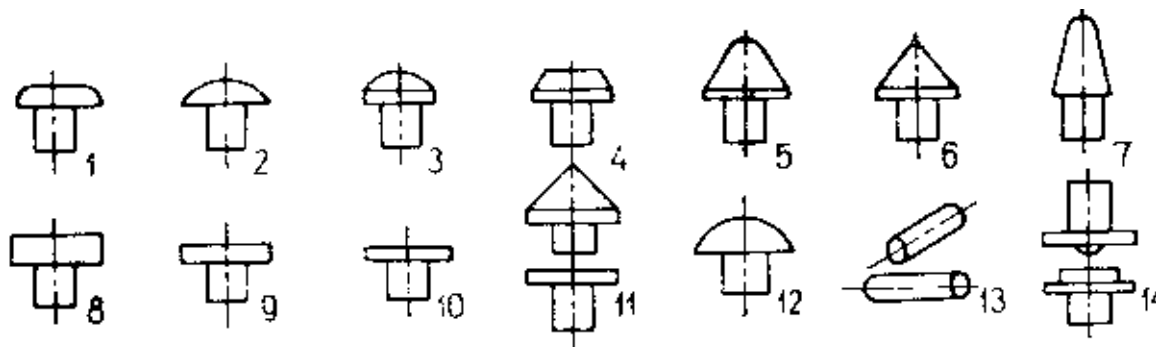
Obr. 2.3. Příklady možného uspořádání kontaktů

2.1.1. Kontaktní systém

Jedná se nejdůležitější část kontaktního snímače (materiál, konstrukce, provedení – určují přesnost, spolehlivost, i dobu života snímače).

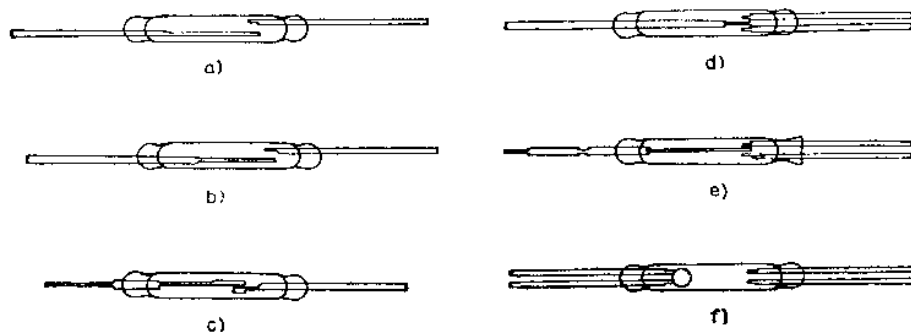
Požadavky na kontaktní systém jsou především malý přechodový odpor a minimální opotřebení. Proto se materiál volí podle pracovních podmínek.

- Ideální dotyková plocha kontaktu je 1/1000 vodivé plochy kontaktu. Při drcení povrchu kontaktů se vlivem proudu odlupují vrstvy oxidů a sirníků (nevodiče a polovodiče) a způsobují izolaci. Tím se vodivá dotyková plocha zmenšuje.
- Rušivé napětí vzniká změnou přechodového odporu vlivem kontaktního tlaku, který je způsoben mechanickými otřesy nebo chvěním. Odstranění je možné díky zvětšení tlakové síly kontaktu.
- Elektrické opotřebení (přenos materiálu kontaktů a jejich opalování) vzniká působením elektrického proudu na kontaktní systém. Při překročení mezního proudu vzniká elektrický oblouk, tj. proud iontů plynu mezi kontakty. U střídavého I je opotřebení menší, kdy průchodem nulou oblouk samočinně zhasíná. U stejnosměrného proudu je třeba oblouk zhasít v komorách. Pro objem přeneseného materiálu platí $V = k \cdot I^3$ (k je materiálová konstanta např. Pt $6 \cdot 10^{-14}$). Vhodné je směřovat proud plusem na hrot a mínusem na plošku, směr přeneseného materiálu usnadňuje čištění kontaktů. Velký problém je i teplota oblouku (až $10\,000\,^{\circ}\text{C}$), kdy opět dochází k opalování kontaktů.
- Mechanické opotřebení vzniká u silného elektrostatického pole (od 10^6 V/cm), kdy se prorazí povrchové vrstvy a na základě tunelového jevu jimi začne procházet proud. Dojde k velkému místnímu oteplení (100-ky $^{\circ}\text{C}$) – zmenšení odporu polovodiče a tím i zvětšení proudu, vodivý most se rozšiřuje až se ustálí. Mechanické opotřebení určuje životnost snímače a uvažuje se 10^6 sepnutí bez změn přesnosti.
- Znečištění kontaktů způsobuje mastnota a prach, což při zahřátí způsobí spalování vrstvy na špatně vodivou uhlíkovou hmotu.
- Kmitání kontaktu způsobuje opakované sepnutí-vypnutí a tak větší opotřebení.
- Přehřívání nastává vlivem vysokých proudů a tím zmenšení přesnosti, narušení funkce snímače.
- Mazání kontaktu – olejem (slaboproudé), jemným tukem (silnoproudé).
- Materiál: Au, Pt, Pt-Ir aj. (pro velmi malé proudové zatížení), Ag, Ag-Pt, Pt-W (pro malá), W, W-Ag (pro střední).



Obr. 2.4. Konstrukce zdvihových kontaktů

Jazýčkové kontakty patří do skupiny nepřímo ovládaných kontaktů, kdy zmagnetizované jazýčky ve skleněné trubičce jsou naplněné inertním plynem. Ovládání kontaktu je možné vnějším magnetickým polem permanentního magnetu nebo elektromagnetu.



Obr. 2.5. Příklady jazýčkových kontaktů

Rtuťové kontakty (kapalinové) jsou ohraničeny baňkou, ve které rtuť tvoří vodivý můstek mezi dvěma nebo více kontakty. Jsou vhodné k snímání teploty, či polohy.

Výhodou je velmi malý přechodový odpor, malé trvalé opotřebení, oblouk je v uzavřeném prostoru (není nebezpečí ohně), malá spotřeba energie pro spínání kontaktu.

Nevýhodou je citlivost na polohu, větší objem kontaktního systému, malá rychlost spínání.

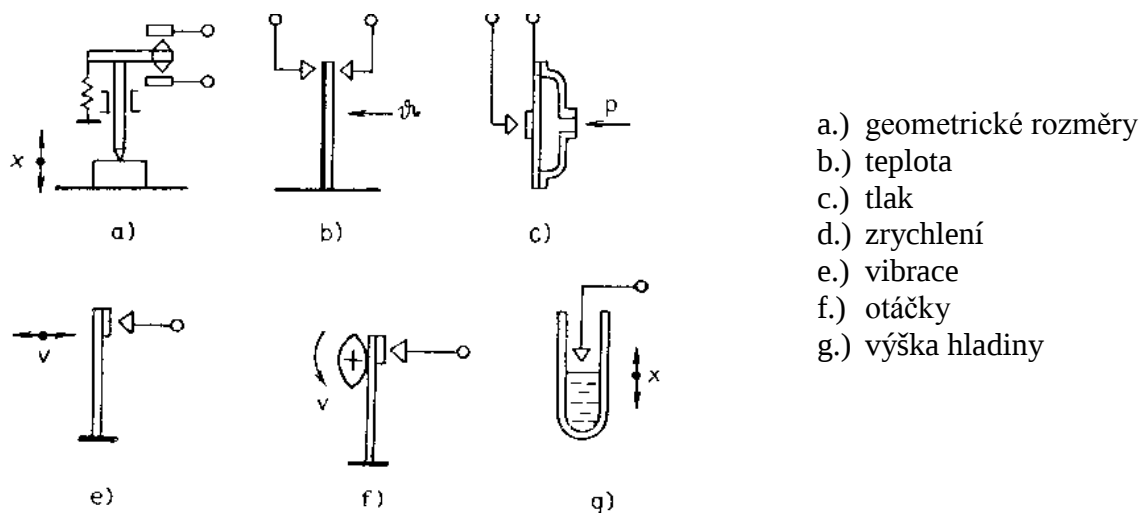
2.1.2. Použití kontaktních snímačů

Kontaktní snímače představují rozsáhlou skupinu snímačů ve všech technických aplikacích. Slouží především pro indikaci stavu měřené veličiny, kdy je měření fyzikální veličiny převedeno na posun kontaktů pomocí různých dilatačních prvků, deformačních prvků apod. Ty budou vysvětleny u jednotlivých metod detailněji.



CD-ROM

Animace použití kontaktního snímače polohy.



Obr. 2.6. Příklady použití kontaktů pro indikace různých veličin

2.2. Odporové snímače využívající stykového odporu

Snímače využívají změny odporu vlivem působení tlaku na uhlíkové či polovodičové vrstvy dle vztahu:

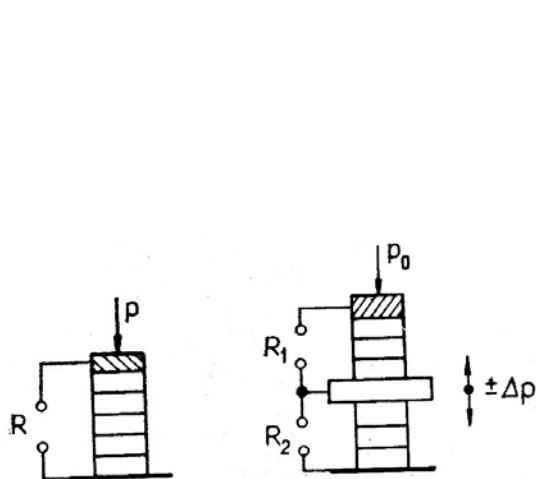
$$R = R_d + R_0 = k_1 \frac{1}{F} + R_0$$

R_d – je stykový odpor,

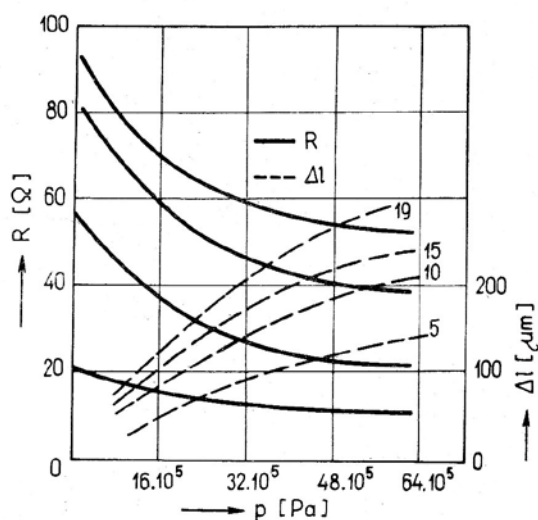
R_0 – odpor základní části tyče,

k_1 – konstanta závislá na geometrii, měrném odporu a mechanických vlastnostech tyče,

F – síla působící v ose tyče.



Obr. 2.7. Jednoduché a diferenční uspořádání uhlíkových desek



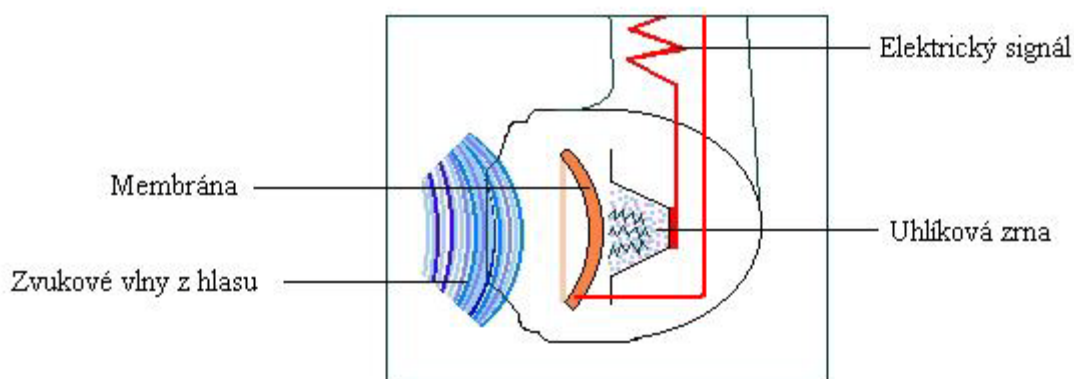
Obr. 2.8. Charakteristika: závislost odporu uhlíkových desek na tlaku pro různý počet desek

Provedení snímače je jednoduché nebo diferenciální. Materiál je elektrodový uhlík či polovodič, průměr destiček 5-10 mm, tloušťka 0,5-3,5 mm (sloupce 10-15 destiček). Chyba snímače je dána změnou teploty (změna odporu, geometrické rozměry) a hysterezí.

Výhodou je vysoká citlivost, jednoduchá konstrukce, velký výstupní signál. Použití snímače v hrubých provozech při měření tlaku, zrychlení, deformace.

Příklad 2.1.

Uhlíkový mikrofon byl prvním prakticky použitelným mikrofonem. Membrána stlačuje uhlíková zrnka, čímž mění jejich odpor. Mikrofon umožňuje přímo modulovat procházející signál, čehož se využívalo na počátku 20. století, kdy ještě nebyly k dispozici zesilovací prvky. Uhlíkové mikrofonní vložky se dlouhá léta používaly v telefonních přístrojích.



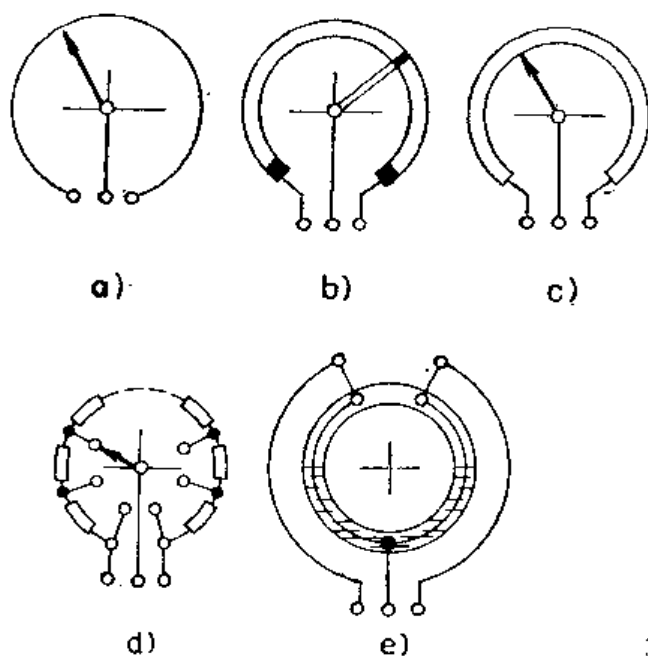
Obr. 2.9. Příklad uhlíkového mikrofonu



2.3. Odporové snímače polohy – potenciometry

Převádí měřenou neelektrickou veličinu na polohu kontaktu, který se pohybuje po odporové dráze snímače (většinou vinutý odporový drát). Výhodou je, že se jedná o jednoduché, levné a spolehlivé snímače.

Použití snímače je vhodné v měřicích zařízeních, měření polohy úhlové, indikace polohy (hladina), snímače tlaku, měření vibrací a zrychlení (lineární i úhlové), měření geometrických rozměrů.



- a.) s jedním odporovým vodičem,
 b.) odporová dráha tvořena elektrolytem,
 c.) odporový drát na nosné podložce,
 d.) dráha tvořena stupňovitými odpory
 e.) sběrač vytvořen rtuťovým zkratem
 části odporové dráhy

Obr. 2.10. Základní typy potenciometrů s kruhovou dráhou

Základní vlastnosti potenciometru jsou definovány rovnicemi

$$U_2 = R_z I_z = \frac{R_2}{R_1 R_2} U_1$$

Pak pokud volíme

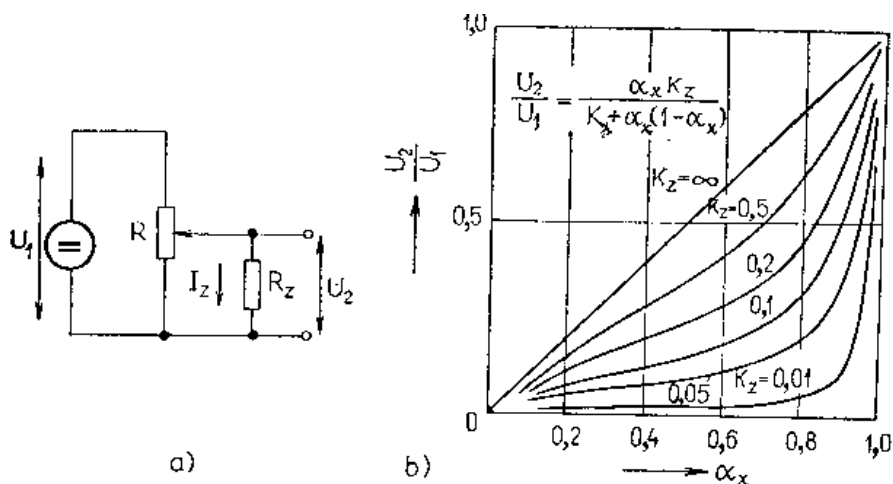
$$R_1 = (1 - \alpha_x) R$$

$$R_2 = \alpha_x R$$

$$K_z = \frac{R_z}{R}, \text{ kde}$$

K_z je činitel zatížení.

$$U_2 = \frac{\alpha_x}{1 + \frac{\alpha_x(1 - \alpha_x)}{K}} U_1 \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \frac{\alpha_x K_z}{K_z + \alpha_x(1 - \alpha_x)}$$



Obr. 2.11. Zapojení potenciometru do obvodu a základní charakteristika potenciometru



Průvodce studiem

Milí studenti, nesnažte se učit odvozování vztahů z paměti a chápat všechny vzorce jako dogma. Zapojení potenciometru a odvození výstupní charakteristiky Vám má pouze dokreslit jeho výrazné **nelineární** závislosti.

Konstrukce potenciometrů

Kruhové - odporový drát je navinut na pásku definovaného tvaru, který je stočen do kružnice, kdy sběrač sleduje dráhu na okraji pásku (snímače polohy, až 100 kΩ, přesnost 0,1%).

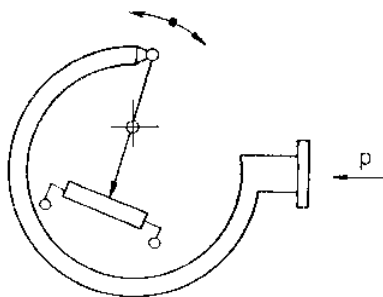
Deskové - snímače se sinusovou nebo kosinovou funkcí (0-360° při neomezeném otáčení), odporový drát je na desce, mající 4 sběrací kontakty v rozích a otáčející se kolem středu (max 150 ot/min, průměr do 100 mm).

Šroubovicové - odporový drát navinut na izolovaném Cu nebo Al vodiči o průměru 2-3 mm. Ten je svinut do pevně uchycené šroubovice. Sběrač sleduje vnitřní dráhu šroubovice (není veden nosným vodičem-má samostatné vedení), 3-40 závitů (rozsáhlá skupina).

Rtuťové - použití v automatizační technice. Ve skleněném prstenci je tenký odporový drát s vyvedenými konci a středem a do poloviny obsahující Hg. Je citlivý na polohu a vibrace.

Elektrolytické - jsou dány vodivostí elektrolytu (pohybem kladných a záporných iontů). Výhodou je malá ovládací síla.

Speciální - např. plastický potenciometr- kroužek z vodivé hmoty (zalisování plnidla do termoplastického materiálu-hladký povrch dráhy sběrače) - velká rychlost, malé opotřebení, velká doba života.



Obr. 2.12. Snímač tlaku s potenciometrem a Bourdonovou trubicí

**Průvodce studiem**

Pokud již nyní chcete lépe poznat Bourdonovu trubicí, stačí zalistovat na kapitole 11.3.1. Průmyslové měření tlaku.

2.4. Odporové snímače deformace – tenzometry

Odporové tenzometry využívají principu změny vodivosti kovů či polovodičů při jejich deformaci (objeveno 1856, Kelvin).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \text{ kde}$$

ρ je měrný odpor ($\Omega \cdot \text{m}^{-1}$).

Změna odporu odporového článku je možná změnou měrného odporu a změnou jeho rozměrů (l , S , d). Poměrnou deformaci měřeného tělesa ε definujeme jako podíl deformace a jednoho z původních rozměrů tělesa

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}.$$

Pro oblast pružné deformace platí Hookeův zákon, tzn. poměrná deformace je úměrná mechanickému napětí materiálu

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \text{ kde}$$

E je modul pružnosti v tahu měřeného tělesa.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} = K \cdot \varepsilon, \text{ kde}$$

K je součinitel deformační citlivosti tenzometru (např. pro konstantan je 4-5%).

**Průvodce studiem**

Drilování fyzikálních vztahů je mnohdy zcela zbytečné. Pro pochopení a snadné vysvětlení principu tenzometrů jsou však výše uvedené zákonitosti nezbytné. Na jednoduchých rovnicích popíšete jejich funkci rychle a přesně. V podstatě se jedná o jednu novou rovnici – Hookeův zákon, který vhodně aplikujete ve vztahu pro elektrický odpor.

Měření mohou být:

- statická,
- dynamická.

Rozdělení snímače podle konstrukce:

- s volným odporovým článkem (příložné),
- s odporovým článkem na podložce (lepené).

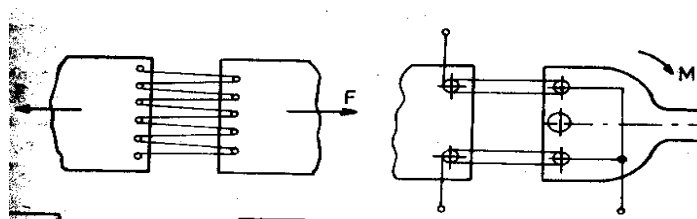
Podle materiálu:

- kovové
 - s kruhovým průřezem vodiče,
 - obdélníkovým průřezem vodiče,
- polovodičové
 - homogenní (bez přechodu),
 - homogenní vytvořené v polovodičovém pružném prvku (např. v membráně),
 - s jedním nebo více přechody PN (např. tenzodiody).

2.4.1. Kovové tenzometry

Snímače s volným odporovým článkem (příložné)

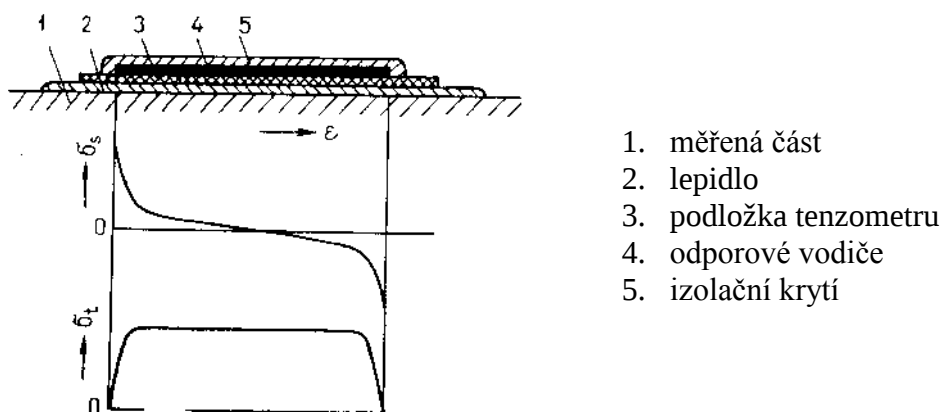
- snímače, kde odporové drátky jsou uchyceny soustavou držáků (je možno je znovu použít),
- aktivní odporový článek není přilepen,
- nejsou tak problémy s přenosem deformace na celý povrch odporového článku,
- možnost použití při vyšších teplotách (až 310 °C),
- např. měření deformací přehrad, tlaků, talkových sil, zrychlení.



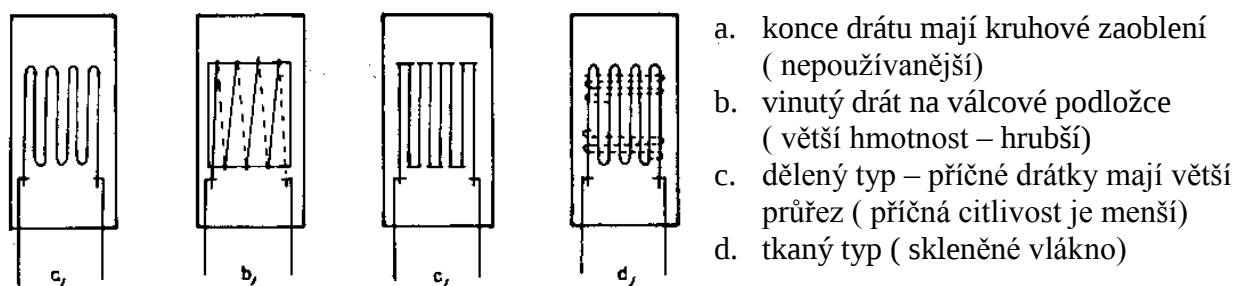
Obr. 2.13. Základní principy volných tenzometrů

Snímače lepené

Odporový článek má tvar mřížky a je přilepený na podložce, která se pak celá přilepí na měřenou část.

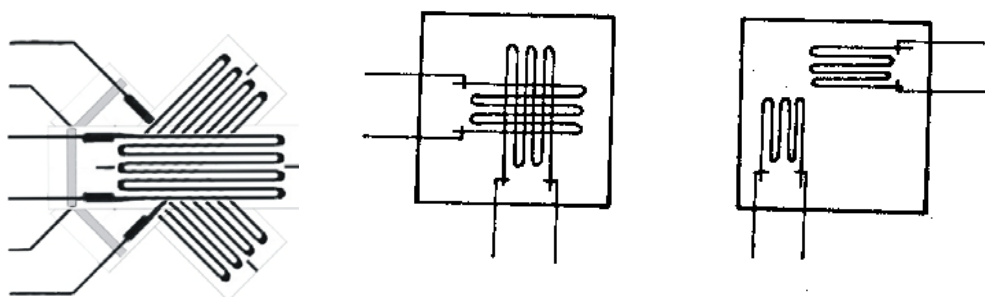


Obr. 2.14. Uspořádání odporového lepeného tenzometru s tahovým a smykovým napětím.



Obr. 2.15. Základní typy lepených odporových tenzometrů

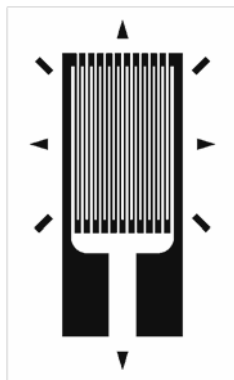
K měření ve více směrech používáme sružené tenzometry, kdy na jedné podložce je umístěno několik vhodně orientovaných vinutí. Mohou být umístěna vedle sebe nebo přes sebe.



Obr. 2.16. Sružené snímače

Mezi lepené snímače patří i speciální - **fóliové tenzometry** – s obdélníkovým průřezem drátku (další vývojový stupeň předchozího provedení) tloušťka fólie 1-10 μm . Výhody jsou:

- větší pracovní rozsah (možnost zvětšení proudového zatížení až na 0,5 A),
- vysoká citlivost,
- nosná podložka je papír, umělé hmoty, azbest, tkaniny apod.,
- lepidla na bázi termoplastů, fenolové pryskyřice, keramické tmely.



Obr. 2.17. Fóliový tenzometr

Přesnost měření ovlivňuje především příčná citlivost snímače a teplota. Příčnou citlivost ovlivníme zvětšením průřezu vodiče. Největší problém měření je kompenzace vlivu teploty. S teplotou snímače se mění mechanické i elektrické parametry (změna odporu, změna součinitele deformační citlivosti K , změna parametrů lepidla i podložky, vznik parazitního termoelektrického napětí). Nejčastější způsoby kompenzace teploty je kompenzace dalším snímačem se stejnou konstrukcí i vlastnostmi, kdy se umístí do sousedního ramene měřícího můstku (princip Wheatsonova odporového můstku) a je tak vystaven stejným teplotním vlivům. Další možnosti jsou autokompenzace či korekce výsledků. Na chybu snímače má vliv i hystereze a nelineární průběh charakteristiky.

2.4.2. Polovodičové tenzometry

Dělíme z hlediska materiálu na:

- monokrystalické (řez monokrystalu nejčastěji z křemíku vodivosti P, či uhlíkové krystaly získané růstem v plynné fázi, nebo epitaxní vrstvy a dendridy),
- polykrystalické (jsou to umělé směsi jako uhlík či bakelitový lak) – jejich vývoj již skončil.

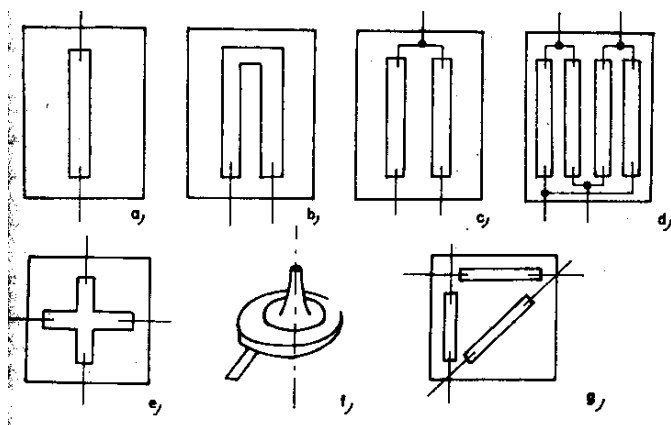
Součinitel deformační citlivosti závisí:

- na krystalografické orientaci,
- druhu vodivosti (P, N),
- na měrném odporu.

Konstrukce polovodičového tenzometru

Nejvýhodnější jsou tenká vlákna z monokrystalu křemíku nebo fosforu – jsou tvrdé a křehké. Vyznačují se poměrně malou změnou odporu a kvalitním spojením (technologie lepidel). Jejich délka je 3-30 mm, obdobně jako u kovových – přímo uchycené nebo s podložkou.

Typy dle konstrukčního uspořádání:



- a) jednoduchý,
- b) tvar U- nevýhodou je poměrně velká příčná deformační citlivost,
- c) dvojité- dva tenzometry obdélníkového tvaru z polovodičů opačného znaménka K,
- d) tenzometrický můstek – 4 prvky
- e) křížový – pro zjištění směru hlavního napětí,
- f) terčový- kruh nebo čtverec,
- g) sdružené – pro zjišťování směru mechanického namáhání
- h) difúzní – pro měření tlaků, tlakových sil, zrychlení, krouticího momentu...

Obr. 2.18. Typy polovodičových tenzometrů

Parazitní vlivy a jejich kompenzace jsou obdobné jako u kovových tenzometrů. Teplotní závislost má vliv na změnu měrného odporu, změnu součinitele deformační citlivosti, vznik termoelektrického napětí v místě připojení, změnu odporu přípojných vodičů). Kompenzace se provádí:

- korekcí stupnice měřiče,
- použitím kompenzačního tenzometru se stejnou teplotní charakteristikou,
- použitím tenzometru se součinitelem def. citlivosti opačného znaménka zapojených v protějších ramenech můstku,
- použitím termistorů.

Použití odporových tenzometrů

- měření deformace,
- měření tlakové a tahové síly, kdy se pro převod na deformaci využívají deformační prvky,
- měření tlaku (diferenční tlak),
- moment kroucení (deformačním elementem je hřídel),
- zrychlení,
- geometrické rozměry, hladina, průtoky kapalin a plynů aj. (měřená veličina se vždy převede na deformaci, kterou změříme odporovým tenzometrem).



Odměna a odpočinek

Milí studenti, myslím že si zasloužíte malý oddech. Jakmile budete zase svěží, ráda bych zdůraznila význam následující kapitoly. Odporové měření teploty má základní využití nejen v hutním průmyslu, ale i v běžné měřicí a řídicí technice. Posuďte sami ☺.

2.5. Odporové snímače teploty

Měření teploty je založeno na změně ohmického odporu vodičů (či polovodičů) s teplotou.

Dělení podle materiálu:

- kovové – platina, nikl, měď, Ag-Au, paladium aj.,
- polovodičové – polykrystalické.

2.5.1. Kovové teploměry

Využívají závislosti odporu kovů na teplotě, kdy se vzrůstající teplotou roste i odpor kovu. Použitý materiál nemá vykazovat změnu teplotního součinitele odporu s časem (stárnutí) a hysterezi. Odporová závislost na teplotě je dána rovnicí

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2), \text{ kde}$$

α, β - teplotní součinitele odporu

t – teplota vodiče

R_t, R_0 – ohmické odpory při teplotě t , při 0°C .

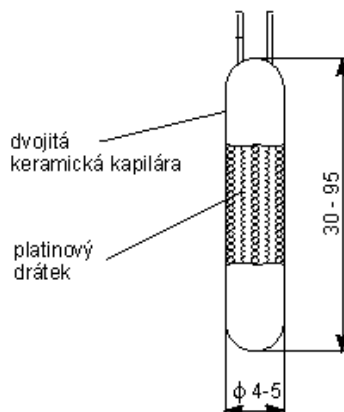
Požadavky na materiály vybraných kovů:

- fyzikální a chemická stálost v rozsahu měřených teplot,
- vysoký teplotní součinitel odporu,
- maximálně lineární závislost v měřeném rozsahu.

Srovnání nepoužívanějších kovů

Materiál	$\alpha \cdot 10^{-3} [\text{K}^{-1}]$	Meze použití [$^\circ\text{C}$]
Pt	3,85 až 3,93	- 200 až 850
Ni	6,17 až 6,70	- 60 až 200
Cu	4,26 až 4,33	- 50 až 150

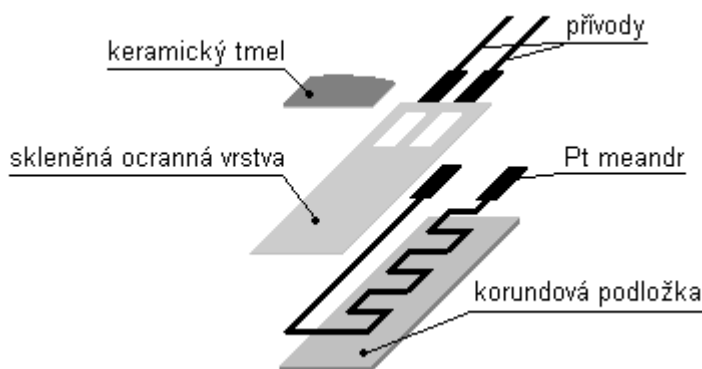
Čidlo odporového snímače teploty je nejčastěji tvořeno spirálovitě stočeným tenkým drátkem (ϕ 0,05 mm), zataveným do keramického nebo skleněného tělíska. Tělísco je pak často uloženo v ochranné trubici a v ochranné jímce.



Obr. 2.19. Platinový odporový teploměr

Současná výroba

V poslední době se vyrábějí měřicí odpory tenkovrstvou technologií, při níž se platinový odpor vytvoří na ploché korundové destičce technikou napařování a iontového leptání. Struktura takového plošného odporového teploměru je patrná z obr. 4.3. Plošné měřicí odpory s vrstvičkou platiny ve formě jednoduchého meandru mají rychlejší odezvu než odpory drátové, mají obvykle vyšší odpor a jsou levnější. Drátové odpory jsou však časově stálejší.



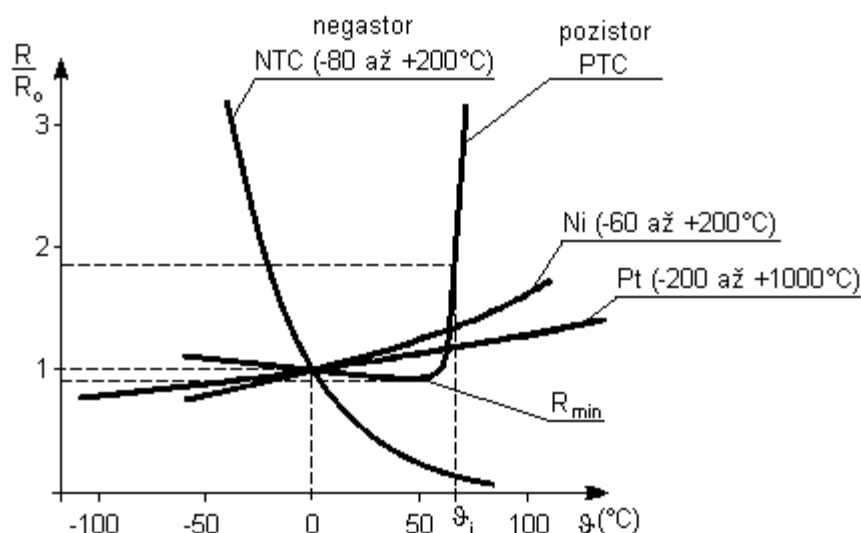
Obr. 2.20. Plošný odporový teploměr

Teploměr Pt 100 (základní odpor při 0 °C je $R_0 = 100 \, \Omega$) – je to absolutní měřidlo (velikost odporu je přímo úměrná velikosti teploty), je vyroben z fyzikálně čisté platiny 99,93-99,99 % (znečištění Ir, Fe). Používá se jako etalonový v oblasti $-259,34$ až $630,74 \, ^\circ\text{C}$, kde základní odpor je $5 \cdot 10^{-6} \, \Omega$, což odpovídá chybě 0,001 K a u kvalitních i o řád menší. Pro vyšší teploty nad $1000 \, ^\circ\text{C}$ je nutno užívat vysoké čistoty Pt, ale ta je citlivá na znečištění vlivem difúze cizích látek.

Ni teploměr pracuje v rozsahu $-60 - 150^\circ\text{C}$, krátkodobě do 180°C . Má velký teplotní součinitel odporu (výhoda). Je levnější než Pt 100, je mnohem citlivější (asi $5 \, \Omega/1^\circ\text{C}$). Používá se např. v klimatizacích.

2.5.2. Polovodičové odporové teploměry

Polovodičové senzory teploty, podobně jako kovové, využívají závislosti odporu na teplotě. Porovnání odporových teploměrů je na obrázku



Obr. 2.21. Závislost odporu na teplotě pro různé materiály

Polykrystalické:

- termistory (NTC-termistory),
- pozistory (PTC-termistory).

Monokrystalické:

- bez přechodu PN,
- s jedním nebo více přechody PN.

PTC-termistory (pozistory) jsou nelineární polovodičové součástky s kladným teplotním součinitelem odporu. Vyrábějí se z polykrystalické ferroelektrické keramiky, např. BaTiO_3 . Jak je patrné z charakteristiky (obr. 2.21.), dochází nejprve k mírnému poklesu odporu, načež v poměrně úzkém teplotním rozmezí elektrický odpor prudce stoupá. Použití pozistorů je dáno tvarem jejich charakteristiky a jsou vhodné pro měření ve velmi úzkém teplotním intervalu, zejména pak pro signalizační účely.

NTC-termistory (negastory) jsou vyráběny spékáním oxidů Fe_2O_3 , TiO_2 , CuO , MnO , NiO , CoO , BaO a dalších. Závislost odporu na teplotě je nelineární a odpor s teplotou klesá podle vztahu

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

R_0 - odpor termistoru při teplotě T_0

R - odpor termistoru při teplotě T

B - materiálová konstanta (veličina úměrná aktivační energii)

$$B \approx \ln \rho \quad B = \frac{\ln R_0 - \ln R}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}}$$



Průvodce studiem

A nyní bych opět ráda připomněla důležitost měření teploty a Vy si prosím ověřte jak dobře jste si zapamatovali fyzikální vztahy pro odporovou teplotní závislost, jak pro kovy, tak pro polovodiče. Jistě jste zaznamenali, že tyto dva odlišné materiály mají rozdílné charakteristiky a doložíte to i graficky.

Termistory jsou vyráběny v širokém rozmezí hodnot odporu od $0,1 \Omega$ až do několika $M\Omega$. Teplotní součinitel je asi o řád vyšší než u kovů. Pro účely měření se používají nejčastěji perličkové termistory ve skleněném držáku. Běžný měřicí rozsah teploty je od -60°C až do $+200^\circ\text{C}$ (výjimečně až do 400°C).

Výhodou termistorů je velká citlivost a malá hmotnost čidla, což umožňuje měření velmi malých a rychlých teplotních změn, bodové měření teploty, měření povrchových teplot apod. **Nevýhodnou** vlastností termistorů je jejich časová nestálost (mění charakteristiky), nejsou opakovatelné (musí se samostatně cejchovat),

Monokrystalické – využívá se teplotní závislost přechodu PN (diody nebo tranzistory). Použití jen ve speciálních případech pro méně přesná měření (např. Zenerova dioda).

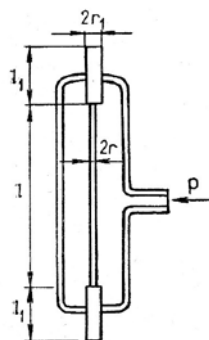


Odměna a odpočinek

Milí studenti, možná Vás potěší upozornění na jisté zjednodušení v chápání pár dalších principů měření. Tyto metody vycházejí z podobného konstrukčního principu (odporový drát žhaven známým proudem je napjat ve skleněné bance), jen účel měření elektrického odporu a fyzikální jev, který zde působí je jiný. Doporučuji v tom nehledat nic složitějšího ☺.

2.6. Odporové snímače vakua – odporový vakuometr

Teplota odporového článku umístěného ve skleněné bance je závislá na tepelné vodivosti okolního plynu a tato je dána tlakem plynu. Čím více molekul plynu, tím se více drátek chladí a tak se mění odpor drátku, který je měřen. Odporový kovový nebo polovodičový článek je žhaven známým proudem nad teplotu okolí.



Obr. 2.22. Princip odporového snímače vakua

Kovový – odporový drátek bývá tenký drát velké délky (30-50 cm), který je pružně napjat na soustavu držáků uvnitř kovové nebo skleněné baňky. Pomocí otvoru se snímač připojuje na vakuovou soustavu. Baňka má průměr 20 až 30 mm a délku kolem 100 mm. Měřicí drát bývá z Pt, Ni, W, apod. někdy používáme termočlánek.

Polovodičový – většinou termistor, (měření vakua až 10⁻⁴ Pa), měřicí zařízení je poměrně složité – snímač i měřicí prostor musí být teplotně stabilizovaný.

2.7. Odporové analyzátory plynů

K měření se nejčastěji používá platinový drátek, který je žhaven známým proudem a vznikající teplo je odnímáno vnějším prostředím. Tím se mění odpor drátku. Využívá se čtyř fyzikálních principů. Jsou to jednoduché, nejvíce rozšířené metody a umožňují kontinuální měření. Použití: pro kontrolu spalovacích pochodů, v chemickém i potravinářském průmyslu.

2.7.1. Analyzátory vodivostní

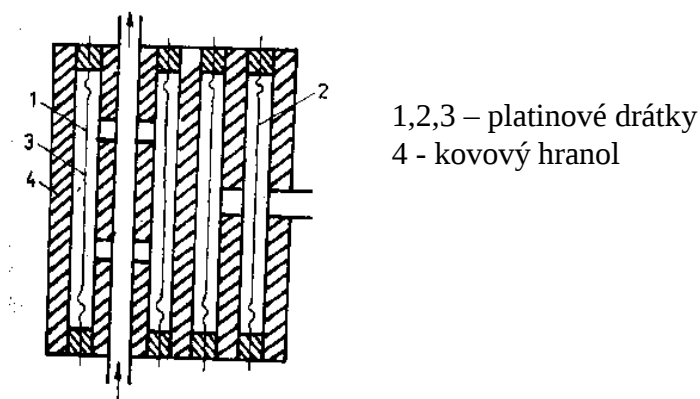
Snímač využívá rozdílné tepelné vodivosti plynů (nejrozšířenější metoda). Pro analýzu se používá měření nepřímé, kdy tepelnou vodivost měřeného plynu porovnáváme s vodivostí plynu standardního. Za srovnávací plyn se nejčastěji volí vzduch, a proto je tato metoda vhodná především pro měření obsahu těch plynů, jejichž tepelná vodivost je ve srovnání s tepelnou vodivostí vzduchu odlišná.

Tabulka tepelné vodivosti plynů, vyjádřená v % tepelné vodivosti vzduchu

Plyn	Relativní tepelná vodivost
Vzduch	100
Vodík	715
Helium	584
Methan	124
Dusík	99
Oxid uhelnatý	96
Oxid uhličitý	58
Oxid siřičitý	34
Kyslík	102

Princip: Ve válcové komoře je napjat tenký drát a je zahříván proudem na teplotu 100 až 150 °C. Při změně teploty se změní odpor a tepelná vodivost plynu.

Uspořádání: 4 válcové komory a střední průtokový kanál. Dvě komory jsou spojeny pomocí otvorů s průtokovým kanálem. Dvě měrné komory jsou porovnávací a naplněny porovnávacím plynem a uzavřeny. Ve všech jsou napjaty drátky o průměru asi 0,05 mm a zapojeny do Wheatsonova můstku. Obsahuje-li měrný plyn např. 20% CO₂, zvýší se teplota drátku o 5 °C oproti původní teplotě ve vzduchu.



Obr. 2.23. Princip vodivostního analyzátoru.

Podmínky použití:

- je třeba definovat průtok plynu snímačem,
- poloha musí být svislá, protože plyn se dostává do měrných komor difúzí,
- stabilizování zdroje můstku,
- konstantní teplota snímače.

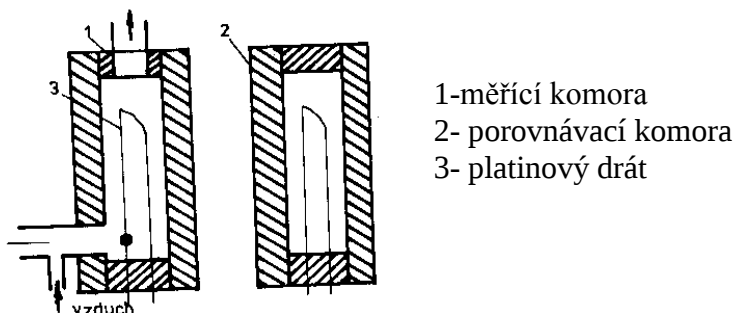
Přesnost měření 0,5 až 1 %. Měření je tím přesnější, čím větší je rozdíl tepelné vodivosti měřeného a srovnávacího plynu. Např. srovnávací médium vzduch se používá pro H_2 , SO_2 , CO_2 a helium nebo vodík pro ostatní plyny podobné vzduchu viz tabulka.

Využití: pro analýzu čistoty plynů (dusík, kyslík, CO, CO_2 , Ar, aj.).

2.7.2. Analyzátory termochemické

Analyzátory využívají termochemickou reakci a pochody se změnami teploty. Reakce plyn s plynem, plyn s kapalinou, kapalina s kapalinou.

Snímač má měřicí a porovnávací komoru. V obou komorách je napjat Pt drátek, který je vyhříván elektrickým proudem. Zahřátý platinový drát slouží jako katalyzátor, je spojen do můstku, který je napájen stabilizovaným zdrojem. Pro dokonalé spálení je nutno přivést i dostatečné množství vzduchu-kyslíku). Reakcí uvolněné teplo zvyšuje teplotu odporového článku. Analyzátory využívající katalytického spalování jsou vhodné jen pro hořlavé plyny. Např. metan – vyžaduje 800 °C, vodík 200 °C. Aktivování drátku (po zanesení katalytickými jedy – sirovodík, fosforovodík) je možno při 1200 °C.



Obr. 2.24. Princip termochemického analyzátoru plynu

Použití převážně pro analýzu vysokopevního plynu.

2.7.3. Analyzátory polovodičové

Analyzátory využívají změnu elektrické vodivosti polykrystalického materiálu (slnutých kyslíčků cínu, zinku, železa). Jestliže se dostane odporový článek do styku s chemicky redukovaným plynem, pak malé množství pohlcuje. Dochází k chemickým reakcím, které zvětšují elektrickou vodivost. Čím vyšší je teplota odporového drátu, tím rychleji tento proces funguje. Jestliže z prostoru snímače odstraním měřený plyn pak odporový článek vylučuje předem přijaté množství plynu a jeho odpor se vrací na původní hodnotu.

Použití: pro jednoduchá zařízení, pro indikaci výfukových plynů u aut, a jiné signální a řídicí účely.

2.7.4. Termomagnetické analyzátory

Snímače využívají silových účinků paramagnetických plynů v magnetickém poli. Využívají magnetické vlastnosti kyslíku.

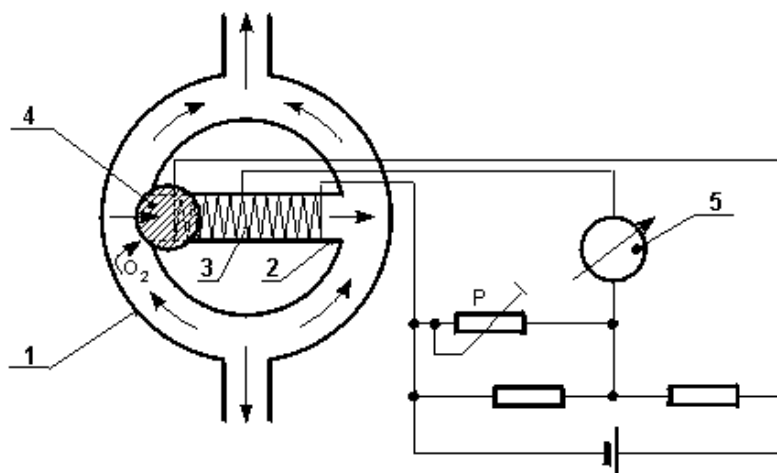
Dělení materiálů dle permeability:

- feromagnetické materiály permeabilita $\mu \gg 1$ (kovy),
- paramagnetické materiály permeabilita $\mu > 1$ (kyslík a některé další plyny),
- diamagnetické materiály permeabilita $\mu < 1$ (plyny).

Využití magnetického větru: vliv nehomogenního magnetického pole na měřený plyn ovlivňuje přitahování molekul kyslíku do míst intenzivnějšího magnetického pole a tím k určitému proudění plynu. Intenzita tohoto magnetického větru závisí na obsahu O_2 v analyzovaném plynu.

Snímač s prstencovou komorou – analyzovaný plyn se přivádí kanálem 1 do prstencové komory a odchází vzhůru. Napříč je umístěna trubice z elektricky nevodivého materiálu (sklo) 2, na níž je navinuto platinové odporové vinutí 4. To je rozděleno na dvě poloviny a tvoří dvě větve Wheatstoneova můstku. Jedna část vinutí je umístěna silném nehomogenním magnetickém poli 3. Odporů jsou v můstku zahřívány na teplotu kolem $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je-li příčná trubice ve vodorovné poloze, pak ji plyn, pokud neobsahuje paramagnetickou složku (např. kyslík) neprochází. Jakmile tuto složku obsahuje, je vtahována do magnetického pole ve směru šipky. Tím vznikne termomagnetické proudění, kterým se nestejněmálně ochlazují odpory vinutí a změnu jejich odporu měříme na výstupu můstku 5. Rychlost proudění plynu, tím i teplota a odpor vinutí jsou úměrné koncentraci kyslíku v analyzovaném vzorku..

Použití: zejména při kontrole spalovacích a dalších oxidačních procesů v chemickém průmyslu, hutnictví, cementárnách, teplárnách apod. Provozní magnetické analyzátory kyslíku využívají i jiných principů než je prstencová komora a vyrábí je celá řada firem.



Obr. 2.25. Termomagnetický analyzátor s prstencovou komorou

2.8. Odporové snímače rychlosti prostředí (anemometry)

Snímač rychlosti má obvykle tvar sondy (válec, fólie, polokoule), na jehož konci je upevněn vlastní měrný odporový článek (Pt, Pt-Ir, W apod.), který je průchodem proudu ohříván na teplotu vyšší, než je teplota okolí. Měrný článek (vodič) je napjat mezi dvěma držáky spojenými s nosnou částí. S rostoucí rychlostí media roste protékající proud drátkem (mění se odpor článku). Snímače slouží pro měření rychlosti plynů a kapalin, také pro proměrování rychlostních polí, pro dynamické měření a pro měření při vysokých teplotách. Realizace odporových článků pomocí kovů (Pt, Ir, W aj.) nebo polovodičů (termistory, monokrystaly).



- 1- měrný článek
- 2 - držáky
- 3 - nosná část

Obr. 2.26. Princip odporového anemometru



Průvodce studiem

Milí studenti, možná je čas najít tu správnou osobní motivaci k učení tohoto předmětu. Před následující kapitolou proto navrhuji popřemýšlet o tom, kde všude ve vašem okolí se můžete setkat s nějakými zajímavými aplikacemi snímačů. Našli jste? Pokud ano, věřím že snímače záření jsou jistě jedny z nich.

2.9. Odporové snímače záření

Snímače převádí světelné, tepelné, radiační záření na změnu odporu snímače. Obecně se snímače dají dál rozdělit dle materiálu použití na kovy a polovodiče. Zde se především zaměříme na snímače světelného záření, které se dále využívají v optických měřeních.

2.9.1. Odporové snímače světelného záření

Fotoelektrický jev či fotoefekt je fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány (vyzařovány, emitovány) z látky (nejčastěji z kovu) v důsledku absorpce elektromagnetického záření (např. rentgenové záření nebo viditelného světla) látkou. Emitované elektrony jsou pak označovány jako fotoelektrony a jejich uvolňování se označuje jako fotoelektrická emise (fotoemise). Snímače záření pracují na principu fotoelektrického jevu s čímž je nutno uvést některá kvantová vysvětlení.

Planck svou kvantovou hypotézou vyslovil předpoklad, že záření vydávané a pohlcované jednotlivými atomy zahřátého tělesa nemůže mít libovolnou energii, ale vždy je vyzařováno nebo pohlcováno v určitých **dávkách (kvantech)**. Energie takového záření je úměrná frekvenci a konstantou úměrnosti je tzv. Planckova konstanta h .

Energie záření $W = h \cdot \nu$, kde

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

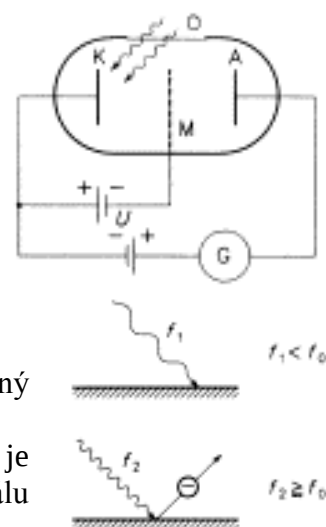
Z uvedené rovnice je vidět, že energie uvolněného elektronu závisí pouze na frekvenci dopadajícího záření a ne na jeho intenzitě. Při hodnotě $E > 2\text{eV}$ (energie fotonu pro žluté světlo) foton vyrazí elektron z polovodiče, ten zvedne vodivost a sníží se odpor polovodiče. Kvantové vlastnosti záření se výrazně projevují při fotoelektrickém jevu, který pozorujeme u kovů (vnější fotoelektrický jev) a polovodičů (vnitřní fotoelektrický jev).

Vnější fotoelektrický jev

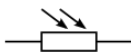
Při vnějším jevu se působením záření uvolňují elektrony, které unikají z povrchu látky. Zinková destička (katoda) je připojena přes galvanometr k zápornému pólu zdroje a před katodou je kovová síťka (anoda). Po ozáření krátkovlnným zdrojem se z katody uvolňují elektrony, které jsou přitahovány k anodě a dochází k uzavření elektrického obvodu a galvanometrem prochází malý proud (fotoproud).

Zákonitosti vnějšího fotoelektrického jevu:

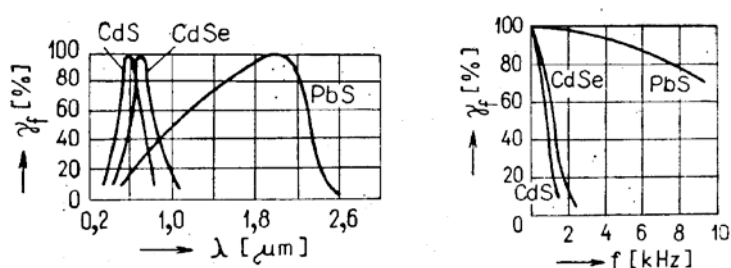
1. Pro každý kov existuje **mezní frekvence** f_m , při níž dochází k fotoemisi. Je-li $f < f_m$, k fotoelektrickému jevu nedochází.
2. Elektrický proud (počet emitovaných elektronů) je přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření.
3. Rychlost emitovaných elektronů (tedy i jejich kinetická energie) je přímo úměrná frekvenci dopadajícího záření, závisí na materiálu katody a nezávisí na intenzitě dopadajícího záření.



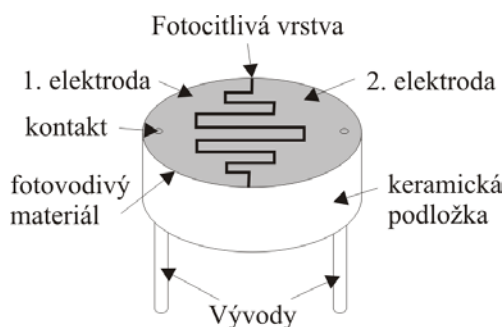
Obr. 2.27. Princip fotoelektrického jevu

Fotorezistor

- pasivní elektronická součástka využívající materiály, které mění svůj reálný odpor při různých osvětleních.
- vlivem světelného toku se odpor zmenšuje (kladný vnitřní fotoelektrický vodivostní jev).
- pokud není osvětlen, má velký odpor, který se po osvětlení snižuje a obvodem s fotorezistorem prochází proud úměrný intenzitě dopadajícího záření.
- při dopadu fotonů jsou pohlcovány a elektrony přecházejí z valenčního pásma do vodivostního, přičemž vznikají páry elektron-díra. Světlem vybuze­né nosiče jsou nerovnovážné, přestane-li působit záření, dochází k rekombinaci nerovnovážných nosičů a polovodič se vrací do původního stavu.
- definujícím parametrem je citlivost, neboli ohmická změna při určité změně osvětlení.
- v závislosti na použitém materiálu je možno detekovat viditelné, ultrafialové a infračervené světlo.
- má poměrně malou odezvu na změnu osvětlení- Při silném osvětlení reaguje rychleji 0,001s, při malém osvětlení trvá ustálení odporu až sekundy. Odpor ve tmě je cca 1 MOhm. (InSb, CdS).
- závislost fotoelektrického proudu na osvětlení má u fotorezistoru nelineární charakter (CdS, CdSe a PbS). V oblasti malých osvětlení (5-50 luxů) je u některých fotorezistorů charakteristika lineární.
- používají se v čidlech pro spínání pouličního osvětlení, v soumrakových spínačích, ve fotoaparátech, fotozávorách a optočlenech. Uplatňují se jako součásti požárních hlásičů, také v kalorimetrech a regulační technice a při podobných aplikacích.
- konstrukčně fotorezistor může vypadat různě, specifikuje ho otvor pro průchod světla. Fotorezistor není konstruován na větší výkon. Jeho parametry udává typové označení a zpravidla nás informují o závislosti světla a odporu pouze grafy. Fotorezistory dnes nahrazují fotodiody.



Obr. 2.28. Spektrální a frekvenční charakteristiky fotorezistoru



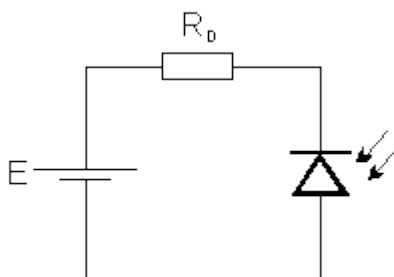
Obr. 2.29. Konstrukční uspořádání fotorezistoru

Spektrální charakteristika udává citlivost fotorezistoru na záření o určité vlnové délce. Frekvenční charakteristika popisuje dynamické vlastnosti fotorezistoru.

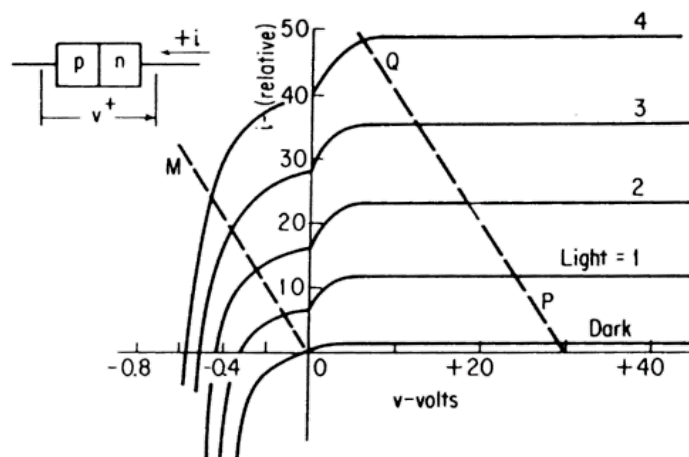
Fotodioda



- aktivní polovodičová součástka reagující na světelné záření.
- využívá vnitřní kladný fotoelektrický jev v polovodiči na přechodu PN, kdy se generuje pár elektron-díra v blízkosti přechodu PN při dopadu záření o dané vlnové délce. Dopadá-li světlo, zvýší se koncentrace minoritních nosičů, dojde k difúznímu toku minoritních nosičů náboje. VA se liší od běžné diody tím, že neprochází začátkem a vykazuje proud v závěrném směru, který je úměrný osvětlení.
- její reakce na světlo je dána vznikem rozdílností potenciálů na PN přechodě. Při dosažení určité hranice osvětlení je přechod příliš dotovaný částicemi a je schopný dodávat elektrickou energii jako baterie.
- pracuje ve dvou režimech. V odporovém zapojení po osvětlení snižuje svůj odpor v závěrném směru (chová se jako spotřebič), v hradlovém zapojení na elektrodách vzniká napětí a fotodioda se stává zdrojem stejnosměrného napětí.
- konstrukčně se řeší jako článek nebo do tvaru LED diody. Článekové řešení umožňuje skládat individuální zdroje elektrické energie. Obecně platí, že článek fotodiody dodává velmi málo elektrické energie. I velké plochy solárních článků nedosahují velkých výkonů. Solárních článků se využívá u nízkovýkonových spotřebičů (kalkulačky apod.).
- fotodiody používáme k měření osvětlení, snímání dat (v minulosti se tak například snímala data z děrných štítků), v automatizaci. Rychlé fotodiody se používají v optických spojích.
- setrvačnost fotodiody je podstatně menší než u fotorezistorů a prakticky nezávisí na velikosti osvětlení.
- pro optimální funkci je důležité záření dopadající do bezprostřední blízkosti přechodu. Ve vzdálenosti 1-2 mm má záření již poloviční účinek



Obr. 2.30. Jednoduchý obvod fotodiody , kde $U_D = E - R_D I$



Obr. 2.31.VA charakteristiky fotodiody v závěrném směru

Fototranzistor



- aktivní polovodičová součástka pracující s řízenými dvojicemi přechodů. Jedná se o obdobu klasického tranzistoru s tím rozdílem, že přechod je ovládán světelným zářením. Dle osvětlení (dotování) se mění napěťové a proudové parametry přechodů. Dle použitého zapojení se dá využít jednotlivých efektů. Ačkoliv je báze nahrazena otvorem pro světlo, může fototranzistor místo 2 nožiček mít i vyvedenou bázi, která může řídit citlivost fototranzistoru.
- je citlivější na osvětlení, neboť využívají tranzistorového jevu pro zesílení proudu.
- doba odezvy je větší než u fotodiod (desítky mikrosekund) a vhodnou konstrukcí je lze zkrátit.
- u fototranzistoru se nepředpokládá přílišné zatížení. Definující parametry jsou obdobné jako u tranzistoru.
- použití v optočlenech.

Fototyristor

- spínací čtyřvrstvá polovodičová součástka, u které je sepnutí provedeno pomocí světelného signálu při ozáření řídicího přechodu. Vypnutí je obdobné jako u klasického tyristoru.
- výhodou je možnost spínání spotřebičů velkého výkonu světelným signálem.



CD-ROM

Animace použití fotoelektrického snímače pro měření výšky hladiny.



CD-ROM

Animace reflexního snímače.



Průvodce studiem

Rozsáhlost výše uvedené kapitoly snímačů záření je pro mnohé jistě zastrašující. Ale informace zde uvedené mají dát dostatečný základ pro pochopení fotoelektrického jevu a na příkladech elektronických součástek doložit jejich využitelnost. Pro lepší pochopení se předpokládá, že studenti znají základní vlastnosti polovodičů a jejich význam v elektronice a počítačové technice. Jedná se především o diodu, transistor a tyristor. Na snímače záření se dále budeme odkazovat v kapitole bezdotykové měření teplot 10.2., proto se snažte soustředit aspoň na hlavní pojmy shrnutí kapitoly.

2.9.2. Odporové snímače infračerveného záření (bolometry)

Funkce spočívá v tom, že absorpcí zářivého toku se mění teplota odporového článku a s její změnou se mění i jeho odpor. Snímače pracují obvykle ve spektrální oblasti 0,8 - 50 μm i více. Předností odporových bolometrů je relativně malá časová konstanta.

Rozdělení podle materiálu:

- kovové – platina, nikl, antimon (tloušťka 0,1-3 μm),
- polovodičové – mají větší tloušťku (až 10 μm).

Podle pracovního režimu (teploty) :

- při normální teplotě,
- při nízké teplotě – teplotní součinitel odporu se zvětšuje se snižující se teplotou,
- v supravodivém stavu.

Požadavek: snímač by měl mít co největší citlivost a co nejmenší časovou konstantu, aby mohl pracovat se střídavým zářivým tokem.

Použití: v pyrometrech k měření teploty, ve velmi malých energetických zdrojích (astronomie), k měření malých rozdílů teploty (biologie a chemie), v kosmické a vojenské technice.

2.9.3. Odporové snímače jaderného a rentgenového záření

Snímač využívá změnu vodivosti některých polovodičových krystalů při působení jaderného záření.

Podle uspořádání polovodiče:

- polovodičové snímače bez přechodu PN (pro indikaci částic α , β , γ a rentgenového záření),
- s přechodem PN (velkoplošné diody).

Použití: ve spektrometrii, v aplikované jaderné fyzice, v radiochemii, apod.

2.10. Odporové snímače magnetických veličin

K měření magnetických veličin se využívají elektrické součástky reagující na změnu magnetické indukce změnou elektrického odporu. Jsou to magnetorezistory, magnetodiody, magnetotranzistory.

Magnetorezistor

Elektrická součástka využívající magnetoodporového jevu, který se projevuje změnou elektrického odporu látky při vložení do magnetického pole (více se projevuje u polovodičů a méně u kovů). Magnetoodporový jev je závislý na krystalografické orientaci použitého materiálu. S rostoucí magnetickou indukcí i nelineárně roste odpor. Nevýhodou snímače je značný vliv teploty.

Použití: pro realizaci odporového potenciometru bez sběrače pro lineární a úhlovou polohu, nespojitě snímání polohy, úhlové a lineární rychlosti.

2.11. Odporové snímače vlhkosti

2.11.1. Přímé metody měření vlhkosti

Metody měření můžeme rozdělit na měření pevných látek nebo plynů. Využívá se závislosti

odporu na vlhkosti dle vztahu $R = \frac{A}{\varphi^n}$, kde

R je odpor mezi elektrodami, A je konstanta (dána rozměrem snímače, obsahem soli), φ je relativní vlhkost materiálu, n - závisí na struktuře a druhu látky.

Pro pevné a sypké látky se používá měření elektrické vodivosti mezi dvěma elektrodami. Systém elektrod mezi které je vložena měřená látka je napájena střídavým proudem (nedojde tak k polarizaci elektrod). Měří se např. vlhkost dřeva, obilí, textilu.

Měření vlhkosti plynů a vzduchu je obdobné, protože však nevodivé soli nebo kyseliny ve vlhkém prostředí mění svoji vodivost, je nutno snímač opatřit tenkou vrstvou hydroskopické soli (či chloridem lithia, kyselinou sírovou apod.).

2.11.2. Nepřímé metody měření vlhkosti

Snímače převádí vlhkost na změnu teploty, rozdílu teploty nebo polohy a ty se pak odporově změří.

Psychrometrická metoda

Základem jsou dva teploměry (suchý a mokrý). Suchý měří teplotu vzduchu a mokrý je stále navlhčován vodou přes tkaninu. Vlhký teploměr ukazuje jinou teplotu než suchý, rozdíl teplot se nazývá psychrometrická diference a je nepřímo úměrná relativní vlhkosti.



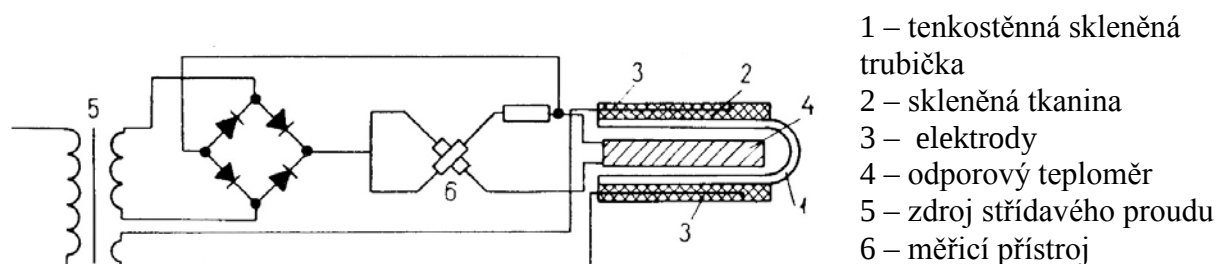
Obr. 2.32. Příklady psychrometrů

Hygrometrická metoda

Využívá schopnost látek udržovat vlhkost v rovnováze s vlhkostí okolního plynu. Při změně vlhkosti vzduchu se vlhkost z látek vylučuje nebo pohlcuje.

Vlasový vlhkoměr (vlas, syntetické hedvábí, celofán, struny živočišného původu) využívá prodloužení vlasu při změně relativní vlhkosti vzduchu od 0 do 100% až 2,5 %. Pracuje i pod bodem mrazu. Převod na elektrický signál se provádí pomocí odporových potenciometrů. Nelineární závislost relativního prodloužení vlasu na vlhkosti je možno korigovat pomocí funkčních potenciometrů.

Elektrolytický vlhkoměr je tenkostěnná skleněná trubička se skleněnou tkaninou nasycenou LiCl s dvěma platinovými elektrodami. Uvnitř trubičky je odporový teploměr. Elektrody jsou napájeny střídavým proudem, dochází k zahřívání elektrolytu a částečně se z něj odpařuje voda. Zvětší se vlhkost v okolí snímače a tím i vodivost elektrolytu, protože pohlcuje vlhkost ze vzduchu. Snímačem tak prochází větší proud a elektrolyt se zahřívá. Měřicí přístroj je připojen na odporový teploměr a je cejchován ve stupních rosné teploty nebo absolutní vlhkosti. Pro měření relativní vlhkosti doplníme přístroj dalším teploměrem, měřící teplotu vzduchu a stupnice je dělena přímo v v relativní vlhkosti. Přesnost měření je 2% s poměrně malou časovou konstantou.



Obr. 2.33. Zapojení elektrolytického hygrometru

2.12. Odporové snímače elektrolytické

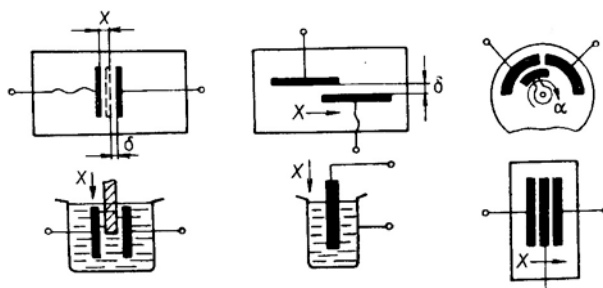
Snímače využívají vlastnosti elektrolytu, kdy je vodivost elektrolytu zajišťována kladnými a zápornými ionty. Obdobně u nich platí Ohmův zákon (nesmí dojít k polarizaci elektrod). Teplotní součinitel je u elektrolytů záporný a poměrně velký, proto je kompenzace nutná.

Snímače koncentrace roztoku (konduktometry)

Měřením elektrické vodivosti roztoků se zjišťuje jejich iontová koncentrace. Měření převádíme na měrnou vodivost, což je vodivost měřeného roztoku mezi elektrodami a jednotkovou objemovou vzdáleností. Základem snímače jsou dvě elektrody s připojeným termistorem umístěny v tělese snímače. Mohou být ponorné nebo průtočné. Přesnost měření 0,1 – 5% podle kompenzace vlivu teploty. Pro roztoky s malou koncentrací elektrolytů používáme elektrody z nerezavějící oceli a pro koncentrovanější roztoky volíme elektrody platinové nebo uhlíkové.

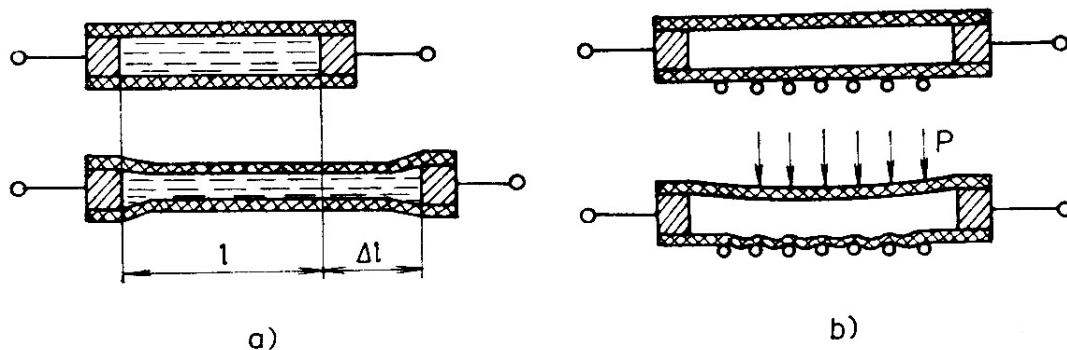
Použití: kromě měření analýzy kapalin (v energetice, chemii, potravinářství, v textilním průmyslu), pro měření malých množství plynů (např. CO, CO₂, SO₂, apod.).

Elektrolytické snímače se dále používají pro měření polohy, deformace, tlaku, kde platí pro odpor $R = 1/(G \cdot \gamma)$, kde γ je měrná elektrická vodivost elektrolytu, a G je geometrická vodivost. Výhodou snímačů polohy je velmi malá ovládací síla.



Obr. 2.34. Základní typy elektrolytických snímačů polohy

Pro snímače deformace jsou v izolační trubici (např. pryžové) umístěny na koncích dvě elektrody, mezi nimi je vodivá kapalina. Jestliže je trubice protahována platí: $\Delta R/R = 2\Delta l/l$.



Obr. 2.35. Elektrolytický snímač deformace (a) a snímač tlaku (b)



Shrnutí pojmů 2

Kontaktní systém. Potenciometr. Tenzometr. Kovové teploměry. Odporová závislost na teplotě. Termistory – negistory, pozistory. Odporové žhavené dráty. Fotoelektrický jev. Fotorezistor. Fotodioda. Bolometr. Magnetorezistor. Psychrometr. Hygrometr. Vodivost elektrolytu.



Otázky 2

1. Zkuste vyjmenovat fyzikální veličiny, které se dají změřit odporovou metodou.
2. Na jakém základním fyzikálním principu odporové snímače pracují (uveďte fyzikální rovnici).
3. Jaký je hlavní problém (parazitní vliv) při měření deformace odporovými tenzometry?
4. Jaké materiály používáme pro měření teploty odporovými teploměry?
5. Jakou závislostí jsou popsány kovové odporové teploměry?
6. Jaké typy záření rozlišujeme?
7. Co to je fotoelektrický jev a co to je foton?
8. Jakým způsobem ovlivňuje vlhkost materiálu jeho elektrický odpor?

3. IONIZAČNÍ SNÍMAČE



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat princip ionizačních snímačů
- popsat konstrukci a použití ionizačních snímačů
- vysvětlit funkci ionizačních snímačů pro měření různých neelektrických veličin

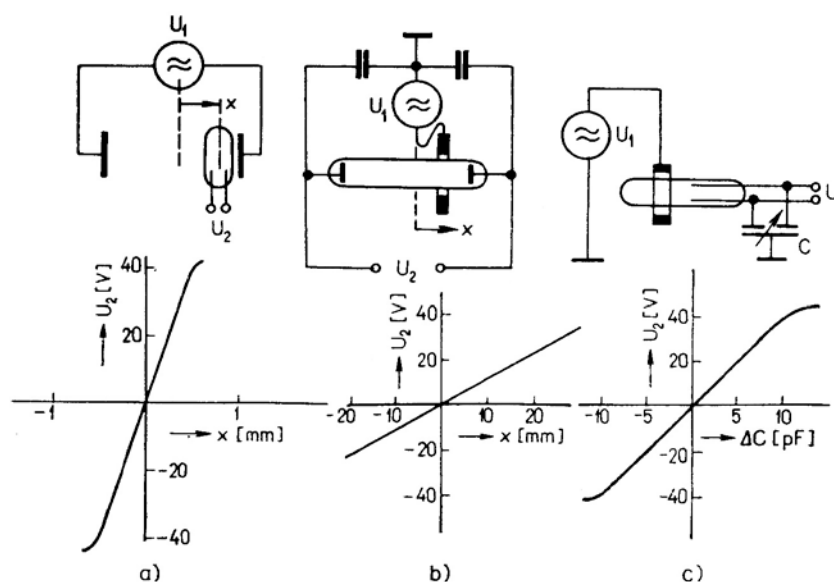


Výklad

Snímače využívají ionizačního proudu, který vzniká pokud připojíme na elektrody umístěné v plynném prostředí zdroj elektrického napětí a vyvoláme ionizaci okolního plynu. Tak nastane mezi elektrodami pohyb elektronů a kladných iontů plynu. Velikost proudu závisí na mnoha faktorech, především na použitém napětí, vlastnostech ionizačního zdroje a geometrických rozměrech snímače.

3.1. Ionizační snímače polohy

Snímač je tvořen skleněnou trubicí s plynem a dvěma elektrodami. Na elektrody kondenzátoru se připojí střídavé napětí, vybudí se uvnitř kondenzátoru střídavé elektrické pole, které zionizuje plyn v trubici. Na elektrodách snímače vznikne stejnosměrné napětí, které je závislé na poloze trubice, rozměrech trubice a elektrod, na druhu plynu, na velikosti a frekvenci napětí. Jako náplň se používá neón, helium. Snímače vykazují vysokou citlivost a dobrou linearitu.



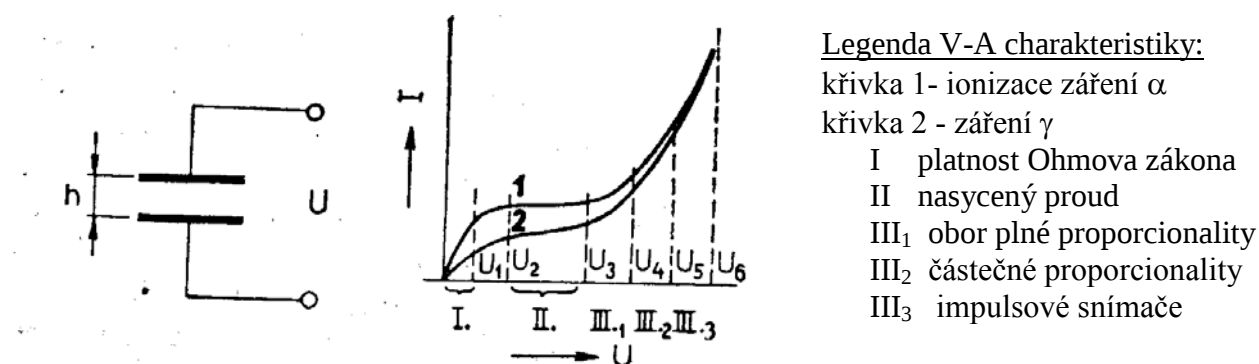
- princip ionizačního snímače polohy
- princip ionizačního snímače pro větší výchylky (ionizační trubice je pevná a pohyblivá je elektroda tvaru prstence)
- spojení ionizačního principu s kapacitním snímačem (ionizační trubice i prstenec jsou pevné a mění se kapacita diferenciálního kondenzátoru)

Obr. 3.1. Principy ionizačního snímače polohy

3.2. Ionizační snímače jaderného záření

Pro popis jevu předpokládáme dvě rovinné elektrody s plochou S a vzdáleností h podle obrázku. A jestliže připojíme na elektrody napětí U při ionizaci plynu v takto vymezeném prostoru prochází vnějším obvodem ionizační proud (nejmenší $10^{-11} - 10^{-15} \text{ A}$).

Kladné ionty a elektrony vznikají ve snímačích jaderného záření buď účinkem nabitých částic a fotonů jaderného záření (v ionizačních komorách) nebo účinkem jaderného záření a elektrického pole (v Geiger-Müllerově snímači)

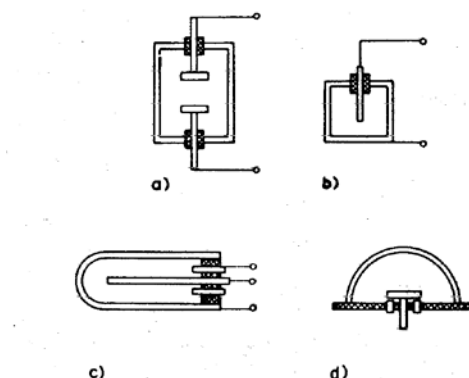


Obr. 3.2. Princip ionizačního snímače jaderného záření a jeho V-A charakteristika

Ionizační komora

Podstatou komory je dvouelektrodivý systém vytvářející kondenzátor, jehož polarizační napětí je voleno v oblasti II (v oblasti nasyceného proudu), jehož hodnota téměř nezávisí na napětí. Ionizační proud procházející snímačem měříme přímo měřicím přístrojem, který má obvykle velký vstupní odpor. Konstrukce závisí na druhu měřeného záření (α , β , δ , γ). Podle tlaku plynové komory je dělíme na:

- nízkotlaké $p < 10^2 \text{ kPa}$ (pro záření velmi slabé intenzity),
- vysokotlaké $p > 1 \text{ MPa}$ (pro měření kosmického záření).



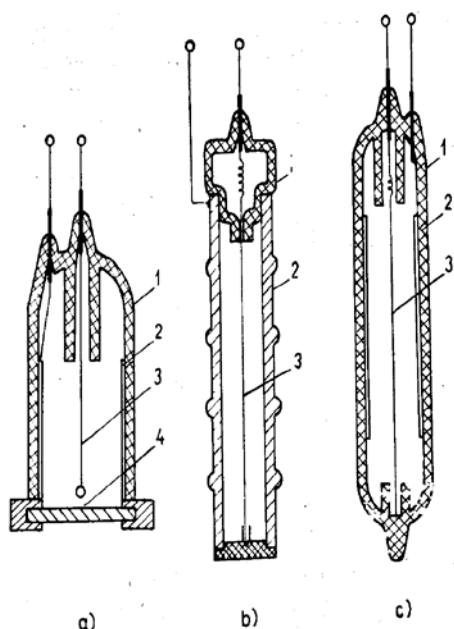
Obr. 3.3. Uspořádání ionizačních snímačů různých typů

Vnitřní elektroda je obvykle anoda a zdroj záření má obvykle tvar tenké fólie nebo vrstvy, aby absorpce ve vlastním vzorku byla minimální. Uvedené typy jsou vhodné pro záření α i β , protože je možné umístit zdroj záření uvnitř snímače, pro záření γ vhodné nejsou, protože

ionizaci způsobují teprve elektrony uvolněné ze stěn snímače. Důležitá je izolace elektrod snímače.

Impulsový ionizační zářič (Geigrův – Müllerův snímač)

Snímač měří α , β , γ a navíc neutrony. Dvě elektrody snímače se připojují na zdroj napětí přes odpor, na němž vznikají impulsy napětí vyvolané průletem ionizující částice snímače. Pracovní obor zářiče je v oblasti III_3 , kde po vniknutí nabitě částice do snímače dojde k lavinovému narůstání počtu iontů vyvolaném nárazovou ionizací a projeví se to v exponenciálním nárůstu proudu a tedy i napětí na sériovém odporu. Po elektrické stránce představuje impulsový snímač kondenzátor, kde napěťový impuls je dán exponenciálními průběhy jak při nabíjení tak při vybíjení.



a.) zvonkový snímač

b.) snímač β záření

c.) snímač γ záření

1 - skleněná baňka

2 - válcová katoda

3 - tyčinková anoda (W, Pt, ocel drátek)

4 - slídové okénko

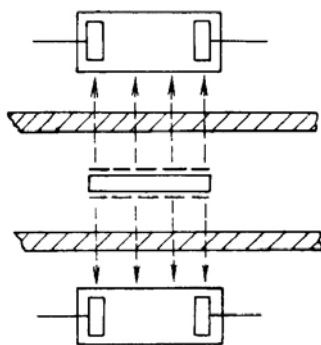
Obr. 3.4. Různé konstrukce Geigerových – Müllerových snímačů

3.3. Použití ionizujících snímačů záření

Snímače mají využití především v jaderné technice (v energetice), a dále pro měření jiných veličin (měření tloušťek, výšky hladiny, analýza látek, měření tlaků, polohy aj.), kde jiné metody nedosahují uspokojivé výsledky nebo jsou z ekonomického hlediska nevýhodné. Nevýhodou je nutnost ochrany obsluhy.

Měření tloušťky materiálu

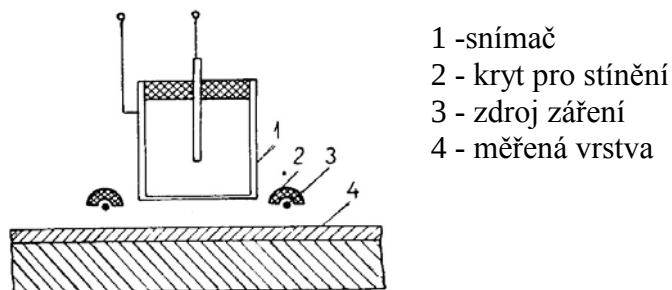
K měření je využito dvou snímačů a srovnávací clona nebo vzorek. Toto uspořádání vylučuje parazitní vliv teploty a tlaku. Důležitý je absorpční součinitel. Pokud je malý, vznikají velké chyby a pokud je velký - jen málo záření dojde k snímači a je pak třeba použít silné zářiče. Jako radioaktivní izotopy se používají Ir, Ta, Co, Th, které se volí pro tloušťky 10 – 150 mm. Použití snímače je vhodné k měření plechů, fólie, papíru, umělé hmoty. Lze měřit kontinuálně, bezdotykově a na velké ploše.



Obr. 3.5. Měření tloušťky využívající jaderného záření.

Měření povrchových vrstev

Měří se tenké vrstvy nanesené na hrubé podložce, kdy odraz záření β se s přibývajícím tloušťkou nanesené vrstvy liší až se přiblíží odrazu tlusté vrstvy. Odražené záření je úměrné tloušťce naneseného materiálu. Odrazová metoda dosahuje menší přesnosti vlivem rozdílu atomových čísel materiálů vrstvy a podložky.

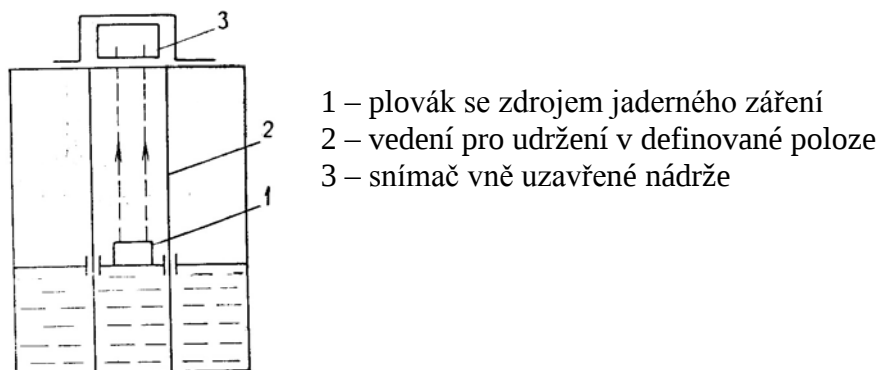


- 1 - snímač
- 2 - kryt pro stínění
- 3 - zdroj záření
- 4 - měřená vrstva

Obr. 3.6. Princip odrazové metody pro měření povrchových vrstev

Hladinoměr

Je vhodný k měření výšky hladiny kapalin nebo sypkých látek především v těžkých provozech s vysokými teplotami a agresivním prostředím. Čím větší je vzdálenost zdroje a snímače, tím je signál slabší. Zdroj i snímač záření lze umístit i vně nádrže.

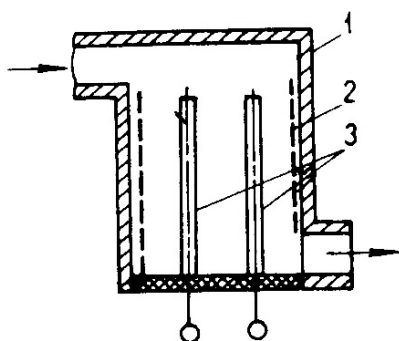


- 1 – plovák se zdrojem jaderného záření
- 2 – vedení pro udržení v definované poloze
- 3 – snímač vně uzavřené nádrže

Obr. 3.7. Princip hladinoměru využívající jaderné záření

Analyzátor plynu

Snímač je použitelný pro plyny, kapaliny i pevné látky. Měření se provádí při konstantní teplotě a tlaku. Vhodný také pro analýzu směsi vzácných plynů, či pro hlásiče požáru. Vyznačují se malou časovou konstantou.

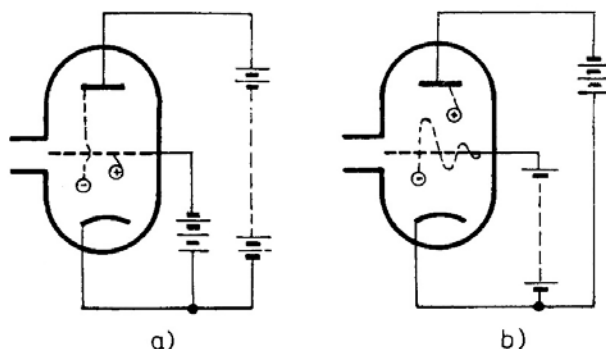


- 1 - ionizační snímač se zkoumaným plynem
- 2 - tenká vrstva která se chová jako zdroj jaderného záření částice α ,
- 3 - odizolované elektrody od tělesa snímače

Obr. 3.8. Princip analyzátoru plynů využívající jaderného záření

3.4. Ionizační snímač vakua termoemisní

Snímač má tři elektrody. Katoda je upravena pro tepelnou emisi elektronů, které jsou přitahovány anodou s kladným potencionálem vůči katodě. Třetí elektroda má proti katodě záporný potenciál a pracuje jako sběrač iontů, které vznikají při srážkách s molekulami zbytků plynu. (jako trioda).



Obr. 3.9. Elektrický obvod termoemisního snímače vakua

- a.) elektron letí od K k A a po dosažení potřebné pohybové energie začne ionizovat. Vzniklé ionty jsou sbírány třetí elektrodou.
- b.) elektrody jsou vyměněny. Elektrony jsou urychleny kladným potenciálem prostřední elektrody, ta má tvar sítě a tak elektrony proniknou do prostoru za elektrodu. Dojde k ionizaci prostředí.



Shrnutí pojmů 3

Ionizace. Ionizační proud. Ionizační komory.



Otázky 3

1. Co to je ionizační proud?
2. Z čeho se skládá ionizační komora?
3. Je ionizační proud zdraví škodlivý?



Odměna a odpočinek

Vážení posluchači, pevně věřím že už jste pochopili, jak s tímto výukovým textem pracovat a nenecháte se množstvím typů snímačů nijak znervóznit. Pamatujte, že nikdo po Vás nebude chtít všechny informace zde uvedené. Neučte se vše nazpaměť a vždy si vyberte nějaký typ snímače (nějak Vám blízký či lépe zapamatovatelný). Určitě se nějaký takový najde a k němu zkuste objasnit fyzikální podstatu daného jevu.

4. INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat princip indukčnostních snímačů
- popsat konstrukci a použití indukčnostních snímačů
- vysvětlit funkci ionizačních snímačů pro měření různých neelektrických veličin



Výklad

Indukčnostní snímače představují další rozsáhlou skupinu pasivních snímačů, kdy měřenou neelektrickou veličinu převádí na změnu indukčnosti.

Indukčnost cívky je definována jako $L = \mu \cdot \frac{S \cdot N^2}{l} \quad [H]$, kdy

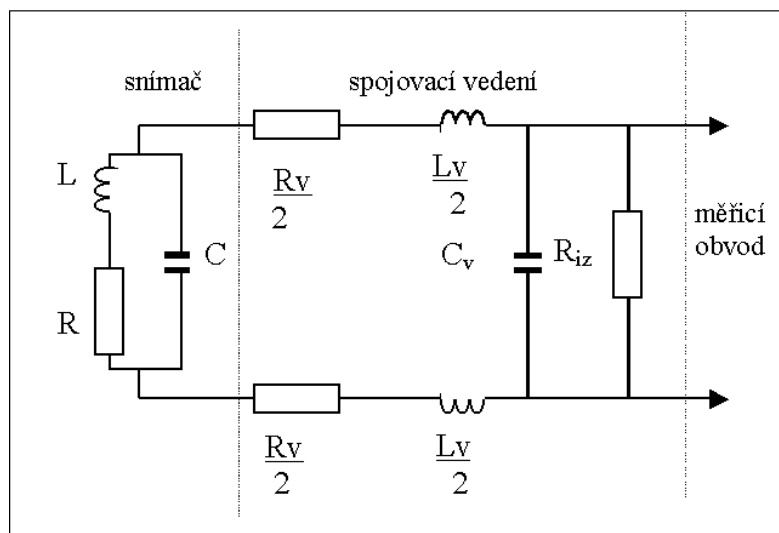
μ - permeabilit magnetického obvodu,

l - délka cívky,

S - plocha cívky,

N - počet závitů.

Indukčnostní snímače bývají zapojeny do obvodu s pomocným střídavým napětím. Nejčastěji to jsou obvody můstkové nebo rezonanční.



L_v - indukčnostní vedení,

R_v - odpor vedení,

R_{iz} - izolační odpor,

musí platit podmínka nerovnováhy

$$R_v, \omega L_v \ll \omega L \ll R_{iz}$$

Obr. 4.1. Náhradní schéma indukčnostního snímače

Nevýhodou je silná kmitočtová závislost indukčnostního snímače závislost odporu na teplotě. Je proto třeba dodržet impedanční poměry vedení dle nerovnice $R_v, \omega L_v \ll \omega L \ll R_{iz}$. V případě nesplnění této podmínky je třeba vyhodnotit parazitní vliv měření. Vlastní snímač je tvořen cívkou bez feromagnetického jádra nebo s feromagnetickým popř. neferomagnetickým elektricky vodivým jádrem. Působením neelektrické veličiny dochází k vzájemnému posunutí těchto částí nebo ke změně jejich elektrických vlastností. Cívka je dána indukčností, která je dána:

- počtem závitů,
- elektrickými a magnetickými vlastnostmi jádra,
- geometrickými rozměry cívky a jádra.



Průvodce studiem

Milí studenti, omlouvám se za přerušení výkladu, ale chtěla bych upozornit na podobnost náhradního schématu indukčnostního snímače a náhradního schématu odporového snímače, které jsem již dříve avizovala. Stejně podstatnou shledávám důležitost této skupiny pasivních snímačů, které mají obdobně širokou škálu využití

Rozdělení snímačů podle uspořádání cívky (příp. magnetického obvodu):

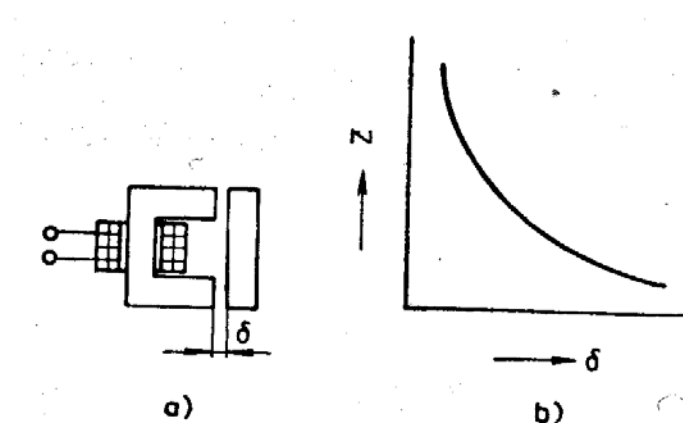
- s malou vzduchovou mezerou,
- s otevřeným magnetickým obvodem,
- s potlačeným polem,
- bez feromagnetika.

4.1. Snímač s malou vzduchovou mezerou

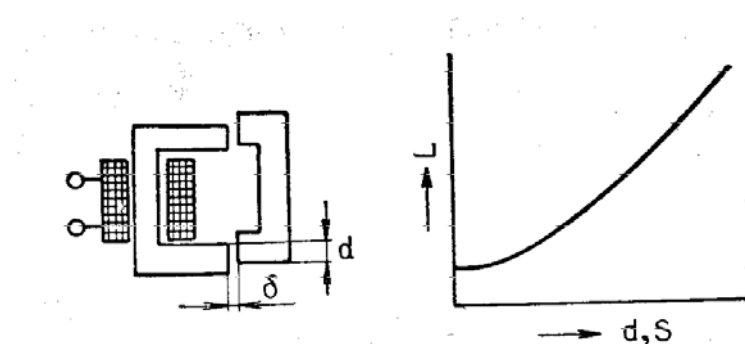
Patří k nejrozšířenějším snímačům pro měření geometrických rozměrů aj. Pracuje ve dvou režimech, kdy je:

- pohyblivá část feromagnetika (mění se velikost vzduchové mezery, nebo plocha vzduchové mezery),
- pohyblivá cívka.

Snímač reagující na změnu velikosti vzduchové mezery se vyznačuje velkou nelinearitou základní charakteristiky a proto se používá především v diferenčním uspořádání pro měření malých změn polohy. Jinou charakteristiku má snímač reagující na změnu plochy vzduchové mezery. Oba způsoby se dají kombinovat. Uvedené snímače se vyskytují v různých konstrukčních provedeních a volí se dle potřeb měřené délky v rozsazích 5 až 100 mm.



Obr. 4.2. Princip a charakteristika snímače s malou vzduchovou mezerou



Obr. 4.3. Snímač pracující se změnou plochy vzduchové mezery a jeho charakteristika

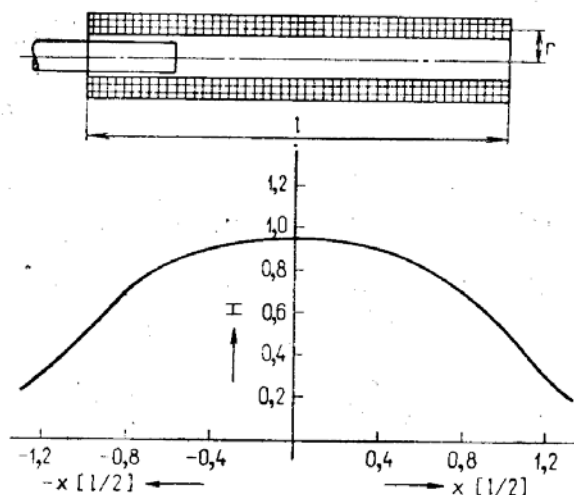
Snímač s pohyblivou cívkou má cívku uprostřed pólových nástavců (v ose magnetické symetrie) a výsledný magnetický tok je roven nule. Pokud dojde k posunutí cívky na jednu nebo druhou stranu, zvětšuje se dílčí magnetický tok, jenž prochází cívkou a na svorkách je napětí, které je mírou nesymetrie a tedy posunutí cívky. Snímače mají téměř lineární charakteristiku. Místo pohyblivé cívky lze vytvořit konstrukci se závitem nakrátko a odpadne tak nevýhoda vývodů na pohyblivé cívice.

- 1 – vnější část magnetického obvodu
- 2 – vnitřní část magnetického obvodu
- 3 – pevné budicí cívky
- 4 – pohyblivá měřicí cívka

Obr. 4.4. Snímač s pohyblivou cívkou

4.2. Indukční snímač s otevřeným magnetickým obvodem

Snímač je obvykle složen z cívky, do níž se zasouvá feromagnetické jádro. Většinou bývá cívka umístěna ve feromagnetickém krytu, který je v podélném směru rozdělen, aby nevytvářel závit nakrátko.

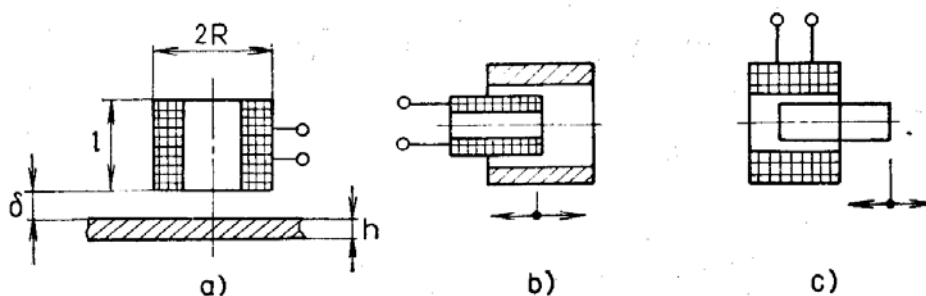


Obr. 4.5. Princip snímače s otevřeným magnetickým obvodem a závislost intenzity magnetického pole na poloze jádra

Nevýhody snímače jsou menší citlivost, větší počet závitů, větší vliv vnějších magnetických polí, větší náročnost na přesnost provedení cívek. Výhodou je použití pro velké změny polohy (100-300 mm).

4.3. Indukční snímač s potlačeným polem

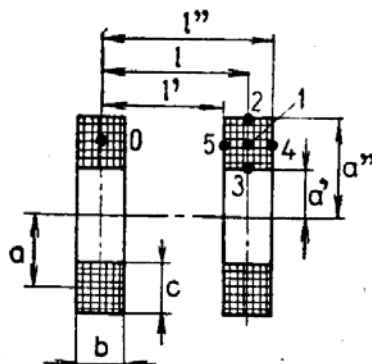
Potlačené pole vzniká při průchodu proudu cívkou, kdy vzniká magnetické pole, které prochází i kovovou vrstvou, v které vznikají vířivé proudy. Ty způsobují magnetické pole působící proti magnetickému poli, které je vyvolalo. Zmenšuje se tak intenzita původního pole (potlačení pole). U snímače se mění vzdálenost cívky od povrchu elektricky vodivého tělesa, a tím se mění i impedance cívky. Ta se změní i se změnou tloušťky vodivé vrstvy h . Snímače jsou vhodné např. pro bezdotyková měření vibrací. Nevýhodou je menší citlivost a nelinearita v případě nemožnosti použití diferenčního uspořádání.



Obr. 4.6. Indukční snímače s potlačeným magnetickým polem

4.4. Indukčnostní snímač bez feromagnetika

Jedná se o spojení alespoň dvou cívek, umožňující vzájemné posunutí. Snímač je navrhován vždy jako transformátorový a většinou jako diferenční. Používá se pro malá posunutí, měření úhlových výchylek apod.



Obr. 4.7. Sestava dvou válcových cívek

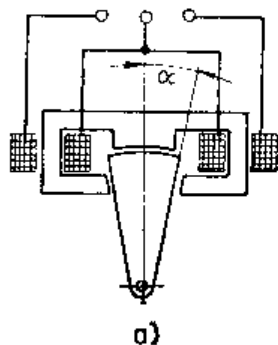
4.5. Použití indukčnostních snímačů

Obdobně jako odporové snímače je možno využít všechny předchozí typy pro měření většiny neelektrických veličin. Jsou to především snímače polohy, tlakové a tahové síly, krouticího momentu, průtoku, deformace, tlaku, zrychlení, ostatní (tloušťka fólie, drsnost, vlhkost apod.). Snímače vychází z výše uvedených principů a většinou jsou měřené veličiny převedeny na měření posunu.

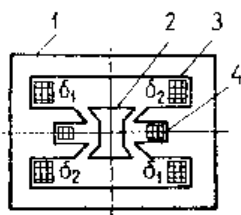
4.5.1. Měření úhlové výchylky

V praxi je velmi častou potřebou měřit úhlové výchylky, úhlové deformace, úhlové rychlosti atp. Snímače tohoto typu můžeme rozdělit dle rozsahu měření na malé a velké výchylky.

Snímače pro malé úhlové výchylky (řádově stupně) jsou uloženy ve spojení dvou částí (průřezů) hřídele. V obou případech při natočení dvou částí spojky se změní vzduchová mezera mezi kotvou (2) a statorem (1). Tím se mění přenos signálu mezi budicím vinutím (3) na měřicí vinutí (4).



a)



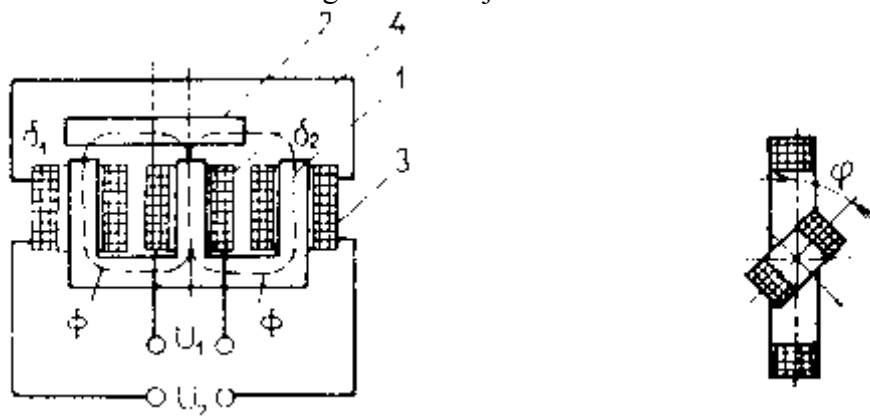
b)

- a) snímač s jednoduchým magnetickým obvodem
- b) snímač se složitým magnetickým obvodem (transformátorového typu)

Obr. 4.8. Vybrané typy pro měření malé úhlové výchylky

Snímače pro velké úhlové výchylky (desítky až 100-ky stupňů)

Na obr. 4.9a je příklad měření do 180° , kdy pohyblivé jádro ve tvaru disku je excentricky otočně upevněno nad střední částí E jádra. Pootočením pohyblivého jádra dochází ke změně vzduchových mezer d_1 a d_2 a tím magnetického toku pevným jádrem a změnu indukovaného napětí u_2 úměrným výchylce. Další možností je polohový transformátor s pohyblivou cívkou a pevnou cívkou bez feromagnetika. Vzájemná indukčnost cívek závisí na $\sin \varphi$.



Obr. 4.9. Vybrané typy pro měření velké úhlové výchylky

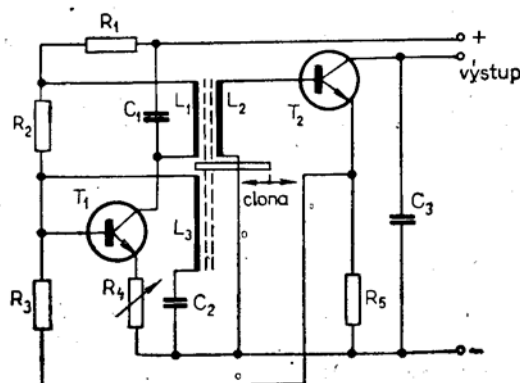
a.) diskový snímač

b.) polohový transformátor

4.5.2. Oscilátorové snímače (snímač s číslicovým výstupem)

Při měření je využito spojení rezonanční metody (indukčnost je součástí LC obvodu oscilátoru a výstupem je frekvence oscilátoru) s indukčním snímačem (indukčnostní ZV oscilátoru přiblížením kovového tělesa). Patří mezi snímače s přímo číslicovým výstupem. Základní typy snímače jsou:

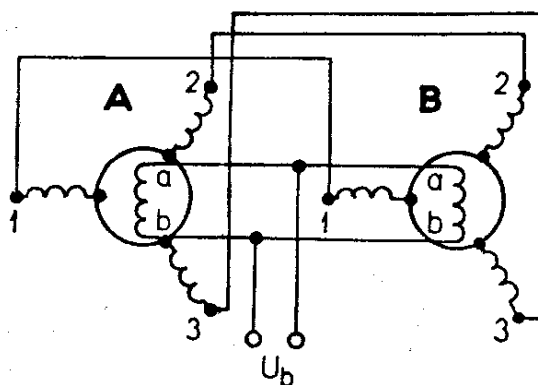
- **mezerový**, kdy mezi vazebními cívkami je mezera, do které se zasouvá elektricky vodivá clona, která mění indukčnost ZV (má největší citlivost).
- **průchozí**, kdy se při průchodu kovového tělesa otvorem ve vazebních cívkách bez feritového jádra mění indukčnostní ZV.
- **přibližovací**, kdy zpětnovazební cívky jsou vestavěny v jednom feritovém jádru a jsou upraveny tak, že při přiblížení elektricky vodivého tělesa z otevřené strany jádra se mění indukčnostní ZV.



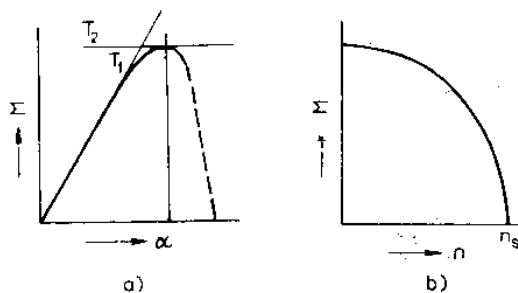
Obr. 4.10. Zapojení snímače – oscilátor běžného zapojení s indukční ZV

4.5.3. Selsyny

Selsyny jsou snímače pro přímý přenos úhlové výchylky. Jeden selsyn pracuje jako snímač úhlové výchylky a druhé jako ukazatel úhlové výchylky, přičemž vlastní ukazatel je pevně spojen s rotorem druhého selsynu. Skládá se ze statoru a rotoru (obdoba točivého stroje). Na rotoru je umístěno jednofázové budicí vinutí pro vybuzení magnetického obvodu selsynu. Ve statorových drážkách je synchronizační vinutí (1,2,3), vytvořené jako souměrné třífázové vinutí (někdy i dvoufázové). Tlumící vinutí (tam kde je budicí vinutí) je umístěno tak, aby bylo kolmé na budicí. Tak se v tlumícím vinutí neindukuje od buzení žádné napětí a synchronizačním vinutím neprochází proud. Měřená výchylka se přenáší na rotor přes vyrovnávací proud synchronizačním vinutím snímače. Tzn. Dojde-li k natočení selsynu A, poruší se rovnováha napětí a vznikne synchronizační proud, který způsobí natočení selsynu B o stejný úhel jako u selsynu A.



Obr. 4.11. Spojení selsynů pro přenos úhlové výchylky



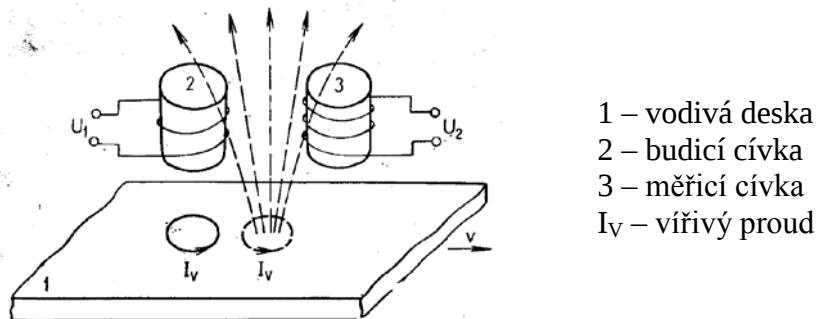
Obr. 4.12. Závislost točivého momentu na úhlu vzájemného natočení a na otáčkách

Polohový transformátor je v podstatě selsyn s nevyniklými póly a bez tlumícího vinutí. Všechna statorová vinutí jsou zapojena tak, že při buzení stálým střídavým U_b vytvoří stálé magnetické pole. V jednofázovém rotorovém vinutí se může napětí indukovat jen tehdy, jestliže osa rotorového vinutí není kolmá na vektor intenzity magnetického pole ve statoru. Při pootočení rotoru vzniká ve vinutí rotoru napětí úměrné natočení.

4.5.4. Indukčnostní snímače rychlostní

Snímače rychlostní se využívají především pro měření úhlové rychlosti pro regulační účely. Princip snímače lze použít i pro lineární rychlost např. kovových pásů při válcování.

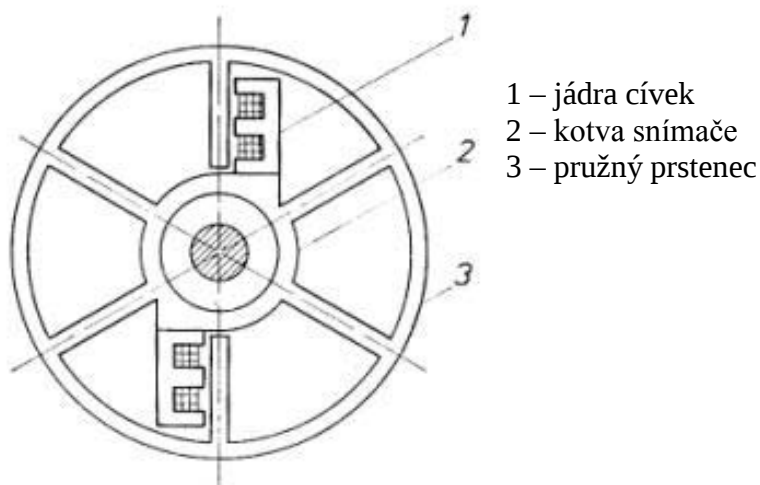
Před elektricky vodivou deskou je uchycena budící a měřicí cívka. Jestliže na budící cívku připojíme střídavé napětí, pak magnetický tok, který vznikne a prochází vodivou deskou, v ní indukuje napětí, které vyvolá vířivý proud I_v . V měřicí cívce se indukuje střídavé napětí U_{20} . Odchyluje-li se tenká deska rychlostí v , je vířivý proud I_v strháván do nové polohy I_v' . Výsledkem je, že se transformátorová vazba mezi vířivým proudem I_v a měřicí cívkou mění a na měřicí cívce vzniká dodatečné napětí U_2 . Toto napětí je úměrné rychlosti vodivé desky dle rovnice $U_2 = k \cdot U_1 \cdot v$, kde konstanta je dána geometrickými parametry desky.



Obr. 4.13. Princip indukčnostního snímače přímočaré rychlosti

4.5.5. Indukčnostní snímače momentu síly

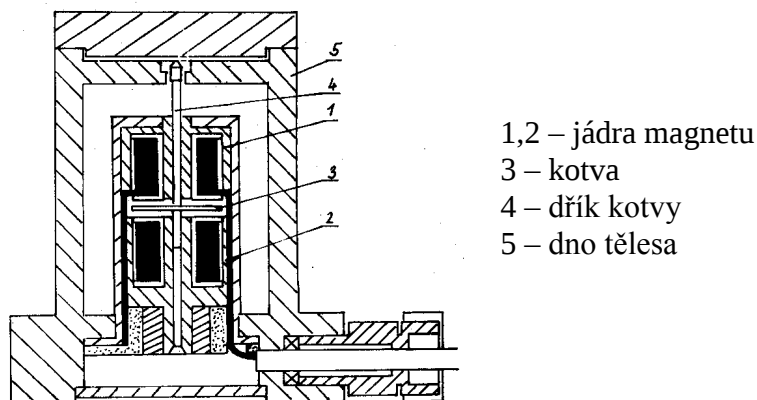
Jako snímačů momentu síly se používají především typy s malou vzduchovou mezerou. Úhlová výchylka dvou průřezů hřídele se převede na změnu vzduchové mezery. Speciální konstrukce umožňují umístění vinutí na statorovou část hřídele. Tím jsou odstraněny komplikace s přenosem signálu z rotujícího hřídele. Takové řešení je velmi složité. Na obr. 4.14. je zobrazeno uspořádání snímače s využitím běžného indukčnostního snímače polohy. Ohybová deformace ramen řemenice se měří dvěma shodnými snímači polohy, jejichž cívky jsou zapojeny do můstku.



Obr. 4.14. Indukčnostní snímač polohy pro měření momentu síly

4.5.6. Indukčnostní snímače síly

Pro měření tlakových a tahových sil se používají snímače s malou vzduchovou mezerou (obr.4.15.) i s otevřeným magnetickým obvodem. S deformací tělesa se posouvá kotva snímače spolu se dnem, s nímž je pevně spojena. Snímačem lze měřit v dynamickém provozu tlakové síly o kmitočtu 5 až 7 Hz. Snímač pro rozsah 2,5 MN má průměr 114 mm, výšku 115 mm. Při největší hodnotě síly je posunutí 20 až 60 mikrometrů.



Obr. 4.15. Indukčnostní snímač síly s malou vzduchovou mezerou

4.5.7. Indukčnostní snímače deformace

Nehodí se pro dynamická měření, jsou však vhodné pro těžké provozy. Např. snímač s malou vzduchovou mezerou.



Shrnutí pojmů 4

Indukčnost. Cívka. Snímač s malou vzduchovou mezerou. Snímač s otevřeným magnetickým obvodem. Snímač s potlačeným polem. Snímač bez feromagnetika. Selsyny.



Otázky 4

1. Definujte základní fyzikální rovnici pro indukčnost.
2. Jakou elektronickou součástkou je indukčnost realizována?
3. Uveďte fyzikálních veličin, které lze měřit indukčnostní metodou?
4. Co to je selsyn a čím je charakteristický?

5. MAGNETICKÉ SNÍMAČE



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat princip magnetických snímačů
- popsat konstrukci a použití magnetických snímačů
- vysvětlit funkci magnetických snímačů pro měření neelektrických veličin

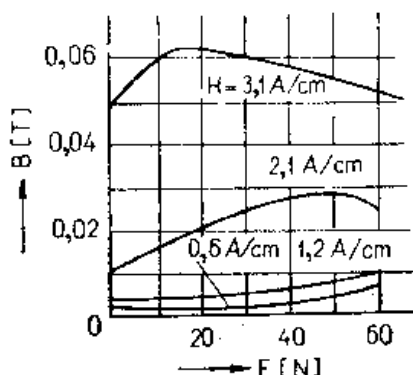


Výklad

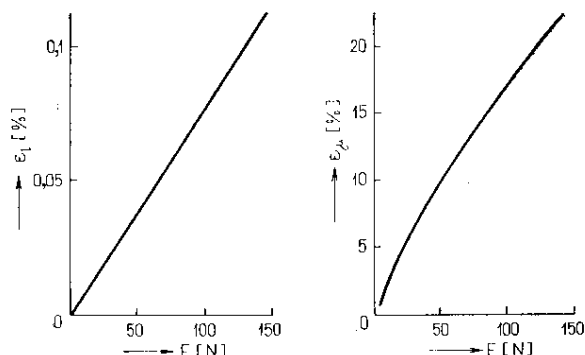
Měřená neelektrická veličina je převedena na změnu permeability feromagnetika, která se projeví změnou impedance, indukčnosti nebo vzájemné indukčnosti jedné nebo několika cívek magnetického obvodu. Snímače jsou vytvořeny s uzavřeným magnetickým obvodem a používáme je k měření mechanických napětí, tlakových a tahových sil, momentu kroucení, teploty aj. především v těžkých provozech. Rozlišujeme tři základní principy.

5.1. Magnetoelastické snímače

Působením deformace na magnetický materiál se mění magnetické vlastnosti feromagnetika. Jako vhodné materiály pro magnetoelastické snímače se používají permalloyové slitiny (78,5 % Ni), slitiny s obsahem niklu 65 % nebo materiály vyrobené z měkké oceli. Změna prodloužení materiálu je vyjádřena na obr. Magnetoelastické snímače se používají především pro měření krouticího momentu a deformace. Deformace feromagnetika je ve všech případech poměrně malá (řádově kolem $10\mu\text{m}$).



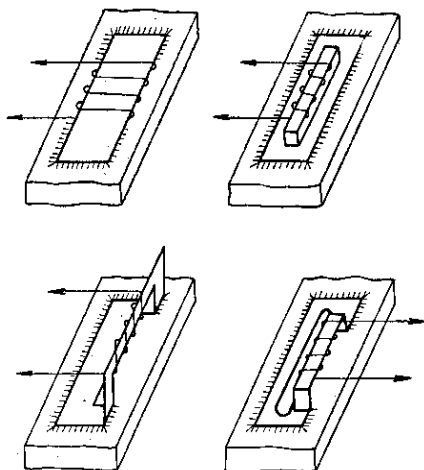
Obr. 5.1. Závislost magnetické indukce B na síle F při deformaci feromagnetika při různých intenzitách magnetického pole



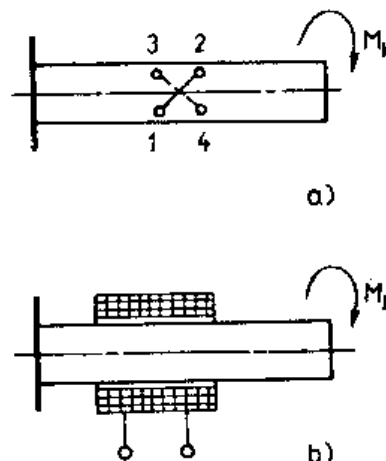
Obr. 5.2. Závislost relativního prodloužení ϵ_l a relativní permeability ϵ_μ na síle F .

pr

Magnetoelastické tenzometry jsou vhodné pro dynamický provoz, do obzvláště obtížných podmínek tam, kde nemůžeme použít odporové tenzometry. Jejich tloušťka je 0,1 až 0,3 mm při šířce 10 mm a délce 15 mm. Snímač se buď nalepí nebo přivaří na měřenou část.



Obr. 5.3. Příklady řešení manetoelastických tenzometrů (lístkové snímače)



Obr. 5.4. Základní typy magnetoelastických snímačů kroucího momentu.

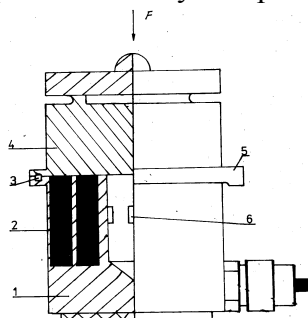
Snímač kroucího momentu magnetoelastických snímačů je možné dvěma způsoby (obr.):

a.) měření permeability mezi body 1-2 nebo 3-4 pomocí příložného snímače indukčního s magnetickým obvodem tvaru U.

b.) změnu permeability hřídele měříme pomocí cívky, která je na hřídel nasunuta.

Měření není příliš časté vzhledem k mnoha parazitním vlivům s obtížnou kompenzací.

Snímač síly je znázorněn na obr. Snímač je vhodný pro těžké provozy a používá se v rozsahu 1 kN až 10 MN, je jednoduchý a spolehlivý. Používá se pemalloyová slitina (78% Ni), nebo měkká ocel. Magnetické snímače tohoto typu dosáhly největšího rozšíření. Změna teploty vyvolává změnu indukčnosti dosahující -2% na každých 10°C. Tyto chyby je možno kompenzovat například měděným odporem.

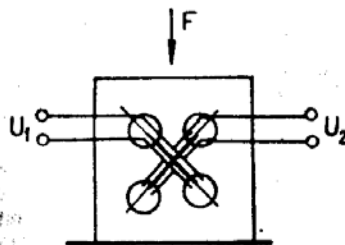


- 1 – magnetický obvod
- 2 – vinutí snímače
- 3 – kroužky magnetického obvodu
- 4 – horní kryt
- 5 – nalisovaný kroužek
- 6 – kompenzační vinutí teploty

Obr. 5.5. Magnetoelastický snímač tlakové síly

5.2. Magnetoanizotropní snímače

Princip magnetoelastického snímače je znázorněn na obr. V tělese z feromagnetického materiálu jsou vytvořeny čtyři otvory tak, že jsou kolem středu symetrické. Otvory je protaženo primární a sekundární vinutí a při dokonalé symetrii se indukuje minimální napětí.



Obr. 5.6. Princip magnetoanizotropního snímače tlakové síly

Pokud působíme na feromagnetickou část silou F , pak se změní magnetická vodivost feromagnetika (obdobně jak u magnetoelastických snímačů) ve směru působící síly. Magnetický tok projde cestou větší magnetické vodivosti (dojde ke změně jeho směru) a jeho rozložení se změní. Změní se tak vazby mezi vinutími a na výstupu dostaneme napětí úměrné síle, která na snímač působí dle rovnice

$$U_2 = k_1 \cdot k_2 \cdot f \cdot B \cdot S \cdot N_2 \cdot \sin \alpha, \text{ kde}$$

k_1, k_2 - jsou součinitele konstrukce a materiálu magnetického obvodu,

f - kmitočet napájecího proudu,

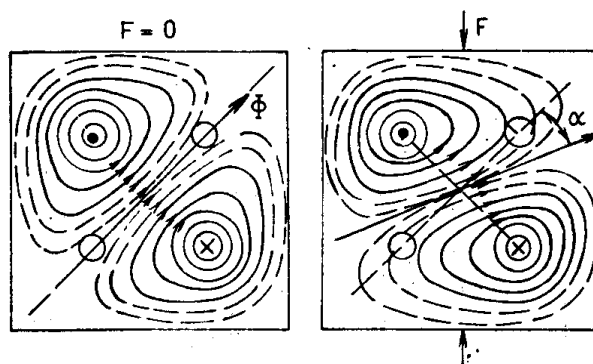
B - magnetická indukce,

S - průřez magnetického obvodu,

n_2 - počet sekundárních závitů,

α - úhel mezi vektorem H a osou budící cívky.

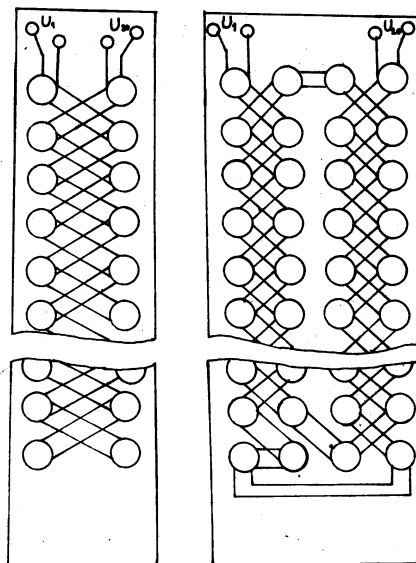
Vhodnou volbou materiálu a konstrukce snímače docílíme téměř lineární závislosti mezi výstupním napětím a měřenou neelektrickou veličinou.



Obr. 5.7. Rozložení magnetického toku u magnetoanizotropního snímače tlakové síly.

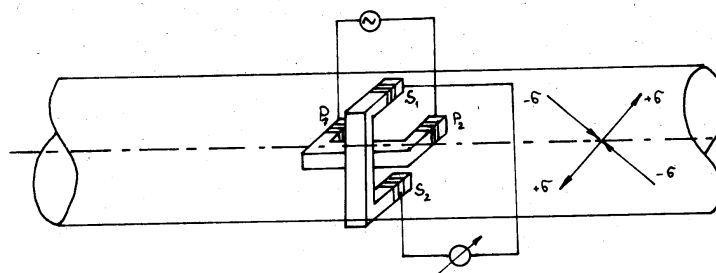
Magnetoanizotropní snímač lze využít při měření tlakové a tahové síly, kroutícího momentu, mechanického napětí apod.

Snímač tlakové a tahové síly se realizují většinou jako mnohočláňkové jednořadové a dvouřadové uspořádání (jednoduché uspořádání je určeno pro malé síly), kdy se docílí větší citlivosti a linearity. Mají rozsah měření až 5 MN, přesnost 0,5%, přetížitelnost až 200%.



Obr. 5.8. Princip jednořadového a dvouřadového magnetoizotropního snímače síly

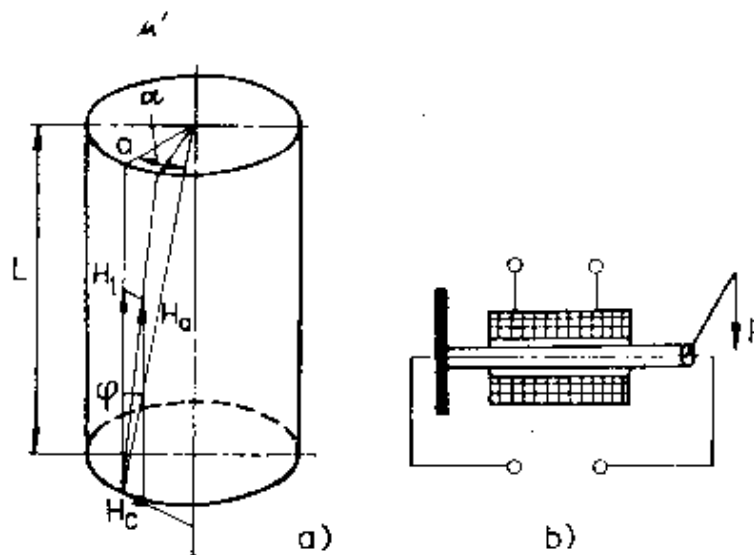
Snímač krouticího momentu je složen ze dvou magnetických obvodů tvaru U. Primární cívky jsou napájeny střídavým proudem a budicí obvod vytvoří na povrchu hřídele téměř souměrné pole. Se zatíženým hřídelem vznikne magnetický tok, deformuje se magnetické pole a v sekundárních cívkách se indukují napětí, jejichž velikost je mírou krouticího momentu.



Obr. 5.9. Princip magnetoanizotropního snímače krouticího momentu

5.3. Snímače využívající inverzi Wiedemannova jevu

Wiedemannův jev (1884) – feromagnetická tyč nebo kruhová trubka je na jedné straně upnutá, se zkroutí kolem osy je-li magnetována současně podélným a kruhovým magnetickým polem.



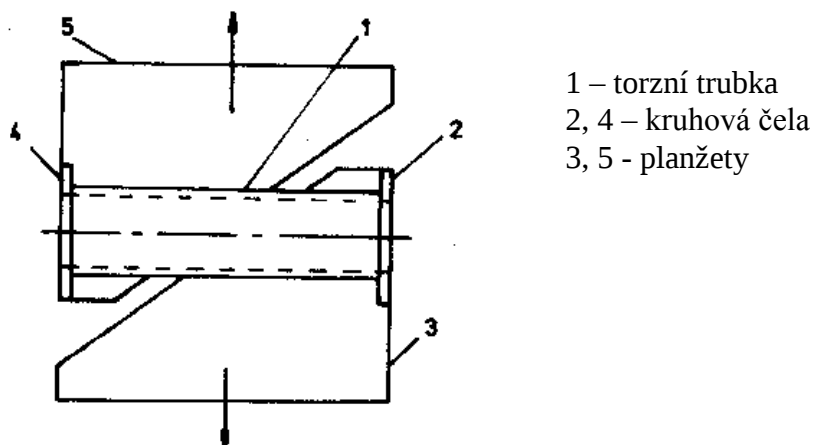
Obr. 5.10. Princip Wiedemannova jevu

Snímač využívá inverze jevu, kdy tyč je namáhána krouticím momentem, který je způsoben silou F . Tyčí prochází budicí proud a v cívce nasunuté na tyči se indukují napětí, jehož hodnota je úměrná krouticímu momentu. Buzení tyče je možno několika způsoby:

- podélným vinutím procházející trubkou,
- napájením trubky,
- kombinovaným napájením.

Tento princip můžeme použít k měření tlakové nebo tahové síly, převedeme-li ji na zkrut tyče, měření krouticího momentu a deformace. Deformace snímače bývá nejvýše 100 mikrometrů. Snímače tohoto typu se vyrábějí pro síly do 0,1 MN (jejich přesnost je $\pm 0,5\%$).

Snímač deformace musí vhodným způsobem převést přímočarou deformaci na torzní namáhání trubky (obr. 5.11.). Při posunutí pásů v naznačeném směru dojde ke zkroucení trubky. Snímač je jednoduchý a dosahuje velké vysoké napětí. Je vhodný pro statické měření.



Obr. 5.11. Převod deformace na torzní namáhání trubky u snímače deformace (tenzometr) využívající inverze Wiedemannova jevu



Průvodce studiem

Vážení posluchači, magnetické snímače jistě nepatří k moderním metodám měření, ale přesto jsou v těžkých provozech výhodně využity. Proto si zapamatujte tyto tři uvedené fyzikální jevy a doložte na příkladech.



Shrnutí pojmů 5

Magnetoelastický princip. Magnetoanizotropní princip. Wiedemannův jev.



Otázky 5

1. Co to je permeabilita materiálu a jak se značí?
2. Kterou veličinu měří tenzometr a jaké tenzometry znáte?
3. Jak je definován kroutící moment?

6. KAPACITNÍ SNÍMAČE



Čas ke studiu: 2 hodiny



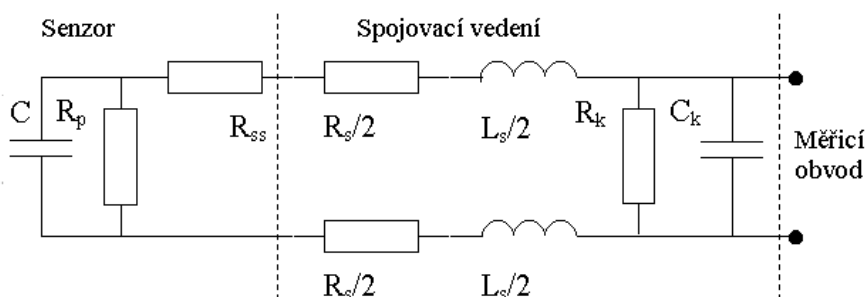
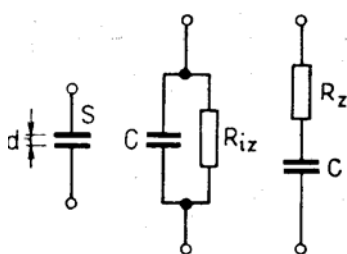
Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat princip kapacitních snímačů
- popsat konstrukci a použití kapacitních snímačů
- vysvětlit funkci kapacitních snímačů pro měření různých neelektrických veličin



Výklad

Převádějí měřenou neelektrickou veličinu na změnu kapacity. Snímač tvoří jeden nebo více kondenzátorů. Základem je dvou nebo několika elektrodový systém s parametry proměnnými působením měřené neelektrické veličiny.



Obr. 6.1. Princip kapacitního snímače a jeho náhradní schéma

Obr. 6.2. Zapojení kapacitního snímače k měřicímu obvodu

Aby nedocházelo k ovlivňování snímače parazitními vlivy změnou elektrických parametrů spojovacího vedení v důsledku změny teploty, vlhkosti apod., musí být splněna tato podmínka

$$R_s, \omega L_s \ll \frac{1}{\omega C} \ll R_k, \frac{1}{\omega C_k}.$$

Kapacita je definována jako $C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot G$ [F], kde

S – plocha elektrod,

d – vzdálenost elektrod,

ε_r – relativní (poměrná) permitivita,

ε_0 – vakuová permitivita,

G – geometrická vodivost.

Z rovnice vyplývá, že působením neelektrických veličin můžeme u kapacitního snímače měnit:

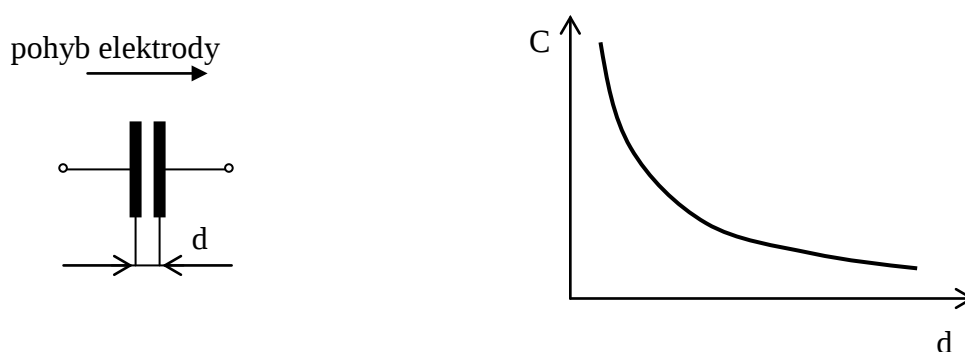
- mezeru mezi deskami (mezerový snímač),

- plochu desek (překrývací),
- dielektrikum (s proměnnou permitivitou).

Použití kapacitních snímačů je rozsáhlé především díky jejich jednoduchosti a malé hmotnosti elektrod. Měří se především poloha, tlaková síla, tlak, krouticí moment, hladina, vlhkost, zrychlení, analýzy plynů, aj.

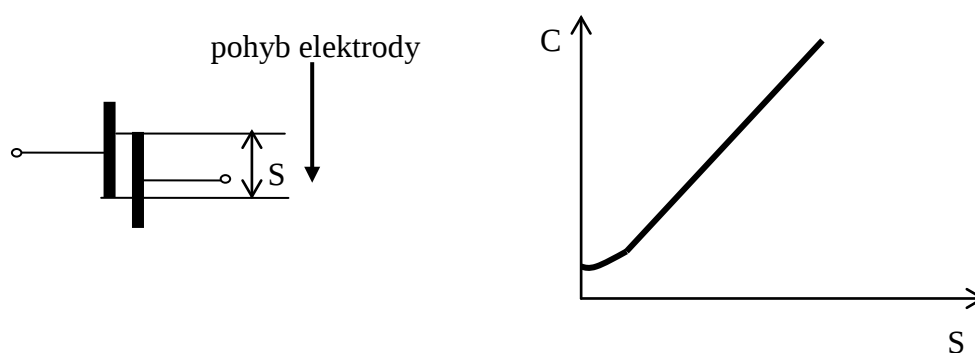
6.1. Typy provedení

Mezerový snímač je nejjednodušším typem kapacitního snímače, je to jednoduchý deskový kondenzátor s proměnnou mezerou mezi deskami. Závislost je nelineární. Linearizací charakteristiky lze dosáhnout diferenciálním zapojením. Snímač je velmi citlivý a vhodný pro rozsahy do 1 mm.



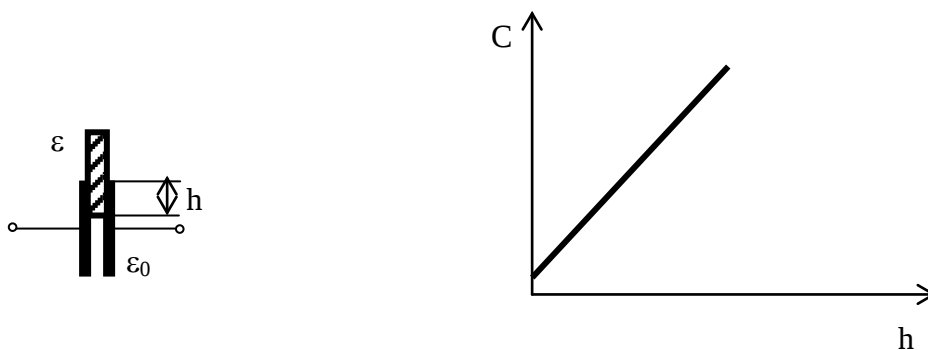
Obr. 6.3. Mezerový kapacitní snímač a závislost kapacity na mezeře mezi elektrodami.

Překrývací snímač využívá změnu plochy elektrod a je vhodný pro měření velkých lineárních (nad 1 mm) a úhlových výchylek. Charakteristika je lineární.



Obr. 6.4. Překrývací kapacitní snímač a závislost kapacity na ploše překrytí

Snímač s proměnnou permitivitou patří do skupiny snímačů se změnou dielektrika. Snímač má lineární závislost a vykazuje malé ztráty dielektrika. Výhodně se využívá pro měření výšky hladiny.

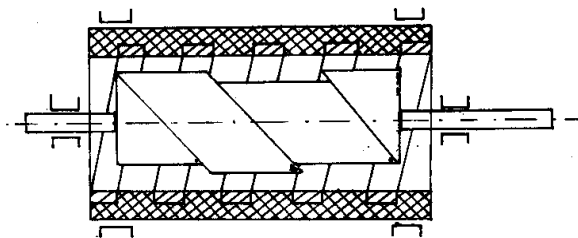


Obr. 6.5. Kapacitní snímač s proměnnou permitivitou

6.2. Použití kapacitních snímačů

Měření polohy

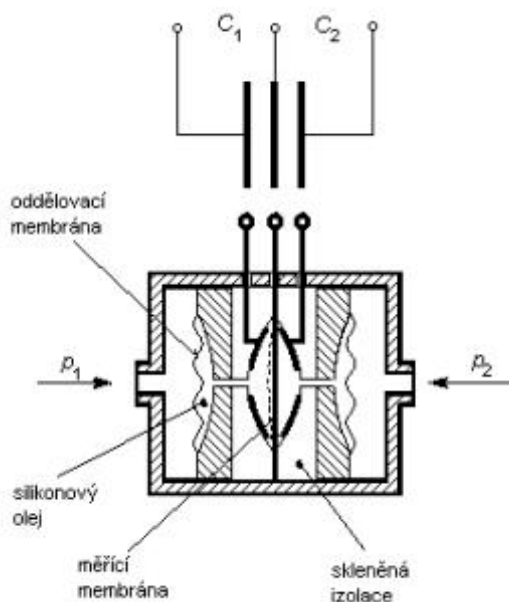
K měření je možno využít snímače pracující se změnou vzdálenosti nebo plochy elektrod (příp. jejich kombinace). Uvedený příklad (obr. 6.6.) je pro spojení s automaticky vyvažujícím můstkem. Válec statoru se může otáčet kolem své osy. Rotor tvoří kovový válec se závity o stejném stoupání jakou u pásku statoru. Měřená výchylka se převádí na rotor, který se posouvá podél své osy, vzniká odchylkový signál, který vykompenzuje motor otáčením statoru (posuvný pohyb se změní na rotační statoru). Měří v rozsahu 0,1 až 10 mm. Výhodou metody je bezdotykový způsob měření, kdy jednou z elektrod je povrch měřeného tělesa.



Obr. 6.6. Šroubovicový diferenční kapacitní snímač polohy

Měření tlaku

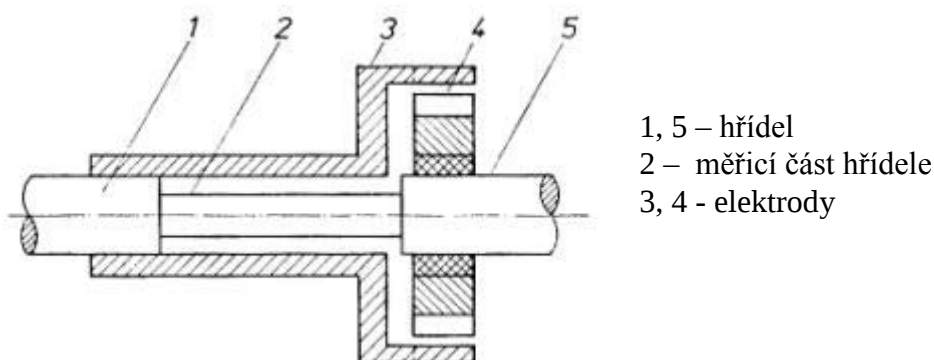
Základním prvkem je pružný člen (membrána, vlnovec) deformovaný měřeným tlakem, který je spojen alespoň s jednou elektrodou kapacitního snímače. Příkladem je membránový snímač tlaku, pracující na principu diferenčního kapacitního snímače (obr. 6.7.). Využívá se při vyhodnocování tlakového rozdílu u měření průtoku tekutin škrticími orgány. Elektrické vyhodnocovací obvody, které převádí změny kapacity na výstupní elektrický signál, bývají doplněny obvody pro potlačení vlivů parazitních kapacit. Ty jsou způsobeny kapacitami kabelu, přívodů a stínícího krytu. Používají se pro měření statických, spíše však dynamických tlaků. Statické tlaky měří s chybou cca 1 %. Jejich měřicí membrána má zpravidla vysokou vlastní frekvenci. Výměnou za jinou s rozdílnou tuhostí lze měnit frekvenční rozsah měření a jeho citlivost. Kapacitní snímače se napájejí střídavým proudem. Změna kapacity se měří v můstkovém zapojení.



Obr. 6.7. Diferenční kapacitní snímač tlaku

Měření kroutícího momentu

Snímač je tvořen dvěma elektrodami zubového tvaru, uchycenými pevně na hřídeli. Elektroda 4 je izolována od hřídele 5. Působením momentu síly na měřicí část hřídele dojde k natočení elektrod a tím ke změně kapacity. Výstupní signál je z rotujícího hřídele vyveden na statorovou část přes vazební kondenzátor.

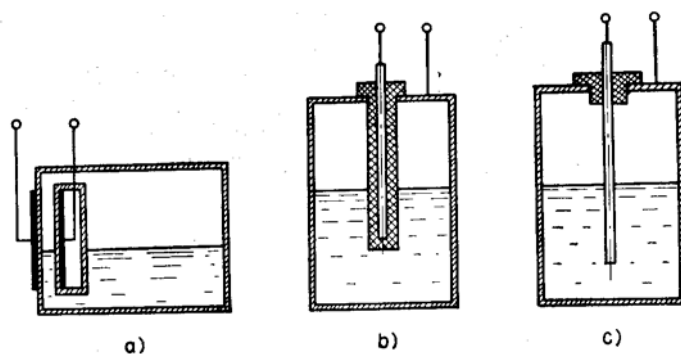


- 1, 5 – hřídel
- 2 – měřicí část hřídele
- 3, 4 - elektrody

Obr. 6.8. Snímač kroutícího momentu

Měření výšky hladiny

Kapacitními snímači lze měřit vodivé i nevodivé látky, zjišťovat výšku hladiny, mezní stavy u látek všeho druhu (kapalných, sypkých, kusových), měřit i v uzavřených nádobách pod tlakem, při vysokých i nízkých teplotách v agresivním prostředí apod.



- a) skleněný stavoznak
b) hladinoměr s izolovanou elektrodou
c) hladinoměr s neizolovanou elektrodou

Obr. 6.9. Základní typy kapacitních hladinoměrů

U skleněných stavoznaků jsou na vnější stěně trubice umístěny elektrody kapacitního snímače. Je-li kapalina vodivá, můžeme použít pouze jednu elektrodu a druhou pak tvoří měřená kapalina. Uspořádání hladinoměru s izolovanou elektrodou v nádrži se používá pro měření elektricky vodivých látek.



CD-ROM

Animace použití kapacitního snímače.



Shrnutí pojmů 6

Kapacita. Kondenzátor. Mezerový snímač. Překrývací snímač. Snímač s proměnnou permitivitou.



Otázky 6

1. Jak je definována kapacita a jakou elektronickou součástí je prezentována?
2. Co to je permitivita materiálu?
3. Které snímače využívají k měření elektrody a jak se od kapacitních snímačů odlišují?

7. HALLOVY SNÍMAČE



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat hallův jev
- popsat princip a funkci hallových snímačů
- vysvětlit funkci snímače polohy



Výklad

Hallovy snímače patří do skupiny aktivních snímačů a využívají Hallova jevu. Tj. pokud na polovodič působí příčné magnetické pole s indukcí B a prochází jím elektrický proud, naměříme na protějších stěnách hranolu polovodiče Hallovo napětí. Platí pro ně

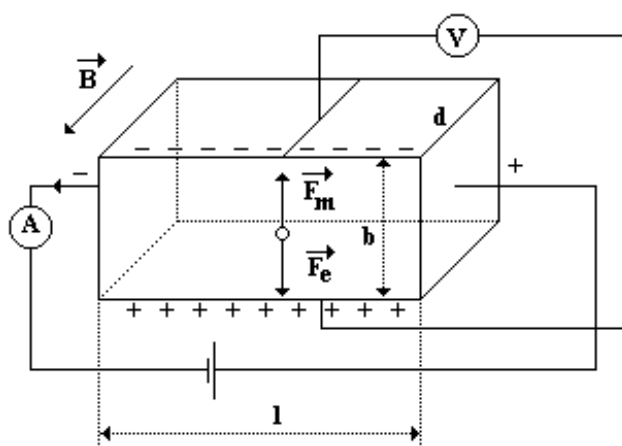
$$U_H = R_H \cdot \frac{I_p \cdot B}{d}, \text{ kde } R_H \text{ je hallova konstanta dána rovnicí } R_H = \frac{3}{8} \cdot \frac{1}{n_q \cdot q}, \text{ kde}$$

n – hustota nosičů náboje,

q – elementární náboj,

d – tloušťka polovodiče.

Jestliže se v polovodiči nacházejí jak elektrony, tak díry, je výraz pro Hallovu konstantu mnohem složitější.



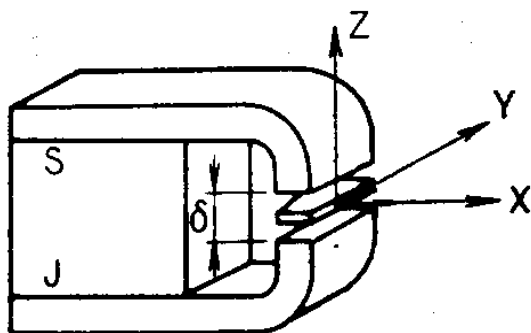
Obr. 7.1. Princip Hallova snímače

Využití Hallova snímače pro měření neelektrických veličin je velká pro svoji jednoduchost. Pokud se Hallův snímač pohybuje v magnetickém poli, mění se jeho napětí v závislosti na jeho poloze.

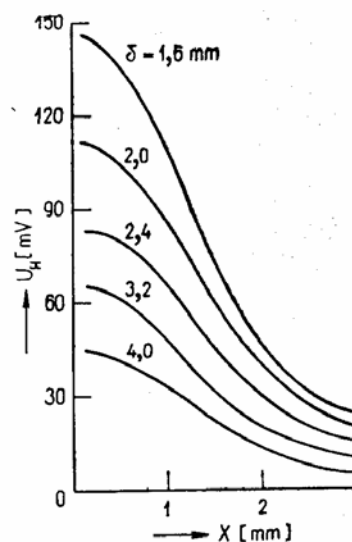
Snímač polohy

Vlastní polovodičová destička se pohybuje ve vzduchové mezeře stálého magnetu ve směru osy x . Magnet má pólové nástavce z magneticky měkkého materiálu. Charakteristika je v úzkém rozsahu lineární, což vyhovuje pracovní oblasti snímače. Ještě lepších výsledků je možno dosáhnout s magnetickými obvody s malou vzduchovou mezerou v diferenciálním uspořádání. Přesnost měření určují parametry magnetu i polovodiče v závislosti na teplotě. Všechny parazitní vlivy je nutno kompenzovat s ohledem na požadovanou přesnost měření.

Používané polovodiče jsou Ge, Si, InAs, InSn, HgTe, HgSe aj. Snímače jsou vhodné pro měření lineárních nebo úhlových vychylek, měření vibrací, zrychlení, otáček a veličin na které je můžeme převést.



Obr. 7.2. Princip Hallova snímače polohy



Obr. 7.3. Charakteristiky jednoduchého Hallova snímače pro různé hodnoty vzduchových mezer

**CD-ROM****Animace použití hallova snímače.****Shrnutí pojmů 7****Hallův jev. Hallovo napětí.****Otázky 7**

1. Co znamená pojem aktivní snímač a jaké aktivní snímače znáte?
2. Kde všude se Hallovy snímače dají použít?

8. INDUKČNÍ SNÍMAČE (GENERÁTOROVÉ)



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat princip indukčních (generátorových) snímačů
- popsat konstrukci a použití indukčních snímačů
- vysvětlit funkci indukčních snímačů pro měření různých neelektrických veličin



Výklad

Indukční (generátorové) snímače jsou aktivní snímače, které se chovají jako zdroj napětí a představují rozsáhlou skupinu, která je využívána především pro měření mechanických veličin. Konstrukčně jde o spojení cívky a magnetického obvodu, u kterého je vytvořen pomocí stálého magnetu nebo budícího obvodu magnetický tok Φ . Napětí, které se indukuje v cívce je dáno **Faradayovým zákonem**

$$u = -N_z \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \text{ kde}$$

N_z – počet závitů cívky,

$d\Phi/dt$ – časová změna magnetického toku vázaného se závity cívky.

Měřená neelektrická veličina může působit buď na rychlost změny magnetického toku spojeného s N_z závitů pevné cívky, nebo při stálém toku měnit počet závitů, které jsou v daném čase vázány s magnetickým tokem. Jsou to pak snímače elektromagnetické nebo elektrodynamické. Další skupina snímačů využívá změny remanentního magnetismu při deformaci magnetického obvodu, tzv. magnetostrikční snímače.



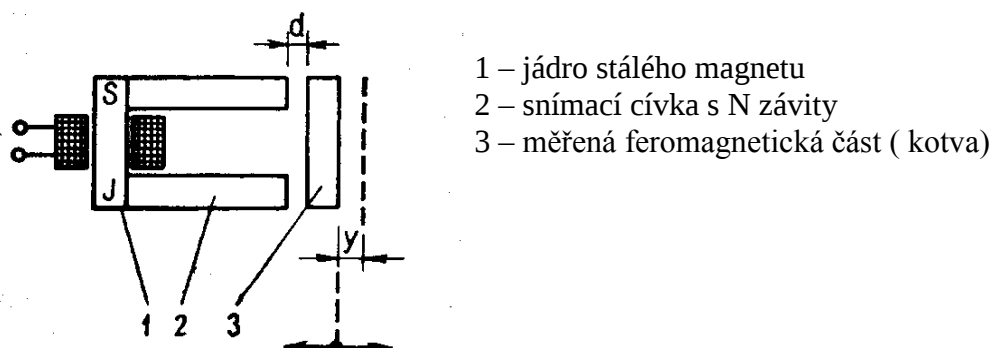
Průvodce studiem

Milí studenti, jistě jste postřehli, že označení indukční snímač má velmi blízko s pojmem indukčnostní snímač. Zkuste si už nyní uvědomit základní rozdíl v chápání “co to je indukčnost” a co znamená pojem “indukovat”. Mohu napovědět, že indukčnost je pasivní vlastnost a indukce je aktivní projev vzniku energie (v tomto případě elektrického napětí). Tyto principy vhodně vysvětlíte na fyzikálních rovnicích. Najděte v této kapitole další vyjádření rovnice Faradayova zákona a naučte se ji!

8.1. Snímače elektromagnetické

Magnetický tok snímače se mění nejčastěji změnou impedance magnetického obvodu. Na obr. je princip snímače, kdy na jádro stálého magnetu je nasazena cívka s N_z závitů a ve vzdálenosti d od pólových nástavců magnetu je měřená feromagnetická část. Napětí ve

snímací cívce je pak dáno časovou změnou magnetického toku $\Phi = \frac{U_m}{R_m}$, kde U_m je magnetomotorické napětí a R_m je magnetický odpor obvodu. Kmitáním feromagnetické části se mění vzduchová mezera od své původní polohy o výchylku y a výstupní napětí snímače je pak úměrné rychlosti pohybu.



Obr. 8.1. Princip elektromagnetického snímače

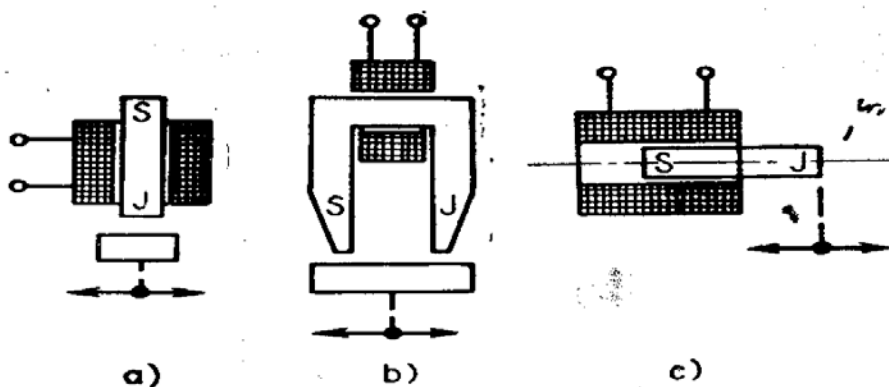
Elektromagnetické snímače jsou vhodné pro měření přímočarého i úhlového pohybu, otáček.

8.1.1. Snímače přímočarého pohybu

Na obr. 8.2. jsou uvedeny základní typy elektromagnetických snímačů pro přímočarý pohyb. Podle uspořádání mají svá specifika:

- snímač je citlivý na vnější magnetické pole,
- snímač vyniká vysokou citlivostí měření,
- u snímače se pohybuje trvalý magnet a výhodou je dobrá linearita i pro větší amplitudy kmitů.

Nevýhodou snímačů je silná závislost výstupního signálu na vzdálenosti snímače od povrchu feromagnetického tělesa.



Obr. 8.2. Základní typy elektromagnetických snímačů pro přímočarý pohyb

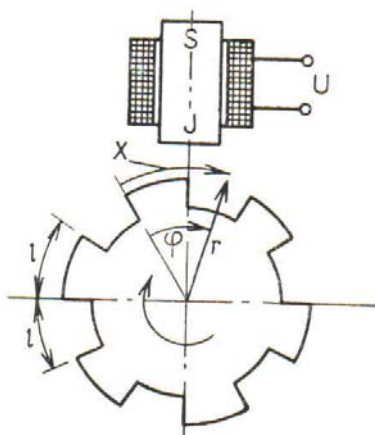


CD-ROM

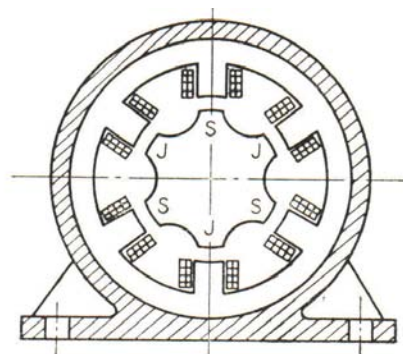
Animace použití indukčního snímače polohy.

8.1.2. Snímače úhlového pohybu

Příkladem snímače pro měření úhlové rychlosti je provedení snímače s otevřeným magnetickým obvodem, kde změna magnetického toku je vytvářena ozubeným kolečkem z magneticky měkkého materiálu (obr. 8.3.). Pro konstantní úhlovou rychlost platí $\omega = r \cdot \dot{\varphi}$, přičemž $\varphi = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t / z$, kde φ je úhel natočení a z počet zubů kolečka. Výstupní napětí je pak přímo úměrné otáčkám.



Obr. 8.3. Princip snímače úhlového pohybu s otevřeným magnetickým obvodem



Obr. 8.4. Konstruktivní řešení snímače úhlové rychlosti

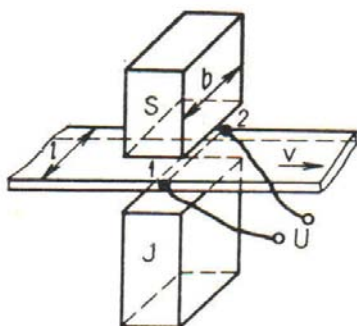
Vhodným konstrukčním řešením je provedení dle obr. 8.4. Snímač se skládá z vinutého statoru a rotoru tvořeného několika pólovými dvojicemi stálých magnetů. Počet pólových dvojic rotoru je určován rozsahem úhlové rychlosti a bývá až 12 pro stroje s malou rychlostí otáčení, aby nedocházelo ke kolísání údaje ukazatele. Stator je složen z plechů s drážkami pro vinutí. Výstupní napětí je 10-100 V. Otáčky max. 10 tis. ot/min. Charakteristiky jsou lineární pouze v nezátíženém stavu.

Mezi parazitní vlivy patří především teplota, kdy se napětí s teplotou zmenšuje, protože indukce trvalých magnetů s teplotou klesá. Kompenzace je možná termomagnetickými bočníky. Snímače jsou velmi jednoduché, robustní a nepotřebují zdroj napětí.

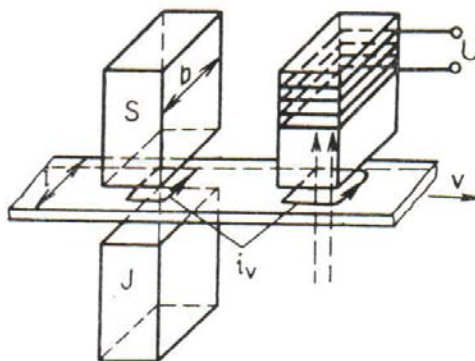
8.2. Snímače elektrodynamické

Jsou založeny na využití Faradayova indukčního zákona a princip lze vysvětlit dle obr. 8.5. V magnetickém poli se pohybuje elektricky vodivý pás a za podmínky $l \leq b$ je naindukované napětí určeno vztahem $U = B l_a \cdot v$, kde B je indukce magnetického pole, l_a je délka aktivního vodiče (šířka vodivého pásu) a v je rychlost vodiče ve směru kolmém na magnetické siločáry.

Také platí, že jestliže připojíme vodič ke zdroji stejnosměrného proudu umístěného v magnetickém poli, působí na něj síla $\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{l}_a$.



Obr. 8.5. Princip elektrodynamického snímače přímočarého pohybu



Obr. 8.6. Princip elektrodynamického snímače bez sběrače

8.2.1. Snímače přímočarého pohybu

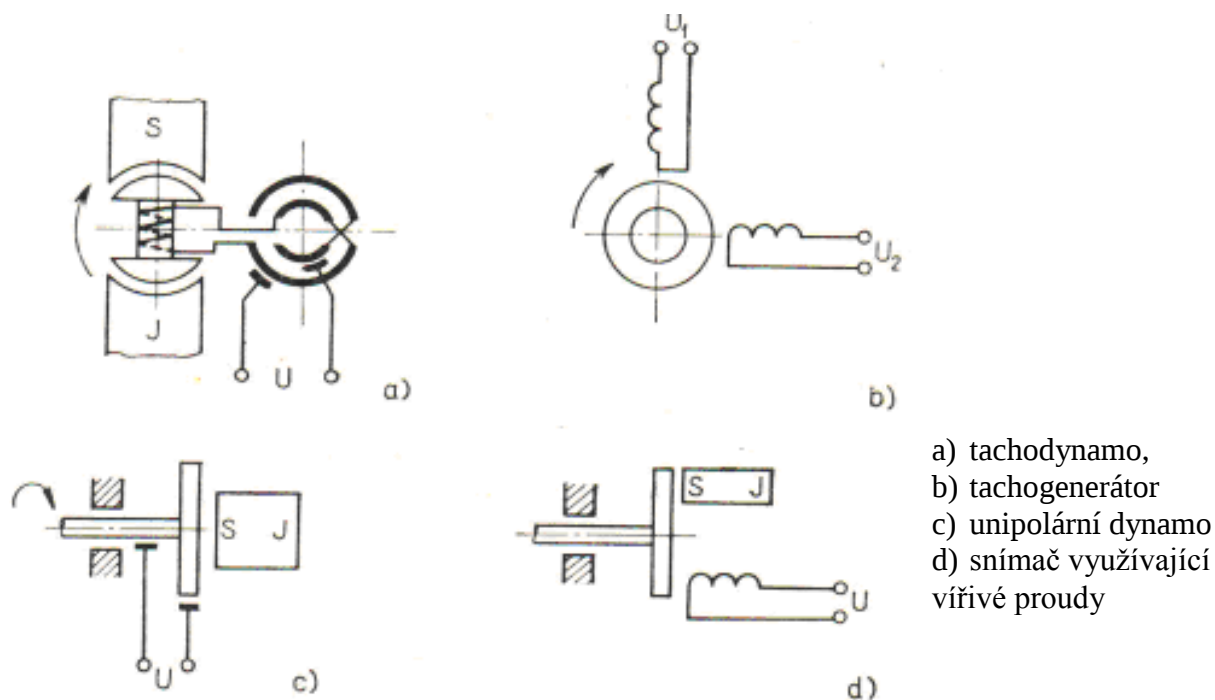
Snímač je řešen tak, že šířka vodivého pásu je větší než šířka pólů trvalého magnetu. Pohybem vodiče v magnetickém poli se ve vodiči indukuje napětí, které vytvoří vířivé proudy a tím vybudí magnetický tok. Vlivem pohybu pásu tok protne snímací cívku a ta indukuje od pohyblivého magnetického toku napětí $U = K \cdot B \cdot \frac{dv}{dt}$.

Napětí je úměrné zrychlení přímočarého pohybu. Pro vytvoření potřebného napětí je třeba velké magnetické indukce a tedy velkých vířivých proudů.

8.2.2. Snímače úhlové rychlosti

Z hlediska funkce známe čtyři základní provedení (obr. 8.7.):

- tachodynamo,
- tachogenerátor,
- unipolární dynamo,
- snímače využívající vířivé proudy.



Obr. 8.7. Základní typy elektrodynamických snímačů úhlové rychlosti.

Stejnoseměrné dynamo je nejrozšířenější snímač úhlové rychlosti, kdy se v magnetickém poli trvalého magnetu nebo elektromagnetu otáčí kotva s vinutím. Může být buď z feromagnetika nebo bez feromagnetika. Konce vinutí kotvy jsou vyvedeny na komutátor odkud se pomocí sběračů odebírá stejnosměrné napětí, které je přímo úměrné měřeným otáčkám n .

$$U = \frac{p_p \Phi_a N_z}{60 a_1} \cdot n, \text{ kde}$$

p – počet pólových dvojic,

Φ -magnetický tok,

N - počet závitů,

a_1 - počet párů paralelních vinutí,

n - otáčky (ot/min).

Výhodou snímače je jeho velký výstupní signál a možnost indikace směru otáčení.

Tachogenerátor je konstrukčně možno provést buď jako indukční generátor s klecovou kotvou, nebo jako indukční generátor s bubínkovým rotorem, jehož výhodou je malý moment setrvačnosti. Výstupní napětí je úměrné úhlové rychlosti rotoru tachogenerátoru a jeho kmitočet je dán kmitočtem budícího napětí. Linearita je lepší až 0,1%, otáčky až 8000 ot/min.

Unipolární dynamo má na hřídeli, která se otáčí uchycen hliníkový kotouč. V jeho čele je uložen trvalý magnet. Prochází-li celou plochou kotouče magnetický tok o indukci B , indukuje se na elementárním vodiči napětí, které je úměrné úhlové rychlosti a naměříme ho na hřídeli a na obvodu kotouče.

Elektrodynamický snímač využívající vířivých proudů převádí úhlový pohyb na kotouč z elektricky vodivého materiálu. K čelu kotouče je přiložen trvalý magnet tak, aby jeho siločáry protínaly rotující kotouč a na obvodu kotouče v určité vzdálenosti je pevně uložena

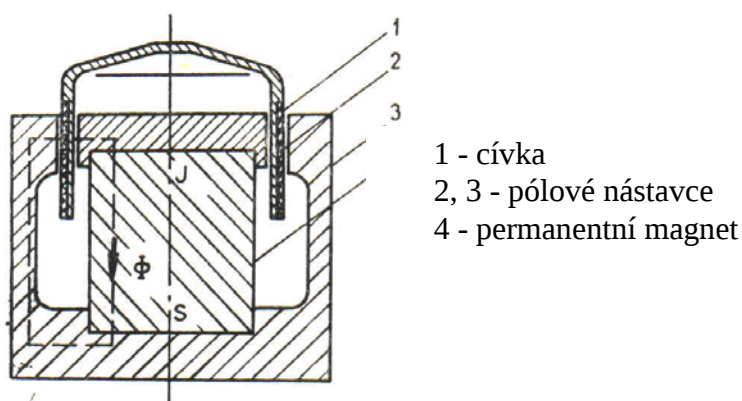
snímací cívka, ve které se indukuje vlivem magnetického toku vířivých proudů napětí. Jde v podstatě o snímač úhlového zrychlení.

8.2.3. Elektrodynamický snímač vibrací

Snímač pracuje v sousém provedení se stálým magnetem v ose snímače. Mezi pólovými nástavci je vzduchová mezera tvaru mezikruží, ve kterém je cívka uchycena tak, aby mohla kmitat ve směru osy systému. Setrvačnou hmotnost tvoří vlastní cívka. Rozlišujeme dva druhy snímačů:

Snímače absolutní mají setrvačnou hmotnost jako relativně klidné těleso, které je s kmitající měřenou částí spojeno článkem s malou tuhostí a s malým tlumením.

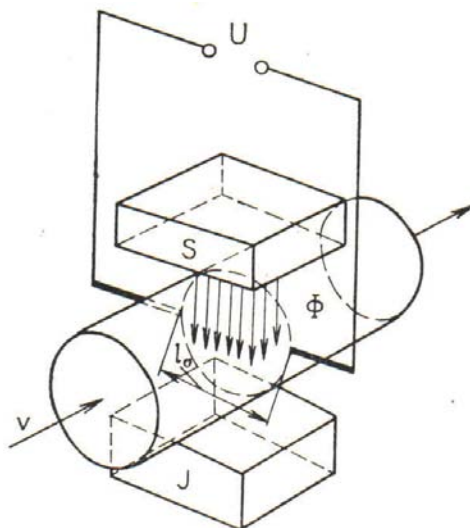
Snímače relativní mají hmotnost představující měřicí systém, který je pevně spojen článkem s velkou tuhostí s měřeným tělesem.



Obr. 8.8. Princip elektrodynamického snímače vibrací a mechanické náhradní schéma snímače

8.2.4. Indukční průtokoměr

U elektrodynamického průtokoměru se indukuje elektromotorické napětí ve vodiči kolmém na rovinu vytvořenou vektorem rychlosti vodivého média a vektorem magnetické indukce a platí rovnice dle Faradayova zákona $\mathbf{U} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{l}_0 \cdot \mathbf{v}$, kde $\mathbf{B}$ je vektor magnetické indukce, $\mathbf{v}$ je vektor rychlosti fiktivního vodiče a $\mathbf{l}_0$ délka vodiče, což odpovídá vzdálenosti elektrod. Je třeba uvažovat problematiku proudění kapalin, kdy se kapalina pohybuje nestejnou rychlostí vlivem turbulence proudění.

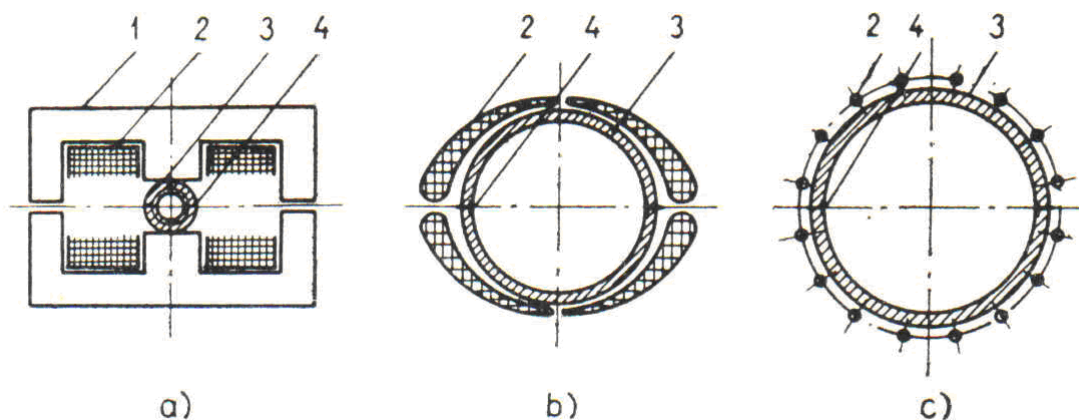


Obr. 8.9. Princip indukčního průtokoměru

Snímače lze konstrukčně rozdělit dle použitého magnetického obvodu na snímače se stejnosměrným magnetickým obvodem (trvalý magnet či elektromagnet) a snímače se střídavým nebo impulsovým magnetickým obvodem. Rozlišujeme průtokový kanál dle tvaru (obdélník, kruh), rozměry 2-2000 mm, materiál může být vodivý nebo nevodivý a vodivost média může být různá od slabých až po silné.

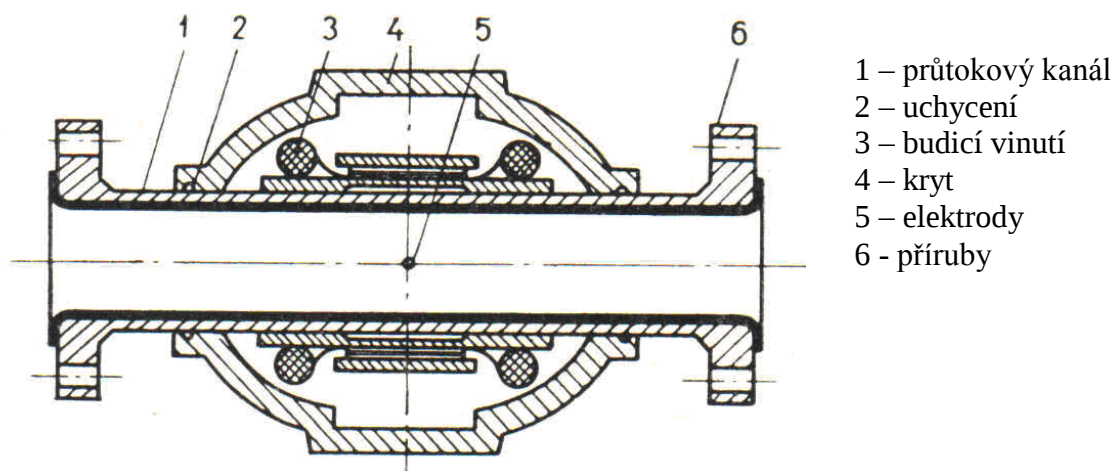
Většinou se používá střídavé buzení (dle obr. 8.10.):

- ve vzduchové mezeře je vložen průtokový kanál (obdélníkový průřez), použití do 25 mm,
- vinutí ve tvaru přílohných cívek, použití do 250 mm,
- pro největší průměry je vhodné vinutí ve tvaru tyčí rozložených po celém obvodu průtokového kanálu.



Obr. 8.10. Základní uspořádání budicích obvodů indukčních průtokoměrů

Kovový průtokový kanál je zakončen na obou koncích přírubami, kterými je snímač připojen do měřeného obvodu. Uvnitř průtokového kanálu je izolační vložka o délce, která se rovná $10 \times D$. Uvnitř krytu je budicí vinutí a elektrody, na nichž je odebírán výstupní signál snímače. Jako materiál snímače se používá Pt, Ti, Au, Ag. apod.



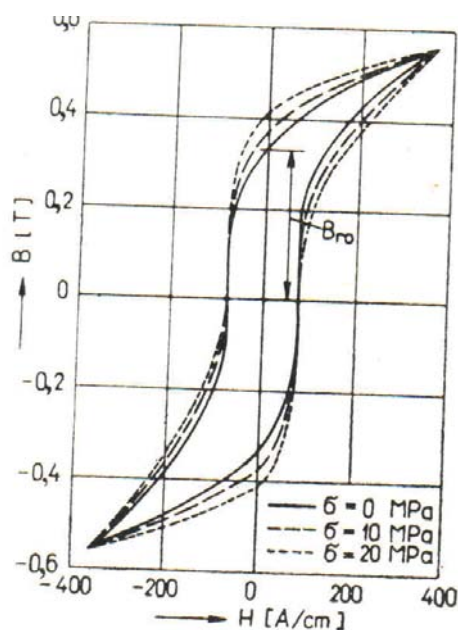
Obr. 8.11. Konstrukční řešení indukčního průtokoměru

Použití snímače pro měření průtoku ve strojírenství, hutnictví, chemii, potravinářství, zdravotnictví, jaderné technice atd. Krom toho je to např. snímač ponorný, plošný, bodový.

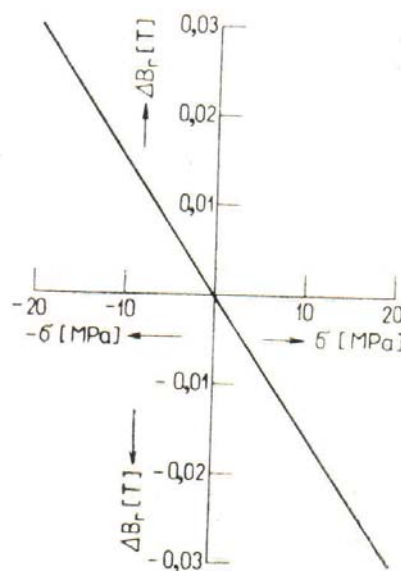
8.3. Magnetostrikční snímače

Magnetostrikční snímače využívají jevu, kdy při deformaci feromagnetických materiálů dochází nejen ke změně permeability, ale i ke změně remanentní indukce B_r . Na obr. 8.12. je naznačeno několik změn hysterezních křivek, ke kterým dojde při jednoosém namáhání niklu ve směru magnetizace.

Tzn. výstupní signál snímače síly je úměrný časové změně síly a s výhodou lze využít, že v určitém rozsahu namáhání je závislost mezi remanentní indukcí a mechanickým napětím lineární (obr. 8.13.) Snímače jsou vhodné především pro měření tlaku, momentů, zrychlení apod.



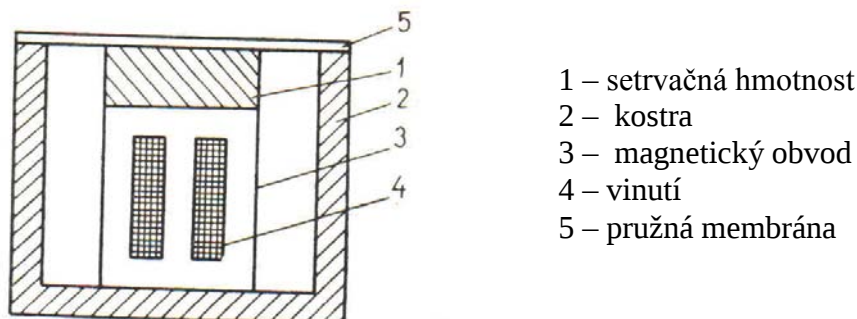
Obr. 8.12. Změna hysterezní křivky při zatěžování feromagnetika



Obr. 8.13. Závislost remanentní indukce na mechanickém napětí u Ni plechu

Magnetostrikční snímač zrychlení

Působením zrychlení se vytváří silové působení setrvačné hmotnosti na magnetický obvod a ve vinutí se pak indukují napětí. Membrána tvoří potřebné předpětí. Použití snímače je jen pro speciální aplikace z důvodu špatné cejchovatelnosti, menší přesnosti a změnám vlastností magnetického obvodu.



Obr. 8.14. Princip magnetostrikčního snímače zrychlení



Shrnutí pojmů 8

Faradayův zákon. Elektromagnetické snímače. Elektrodynamické snímače. Tachodynamo. Tachogenerátor. Indukční průtokoměr. Magnetostrikční snímače



Otázky 8

1. Vysvětlete rozdíl mezi indukčností a indukcí.
2. Definujte Faradayův zákon pomocí fyzikální rovnice.
3. Napište rovnici síly působící na vodič s proudem v magnetickém poli.
4. Vysvětlete funkci tachodynamu a definujte rozdíl mezi tachodynamem a tachogenerátorem.
5. Popište funkci indukčního průtokoměru a vysvětlete, zda měřeným médiem může být i voda.
6. Co znamená pojem remanentní indukce?
7. Nakreslete hysterezní křivku magnetického materiálu?

9. PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

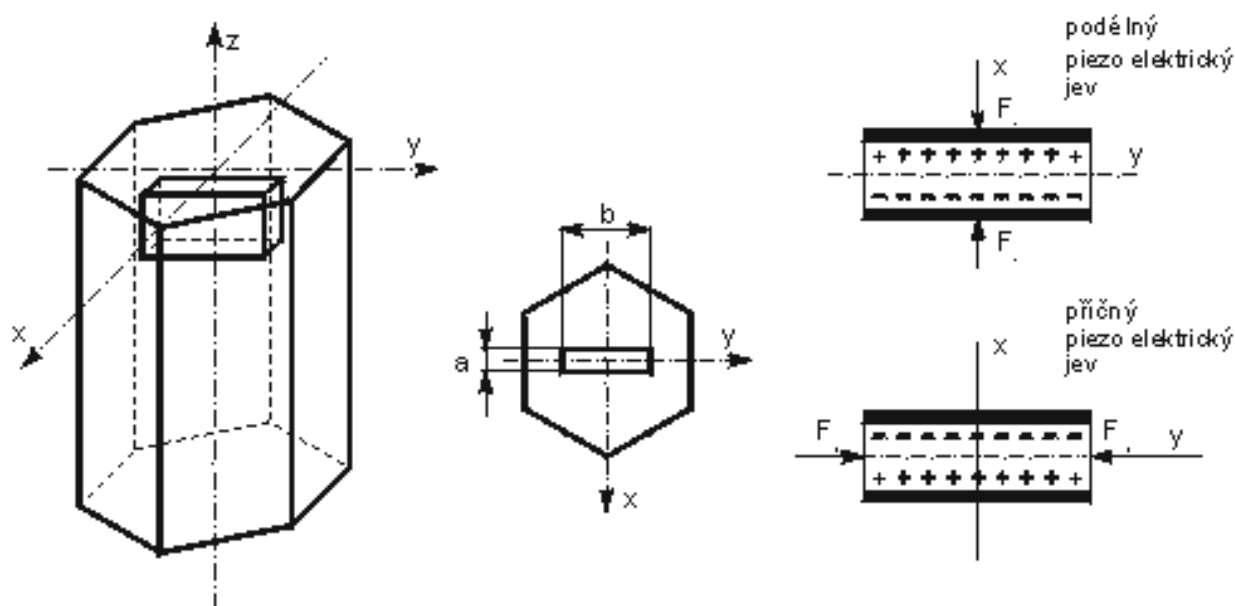
- definovat piezoelektrický jev
- popsat konstrukci a použití piezoelektrických snímačů
- vysvětlit funkci piezoelektrických snímačů pro měření neelektrických veličin



Výklad

Piezoelektrické snímače jsou aktivní snímače a využívají piezoelektrického jevu. Tzn. vlivem mechanických deformací uvnitř některých krystalických dielektrik vzniká elektrická polarizace, čímž na povrchu vznikají zdánlivé náboje, které mohou v přiložených elektrodách vázat nebo uvolňovat náboje skutečné. Jakmile mechanické napětí zmizí, dostává se dielektrikum do původního stavu.

Jev je závislý na typu a krystalografické orientaci použitého krystalu. Tento děj je reciproký, tzn. přiložením střídavého elektrického pole se krystal mechanicky rozkmitá. Nejčastěji se používá křemen (SiO_2) a elementárním strukturním prvkem je hranol (obr. 9.1.). Podélná osa z se nazývá optická, osa x a y , které jsou kolmé k optické označujeme za elektrické. Vektor polarizace P směřuje podél elektrické osy a na plochách kolmých na elektrickou osu se objeví náboje. Působením síly F_z , která je rovnoběžná s osou optickou se krystal nezelektrizuje.



Obr. 9.1. Piezoelektrický jev u krystalu křemene

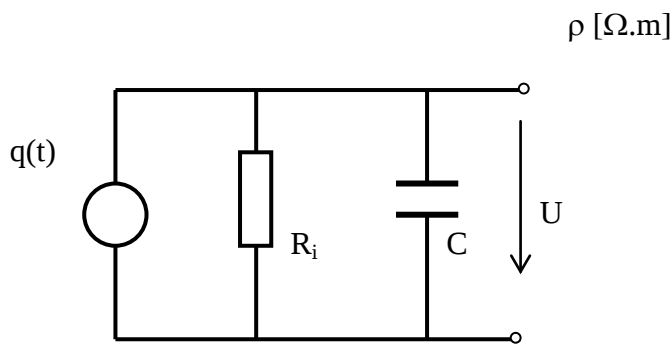
Požadavky na piezoelektrické materiály jsou především velká piezoelektrická citlivost, mechanická pevnost a permitivita. Kromě křemene jsou dalšími vhodnými materiály titaničitan barnatý (BaTiO_3), olovnatý (PbTiO_3), některé makromolekulární látky aj.

Křemen má lineární statickou charakteristiku, nepatrnou závislost piezoelektrické konstanty na teplotě, velký měřicí rozsah, který je dán mechanickou pevností krystalu a široké teplotní rozmezí (maximálně do 550°C). Využívá se modifikace α do 573°C , kdy křemen ztrácí své piezoelektrické vlastnosti.

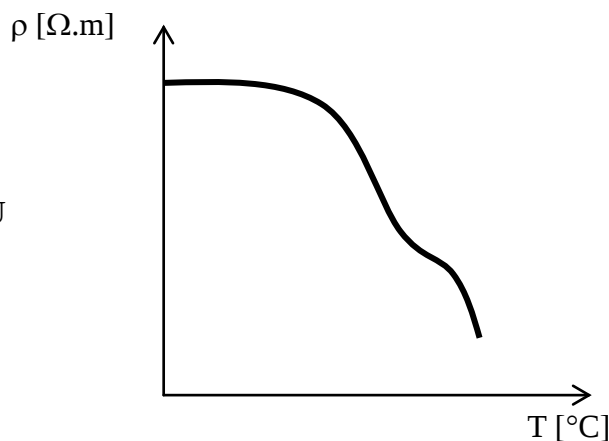
Piezoelektrický snímač je vytvořen z krystalového výbrusu, který je opatřen vodivými elektrodami. Snímač se při působení neelektrické veličiny chová jako generátor náboje. Představuje zdroj napětí s velkým vnitřním odporem, protože dielektrikum má značný izolační odpor. Náboj, vznikající při působení měřené veličiny, se převádí na napětí dle obr. 9.2. R_i je definován vnitřním a povrchovým odporem použitého materiálu a kapacita C je závislá na geometrických rozměrech krystalu a na permitivitě použitého materiálu. Naměřené napětí je funkcí síly, která ho vyvolala dle vztahu

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{k_p}{C} F = k_u \cdot F,$$

kde k_p je piezoelektrická konstanta a k_u je napěťová citlivost snímače.

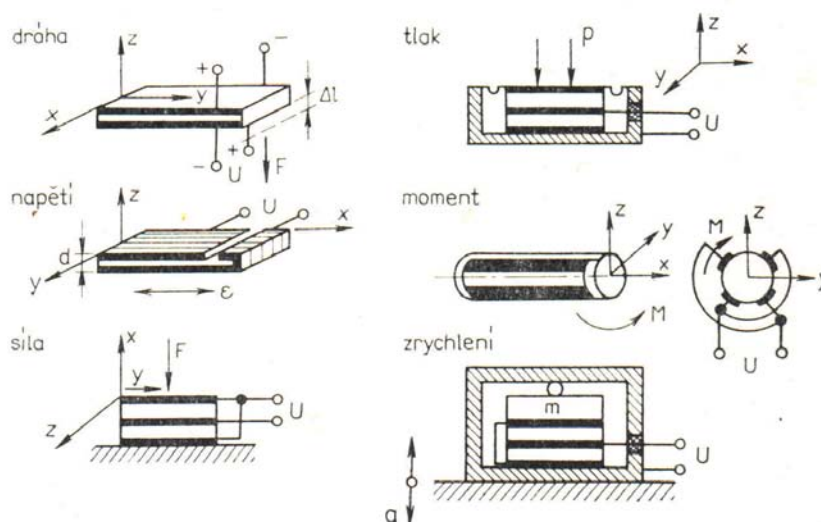


Obr. 9.2. Náhradní schéma piezoelektrického snímače



Obr. 9.3. Závislost měrného odporu křemene na teplotě

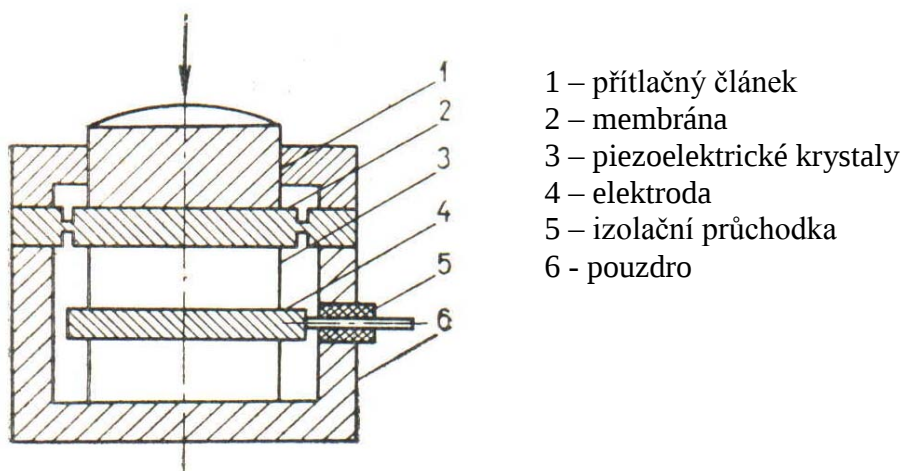
Použití piezoelektrického snímače je pro své malé rozměry, jednoduchost, lineární charakteristiku široké. Vhodné především pro dynamická měření tlakové síly, tlaku, zrychlení, výchylky, mechanického napětí. Příklady užití snímače pro některé významné veličiny jsou schematicky zobrazeny na obr. 9.4.



Obr. 9.4. Princip piezoelektrických snímačů některých veličin

Snímače tlakové síly

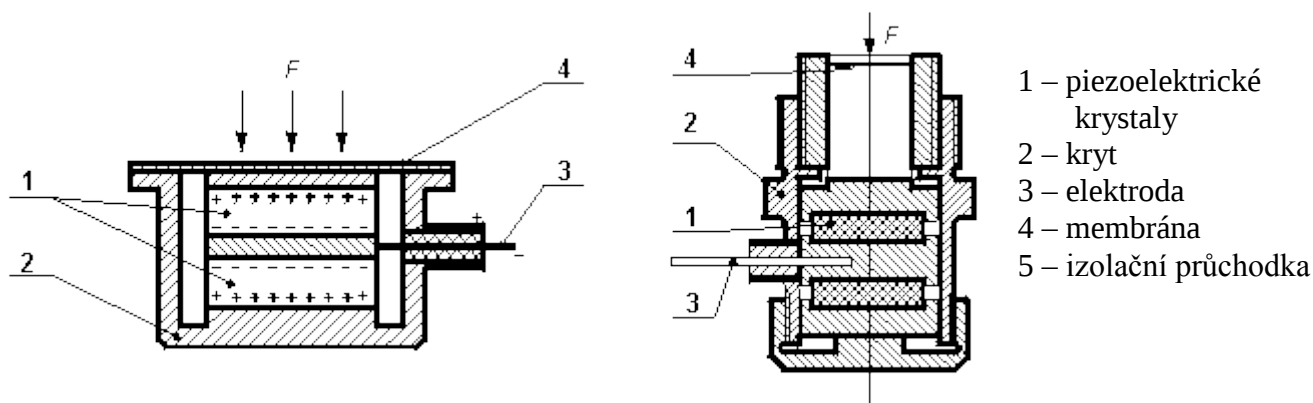
Snímače se vyrábějí v různých provedeních pro tlakové i tahové síly pro rozsahy od 10 kN do 10^6 kN. Snímač (obr. 9.5.) obsahuje dva piezoelektrické krystaly orientované tak, aby se náboje sčítaly při působení síly přes membránu na přítlačný článek. Výstup snímače získáme z elektrody.



Obr. 9.5. Snímače pro měření velkých tlakových sil

Snímače tlaku

Snímače piezoelektrické jsou používány především pro měření dynamických tlaků. Schéma piezoelektrického snímače tlaku na obr. 9.6. obsahuje dva piezoelektrické krystaly, které jsou zapojeny proti sobě a jejich náboje se sčítají. Křít snímače je vodivě spojen s vnějšími elektrodami obou krystalů a současně vytváří elektrické i magnetické stínění. Centrální elektroda je vyvedená izolační průchodkou. Přenos tlakové síly na krystal je zprostředkován membránou.



Obr. 9.6. Konstrukce snímače tlaku

Piezoelektrický snímač teploty

Snímač využívá inverzní piezoelektrický jev, tedy nepatří do skupiny generátorových snímačů. Uložíme-li destičku s piezoelektrickými vlastnostmi do elektrického pole, dojde k její deformaci. Je-li pole střídavé, dojde k mechanickému kmitání. Kmitající článek se chová po elektrické stránce jako oscilační obvod.



CD-ROM

Animace použití piezoelektrického snímače.



Shrnutí pojmů 9

Piezoelektrický jev (příčný, podélný). Piezoelektrický krystal.



Otázky 9

1. Uveďte základní podmínky pro vznik piezoelektrického jevu.
2. Kolik os má piezoelektrický krystal a jak se odlišují?
3. Jaký je rozdíl mezi křemenem a křemíkem?



Odměna a odpočinek

Milí studenti, jistě si zasloužíte velkou pochvalu, že jste při studiu došli až sem. Můžu s jistotou tvrdit, že většina fyzikálních jevů již byla objasněna a teď už nás čekají jen takové “bonbónky” v podobě metod měření čtyř důležitých veličin: teplota, tlak, průtok a výška hladiny. Tuším, že tato část pro Vás bude daleko příjemnější a lépe uchopitelná.

10. PRŮMYSLOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty



Průvodce studiem

Ve zbývajících kapitolách se zaměříme na nejdůležitější veličiny měřené v metalurgii (tj. snímače teploty, tlaku, průtoku a výšky hladiny). Protože některé metody (většinou elektrické) již byly vysvětleny v předešlých kapitolách, nebudou tady znovu uvedeny. Je ale zřejmé, že je nelze při studiu vynechat!



Čas ke studiu: 8 hodin



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

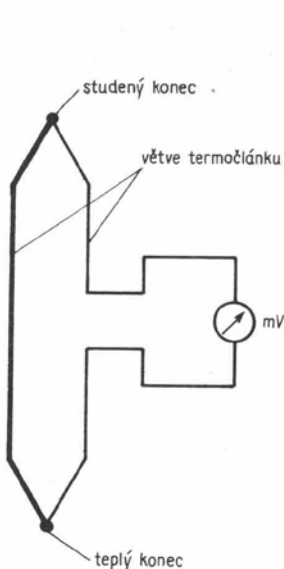
- definovat principy měření teploty
- vysvětlit termoelektrický jev
- popsat funkci a druhy pyrometrů



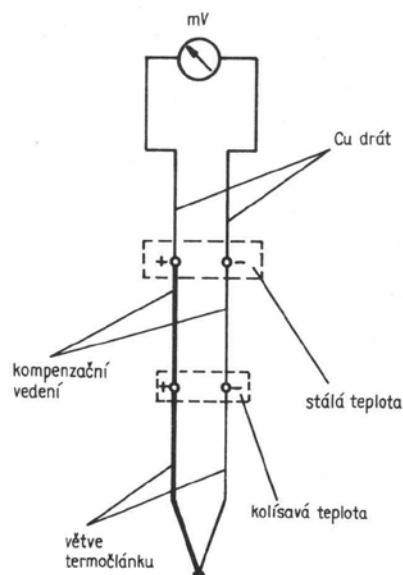
Výklad

10.1. Termočlánky

Snímače jsou založeny na termoelektrickém jevu objevené panem Seebeckem v roce 1821. Termočlánek je tvořen dvěma kovovými vodiči různého chemického složení, které jsou na obou koncích vodičů spojeny. Jestliže teploty obou konců jsou rozdílné, vzniká v obvodu termoelektrické napětí a obvodem protéká elektrický proud.



Obr. 10.1. Princip termočlánku



Obr 10.2. Schéma připojení termočlánku k měřicímu přístroji

Teplý spoj (neboli měřicí) je kontaktně umístěn v místě měření a studený spoj (neboli srovnávací) je nutno udržovat na konstantní teplotě, nebo musí být vliv termoelektrického napětí tohoto spoje kompenzován. Kompenzační vedení přenáší termočlánekové napětí ke srovnávacímu místu, aniž by nastalo působení teploty prostředí. Materiál se volí s menším ohmickým odporem než má materiál termočlátku, termoelektrické vlastnosti musí být shodné s vlastnostmi termočlátku a musí být levnější.

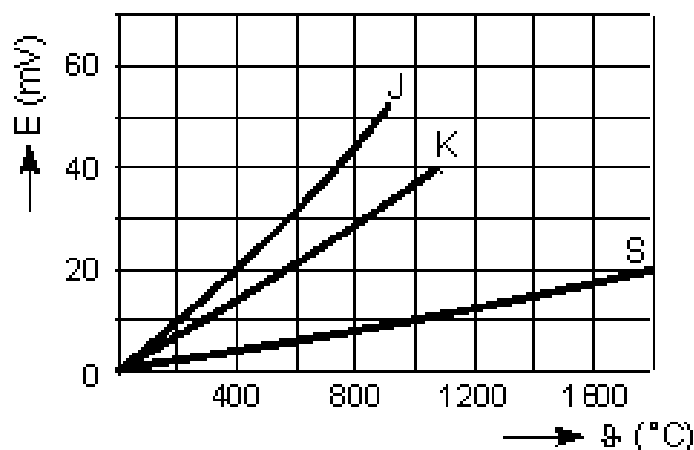
10.1.1. Materiál a vlastnosti termočlátku

Při volbě materiálů se musí vždy vycházet z podmínek měření v daném prostředí. V rámci usnadnění volby se ustálily vhodné kombinace kovů s již ověřenými vlastnostmi a potřebné údaje jsou obsaženy v normách ČSN. Označení jednotlivých termočlátek se provádí velkými písmeny. Vlastnosti termočlátek jsou charakterizovány těmito parametry:

- citlivost,
- tepelná odolnost,
- chemická odolnost,
- termoelektrická stálost.

Materiál na výrobu termoelektrických článků má vykazovat pokud možno velký a lineární přírůstek napětí v závislosti na teplotě, stabilitu údaje při dlouhodobém provozu a odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům.

Hlavním kritériem je maximální teplota měřeného místa. Z obr. 10.3. je vidět, že kovy s velkou citlivostí (např. typ J) se nedají použít na měření vysokých teplot a opačně. Pro průmyslové použití je nejrozšířenější termočlánek typu J (železo-měďnikl) pro rozsah teplot od -200 do +600 °C. Pro vyšší teploty se používá termoelektrický článek typu K (niklchrom-niklhlíník) v rozsahu od -50 do 1 000 °C. Termoelektrický článek typu S (platinarhodium-platina) se používá v rozsahu od 0 do +1 300 °C. Přehled vlastností vybraných termočlátek je uveden v tab. 10.1.

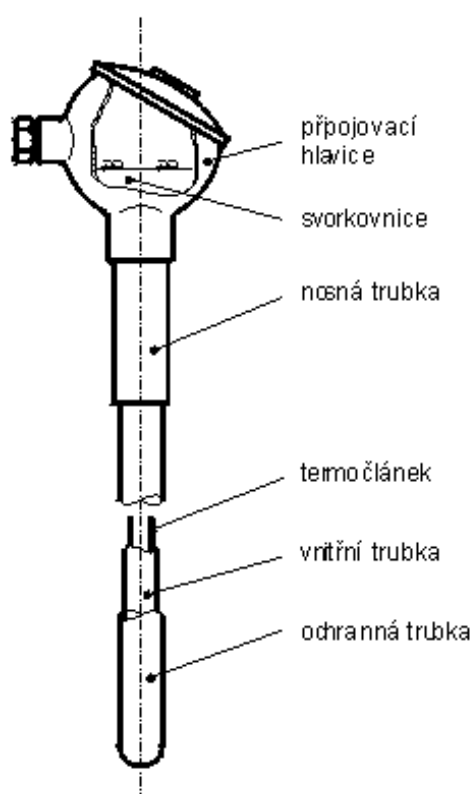


Obr. 10.3. Statické charakteristiky vybraných termočlátek

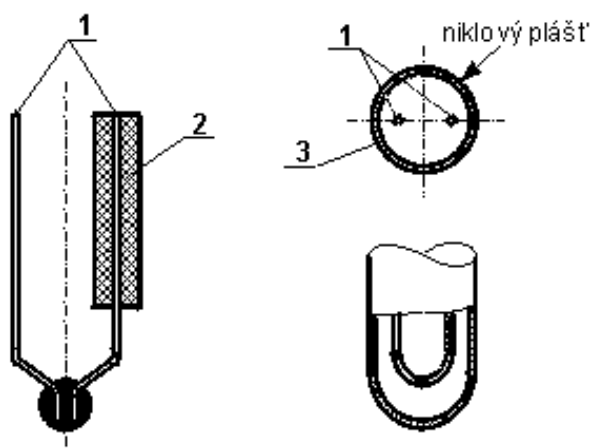
0značení termočláčku	T	J	X	S
název termočláčku	měď'-měď'nikl	železo-měď'nikl	niklchrom -niklhlíník	platinarhodium - platina
použitelnost trvale	-200 °C až +400 °C	-200 °C až 600 °C	-50 °C až 1000 °C	0 °C až 1300 °C
použitelnost krátkodobě	+600 °C	+900 °C	+1300 °C	+1800 °C
termoelektrické napětí (mV/100 °C)	4,25	5,37	4,8	0,64
odolnost v oxidačním prostředí	malá	malá	velká	velká
odolnost v redukčním prostředí		velká	malá	malá

Tab.10.1. Přehled vlastností termočláčků

Provedení termoelektrického snímače pro provozní aplikace je patrné z obr. 10.4. Termoelektrický snímač teploty je vlastně termoelektrický článek, umístěný v ochranné armatuře, která zabraňuje jeho mechanickému poškození a chrání jej před nepříznivými fyzikálními a chemickými vlivy. Vlastní termoelektrický článek je vložen do stonkové trubky zakončené přírubou, na které je svorkovnice s připojenými vývody termočláčku. Materiál vnější ochranné trubky je různý podle charakteru prostředí a velikosti měřené teploty. Ochranná jímka chrání teploměr před nepříznivými účinky prostředí, zhoršuje však jeho dynamické vlastnosti.



Obr. 10.4. Termoelektrický snímač s ochrannou trubicou



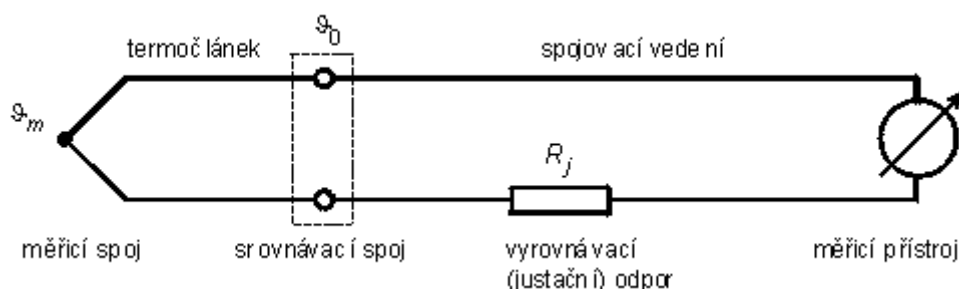
Obr. 10.5. Detail a řez plášťového termočládku

Termoelektrické měřicí vložky se vyrábějí s jedním nebo dvěma články. Termočlánekové dráty jsou vzájemně elektricky izolované keramickými trubičkami (obr. 10.5a.). Moderním typem kompaktních snímačů jsou tzv. plášťové termočládky, u nichž jsou dráty uloženy v niklové trubičce vyplněné práškovým MgO nebo Al_2O_3 (obr. 10.5b.). Průměr kovového pláště činí (0,15 až 10) mm. Plášťové termočládky lze ohýbat, mají malou časovou konstantu a umožňují měření i na těžko přístupných místech.

10.1.2. Měření termočládky a kompenzace srovnávacích spojů

Termoelektrický článek je zdrojem napětí, k jehož vyhodnocování se používá magnetoelektrických přístrojů, měřicích zesilovačů nebo kompenzačních měřicích metod. V případě, že se měří termoelektrické napětí pomocí přístrojů s proudovou spotřebou, vzniká na vnitřním odporu termočládku a na odporu vedení úbytek napětí. O tento úbytek bude napětí na svorkách vyhodnocovacího přístroje nižší nežli termoelektrické napětí článku. Proto vyhodnocovací přístroje s měřicím ústrojím s otočnou cívkou mají předem nacejchovaný odpor vedení $20\ \Omega$. S tímto odporem vedení se počítá při cejchování stupnice přístroje $^{\circ}\text{C}$. Při zapojení termočládkového snímače je nutno zjistit odpor celého obvodu (odpor termočládku, odpor kompenzačního vedení, odpor kompenzační krabice či termostatu, odpor spojovacího vedení) a hodnotu vyrovnávacího (justačního) odporu R_j upravit tak, aby celkový odpor obvodu byl $20\ \Omega$. Je-li k měření termoelektrického napětí použito některé kompenzační

metody, při které neprotéká proud obvodem termoelektrického článku, není nutno vyrovnávat odpor vedení.

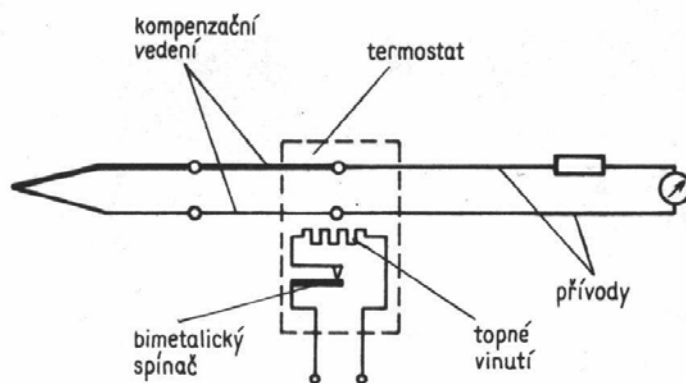


Obr. 10.6. Zapojení termočlánu

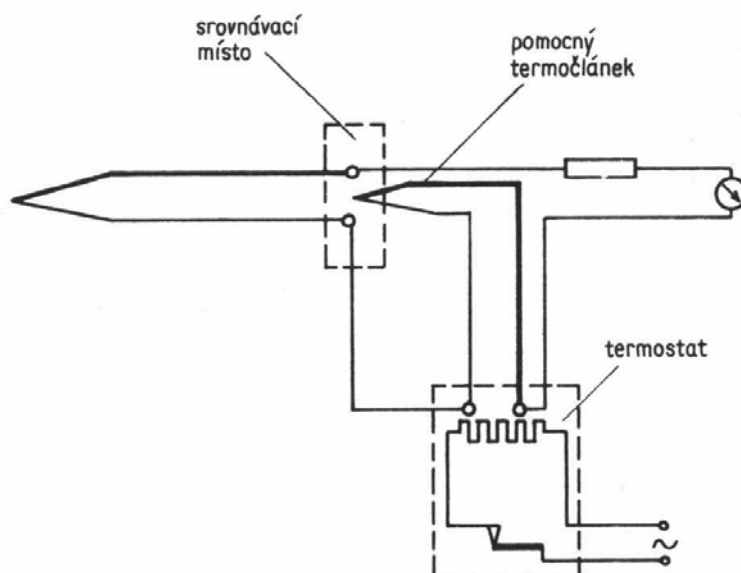
Rozhodující pro měření je udržet teplotu srovnávacího konce na konstantní výši. Vliv kolísání teploty srovnávacího spoje lze vyloučit několika způsoby. Umístěním srovnávacích spojů do termostatu (v laboratoři při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, u průmyslových aplikací při $50\text{ }^{\circ}\text{C}$) nebo použitím kompenzačních obvodů. U číslicových měřicích systémů se nejčastěji používá tzv. izotermické svorkovnice, jejíž teplota se snímá např. polovodičovým odporovým teploměrem. Příslušná korekce se vyhodnotí číslicově.

Metody stabilizace teploty srovnávacích konců termočlánu

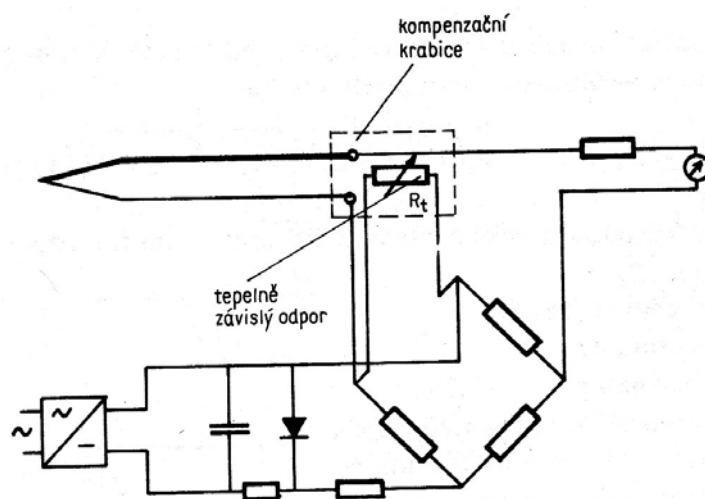
- Použití Dewarových nádob naplněných směsí vody a ledu se používá jen pro laboratorní účely, kdy srovnávací konec je v této směsi držen na teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Provozně je tento způsob nepoužitelný.
- Termostat srovnávacích konců, který má uvnitř odporové vinutí a bimetalicky ovládaný kontakt (obr. 10.7.). Odporově vyhřívaný termostat obvykle slouží jako srovnávací místo pro více termočlánu a bimetalický kontakt je nastaven tak, aby se udržovala konstantní teplota, obvykle na $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Pomocný termočlánek měří kolísající teplotu srovnávacích konců. Změny srovnávací teploty jsou kompenzovány díky sériového zapojení pomocného termočlánu, který je ze stejného materiálu (obr. 10.8.).
- U kompenzační krabice (obr. 10.9.) jsou srovnávací konce vyvedeny do robustní litinové skříně, v níž je umístěn teplotně závislý odpor. Ten je zapojen do můstku. Zvýšená teplota vyvolá snížení termočláňkového napětí, ale i zvýšení odporu R_t a na diagonále se zvýší napětí. Tak se vykompenzuje pokles termočláňkového napětí. Obvykle se udržuje při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 10.7. Kompenzace pomocným termočlánkem

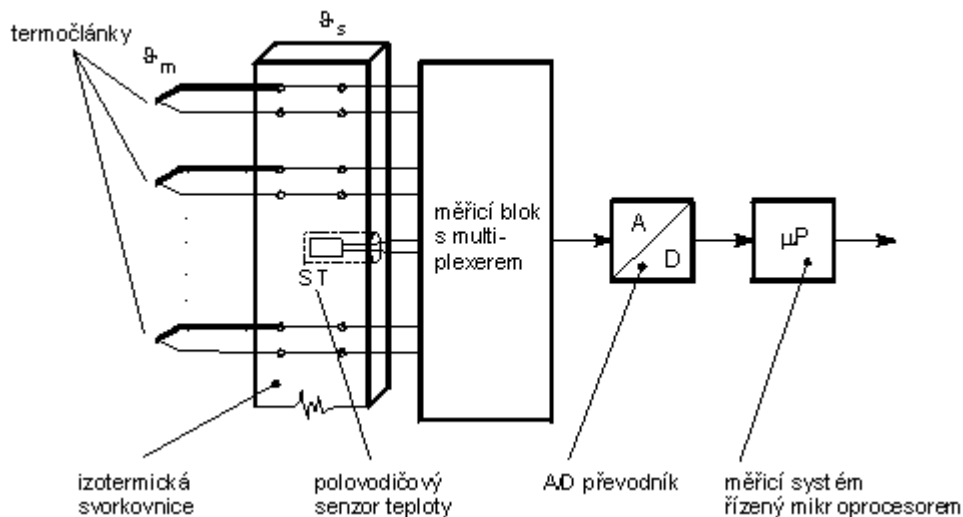


Obr. 10.8. Schéma zapojení termočlánku s termostatem



Obr. 10.9. Kompenzace s kompenzační krabicí

Užití termočlánků je zvláště vhodné při monitorování velkého množství měřicích míst. V těchto případech lze použít i různých typů termočlánků, jejichž srovnávací spoje jsou připojeny k izotermické svorkovnici. Kompenzace vlivu změn teploty srovnávacího spoje se provádí softwarově s využitím počítače (obr. 6). Počítač řídí vyhodnocování signálu a prostřednictvím multiplexoru i sériové snímání údajů z jednotlivých míst. Multiplexor představuje mnohopolohový přepínač, který zajišťuje postupné připojování jednotlivých termočlánků k vyhodnocovacímu zařízení. Jistou nevýhodou tohoto uspořádání je delší čas potřebný pro zpracování údajů. Při požadavku rychlé odezvy je nutno použít hardwarové kompenzace speciální pro každý termočlánek.



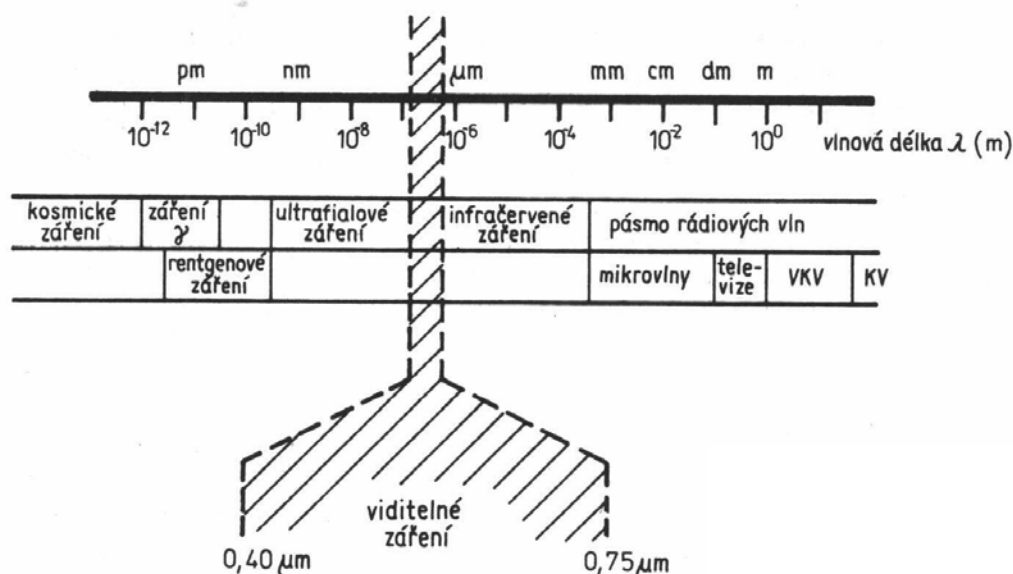
Obr. 10.10. Monitorování teploty

10.2. Bezdotykové teploměry – pyrometry

Bezdotykové teploměry jsou v poslední době velmi rozšířené díky pokroku v elektronice a optice. Přístroje se označují jako radiační pyrometry nebo radiační teploměry, nyní většinou jako IČ-teploměry. Pyrometry se uplatňují především při měření vysokých teplot a pohybujících se objektů v metalurgii a v provozech a aplikacích, kde je obtížné měřit kontaktními metodami (chemický průmysl, sklárství, cementárny, vápenky, keramický průmysl). V průběhu posledních let se aplikace IČ-teploměrů posunula k nižším teplotám, včetně měření teplot nižších než 0 °C. Takže se pyrometry více využijí i v potravinářství, elektronice, průmyslu papírenském, farmaceutickém, textilním, gumárenském, při zpracování plastických hmot apod. Přenosné IČ-teploměry nacházejí široké uplatnění při detekci tepelných ztrát a poruch, při kontrole potrubních systémů, nádrží apod.

10.2.1. Fyzikální principy pyrometrie

Pyrometry měří teplotu předmětu nebo teplotonosného média na základě snímání tepelného nebo světelného záření. Každý objekt zahřátý na teplotu vyšší než je teplota jeho okolí, vyzařuje elektromagnetické záření o určitých vlnových délkách (obr. 10.11.).



Obr. 10.11. Zobrazení spektra elektromagnetického záření

Tělesa zahřátá na nižší teploty se neprojevují viditelným zářením, neboť vyzařují záření o delších vlnových délkách, tzv. infračervené záření, označované jako tepelné záření. Tělesa zahřátá na velmi vysoké teploty, nad oblasti viditelného záření o kratších vlnových délkách je ultrafialové záření. Ve vlnovém rozsahu světelného záření je i viditelné záření, které může vnímat lidské oko ($0,35 - 0,70 \mu\text{m}$).

Pyrometrická měření závisí na fyzikálních vlastnostech zářiče a na fyzikálních vlastnostech přijímače, tj. čidla pyrometru. Při dopadu na čidlo platí rovnice

$$r + p + a = 100 (\%), \text{ kde}$$

r - je odražené záření,

p - záření proniknuté,

a - pohlcené záření.

Pokud je složka pohltivosti stoprocentní, čidlo má vlastnosti černého tělesa a nedochází ke zkreslení měření. Obdobné vztahy platí i pro zářič, ale obráceně. Tzn. pokud je veškeré záření emitováno, má zářič vlastnosti černého tělesa a nedochází ke zkreslení. Prostředí mezi zářičem a přijímačem má vliv na přesnost měření, tzn.:

- propustnost záření p je 100%, prostředí je průteplivé a nemá vliv na přesnost měření,
- $p < 100 \%$, dochází k pohlcování určité části záření nebo k jeho odrazu a měření je nutno korigovat,
- nežádoucím prostředím je vlhký vzduch, pára, kouřové plyny, sklo, led,
- vhodným prostředím je suchý vzduch, kyslík, dusík, krystaly minerálů.

Skutečná tělesa nemají vlastnosti černých těles a platí rovnice

$$E = \varepsilon_{\lambda} \cdot E_0, \text{ kde}$$

E je energie záření nečerného tělesa při určité teplotě,

E_0 – energie záření černého tělesa při stejné teplotě,

ε_λ – součinitel emise nečerného tělesa závisí na povrchu, druhu materiálu, teplotě a vlnové délce.

Látky, které mají pro různou vlnovou délku různou emisivitu ε_λ vykazují také různě velké odchylky od záření černého tělesa; jsou to tzv. selektivní zářiče. Existují však tělesa, jejichž emisivitu můžeme považovat za konstantní v dosti značném rozsahu vlnových délek. Takové zářiče označujeme jako šedá tělesa s emisivitou ε . Jde o většinu tuhých látek v určitém rozsahu spektra. Příklady vybraných materiálů jsou uvedeny v tabulce.

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

Tab. 10.2. Emisivita ε pro vybrané povrchy

Emisivita je definována jako poměr energie vyzařované objektem při dané teplotě k energii ideálně černého tělesa při stejné teplotě. Emisivita černého tělesa je rovna 1,0. Emisivita je velmi důležitým faktorem pyrometrie a její vliv není možno zanedbávat.

Intenzita záření je dána: Stefan - Boltzmannovým zákonem

$$E_0 = \sigma \cdot T^4, \text{ kde}$$

T - termodynamická teplota zářiče (K),

σ - Stefan - Boltzmannova konstanta $5,6697 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

Pro reálné těleso o emisním součiniteli ε pak platí

$$E_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Intenzita záření je funkcí vlnové délky – Planckův zákon

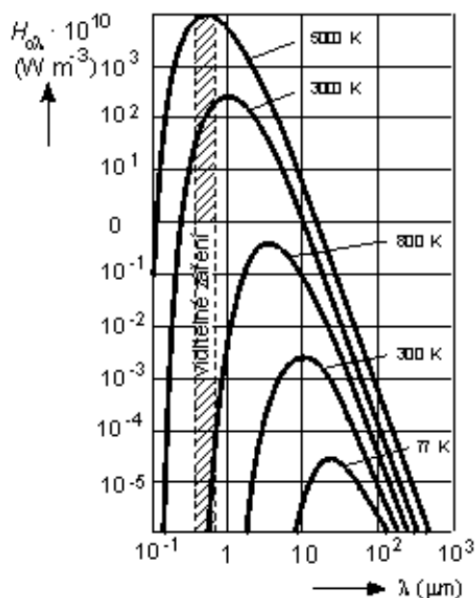
$$E_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T} - 1}}, \text{ kde}$$

E_λ - je intenzita záření při vlnové délce λ (Wm^{-2}),

c_1 – první vyzařovací konstanta $= 3,74 \cdot 10^{-16} (\text{Wm}^{-2})$,

c_2 – druhá vyzařovací konstanta $= 1,44 \cdot 10^{-2} (\text{mK})$,

λ - vlnová délka (m).



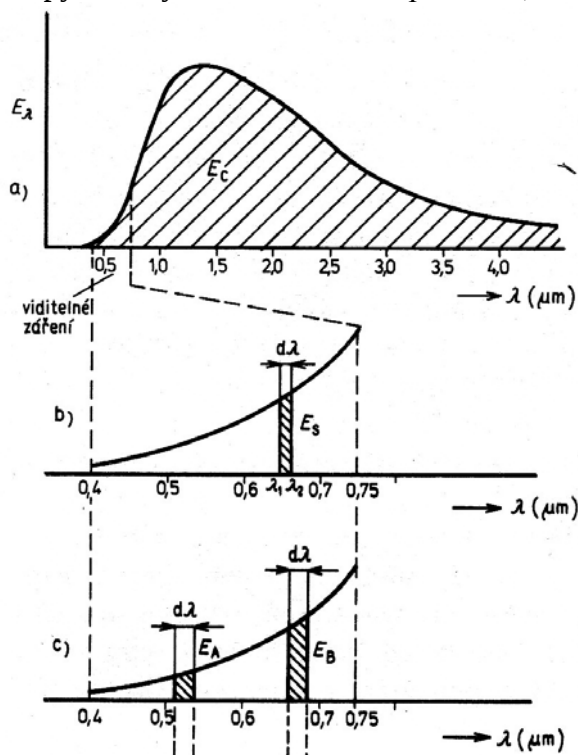
Obr. 10.12. Planckův zákon – rozložení emitované energie v závislosti na vlnové délce záření

Planckův zákon platí pro černé těleso, maximum intenzity záření se posunuje s rostoucí teplotou směrem ke kratším vlnovým délkám dle tzv. Wienova zákona posuvu

$$\lambda_m \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3}, \text{ kde}$$

λ_m je vlnová délka, při níž nastává při dané teplotě T maximum intenzity záření.

Uvedené zákony záření zahřátých těles musí být respektovány při konstrukci pyrometrů i při korekci naměřených údajů. Přístroje založené na měření teplotního záření umožňují měření v širokém rozsahu teplot od -40°C až do $8\,000^\circ\text{C}$. Podle oblasti spektra, které k měření využívají, můžeme pyrometry rozdělit na širokopásmové, úzkopásmové a poměrové.



a) radiální pyrometr

b) spektrální pyrometr

c) barvový pyrometr

Obr. 10.13. Závislost intenzity záření na vlnové délce u jednotlivých druhů pyrometrů

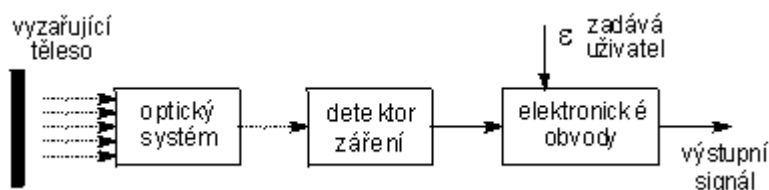
10.2.2. Pyrometry radiační

Pyrometry mohou být označeny taky jako pyrometry celkového záření, širokopásmové, pyrometry integrační nebo ardometry. Jsou konstruovány tak, že reagují na téměř celé spektrum vysílaného záření, tzn. snímají celkovou energii záření podle vztahu

$$E_C = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_{\lambda} d\lambda.$$

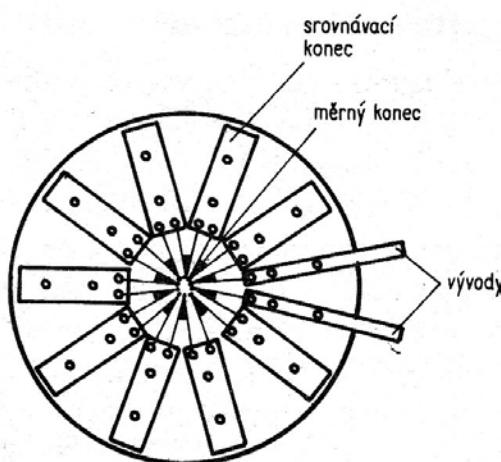
V praxi se realizují pouze ve velmi širokém pásmu spektra (0,4 až 3,5 μm) vzhledem k propustnosti optických prvků a spektrální citlivosti.

Vlastnosti pyrometru jsou dány použitým snímačem záření a druhem optického systému, ze kterých se pyrometr skládá (obr. 10.14.).



Obr. 10.14. Blokové schéma radiačního pyrometru

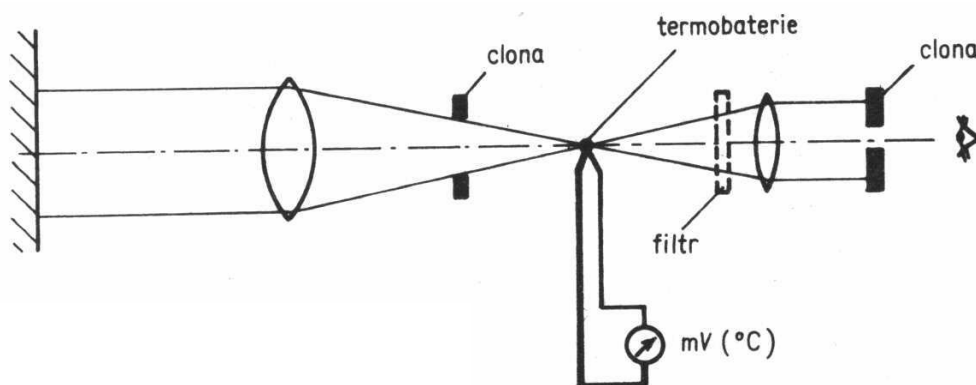
Tepelné záření, vysílané měřeným objektem, se soustřeďuje optickým systémem na čidlo radiačního pyrometru. Optický systém bývá sestaven z čoček nebo zrcadel. Čidlem bývá nejčastěji baterie termočlánků (až 30 měřicích spojů na ploše 4 mm^2), dále bolometr (fóliový odporový teploměr) nebo termistor. Termobaterie (obr. 10.15.) jsou sériově spojené termočlánky, které tak dávají vyšší termočlávkové napětí. Plocha, na kterou dopadá záření je minimální.



Obr. 10.15. Termobaterie radiačního pyrometru

Povrch čidla bývá začerněn. Přijímač záření i optika musí být pokud možno nezávislá na vlnové délce. Volba optiky se řídí měřicím rozsahem, který bývá standardně (600 až 2 000) $^{\circ}\text{C}$ a (0 až 1 000) $^{\circ}\text{C}$. V rozmezí nižších teplot jsou vhodnější použití jen zrcadlové

optiky s kovovým povrchem zrcadel. Vstupní okénko takového pyrometru bývá chráněno před prachem tenkou fólií z umělé hmoty, která propouští infračervené záření.



Obr. 10.16. Princip radiačního pyrometru s termočláňkovým čidlem

Jako snímače je možno užít i vhodných polovodičových snímačů záření a dosáhnout tak vysoké citlivosti, ovšem pouze v určitém pásmu vlnových délek. Tyto přístroje se vyznačují nízkou časovou konstantou (řádově 10^{-2} s) na rozdíl od přístrojů s tepelnými snímači a vzhledem k vysoké citlivosti mohou být použity i pro měření teploty těles malých rozměrů (ϕ tělesa 1,5 mm ze vzdálenosti 150 mm).

Všechny radiační pyrometry pracují s malými chybami pouze v případech, kdy emisivita $\varepsilon \rightarrow 1$. Tuto podmínku splňují dobře uzavřené prostory, objekty bez lesku apod. Při měření se používají uzavřené keramické trubice, které jsou vloženy uzavřeným koncem do měřeného prostředí (např. pece). Na dno trubky se pak zaměří pyrometr. Aby pyrometr měřil teplotu zářiče správně, musí být zaručeno, že na přijímač záření dopadají jen tepelné paprsky zářiče. Zdrojem častých chyb je rušivě působící denní světlo; např. těleso ozářené sluncem nelze měřit. Měření je nezávislé na vzdálenosti přístroje od měřeného tělesa, pokud obraz tělesa kryje obrys přijímače záření. Kontrola se provádí vizuálně okulárem. Obsahuje-li atmosféra mezi objektem a radiačním pyrometrem složky absorbující infračervené záření, dochází k chybě měření.

Ke zpracování signálu se u současně vyráběných přístrojů využívají moderní elektronické obvody řízené mikroprocesorem. Do paměti se ukládají údaje o maximální a minimální měřené teplotě, střední hodnota teploty a údaj o rychlosti změny teploty. Na displeji je k dispozici měřený údaj i hlášení o poruchových stavech. Velikost emisivity se zadává prostřednictvím obslužné klávesnice.

10.2.3. Pyrometry spektrální (pásmové, úzkopásmové)

Spektrální pyrometry reagují pouze na jednu vlnovou délku (na velmi úzké pásmo vlnových délek), která se získá vhodnou volbou snímače nebo optickou filtrací přijatého záření. Pracují většinou v oblasti viditelného záření. Energie přijímaná čidlem je dána vztahem

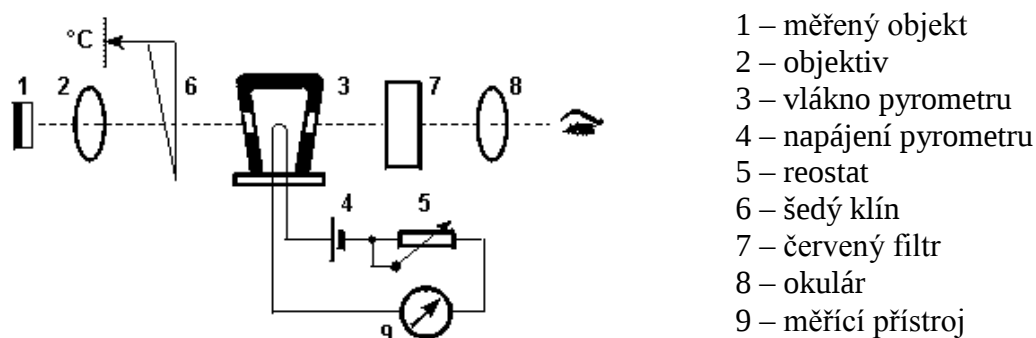
$$E_S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda = E_\lambda \Delta\lambda .$$

Měřicí rozsahy jsou značně proměnné např. $(-50 \text{ až } +600)^\circ\text{C}$, $(0 \text{ až } 1\,000)^\circ\text{C}$, $(600 \text{ až } 3\,000)^\circ\text{C}$, $(500 \text{ až } 2\,000)^\circ\text{C}$ aj. Jako čidla pásmových pyrometrů se používají fotonky, fotočlánky, fotodiody, fototranzistory a fotoodpory. Jejich výhodou je velmi rychlá reakce na změny teploty a možnost měření teploty i malých objektů. Spektrální citlivost je závislá na typu čidla. Např. selenové fotočlánky jsou citlivé v oblasti viditelného záření, křemíkové fotočlánky jsou citlivé v rozsahu $0,6 \mu\text{m}$ až $1,8 \mu\text{m}$, fotoodpory PbS mezi $0,5 \mu\text{m}$ až $3,6 \mu\text{m}$ apod. Výhodou pásmových pyrometrů je možnost měření v prostředí s plyny a vodní parou, kdy se použijí pyrometry s takovými čidly, kdy se absorpce neuplatňuje. Spektrální pyrometry pracují na dvou základních principech, a to přístroje jasové nebo intenzitové.

Jasový pyrometr

Jasový pyrometr (s mizejícím vláknem) využívá k měření teploty úzkého spektrálního pásma v oblasti viditelného záření. Přístroj pracuje kompenzační měřicí metodou, při níž se porovnává záře měřeného objektu se září srovnávacího zdroje při určité vlnové délce, vymezené barevným filtrem. Provádí-li se porovnávání záře subjektivně, tzn., že čidlem pyrometru je lidské oko, hovoříme o optickém pyrometru. Ten pracuje nejčastěji s vlnovou délkou $0,65 \mu\text{m}$, vymezenou červeným filtrem (obr. 10.17.). Obraz měřeného objektu je vytvářen objektivem v rovině vlákna pyrometrické žárovky. Wolframové vlákno žárovky je žhaveno proudem z baterie, jehož velikost se reguluje reostatem. Pozorovatel sleduje obraz objektu a vlákno žárovky okulárem přes červený filtr, který vymezuje vlnovou délku. Záře vlákna žárovky se reguluje až do okamžiku, kdy vlákno svou září splyne (vlákno zmizí) se září pozorovaného objektu. Naměřený proud obvodem odpovídá měřené teplotě.

U některých typů optických pyrometrů je žhavicí proud vlákna konstantní a porovnání září se provádí zasouváním šedého klínu. Velikost zasunutí šedého klínu je funkcí měřené teploty.



Obr. 10.17. Jasový pyrometr

Měřený objekt má málokdy vlastnosti černého tělesa, proto je údaj pyrometru všeobecně nižší než skutečná teplota a je třeba provést teplotní korekci. Další chyby mohou být způsobeným absorpcí tepelného záření v prostředí (sklo, dým, CO_2 , vodní pára apod.).

Intenzitový pyrometr

Intenzitové pyrometry se používají tam, kde je potřeba velmi rychlé časové odezvy (např. měření teploty plamene, pohybující material). Principem je vznik elektrického signálu z fotosnímače úměrného intenzitě přijatého záření. Konstrukčně se mnoho neliší od pyrometru radiačního. Rozdíl je v použitém snímači, jehož spektrální rozsah je velmi úzký. Nevýhodou je horší přesnost.

10.2.4. Pyrometry barvové (pyrometry poměrové, kvocienční)

Pyrometry měří energii na dvou nebo i třech vlnových délkách a pro stanovení teploty je rozhodující poměr těchto energií dle vztahu

$$\frac{E_A}{E_B} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} E_\lambda d\lambda}.$$

Pracují obvykle ve viditelné části spektra a protože každé vlnové délce viditelného spektra odpovídá barva světelného záření, jsou označovány jako barvové. Při nízké teplotě je barva tmavě červená (asi 0,65 μm) a s rostoucí teplotou se zabarvení mění až na světle žlutou, příp. bílou (0,35 μm) v souladu s Wienovým zákonem posuvu. V případě šedých zářičů, kdy součinitel emise není závislý na vlnové délce, je u barvových pyrometrů možnost měřit skutečné teploty bez dodatečné korekce.

10.3. Dilatační teploměry

Dilatační teploměry pracují na základě roztažnosti (dilatace) tuhých, kapalných nebo plyných látek. Roztažnost je dána vztahem:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t, \text{ kde}$$

ΔL - změna vyvolaná rozdílem teploty,

L - původní délka měřicího elementu,

α - součinitel teplotní roztažnosti,

Δt - rozdíl působících teplot.

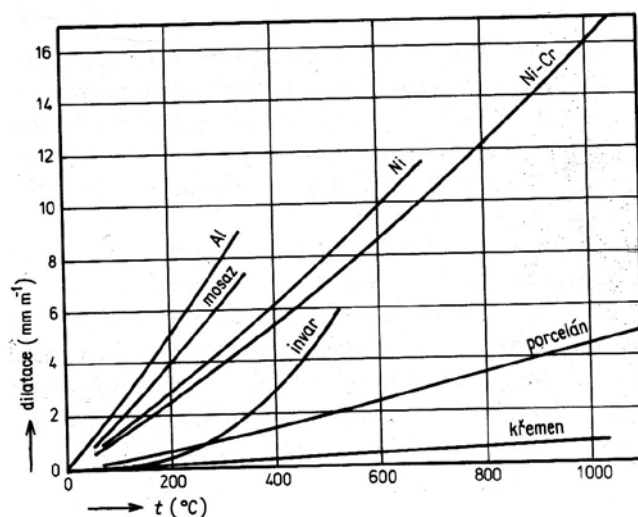
Tyto teploměry využívají objemové nebo délkové roztažnosti plyných, kapalných i tuhých látek. Měření teploty se převádí na měření tlaku, objemu nebo délky.

10.3.1. Teploměry založené na roztažnosti pevných látek

Teploměry využívají různé délkové roztažnosti pevných látek, nejčastěji kovů. Součinitele teplotní roztažnosti různých materiálů používaných pro výrobu dilatačních teploměrů jsou uvedeny v tabulce. Závislosti dilatace na teplotě jsou v určitém rozsahu u některých materiálů téměř lineární (obr. 10.18.). Invar má nelineární průběh a do teploty téměř 150 °C je na teplotu necitlivý, proto je vhodný jako konstrukční součástka, která má zajistit nezávislost na teplotě.

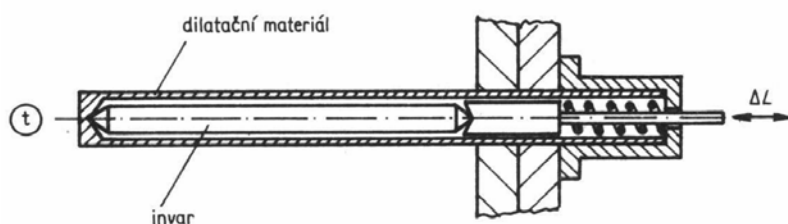
Druh materiálu	Střední součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6} (K^{-1})$
Hliník	23,8
Ocelolitina	10,4
Invarová ocel	1,5
Měď	16,5
Mosaz	18,4
Nikl	13,0
Ocel (legovaná)	11,0 -16,0
Sklo	5,9
Porcelán	3,0
Křemenné sklo	0,5

Tab. 10.3. Porovnání vybraných materiálů s různým součinitelem teplotní roztlačnosti



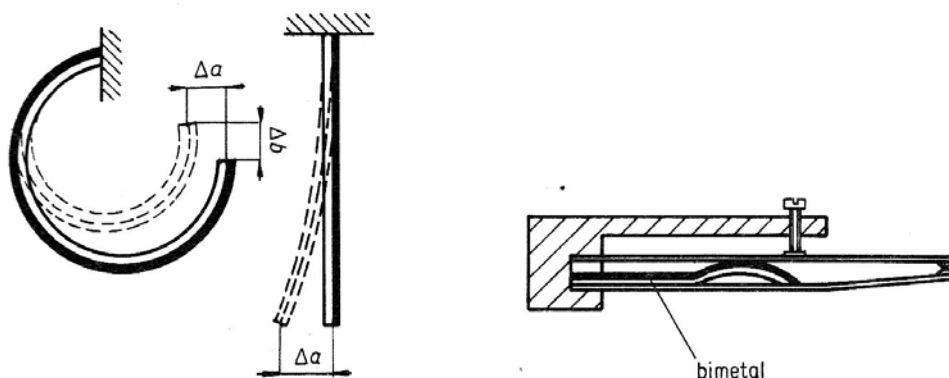
Obr. 10.18. Roztlačnost vybraných materiálů v závislosti na teplotě

Tyčové dilatační teploměry (obr. 10.19.) jsou vyrobeny tak, že vnější trubice je z kovu o velké tepelné roztlačnosti a vnitřní tyč bývá z invaru nebo porcelánu (materiál o malé teplotní roztlačnosti). Posuv konce tyče lze snímat indukčním převodníkem nebo jiným snímačem posuvu. V současnosti už jsou používány méně a jsou nahrazeny snímači odporovými.



Obr. 10.19. Princip dilatačního tyčového teploměru

Bimetalické teploměry jsou tvořeny dvojicí pevně spojených kovových pásků s rozdílným teplotním součinitelem roztažnosti. Při zvýšení teploty se pásek prohne na stranu materiálu s nižším součinitelem roztažnosti. Bimetalický pásek je na jednom konci pevně uchycen, pohyb volného konce může být převeden na ukazatel nebo přímo ovládá spínač. Je používán pro dvoupolohovou regulaci teploty, zvláště pak při tepelné ochraně elektromotorů, transformátorů a jiných silnoprůdových zařízení, v oblasti signalizace mezních stavů.



Obr. 10.20. Principy bimetalických snímačů

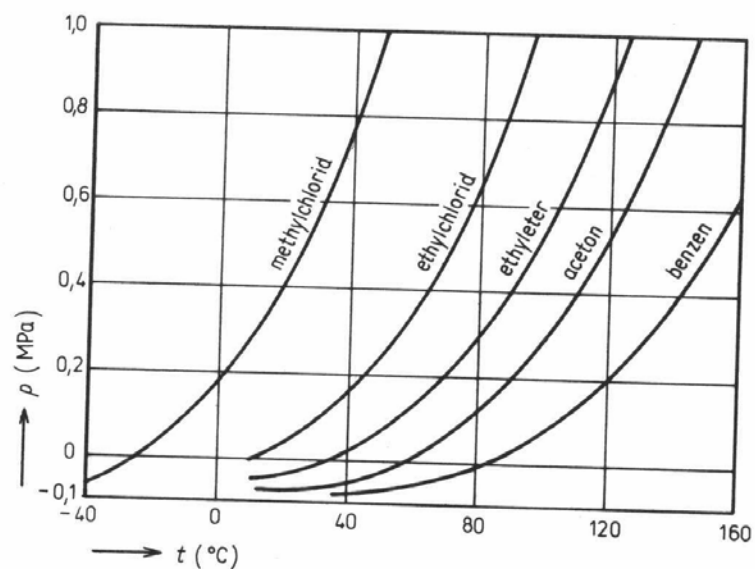
10.3.2. Dilatační teploměry plynové

Využívají toho, že tlak plynu za stálého objemu je přímo úměrný teplotě

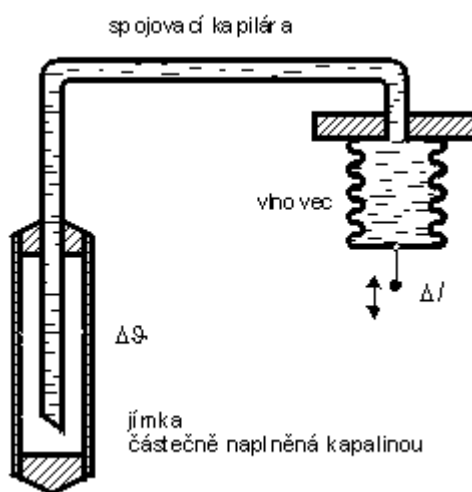
$$p = \frac{nR}{V}T = kT$$

Snímač je tvořen jímkou, což je kovová banička válcového tvaru o objemu 100 až 500 cm³, spojovací kapilárou a měřicím ústrojím, které tvoří obvykle deformační tlakoměr. Nejčastější náplň je dusík, hélium nebo vzduch. Rozsah použití je od -50 °C do +500 °C. Jejich spolehlivost je vysoká, ale jako provozních teploměrů se jich nepoužívá, z důvodu obtížné náročnosti na údržbu kapilárového vedení.

Teploměry tenzní využívají závislosti mezi teplotou a rovnovážným tlakem v soustavě o jedné složce a dvou fázích: kapalina - pára. Provedení teploměrů je obdobné, ale banička je zaplněna kapalinou jen zčásti a prostor kapiláry a deformačního tlakoměru jsou zcela vyplněny kapalinou. Množství náplně v baničce je odměřeno tak, že při vzrůstu teploty k maximální hodnotě se vypaří všechna kapalina, tlak již dále neroste exponenciálně, ale pouze lineárně a nedojde k poškození tlakoměru. Použité kapaliny jsou methylchlorid, ethylchlorid, aceton, benzol.



Obr. 10.21. Závislost tlaku na teplotě u tenzních teploměrů různého typu



Obr. 10.22. Tenzní teploměr

**CD-ROM****Animace tenzního teploměru.****10.3.3. Dilatační teploměry kapalinové**

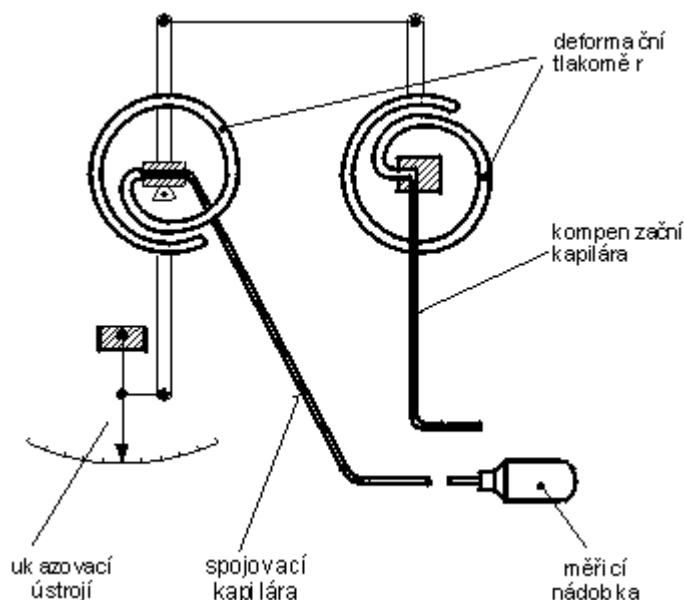
Teploměry jsou založeny při změně teploty na měření změny objemu kapaliny. Pro změnu objemu kapalin s teplotou platí

$$V_s = V_o (1 + \beta \vartheta), \text{ kde}$$

V_9 , V_0 - objem kapaliny při teplotách ϑ resp. $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,

β – teplotní součinitel objemové roztažnosti.

Běžně používané teploměry jsou ve skleněném provedení plněné rtutí. Jsou jednoduché, spolehlivé, přesné a levné. Jejich nevýhodou, hlavně z provozního hlediska je křehkost a někdy i špatná čitelnost a obtížnost dálkového přenosu údaje. Snímač pro provozní použití je kovový a tvoří jej nádobka, spojovací kapilára a deformační tlakoměr. Kromě rtuti se dále užívá xylen, metanol, toluol, methyl-alkohol, xylol aj. Nádobka je obvykle válcového tvaru o průměru asi 15 mm a délce 100 až 200 mm, někdy bývá ve tvaru šroubovice. Spojovací kapilára má vnitřní průměr 0,1 až 0,35 mm. Celý systém je zcela vyplněn kapalinou a uzavřen. Změna objemu kapaliny s teplotou působí deformaci deformačního prvku tlakoměru (obr. 10.23.). Výhodou těchto teploměrů je značná přestavná síla a lineární závislost údaje na teplotě. Určitou nevýhodou kapalinových teploměrů je vliv kolísání teploty okolí na výstupní signál. Při změnách teploty okolí kapiláry a tlakoměru dochází rovněž ke změnám objemu kapaliny. V praxi se k odstranění této závislosti používá tzv. kompenzační kapiláry, která je uložena paralelně, není však zakončena jímkou. Teploměr má dva shodné systémy, a to měřicí a kompenzační, které působí proti sobě. Přitom je kompenzován i případný vliv nestejných výšek umístění čidla a tlakoměru.



Obr. 10.23. Kapalinový teploměr

10.4. Speciální teploměry

Do této skupiny je možno zařadit teploměry pro speciální použití, např. pro vyhodnocování rozložení teplot na povrchu těles, teploměry pro jednorázové změření jmenovité teploty apod. Těchto teploměrů se nevyužívá jako čidel v regulačních obvodech.

Keramické žároměrky se používají v keramickém průmyslu. Jsou to šikmé komolé trojboké jehlánky z keramických hmot o různém bodu měknutí. Po dosažení jmenovité teploty se

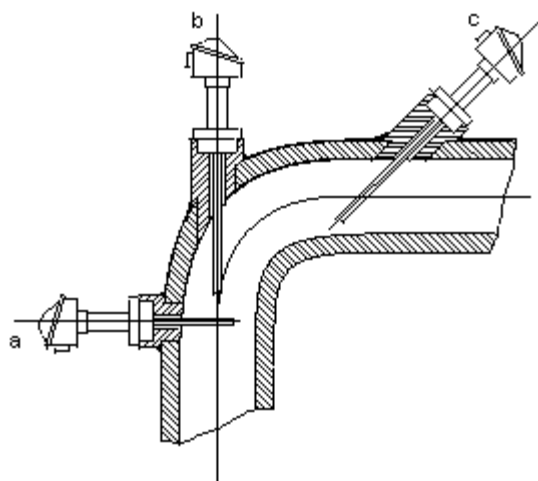
jehlánek ohýbá a dotkne se vrcholem podložky, na které je nalepený. Keramických žároměrek se používá pro teploty od 600 °C do 2 000 °C, odstupňovaných po 20 °C až 50 °C.

Teploměrné barvy, pásky a tužky využívají změny barvy při tzv. teplotě zvratu. Teploměrné barvy jsou nanášeny přímo na měřený objekt, nebo na samolepicí pásy z umělé hmoty a slouží pro zjištění rozložení teplotního pole. Teploměrné pásy bývají opatřeny i hrubou stupnicí teploty. Teploměrné barvy se používají v rozsahu od 40 °C do 1 350 °C, teploměrné tužky od 65 °C do 700 °C.

Kapalné krystaly na bázi cholesterického typu lze s výhodou použít k měření povrchové teploty ve formě barevných teplotních indikátorů. Tyto teplotní indikátory jsou velmi citlivé, barevné změny jsou vratné a změnu teploty sledují prakticky okamžitě. Tyto vlastnosti je předurčují k použití při nedestruktivní kontrole správné funkce různých zařízení, k odhalování skrytých vad materiálu apod. Nejjednodušším způsobem aplikace indikátorů teploty s kapalnými krystaly je jejich nátěr o tloušťce několika setin mm přímo na povrch měřeného tělesa. Nevýhodou přímo natřené vrstvy je krátká životnost v důsledku působení vnějšího prostředí. Dlouhodobou životnost mají indikátory ve formě fólií, ve kterých je indikátor jemně rozptýlen a chráněn vůči okolí. Nevýhodou fólií je větší teplotní setrvačnost oproti přímému nátěru, menší rozlišovací schopnost a nemožnost teplotního proměření členitých povrchů.

10.5. Zabudování dotkových teploměrů

V inženýrské praxi je důležité nejen správně rozhodnout o vhodném typu teploměru, ale je nutno zabudovat teploměr tak, aby správně měřil a aby byly eliminovány nebo potlačeny rušivé vlivy na jeho údaj. Jedním ze základních předpokladů správného měření teploty je vhodné umístění snímačů teploty, aby byl zajištěn správný přestup tepla a dokonalý styk s měřeným prostředím. Měřicí místo musí být voleno vhodně tak, aby byla zajištěna snadná montáž, demontáž a údržba teploměru.



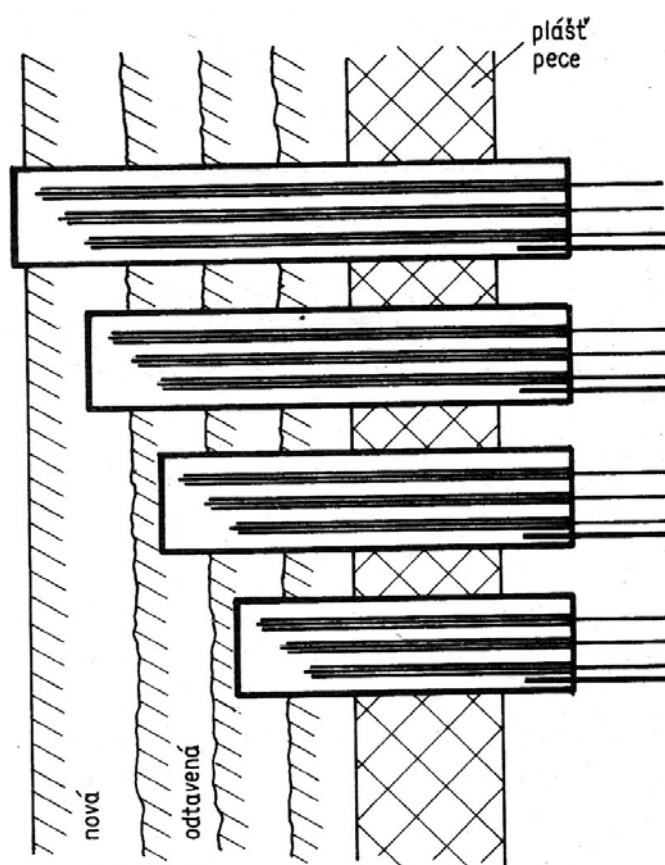
- a – kolmo na směr proudění pro velké průměry potrubí
- b – v místě kolena pro menší průměry (do 200 mm)
- c – proti směru proudění pod úhlem 45° pro menší průměry

Obr. 10.24. Zabudování teploměru do potrubí

Při měření vyšších teplot u plynů je ovlivněn výsledek měření odvodem tepla sáláním. Tyto tepelné ztráty je třeba omezit např. pomocí krytů teploměru nebo izolováním potrubí v okolí zabudovaného teploměru. Pro zvýšení přestupu tepla se umísťuje teploměr do místa s vyšší

rychlostí a nikoliv do koutů bez proudění. Čidlo teploměru má zasahovat přibližně do osy potrubí (obr. 10.24.). Obdobný způsob měření teploty je u měření teploty proudící kapaliny. Zjednodušení spočívá v tom, že není třeba provádět ochranu proti ztrátám tepla sáláním. Při měření teploty kapalin v nádobách se vyžaduje míchání měřené kapaliny, aby byl zvětšen součinitel přestupu tepla, a aby bylo dosaženo homogenního teplotního pole. Ztráty tepla vedením se omezí dostatečným ponorem teploměru.

Teploměry je nutno téměř vždy umístit do teploměrných jímek, které chrání teploměr proti chemickým a mechanickým vlivům. Při umístění teplotního snímače do jímky dochází vždy k značnému ovlivnění jeho dynamických vlastností. Je to způsobeno tím, že hmota jímky bývá mnohdy několikanásobně větší než hmota vlastního čidla. Pro správné vyhodnocení teploty je nutno uvažovat vzniklou dynamickou chybu.



Obr. 10.25. Příklad vestavění termočlánků v ocelářské peci

10.6. Srovnání metod měření teploty

Měření teploty v metalurgii patří mezi nejdůležitější úkony při výrobě. Teplota je také důležitým faktorem při měření jiných veličin, kde její vliv způsobuje nepřesnosti měření. Proto je vždy důležité znát základní parametry jednotlivých principů a vybrat vhodnou metodu měření s ohledem na její použitelnost.

V rámci odporových metod měření jsme se odporový způsob měření teploty uvedli v kapitole 2.3., proto nyní jen shrneme a porovnáme jejich parametry. V tabulce 10.4. jsou srovnány elektrické dotykové principy měření teploty. V tabulce 10.5. jsou srovnány metody měření obecně.

	<i>Termočlánek</i>	<i>Kovový teploměr</i>	<i>Termistor</i>
VÝHODY	• aktivní snímač • jednoduchý • levný • odolný • široce použitelný • široký teplotní rozsah	• vysoká stabilita • vysoká přesnost • lepší linearita než u termočlátku	• vysoká citlivost • rychlá odezva • dvou vodičové zapojení
NEVÝHODY	• nelineární • nízká úroveň signálu • potřeba referenčního signálu • nízká citlivost • nízká stabilita	• poměrně vysoká cena • potřeba stabilizovaného napájecího zdroje • malá změna odporu • nízká hodnota odporu • zahřívání proudem	• nelineární • omezený teplotní rozsah • křehký • potřeba stabilizovaného napětíového zdroje • zahřívání proudem

Tab. 10.4. Porovnání vlastností elektrických teploměrů

Termistory nacházejí uplatnění v případech, kdy je preferováno snadné připojení k řídicímu systému a není na závalu menší přesnost ($\pm 0,5$ až ± 2 °C). Kovové odporové teploměry jsou vhodné v aplikacích, kde se požaduje větší přesnost měření. Platinové odporové snímače teploty jsou pro svoji přesnost, robustnost a spolehlivost v řadě průmyslových aplikací nenahraditelné. Přesnost měření u všech typů senzorů je však výrazně ovlivněna i způsobem připojení.

skupina teploměrů	typ teploměru	fyzikální princip	teplotní rozsah (°C)	
dilatační teploměry	plynový	změna tlaku	-5	+500
	tenzní	změna tenze par	-40	+400
	kapalinový	změna objemu	-200	+750
	kovový	délková roztažnost	0	+900
elektrické teploměry	termoelektrické	termoelektrický jev	-200	+1700
	odporové kovové	změna elektrického odporu	-250	+1000
	odporové polovodičové, diodové	změna prahového napětí	-200	+400
speciální teploměry	keramické žároměrky	bod měknutí	+600	+2000
	teploměrná tělíska	bod tání	+100	+1300
	teploměrné barvy	změna barvy	+40	+1350
bezdotykové teploměry	širokopásmové pyrometry	zachycení veškerého teplotního záření	-40	+5000
	monokrystalické pyrometry	zachycení úzkého svazku teplotního záření	+100	+3000
	poměrové pyrometry	srovnání dvou svazků teplotního záření o různých vlnových délkách	+700	+2000
	termovize	snímání teplotního obrazu tělesa	-30	+1200

Tab. 10.5. Přehled teploměrů



Shrnutí pojmů 10

Termoelektrický jev. Termočlánky. Termostat. Kompenzační krabice. Pyrometr. Elektromagnetické záření. Pohltivost. Černé těleso. Emisivita. Stefan - Boltzmannův zákon. Planckův zákon. Radiační pyrometr. Spektrální pyrometr. Poměrový pyrometr. Termobaterie. Bimetal.



Otázky 10

1. Vysvětlete princip Seebeckova jevu.
2. Z čeho se skládá termočlánek?
3. Proč je důležitá kompenzace srovnávacích konců termočlánku?
4. Jaké materiály se pro výrobu článku využívají?
5. Z čeho se skládá pyrometr?
6. Jaké typy záření rozlišujeme?
7. Definujte vlastnosti černého tělesa.
8. Vysvětlete pojem emisivita a uveďte souvislost s funkcí pyrometru?
9. Vyjmenujte druhy pyrometrů a vysvětlete rozdíly mezi nimi.
10. Jaké snímače se používají u radiačních pyrometrů?
11. Jaké snímače využívají spektrální pyrometry?
12. Popište princip jasového pyrometru.
13. Vyjmenujte druhy dilatačních teploměrů teploty.
14. Uveďte příklad materiálu s malou a materiálu s velkou teplotní roztažností.
15. Uspořádejte všechny metody měření teploty, co již znáte a shrňte jejich vlastnosti.



Průvodce studiem

Vážení posluchači, záměrně jsem nezasahovala do této rozsáhlé kapitoly svými komentáři, aby Vám vynikl obsah kapitoly jako celek. Je zřejmé, že význam měření teploty jistě všichni chápete a proto i přínos všech nových informací oceňujete. Pokud mohu ještě jednou zdůraznit vliv teploty na všechny metalurgické procesy, je jisté, že bez znalosti termočlánků a pyrometrů se při studiu oboru automatizace a počítačové techniky v metalurgii neobejdete.

11. PRŮMYSLOVÉ MĚŘENÍ TLAKU



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat principy měření tlaku
- definovat druhy tlaků
- popsat funkci a druhy manometrů



Výklad

V metalurgii patří měření tlaku, podtlaku a tlakových diferencí k nejběžnějším provozním měřením. Proto je třeba definovat základní rozdělení a metody měření tlaku.

Tlak je stavová veličina, která určuje stav látek. Všechny tekutiny v kapalném nebo plynném skupenství působí určitým tlakem na stěny nádoby, ve které jsou uzavřeny nebo působí na stěny tělesa do nich ponořeného. Tlak je definován poměrem síly na plochu dle vztahu

$$p = \frac{F}{S} \quad [Pa].$$

U kapalin se tlak vyjadřuje hydrostatickým tlakem sloupce tekutiny. Tlak v hloubce h pod hladinou je určen vztahem

$$p = h \cdot \rho \cdot g, \text{ kde}$$

ρ je hustota kapaliny a g je tíhové zrychlení.

V proudící kapalině se uplatňuje tlak statický a tlak dynamický, který je dán rovnicí

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2.$$

Celkový tlak p_c je pak součtem tlaku statického a dynamického

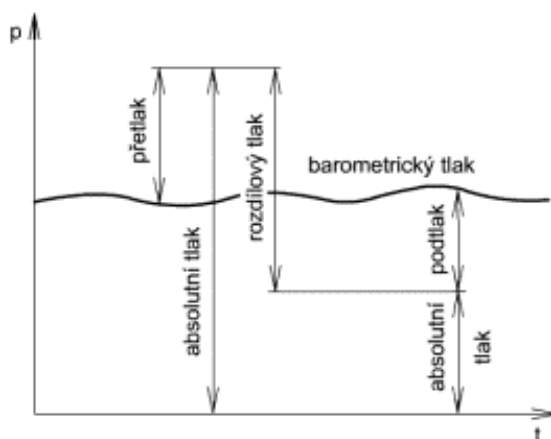
$$p_c = p_s + p_d.$$

Tlak se v průběhu let vyjadřoval velkým počtem jednotek. V současnosti je platná jednotka odvozená z jednotek SI, jeden pascal. Pascal je tlak, který vyvolává síla jednoho newtonu rovnoměrně rozložená na rovinné ploše s obsahem jednoho čtverečního metru, kolmé ke směru síly. Pro praktické použití v technické praxi je jednotka 1 Pa velmi malá, proto používáme jednotky násobné kPa, MPa.

Z hlediska vyjádření můžeme tlak udávat vůči dvěma vztažným hodnotám, absolutní tlakové nule a atmosférickému tlaku ($101325 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$). Podle tohoto kritéria můžeme hovořit o tlaku absolutním, přetlaku, podtlaku a tlaku diferenčním (rozdílovém). Vysvětlení jednotlivých pojmů je v tabulce 11.1.

Druh tlaku	Vysvětlení
Absolutní nulový tlak	tlak v prostoru, v němž není hmota.
Absolutní tlak	tlak měřený od absolutního nulového tlaku.
Barometrický tlak	tlak zemského ovzduší u zemského povrchu, měří se od absolutní nuly a má charakter tlaku absolutního.
Normální barometrický tlak (atmosférický)	je podle konvence tlak $p_N = 101325 \text{ Pa}$
Přetlak	rozdíl absolutního tlaku, který je vyšší než barometrický tlak, a tlaku barometrického.
Podtlak	rozdíl tlaku barometrického a tlaku absolutního, který je nižší než tlak barometrický.
Vakuum	velký podtlak (velmi malý tlak absolutní).
Rozdíl tlaků (tlak diferenční, difference)	$\Delta p = p_1 - p_2$, přičemž se oba tlaky p_1 a p_2 liší od barometrického.

Tab. 11.1. Druhy tlaků



Obr. 11.1. Grafické znázornění tlakových oblastí

Přístroje pro měření tlaku se nazývají tlakoměry. Tlakoměry na měření přetlaků se označují zpravidla jako manometry, na měření podtlaků jako vakuometry a na měření tlakových rozdílů jako diferenční tlakoměry. Přístroje určené pro měření barometrického tlaku se označují jako barometry. Pro měření tlaku se využívá různých fyzikálních principů, které se liší podle charakteru převodu tlaku na výstupní signál. Technické tlakoměry můžeme rozdělit podle principu na tlakoměry kapalinové (hydrostatické), tlakoměry se silovým účinkem, deformační a elektrické (viz předešlé kapitoly).



Průvodce studiem

Milí studenti, v předcházejícím shrnutí možných rozdělení a druhů tlaku jsem Vám názorně ukázala, s jakými druhy tlaků se můžete v životě setkat, a že s pojmem "tlak" si vždy nevystačíme. Z historie se nám vžily i různé jednotky tlaku a je dobré se v nich orientovat. V provozu je pak možno najít přístroje a snímače pracující s těmito údaji a přepočty do standardních jednotek jsou nezbytné. Při studiu se zaměřte vždy na nějaký typ snímače daného principu a ten popište více.

11.1. Kapalinové snímače tlaku (hydrostatické)

Kapalinové tlakoměry jsou většinou založeny na rovnováze měřeného tlaku a silového účinku sloupce kapaliny. Svou konstrukcí a principem jsou vhodné pro měření malých tlaků a pro měření diferenčních tlaků. Jako náplně se používá: voda, rtuť, alkohol, benzol, petrolej. Pro různé rozsahy se používá kapalina o různé hustotě (tab. 11.2.).

Kapalina	Hustota [kg.m ⁻³] (při 0°C)	Výhody	Nevýhody
Alkohol	806,3	nízké povrchové napětí	hořlavý, pohlcuje vlhkost z ovzduší
Voda	999,8	dostupná, závislá jen na teplotě	velké povrchové napětí (u trubic malých průměrů a měření malých tlakových rozdílů)
Tetrachlor	1 632,5	dá se dobře barvit	změna hustoty znečištěním, působí korozivně
Rtuť	13595,0	velká stálost vlastností	velké povrchové napětí (nesmáčí stěny), jedovatá, působí korozivně

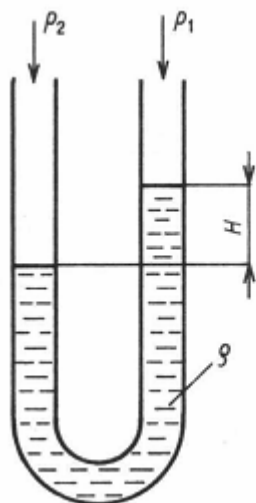
Tab. 11.2. Vlastnosti tlakoměrných kapalin

11.1.1. Trubice U

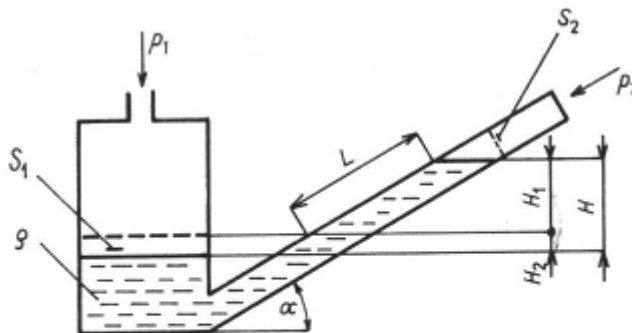
Jedná se o nejjednodušší tlakoměrný přístroj. Základem jsou dvě skleněné trubice ohnuté do tvaru písmene U naplněné tlakoměrnou kapalinou (obr. 11.2.). Vzhledem k nepřesnostem při převodu sloupce kapaliny na elektrický signál není vhodný pro automatizační účely, ale je výhodný pro kontrolu, cejchování či seřizování regulačních obvodů. V rovnovážném stavu působí na plochu S stejná tlaková síla, takže platí rovnice

$$p_1 - p_2 = \Delta p = H \cdot g \cdot \rho.$$

Rozsah měření je dán použitou kapalinou a délkou ramen trubice. Délka trubic bývá maximálně 1,5 m, tím je omezen i rozsah měření tj. např. 0,2 MPa pro rtuť nebo 15 kPa pro vodu. Polohy hladin tlakoměrné kapaliny je možno indikovat přímo na milimetrové stupnici umístěné za trubicí s kapalinou. Výšku hladiny odečítáme s přesností na 1mm (tlakový rozdíl tedy s přesností 10 Pa). Optickými úpravami lze zvýšit přesnost 20krát až 50krát. Další možností je snímat hladinu elektricky. U-manometr se používá pro měření malých rozdílů tlaků. Nevýhodou je, že se výchylka sloupce musí číst v obou ramenech. Je-li jedno rameno uzavřeno a odčerpán vzduch, lze takto měřit absolutní tlaky.



Obr. 11.2. Princip U trubice



Obr. 11.3. Sklonný manometr

11.1.2. Sklonný manometr

Pracuje na stejném principu jako U trubice a slouží k přesnému kontrolnímu měření malých tlaků nebo malých tlakových rozdílů (obr. 11.3.). Trubicí lze sklápět oproti horizontální rovině o úhel α v rozsahu (0° ; 90°) a tím zvětšovat citlivost. Pro plošný průřez ramen platí $S_1 \gg S_2$ a měřený tlak se vypočte z výchylky kapalinového sloupce v trubici L dle rovnic

$$\Delta p = \rho g H = \rho g (H_1 + H_2) = \rho g (H_2 + L \sin \alpha)$$

$$S_1 H_2 = S_2 \cdot L$$

$$\Delta p = \rho g L \left(\frac{S_2}{S_1} + \sin \alpha \right)$$

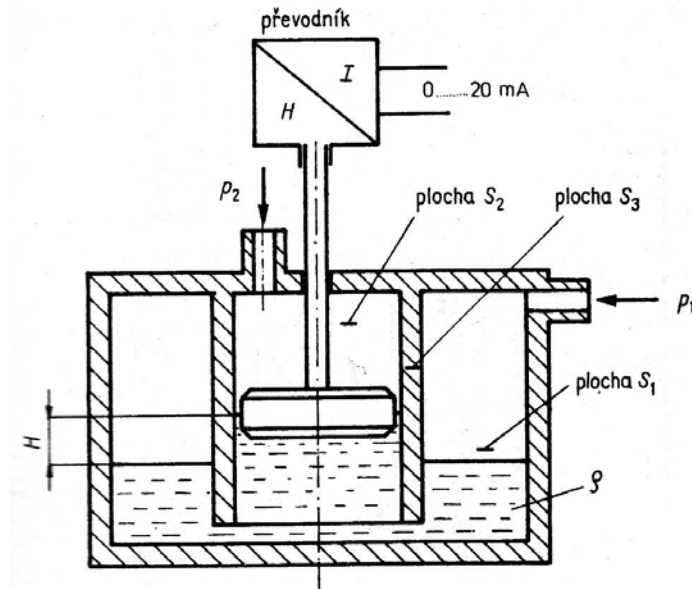
Výraz $\rho g \left(\frac{S_2}{S_1} + \sin \alpha \right)$ je pro určité α konstantní a pak $\Delta p = KL$.

Zvýšení citlivosti a zmenšení měřicího rozsahu se dosahuje skláněním jednoho ramena a rozdílným průřezem ramen. Měřicí rozsah je dán délkou trubice. Mikromanometry se vyrábějí s délkou trubice 200 a 500 mm. Náplň bývá výhradně ethylalkohol. Sklonnými manometry lze dosáhnout přesnosti 0,01 mm sloupce použité kapaliny. Tyto manometry jsou vhodné pro přesná měření nebo pro kontrolní měření v provozech.

11.1.3. Plovákový manometr

Pracuje na principu U trubice jen pohyb hladiny v nádobě sleduje plovák. Jeho dřík je opatřen mechanickým převodem pro převod pohybu plováku na ukazatel, popřípadě je vybaven indukčním převodníkem polohy. Pro diferenci tlaků pak platí rovnice

$$\Delta p = \rho g H \left(\frac{S_2}{S_1} + 1 \right).$$



Obr. 11.4. Plovákový manometr

11.1.4. Prstencový manometr

Prstencový manometr je tvořen dutou kruhovou trubicí otočně uloženou ve svém středu. Uložení je břitové, aby se dosáhlo minimálního momentu tření. Trubice je téměř do poloviny naplněna kapalinou, která spolu s přepážkou rozděluje vnitřní prostor na dvě části. Každá část je připojena pomocí ohebných přívodů k tlakovému prostředí. Na spodní části prstence je připevněno závaží, které určuje svou tíhou základní polohu. S prstencem je spojeno ukazovací zařízení nebo čidlo úhlové výchylky (potenciometr, indukční snímač apod.). Působením tlaků dojde k natočení prstence o úhel α , a platí rovnováha momentů

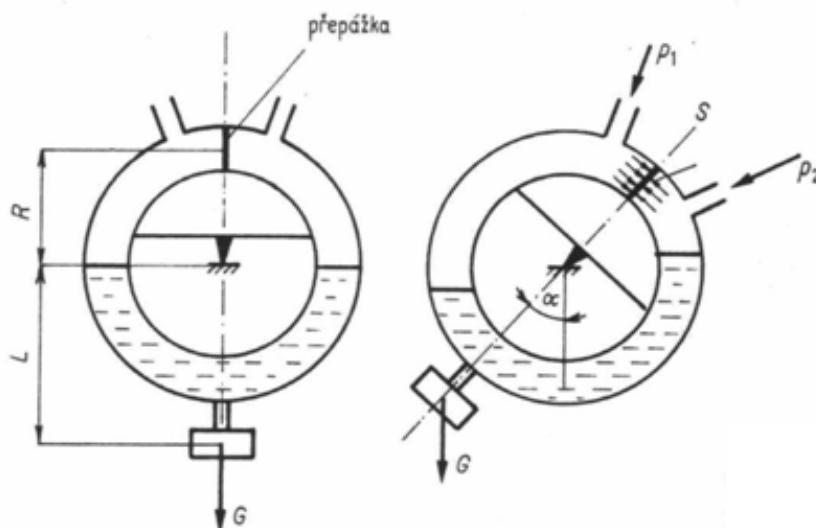
$$(p_1 S - p_2 S) \cdot R = G \cdot L \cdot \sin \alpha.$$

a tedy

$$\Delta p = \frac{GL}{SR} \sin \alpha = K \sin \alpha.$$

Z rovnice plyne, že na natočení nemá vliv druh kapaliny.

Pro měření velmi malého absolutního tlaku se používá tlakoměr se skleněným prstencem a rtuťovou náplní. Pro snímače vysokotlaké se používá prstenec z ocelové trubky a jako náplň rtuť. Prstencové tlakoměry mají proti ostatním tlakoměrům podstatně větší citlivost a používají se jako provozní přístroje. Měří přetlak, podtlak a tlakový rozdíl. Výhodou je jednoduchá změna rozsahu výměnou závaží i za provozu a necitlivost na změnu teploty. Nevýhodou je velká setrvačnost. Pro nelineární závislost úhlu natočení se používá linearizační převod mezi prstencem a ukazovacím přístrojem. Přesnost manometru je kolem 1-1,5 %. V současné době jsou až na výjimky plně nahrazeny modernějšími tlakoměry, zejména deformačními přístroji s elektrickým výstupem.



Obr. 11.5. Princip prstencového manometru

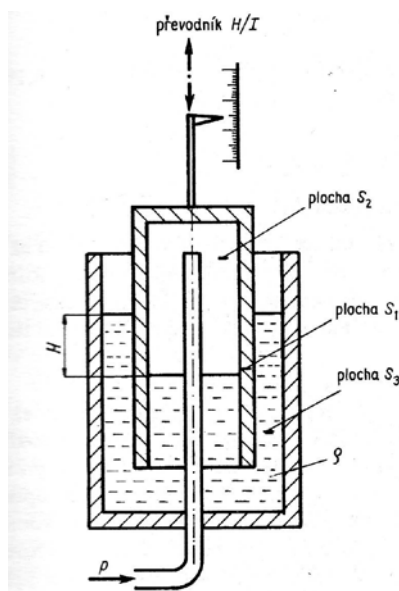
11.2. Tlakoměry se silovým účinkem

Měření tlaku se převádí na měření síly, jejíž účinky jsou vyvažovány např. závažím či pružinou. Do této skupiny tlakoměrů patří tlakoměr pístový a zvonový.

11.2.1. Zvonový manometr

Zvonový manometr (obr. 11.6.) je založen na principu rovnováhy sil, kde na jedné straně působí měřený tlak a jeho silový účinek je v rovnováze s hmotností kapaliny a vlastního zvonu.

$$p = \rho g H \frac{S_1}{S_2} \left(1 + \frac{S_1}{S_2 + S_3} \right) = \rho g K H, \text{ kde } K \text{ je konstanta přístroje dána jeho konstrukcí.}$$



Obr. 11.6. Zvonový manometr

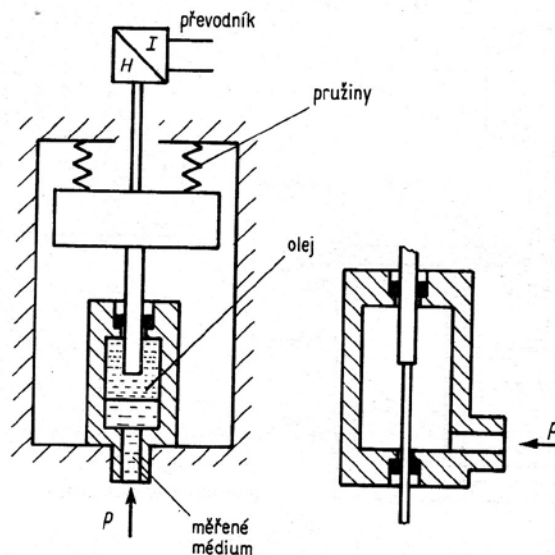
Zvonový tlakoměr může sloužit k ověřování a kalibraci jiných tlakoměrů s rozsahem do 1 000 Pa. Má vysokou přesnost a značnou přestavovací sílu. Jako kapalina do nádoby tlakoměru se používá olej, voda, petrolej nebo toluen. U provozních přístrojů působí proti tlakové síle síla pružiny, takže pak lze značně omezit zdvih zvonu a jeho polohu snímat elektrickým snímačem. Konstrukčně jej lze upravit a měřit tak diferenční tlaky. Přesnost měření se pohybuje od 1 -2 % z maximálního rozsahu.

11.2.2. Pístový manometr

Základní částí manometru je píst přesného průřezu, umístěný ve válci. Tlak na píst opatřený se přenáší obvykle olejem, kterým je celý systém tlakoměru vyplněn a olej současně píst chrání před nežádoucím účinkem měřeného media (obr. 11.7.). Velikost síly vzniklé působením měřeného tlaku na píst je kompenzována tíhou pístu a závaží. Rovnováha mezi silou závaží a tlakem oleje na píst nastane při zastavení pohybu. Měřený tlak je pak úměrný tíze závaží G_M a tíze pístu G_P dle rovnice

$$p = \frac{G_M + G_P}{S}, \text{ kde}$$

S je plocha pístu.

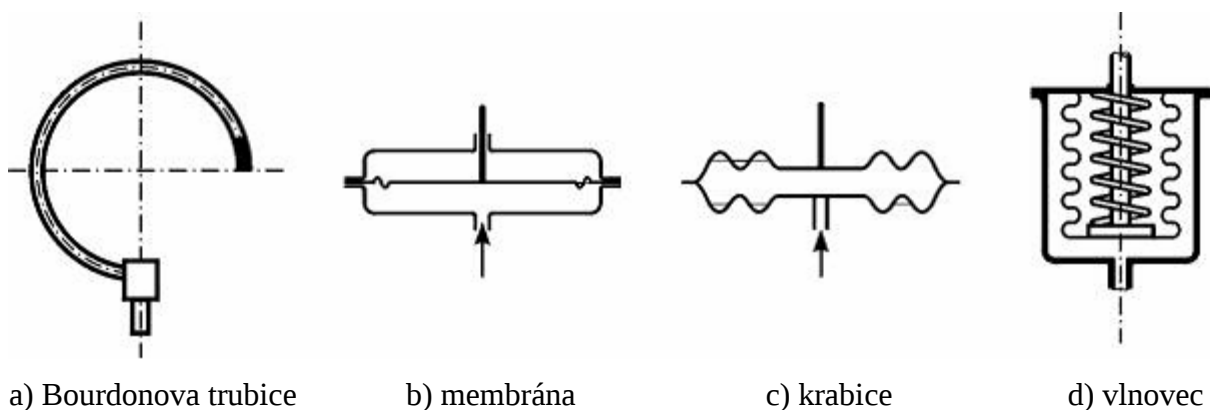


Obr. 11.7. Pístový manometr

U provozního pístového tlakoměru je kompenzační síla vyvozována pružinou. Výhodou tohoto přístroje je, že lze potlačit libovolnou část rozsahu použitím přídavného závaží. Pro převod na elektrický signál je možno použít snímače tlakové síly. Manometr se využívá v laboratorních provezech pro ověřování a kalibraci deformačních tlakoměrů (v rozsahu od 50 kPa do 2 000 MPa) jako etalon a dále měří tlaky až do 10 MPa s přesností až 0,5 %.

11.3. Deformační snímače tlaku

Základem deformačních manometrů je pružný element, schopný pružné deformace při zatížení působícím tlakem. Manometry se vzájemně liší konstrukcí a uložením deformačního členu. Proti kapalinovým mají mnoho výhod. Jsou méně závislé na pracovní poloze, více přetížitelné, konstrukčně jednodušší, provedení je vhodné pro těžké provozní podmínky, pro velké rozsahy tlaku (od setiny až po stovky MPa). Nejčastěji používanými deformačními prvky jsou Bourdonova trubice, membrána, krabice a vlnovec (obr. 11.8.). Deformační prvky se zhotovují z uhlíkových a niklových ocelí, z mosazi, z fosforového a beryliového bronzu a dalších vhodných slitin. Výchylka se zpracovává buď převodem na přímý ukazatel nebo převodem na elektrický, popř. pneumatický signál, který se dále vyhodnocuje.

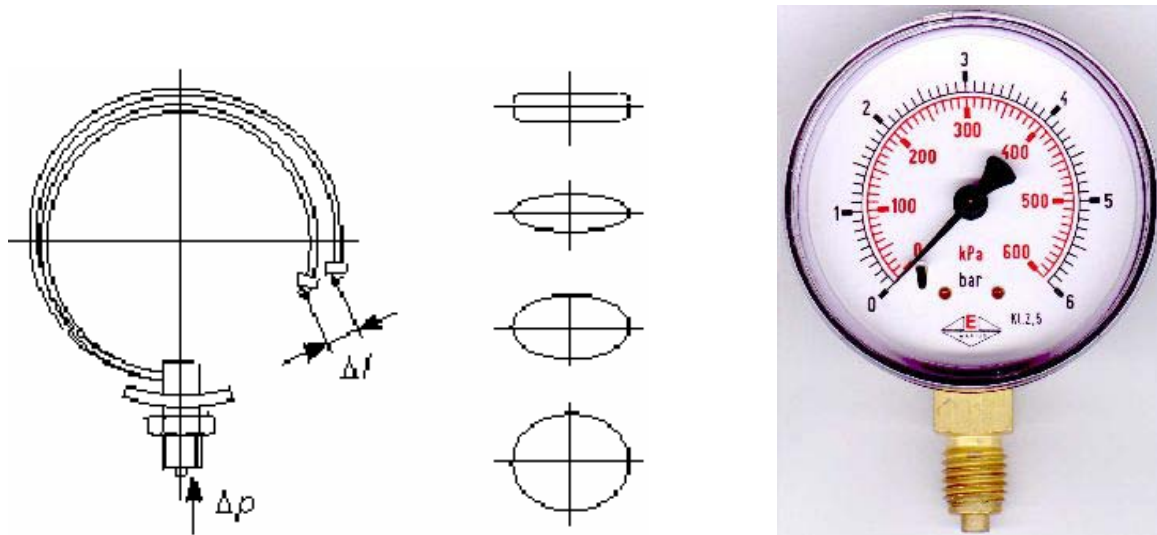


Obr. 11.8. Základní typy deformačních prvků

Všechny typy deformačních manometrů se používají při konstrukci monostatů, které při dosažení požadovaného nebo nastaveného tlaku spínají nebo rozpínají ovládací kontakty regulačního obvodu (obvykle dvupolohová regulace). Jedná se např. o ovládání kompresoroven, domácích vodáren apod. Kontakty jsou buď mechanické nebo rtuťové.

11.3.1. Bourdonův manometr

Jako deformačního elementu se používá Bourdonova trubice, což je trubice eliptického průřezu stočená do kruhového oblouku, spirály nebo šroubovice. Jedním koncem je trubice pevně spojena s tělesem, opatřeným závitem pro připojení tlaku. Volný konec trubice je uzavřen a spojen přes převodové ústrojí s ukazovatelem na stupnici. Při působení tlaku se snaží eliptický průřez změnit v kruhový a zakřivení oblouku trubice se napřimuje. Pro nízké tlaky je trubice mosazná a má plošší profil, pro vysoké tlaky je ocelová a blíží se kruhovému profilu (obr. 11.9.b). Měřicí rozsahy trubicových tlakoměrů bývají od 0 do 0,5 MPa až 2 000 MPa. Těmito přístroji lze měřit i podtlaky. Vyrábějí se jak pro kontrolní měření tak pro provozní užití. K převodu na elektrický signál se používají odporové tenzometry, které se lepí na stěnu trubky buď v podélném nebo tečném směru nebo potenciometry.



Obr. 11.9. Bourdonova trubice s různými průřezy a její technické provedení

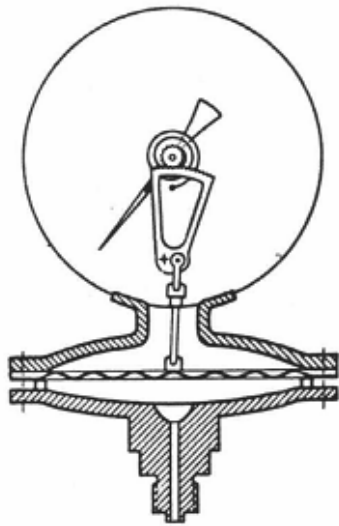
11.3.2. Membránový manometr

Jako tlakoměrný element se používá zvlněná kovová membrána kruhového tvaru upnutá mezi dvěma přírubami (obr. 11.10.). Z jedné strany je přiváděn měřený tlak a ten vyvolá průhyb membrány, který se přenáší na ukazatel nebo jsou snímány elektricky (např. kapacitně, indukčně či piezoelektricky). Závislost zdvihu na tlaku je přibližně lineární. Membránové tlakoměry se vyrábějí pro tlaky do 4 MPa.

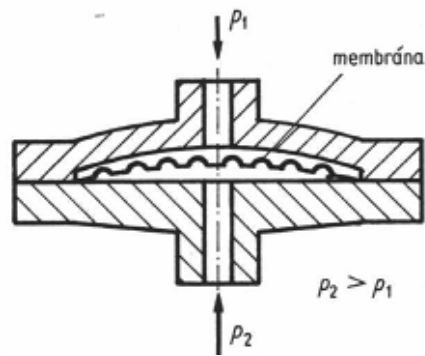
Výhodou membránového manometru je malá setrvačnost hmoty systému. Takový snímač je vhodný pro měření velmi rychle pulsujících tlaků. Další výhodou je vyšší citlivost než u tlakoměrů trubicových. Měřicí vlastnosti závisí na kvalitě použitých membrán.

Pro nízké tlaky se využívá pryžových membrán s textilní vložkou s kovovými příložkami, kde je deformačním prvkem pružina z ocelového drátu. Pro měření vyšších tlaků se používají tuhé membrány, tj. kruhové desky vetknuté po obvodu. Speciálním použitím membránových tlakoměrů je konstrukce diferenčních tlakoměrů a to v rozsahu do 0,5 MPa, při měření statického tlaku do 50 MPa. V těchto případech jsou membrány kovové a jsou chráněny proti jednostrannému přetížení komorou s tlumicí kapalinou (destilovaná voda, olej, atd.).

Je-li tlak přiveden na obě strany membrány, lze využít membránových tlakoměrů i pro měření tlakových diferencí (obr. 11.11.).



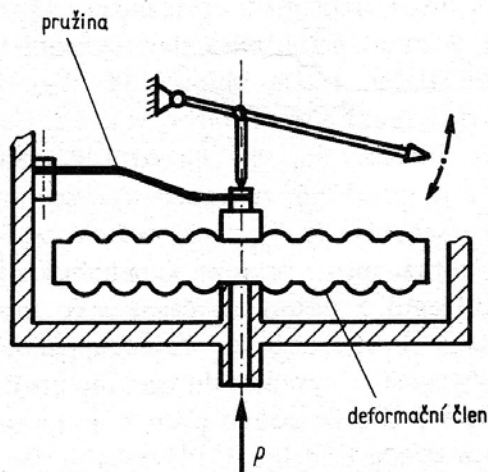
Obr. 11.10. Membránový manometr



Obr. 11.11. Membránový manometr pro měření diferenčních tlaků

11.3.3. Krabicové tlakoměry

Měřicím prvkem je krabice tvořená dvěma zvlněnými membránami o průměru 50 až 100 mm (obr. 11.12.). Deformace se přenáší pákovým převodem na ukazatel. K převodu výchylky krabice na elektrický signál musí být použito snímače s minimálním silovým zatížením, protože představující síla je malá. Měřicí rozsah bývá 10 Pa až 1 000 Pa. Pro zvýšení citlivosti se spojuje několik krabic v jeden konstrukční celek. Výhodou krabicového manometru je jeho citlivost a je tak možno měřit malé přetlaky, podtlaky a tlakové difference.

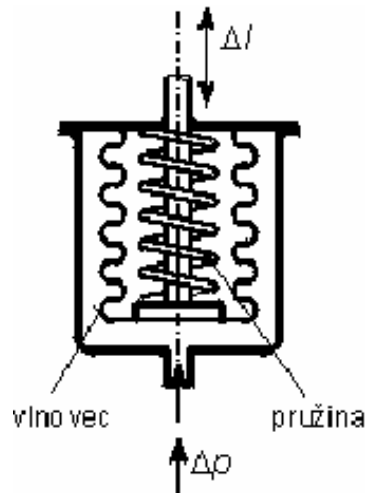


Obr. 11.12. Krabicový manometr

11.3.4. Vlnovcové tlakoměry

Tlakoměrným prvkem je tenkostěnný kovový měch – vlnovec (obr. 11.13), který je umístěn v pouzdře, do něhož je přiváděn měřený tlak. Na rozdíl od předešlých typů je deformace

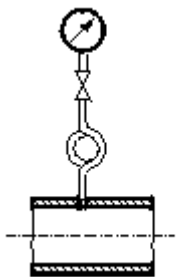
podstatně větší (až 10 i více mm). Deformace vlnovce se přenáší táhlem na ukazatel. Odolnost proti deformaci (tuhost vlnovce) lze snadno zvětšit vložením pružiny. Dojde tak úpravě charakteristiky a měřicího rozsahu tlakoměru. V případě měření tlakové difference se větší tlak přivádí do pouzdra, menší do vlnovce. Někdy se místo kovového měchu používá měchu z umělé hmoty (např. teflonu); funkci deformačního prvku pak zcela přebírá pružina. Hlavní použití kovových vlnovců s pružinou je v regulační technice, kde se jich používá v pneumatických vysílačích, převodnicích, přijímačích apod. Vlnovce se používají pro měření přetlaků, podtlaků a tlakových diferencí do 0,4 MPa. Přesnost měření je zpravidla lepší než 1%.



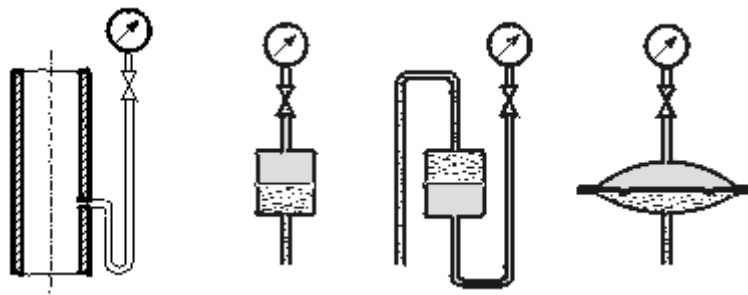
Obr. 11.13. Vlnovcový manometr

11.4. Provozní montáž manometrů

Při měření statického tlaku je nutno volit místo odběru tak, aby měřený tlak nebyl zkreslován dynamickou složkou tlaku proudícího prostředí. Odběrové místo na potrubí musí být dostatečně vzdáleno od rušivého vlivu armatur (ventily, kolena apod.); obvykle postačí vzdálenost rovná desetinásobku průměru potrubí. Stěna potrubí v místě odběru musí být hladká, odběrová trubka nesmí zasahovat dovnitř potrubí. U potrubí uloženého vodorovně a šikmo se u plynů odebírá tlak v horní části potrubí, u kapalin ze strany.



Obr. 11.14. Kondenzační smyčky



Obr. 11.15. Oddělovací nádobky

Při dálkovém měření se propojuje tlakoměr s místem odběru signálním potrubím, které je často nevhodně označováno jako impulsní potrubí. Doporučuje se potrubí o světlosti 6 až 10 mm. Potrubí nemá mít ostré ohyby a má být položeno tak, aby se zabránilo usazování kondenzátu při měření tlaku plynů a par nebo vytváření parních či plynových bublin při měření tlaku kapalin. Z toho důvodu musí mít signální potrubí vždy určitý spád, přičemž na nejnižším, resp. nejvyšším místě musí být odkalovací, resp. odvzdušňovací ventily. Délka signálního potrubí by neměla přesáhnout 50 m.

Při měření tlaku vodní páry při vysokých teplotách musíme zajistit, aby se pára nedostala do tlakoměru, který by se tím poškodil. Před tlakoměr se proto zařazuje kondenzační nádobka nebo kondenzační smyčka (obr. 11.14.).

Při měření tlaku agresivních látek se používá oddělovacích nádobek naplněných oddělovací kapalinou anebo se k oddělení obou prostorů používá gumová oddělovací membrána (obr. 11.15.).

Funkci provozních tlakoměrů je nutno pravidelně kontrolovat. Kalibrační kontrola statických charakteristik se provádí buď absolutní nebo srovnávací metodou. Při absolutní metodě se používají (do tlaku 0,2 MPa) hydrostatické tlakoměry nebo zvonové tlakoměry a pro vyšší tlaky se používají pístové tlakoměry. Při srovnávací metodě se používají etalonové tlakoměry.



Shrnutí pojmů 11

Druhy tlaku. Hydrostatický tlak. U-trubice. Prstencový manometr. Pístový manometr. Zvonový manometr. Vlnovec. Krabice. Membrána. Bourdonova trubice.



Otázky 11

1. Pojmenujte druhy tlaků a vyjádřete je vzorci.
2. Určete základní metody měření tlaku a doložte na příkladech.
3. Co to je Bourdonova trubice a jaké deformace na ní můžeme vyhodnocovat?

12. PRŮMYSLOVÉ MĚŘENÍ PRŮTOKU



Čas ke studiu: 8 hodin



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat principy měření průtoku
- specifikovat způsoby průtoku
- popsat funkci a druhy průtokoměrů



Výklad

Měření množství plynů a kapalin je pro řízení metalurgických agregátů, výrobních procesů a celého provozu naprosto nezbytné. Pro měření průtoku a proteklého množství plynů a kapalin existuje velké množství různých přístrojů, které využívají celé řady fyzikálních principů. Při měření průtoku je nutno rozlišovat dva základní způsoby měření. Měří se buď protékající množství (v určitém okamžiku, které protéká potrubím), nebo se měří celkové proteklé množství za zvolenou časovou diferenci (označené jako spotřeba). Většina metod a přístrojů umožňuje provádět oba způsoby měření a záleží na možnosti jejich využití při vyhodnocování. Výsledek měření průtoku může být udáván jako:

- | | |
|---|---|
| - hmotnostní okamžitý průtok | $Q_m = \frac{dm}{dt} \quad [kg.s^{-1}]$, |
| - objemový okamžitý průtok | $Q_v = \frac{dV}{dt} \quad [m^3.s^{-1}]$, |
| - proteklé hmotnostní množství (spotřeba) | $m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m . dt \quad [kg]$, |
| - proteklé objemové množství (spotřeba) | $V = \int_{t_1}^{t_2} Q_v . dt \quad [m^3]$. |

Průtok je možno vyhodnotit i na základě měření místní nebo střední rychlosti média proudícího známým průřezem.

$$Q_v = \int_S v . dS = \bar{v} . S \quad [m^3 . s^{-1}], \text{ kde}$$

$\bar{v}$ je střední rychlost,

v - místní rychlost proudění $[m.s^{-1}]$,

S - průřez potrubí $[m^2]$.

Většina přístrojů udává změřený průtok či proteklé množství při provozních podmínkách (tlak, teplota). V případě proměnných stavových veličin se provozní podmínky přepočítávají na určité podmínky vztažené. Některé z přístrojů bývají vybaveny zařízením, jež umožňuje automatické provádění této korekce. Současný trend vývoje průtokoměrů je zaměřen na přímé

měření hmotnostního průtoku, tj. měření nezávislé na teplotě, tlaku a viskozitě měřené tekutiny.

Význam měření průtoku je nesporný; průtokoměry poskytují informace o toku materiálu, jsou zdrojem podkladů pro bilance během technologického procesu, při příjmu i expedici, slouží jako čidla v regulačních obvodech a mají i velký význam pro bilanční měření znečišťujících látek v oblasti ochrany životního prostředí.

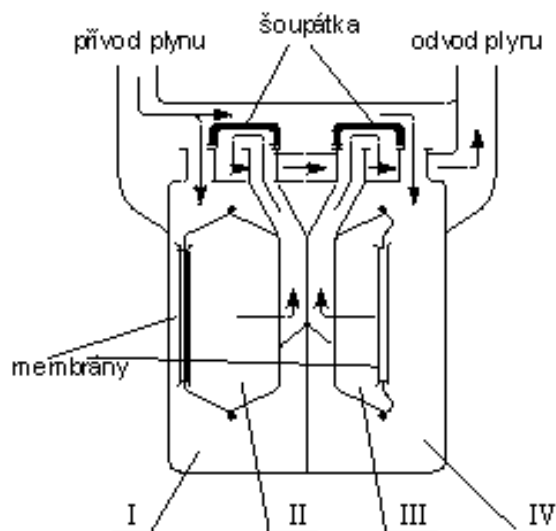
12.1. Objemová měřidla

Objemová měřidla jsou založena na principu odměřování objemu plynu nebo kapaliny v odměrných prostorách. Můžeme je rozdělit na měřidla s nespojitou funkcí, kde průtok je určen přírůstkem objemu za určitý časový interval a měřidla se spojitou činností. Spojitá měřidla mají několik odměrných prostorů, které se cyklicky plní a vyprazdňují tak, aby průtok byl spojitý a měření plynulé. Měřítkem objemového průtoku je počet cyklů za jednotku času. Přístroje bývají vybaveny počítadly proteklého množství a používají se především jako měřidla bilanční a měřidla pro obchodní a odběratelskou síť. Některé typy objemových měřidel slouží jako etalony pro ověřování jiných průtokoměrů.

Výhodou objemových měřičů je poměrně vysoká přesnost a dlouhodobá stálost této přesnosti (je nutná včasná údržba). Používají se především tam, kde průřezové měřiče nejsou trvale přesné. Nevýhodou je citlivost na mechanické nečistoty a dost velká tlaková ztráta nutná pro pohyb oddělovacích elementů.

12.1.1. Membránový průtokoměr

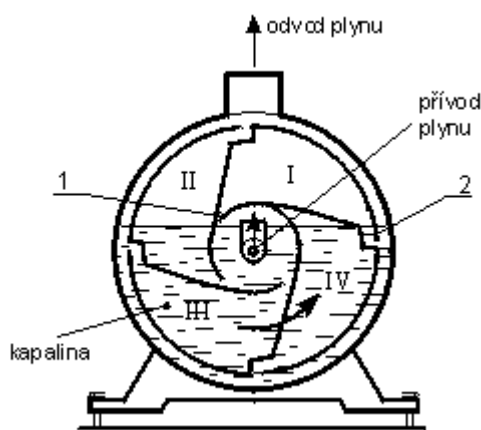
Průtokoměr se používá pro měření množství plynu (obr. 12.1.). Ve společném pouzdru jsou dvě komory rozdělené koženými membránami, čímž jsou vytvořeny čtyři odměrné prostory I až IV. Každý prostor je spojen hrdlem s rozvodným ústrojím, tvořenými šoupátky, jejichž pohyb je odvozen od pohybu membrán. Od pákového ústrojí je odvozen i pohyb počítadla. Membránové plynoměry se používají ve spotřebitelské síti k měření množství topných plynů. Vyrábějí se pro průtoky od $0,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ až do $75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; správnost v měřicím rozsahu je $\pm 2 \%$.



Obr. 12.1. Membránový průtokoměr

12.1.2. Bubnový průtokoměr

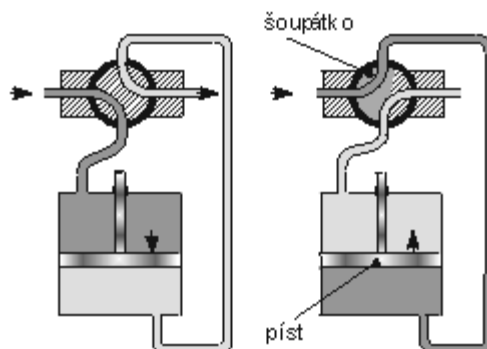
Bubnový průtokoměr se používá pro přesná laboratorní a ověřovací měření. V ležaté válcové nádobě, vyplněné z části kapalinou (voda, olej), je otočně uložen vlastní měřicí buben (obr. 12.2.). Buben je opatřen štěrbinami pro přívod a odvod plynu a rozdělen radiálními přepážkami na čtyři odměrné prostory. Přepážky jsou tvarovány tak, aby při otáčení bubnu kapalinou uzavírala současně např. vstupní štěrbinu 1 a výstupní 2, čímž je odměřen objem plynu v prostoru I. Plyn se přivádí trubicí, umístěnou v ose otáčení a její ústí leží nad hladinou uzavírací kapaliny. Prostor II se vyprazdňuje, III je zcela vyplněn kapalinou a IV se právě začíná plnit plynem. S hřídelem bubnu je spojeno počítadlo, udávající proteklé množství.



Obr. 12.2. Bubnový plynoměr

12.1.3. Pístový průtokoměr

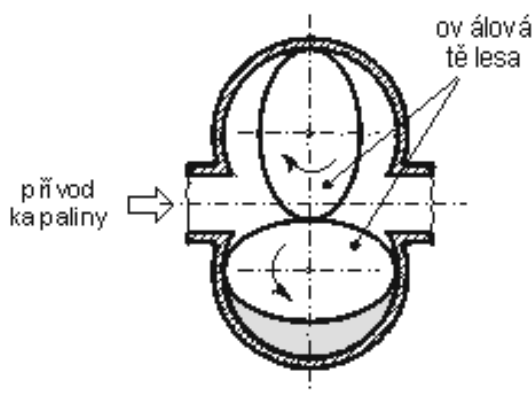
Pístový průtokoměr patří mezi nejpřesnější přístroje pro měření proteklého množství kapalin. Měřenou kapalinou se střídavě naplňují a vyprazdňují odměrné prostory vymezené pístem a tělesem měřidla. Vlivem tlakového spádu na měřidlo dochází k pohybu pístu, který je spojen s počítadlem. Běžně se užívá dvou i více odměrných prostorů, jejichž funkce je svázána tak, aby byl zajištěn plynulý chod měřidla i nepřerušovaný průtok média. Některé konstrukce užívají dvojčinného válce s pístem, který vykonává přímočarý vratný pohyb (obr. 12.3.). Pístní tyč pak ovládá šoupátkový rozvod a počítadlo. Dále se užívá pístů vykonávajících točivý nebo krouživý pohyb. Pístová měřidla jsou vhodná pro měření i velmi viskózních kapalin.



Obr. 12.3. Pístové měřidlo

12.1.4. Průtokoměr s oválnými rotory

Velmi rozšířeným objemovým měřidlem je měřidlo tělesové (oválové). Je to typický přístroj pracující se spojitým cyklem. V komoře se pohybují dvě oválná tělesa, jejichž pohyb je vzájemně vázán buď ozubením přímo na tělesech, nebo prostřednictvím ozubených kol (obr. 12.4.). Rozdílem tlaku na přední a zadní straně těles dojde k jejich otáčivému pohybu, a tím i k odměřování kapaliny. Průtokoměr se používá k měření různých organických kapalin, produktů petrochemického průmyslu a v potravinářství (např. měření množství mléka).



Obr. 12.4. Tělesové (oválové) měřidlo



Odměna a odpočinek

Milí studenti, věřím že se již těšíte na konec textu, a než se k němu rychle dopracujeme – ještě jednou se pořádně nadechněte. V následující podkapitole snímačů průtoku se musíme zabývat tlakovými poměry v potrubí. Je třeba znát některé rovnice, ale ne všechny zde uvedené! Zaměřte se proto na rovnici kontinuity a Bernoulliho rovnici. Po vzájemném dosazení a vyjádření rychlosti proudění, již snadno princip snímače sami vysvětlíte. Zkuste se sami zamyslet - jakou veličinu vlastně uvedený průtokoměr měří? Tzn., jakým snímačem průtok vyhodnocujeme? Uvedené příklady clon a dýz mají dokreslit náročnost tohoto měření a doložit jistá omezení a parazitní vlivy při různých okolnostech proudění media. Nesnažte se učit nazpaměť.

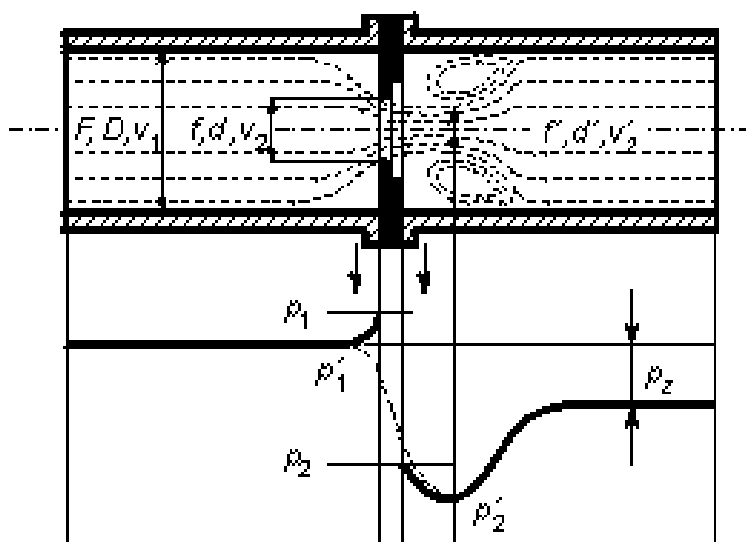
12.2. Průtokoměry měřící tlakovou diferencí

Měřiče průtoku založené na měření rozdílu tlakových účinků proudícího média jsou dosud nejrozšířenějším způsobem měření průtoku. K měření lze využít několika principů:

- rozdílu statických tlaků ve zúženém profilu potrubí (clonkové a Venturiho průtokoměry),
- rozdílu dynamického a statického tlaku (Prandtlova trubice),
- změny v rozložení a rozdílu statických tlaků v zakřiveném potrubí (kolenové průtokoměry).

12.2.1 Průřezová měřidla

Průřezová měřidla zahrnují celé spektrum clon a dýz. Měření je založeno na změně statického tlaku měřené látky při proudění zúženým profilem potrubí. Rozdíl statických tlaků, snímáný diferenčním tlakoměrem před a za zúžením, je závislý na velikosti průtoku.



Obr. 12.5. Princip proudění a průběh tlaků na cloně

Závislost rychlosti proudění a statického tlaku na změně průřezu lze stanovit z rovnic:

Rovnice kontinuity (zákon o zachování hmoty)

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

Bernoulliho rovnice (zákon o zachování energie)

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Pro rychlost pak platí

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \cdot \left[1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2\right]}}$$

Pro poměr zúžení

$$m = \frac{S_2}{S_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

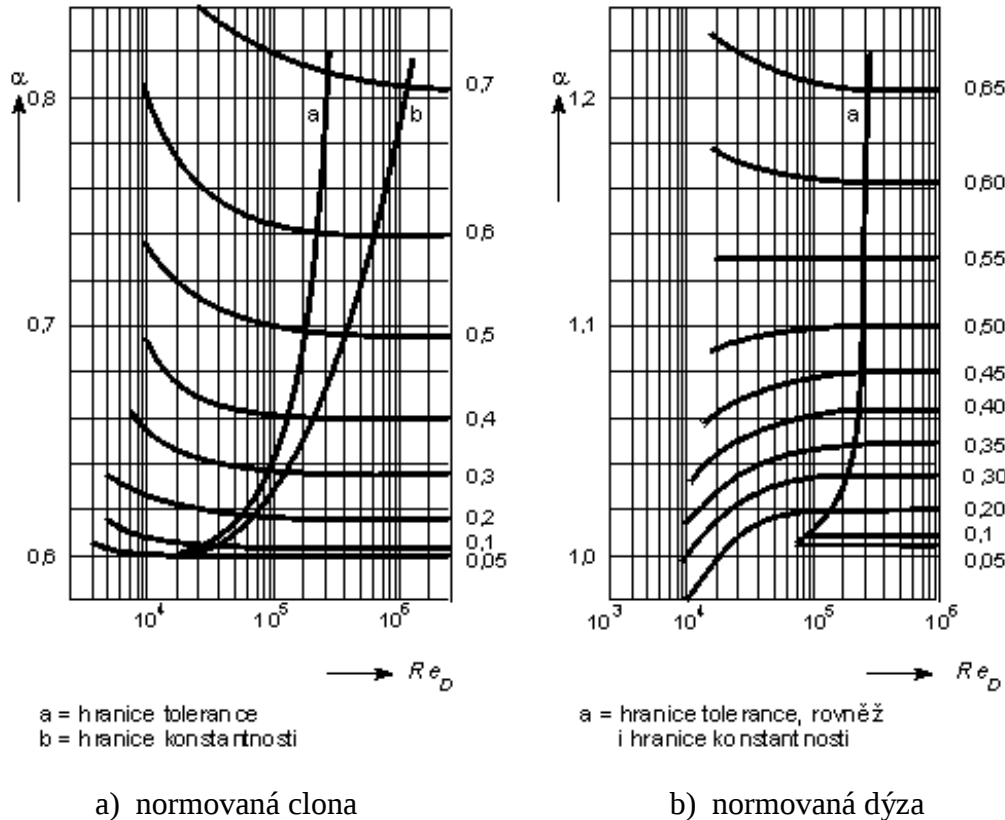
je objemový průtok

$$Q_v = S_2 \cdot v_2 = S_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Na obrázku je vidět jak proudnice tekutiny se za clonou zužuje. Tuto problematiku řeší zavedení dalších parametrů (koeficient zúžení, ztrátový součinitel, opravné koeficienty). Součinitel průtoku α se pak dá určit z tabelárních údajů. Při průtoku plynů a par škrťicím orgánem nastává expanze a dochází ke změně hustoty média. Tato skutečnost je respektována zavedením expanzního součinitele ε . Celkový vzorec pro objemový průtok má potom tvar

$$Q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot S_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Pro početní řešení průřezového měřidla je potřeba znát hodnotu průtokového a případně i expanzního součinitele. U měřidel pro malé průtoky by bylo možno zjistit hodnoty při ověřovacím měření, avšak u velkých průtoků by bylo ověřovací měření značně obtížné. Východiskem je využití zákonů podobnosti, které umožňují používat tabelovaných hodnot součinitelů stanovených měření. Přitom je ovšem nutno dodržet podmínky, při kterých byla měření provedena, tzn. zachovat podobnost geometrickou i hydrodynamickou. Geometrická podobnost je charakterizována tvarem, umístěním odběrů tlaku a poměrem zúžení. Hydrodynamická podobnost je určena hodnotou Reynoldsova čísla. Normy pro výpočet obsahují mimo jiné tabulky a grafy potřebné pro výpočet.



Obr. 12.6. Závislost průtokového součinitele na Reynoldsově čísle a poměru zúžení

Průtokový součinitel α zahrnuje v sobě poměr zúžení, tření v potrubí a ve škrticím orgánu, zúžení proudu za clonou, víry před a za měřidlem. Jeho hodnota je závislá především na poměru zúžení a na Reynoldsově čísle

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}, \text{ kde}$$

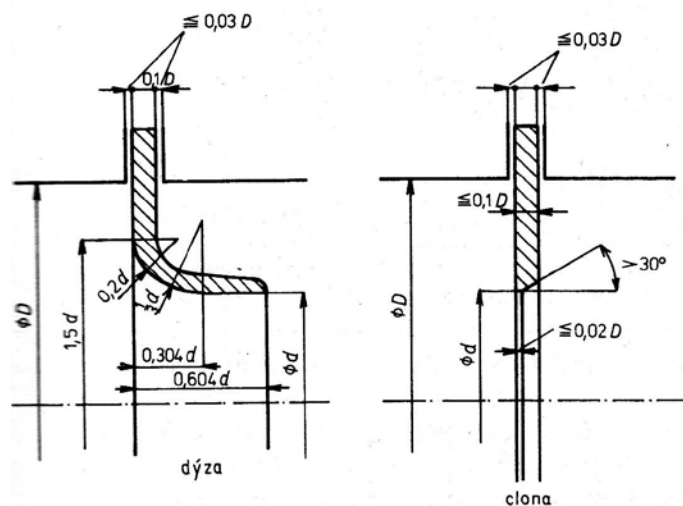
ν je kinematická viskozita. Reynoldsovo číslo charakterizuje proudění v potrubí a na obr. jsou vymezeny dvě oblasti, vymezené hranicí konstantnosti (vpravo od hranice konstantnosti leží tzv. obor konstantnosti, kde průtokový součinitel nezávisí na Reynoldsově čísle, nalevo je oblast, kde průtokový součinitel na Reynoldsově čísle závisí). Normovaná průřezová měřidla jsou určena pro použití v turbulentní oblasti proudění. Existují však nenormované tvary clon a dýz, použitelné i v laminární oblasti proudění. Při přesnějších výpočtech je nutno provést ještě případné korekce na viskozitu, drsnost potrubí, umístění odběrů tlaků a neostrost hran.

Expanzní součinitel ε závisí na hodnotě izentropického exponentu κ (Poissonova konstanta), na diferenčním tlaku, na statickém tlaku před měřidlem, na poměru zúžení a typu měřidla. Pro kapaliny, které jsou nestlačitelné je $\varepsilon = 1$. Hodnota expanzního součinitele se odečítá z nomogramu uvedeného v normě.

Konstrukce a typy clon

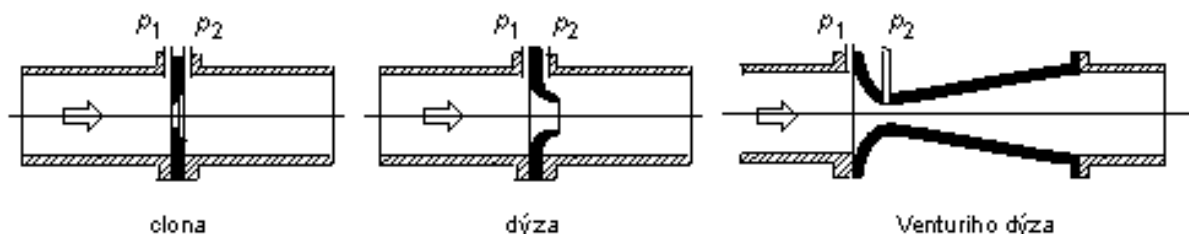
Škrticí orgány můžeme rozdělit do dvou skupin, normované a speciální provedení.

Normované provedení (tzv. základní škrticí orgány), existují pro ně zpracované a experimentálně ověřené výpočtové podklady, že pro dané podmínky měření lze řešit měřidla pouze početně, aniž by bylo nutno provádět kalibrační měření.



Obr. 12.7. Tvar normované clony a normované dýzy

Nejznámějšími základními škrticími orgány jsou centrická kruhová clona, dýza ISA a Venturiho dýza (obr. 12.8.). Centrická kruhová clona je tenký kotouč s kruhovým otvorem, jehož střed leží v ose potrubí. Měřicí dýza je nátrubek, jehož vtoková hrana je zaoblena, výtoková strana je ostrá. Venturiho dýza je nátrubek, jehož vtoková strana je zaoblena, výtoková strana se kuželovitě rozšiřuje až na původní průměr. Protože poměr obou průtočných průřezů zůstává stálý, hovoříme o měřidlech s konstantním poměrem zúžení.



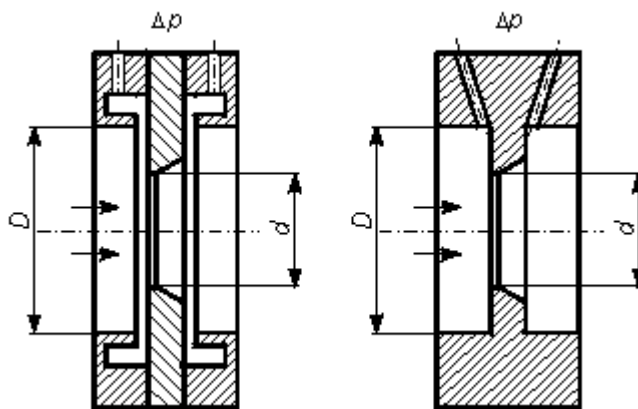
Obr. 12.8. Škrticí orgány

Speciální škrticí orgány nelze řešit pouze výpočtem, ale obvykle je zapotřebí provést i kalibrační měření. Mezi speciální škrticí orgány patří čtvercová a obdélníková clona a čtyřhranná Venturiho trubice, které se používají v potrubích s čtvercovým či obdélníkovým průřezem. Dále pak je to segmentová clona, což je tvarově kruhová úseč, zabudovaná v horní části vodorovného potrubí. Segmentová clona se používá při měření průtoku heterogenních

směsí, kdy je nebezpečí tvorby usazenin či kondenzátů v potrubí. Speciálních měřidel existuje ještě řada dalších typů.

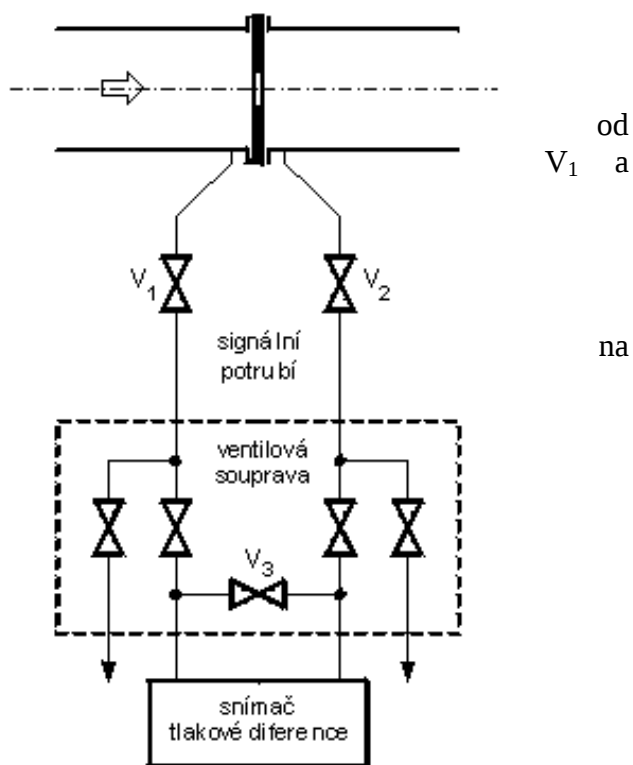
Měření a provozní umístění clon a dýz

Diferenční tlak, vznikající na škrticím orgánu, zjišťujeme diferenčním tlakoměrem, který je napojen signálním potrubím s potřebnými armaturami na komorové nebo bodové odběry. Uspořádání komorového a bodového odběru tlaku u clony je patrné z obr. 12.9. Při komorovém odběru se snímá tlak po celém obvodu měřicí clony, konstrukční provedení bodového odběru je jednoduché a levnější



Obr. 12.9. Odběry tlaků

Způsob připojení snímače tlakové difference k průřezovému měřidlu je uveden na obr. 12.10. Odběrová potrubí škrticího orgánu jsou uzavíratelná ventily V_1 a jejich uzavření umožňuje odpojení měřicího zařízení i za provozu technologického zařízení. Dále následuje signální potrubí. Na signální potrubí je připojena pětice ventilová souprava, kterou je napojen snímač tlakové difference. Ventilová souprava bývá umístěna těsně nad měřicím přístrojem. Umožňuje proplachování a odkalování signálního potrubí a prostřednictvím ventilu V_3 kontrolu nulové polohy přístroje.



Obr. 12.10. Schéma připojení snímače tlakové difference

Při měření průtoku škrticími orgány musí být splněny určité pracovní podmínky. Látka musí být homogenní, musí mít stejnou teplotu, musí být tvořena jednou fází. Kapalina nesmí obsahovat tuhé částice ani bublinky plynu, plyn nesmí obsahovat tuhé částice ani kapky. Výjimkou jsou některé koloidní roztoky. Potrubí, ve kterém je umístěn škrticí orgán, musí být kruhového průřezu o průměru větším než 50 mm. Potrubí musí být přímé v určité délce před a za měřidlem a nesmí v něm být umístěny žádné překážky rušící proudění. Potrubí musí být uvnitř hladké nebo musí mít drsnost získanou z výroby. Tekutina musí trvale vyplňovat celý prostor potrubí, škrcením nesmí nastávat fázová přeměna. Proudění musí být ustálené, bez rázů, rychlost se může měnit jen zvolna a musí být nižší než rychlost zvuku. Tekutina musí téci většinou v turbulentní oblasti. Pokud nejsou uvedené podmínky zcela dodrženy, je třeba brát zřetel na jednotlivé odchylky.

Pro měření tlakové difference se v laboratoři používají kapalinové U-manometry. Při provozním měření se užívají plovákové a prstencové tlakoměry nebo kapacitní snímače diferenčního tlaku, snímače s polovodičovými tenzometry, které poskytují elektrický výstupní signál. Měření průtoku škrticími orgány patřilo mezi nejčastěji používanou provozní metodou pro měření průtoku kapalin i plynů ve velmi širokém rozmezí teplot a tlaků. V současné době se často místo průřezových měřidel užívá moderních metod s přímým elektrickým výstupem (např. průtokoměry indukční, ultrazvukové, vírové).

12.2.2 Rychlostní sondy

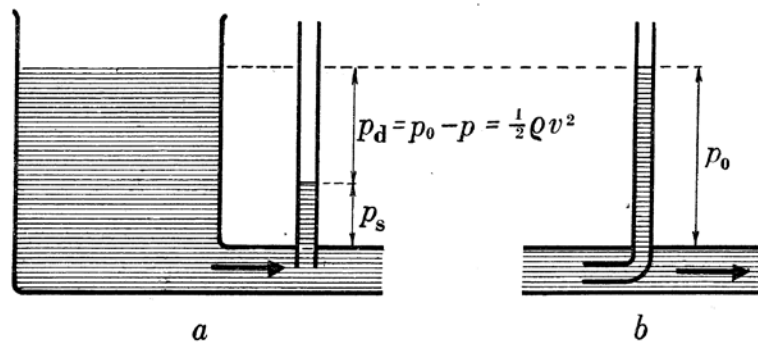
Rychlostní sondy využívají závislosti dynamického tlaku proudícího média na rychlosti proudění.

Pitotova trubice (obr. 12.11.) je nejjednodušší typ rychlostních sond. Je to trubice zahnutá v pravém úhlu a rovina jejího ústí stojí kolmo k ose proudění. U ústí sondy se zbrzdí rychlost proudění prakticky k nule a veškerá kinetická energie přejde v energii potenciální. Sonda snímá celkový tlak p_c , který je součtem tlaku statického p_s a dynamického p_d . Statický tlak se snímá na okraji potrubí, tj. v jiném místě než se snímá tlak p_c , což je hlavní nevýhodou Pitotovy trubice.

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho v^2}{2}$$

Rychlost proudící tekutiny je pak

$$v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}}$$



Obr. 12.11. Pitotova trubice

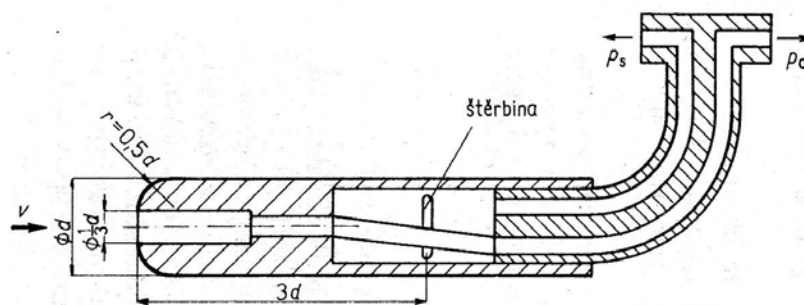
Prandtlůva trubice je konstrukčně uzpůsobena tak, že měří tlak p_c i p_s v jednom místě. Rychlost proudění v jakémkoliv bodě lze určit z tlakových poměrů v tomto bodě. V každém bodě průřezu potrubí působí celkový tlak p_c , složený ze statické a dynamické složky a pro ně platí

$$p_c = p_s + p_d = \text{konst}$$

Rychlost proudící tekutiny je pak

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot p_d}$$

Praktické měření umožňuje konstrukční uspořádání trubice (obr. 12.12.). Čelní otvor snímá celkový tlak a boční štěrby snímají tlak statický. Nevýhodou je ruční způsob usazování trubice a tak je vhodná jen při jednorázových kontrolních měřeních.



Obr. 12.12. Prantlova trubice

Rychlostní sondy se používají k různým krátkodobým měřením a hlavně pak k proměřování rychlostních profilů. Spodní mez měřené rychlosti je dána měřitelností dynamického tlaku. U plynů je to rychlost proudění asi 6 m/s, u vody asi 0,2 m/s.

12.2.3 Kolenový průtokoměr

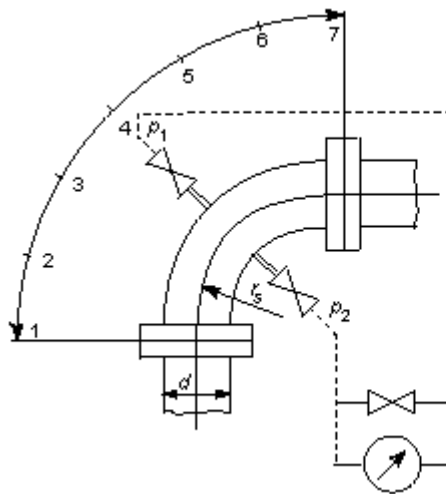
Kolenový průtokoměr je založen na měření rozdílu tlaků, který vzniká při průtoku tekutiny zakřiveným kanálem. Proudí-li plyn nebo kapalina kolenem, zabudovaným v přímém úseku potrubí, pak vlivem působení sil, vyvolaných změnou směru proudu, dochází ke změně v rozložení rychlostí a statických tlaků v radiálním směru zakřivení. Důsledkem toho je zvýšení tlaku na straně většího oblouku a snížení tlaku na straně menšího oblouku v porovnání s tlakem v přímé části potrubí (obr. 12.13.). Tlakový rozdíl mezi určitými body oblouků je

funkcí rychlosti proudících částic a tedy funkcí průtoku. Největší tlakový rozdíl je v ose souměrnosti kolena, kde se také měří diferenčním tlakoměrem.

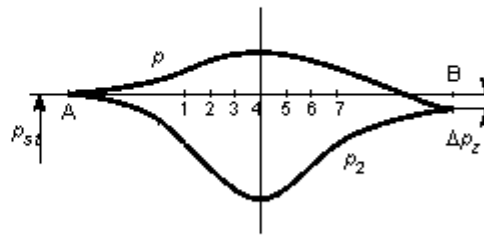
Složitost děje při průtoku kolenem ztěžuje matematické odvození průtokové rovnice. V technické praxi se proto používá různých rovnic s empirickým průtokovým součinitelem s omezeným rozsahem platnosti. Tak např. pro $Re > 65\,000$ je to rovnice:

$$Q = \alpha_K \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}, \text{ kde}$$

kde α_K je empirický průtokový součinitel kolena. Hodnota α_K závisí na geometrii kolena, je funkcí jeho průměru d a středního poloměru zakřivení.



a) uspořádání měřidla



b) rozložení statických tlaků na vnějším a vnitřním oblouku kolena

Obr. 12.13. Kolenový průtokoměr

Kolenový průtokoměr umožňuje měření i za nepříznivých provozních podmínek (agresivní, nehomogenní, korozivní látky, pěnicí kapaliny). Tlaková diference je ve srovnání s klasickými škrtícími orgány menší, menší jsou však i tlakové ztráty na měřidle. Průtokoměr tohoto typu vyžaduje experimentální ověření.

12.3. Rychlostní měřiče průtoku

Rychlostní měřiče průtočného množství jsou založeny na dynamickém silovém účinku proudícího média na rotující element měřiče. Frekvence otáčení rotujícího elementu je úměrná střední rychlosti proudění, a tím i průtočnému množství. Podle směru proudění vzhledem k ose rotoru rozlišujeme průtokoměry axiální a radiální. Osa rotace měřicího elementu je shodná s osou potrubí nebo je na osu potrubí kolmá. Nejběžnější typy průtokoměrů této skupiny jsou odvozeny od turbinky, lopatkového nebo šroubového kola, které je uváděno do otáčivého pohybu silovým účinkem proudící kapaliny. Rychlost otáčení je úměrná střední rychlosti proudění. Závislost frekvence otáčení na průtoku je popsána Eulerovou turbinovou rovnicí, která vede k jednoduchému tvaru

$$f = k \cdot Q_v - s, \text{ kde}$$

f - je frekvence otáčení,

Q_v - objemový průtok,

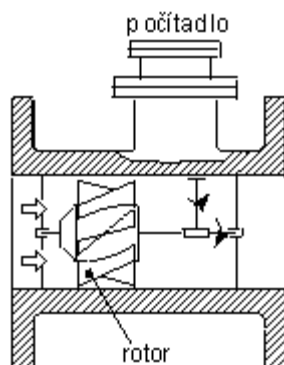
k - konstanta,

s - skluz.

Skluz je přímo úměrný zatěžovacímu momentu rotoru a je ovlivňován okamžitou hodnotou průtoku.

12.3.1 Woltmanův měřič průtočného množství

Představitelem axiálních průtokoměrů je tzv. šroubové (Woltmannovo) měřidlo (obr. 12.14.). Rotor je vytvořen z několika šroubových ploch, připevněných k náboji uloženému v ložiscích. Ložiska jsou upevněna do ramen, která slouží jako usměrňovače proudu. Měřidla se vyrábí v širokém rozsahu jmenovitých průtoků (až do $2\,800\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$); montážní poloha v potrubí je libovolná.



Obr. 12.14. Woltmannovo měřidlo

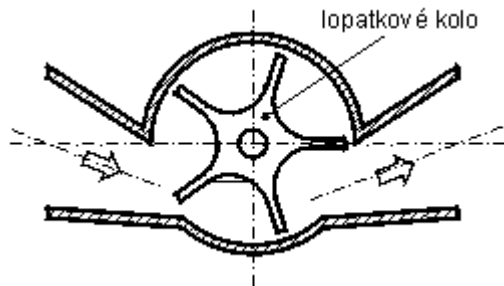
12.3.2 Turbínový měřič

Turbínový měřič je odvozen od Woltmannova měřidla. Konstrukčními úpravami v uložení a ve snímání otáček je zde dosaženo minimálního momentového zatížení. Průtokoměry jsou vhodné pro kapaliny i pro plyny. Pro impulzní snímání otáček se využívá principů mechanických nebo bezdotykových snímačů indukčních, fotoelektrických, elektromagnetických apod. Impulsy se dále zesilují a tvarují na obdélníkový průběh.

Frekvence otáčení je úměrná okamžitému průtoku, celkový počet otáček souvisí pak s proteklým množstvím tekutiny. Bezdotykové snímače jsou výhodné z hlediska číslicového zpracování signálu. Pro zjištění okamžitého průtoku se vyhodnocují impulsy v konstantních časových intervalech a není zapotřebí analogově-číslíkový převodník. Při bezdotykovém snímání otáček odpadá nutnost ucpávky a přístroje je možno použít i k měření při vysokých statických tlacích. Relativní chyba měření může být menší než 0,5 %, provozní tlaky do $2\,000\text{ MPa}$ a teploty od -200 °C do 700 °C .

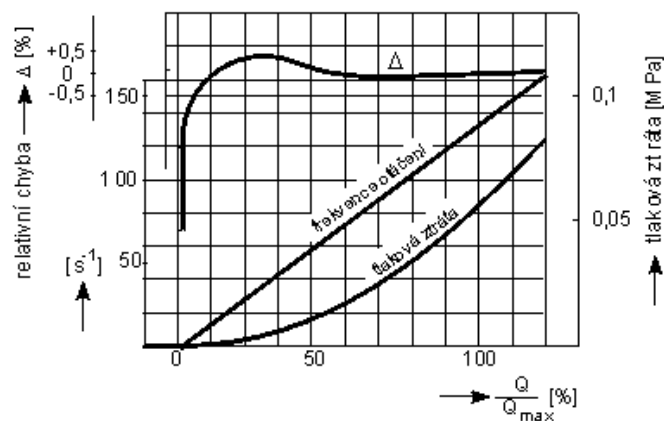
12.3.3 Lopatkový radiální průtokoměr

Lopatkový průtokoměr patří do skupiny radiálních měřidel (obr. 12.15.). Osa rotace ploch radiálního lopatkového kola je kolmá k ose toku média. Způsoby snímání otáček jsou stejné jako u předchozího typu.



Obr. 12.15 Radiální lopatkový průtokoměr

Společnou nevýhodou uvedených rychlostních měřidel je značně velká relativní chyba v počátku stupnice, a dále pak skutečnost, že rotor se uvede do pohybu, až když průtok dosáhne jisté minimální hodnoty $Q_{\min}$, kdy jsou překonány statické pasivní odpory. Do té doby nezaznamenává měřidlo žádné proteklé množství. Příklad charakteristiky lopatkového rychlostního měřidla je uveden na obr. 12.16. Relativní chyba měřidla se s rostoucím průtokem blíží jisté mezní hodnotě, která se zmenšuje s rostoucí průtočnou plochou měřidla a se zvětšujícím se počtem rotujících ploch.



Obr. 12.16. Charakteristiky radiálního lopatkového měřidla



CD-ROM

Animace použití lopatkového průtokoměru.

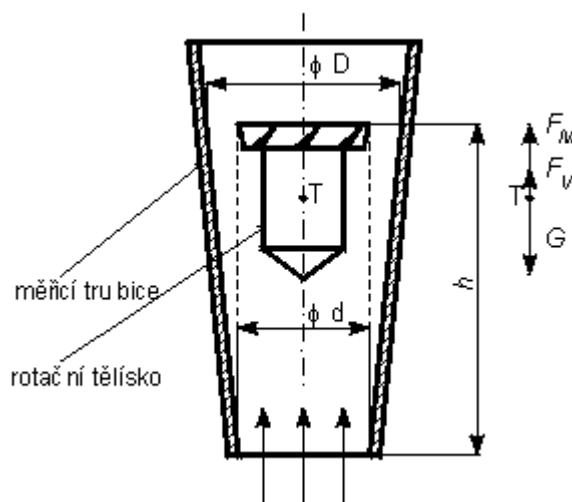


Průvodce studiem

Milí studenti, je zřejmé, že metody měření průtoku jsou rozsáhlé. Neočekávám, že budete detailně znát všechny uvedené metody. Myslím, že v rámci celého studovaného předmětu Prvky řídicích systémů jste se s metodami seznámili a v případě nutnosti jejich použití budete umět zvážit jejich výhody, možnosti a způsob realizace.

12.4. Rotametr

Rotametry patří do skupiny průřezových měřidel, u kterých se s měnícím průtokem mění průtočná plocha při přibližně stálém tlakovém rozdílu před zúženým průřezem a za ním. Hlavní funkční částí rotametru je svislá měřicí trubice tvaru mírně kuželovitého, nahoru se rozšiřující; úhel kužele je menší než 2° (obr. 12.17.). Měřicí trubice musí být v poloze svislé a měřená látka proudí směrem vzhůru. V trubici se vznáší v proudícím prostředí rotační tělísko. (Toto tělísko se označuje často nevhodně jako plováček a měřidlo jako plováčkový průtokoměr; označení neodpovídá fyzikální podstatě měřicí metody, protože tělísko vzhledem ke své hmotnosti neplave.) Podle velikosti průtoku zaujme rotační tělísko vyšší nebo nižší polohu, čímž se změní průtokový průřez, kterým tekutina protéká. Tlakový spád a průtoková rychlost v místě zúžení zůstávají konstantní. Měřený průtok se odečítá podle vertikální polohy tělíska. Stupnice bývá vyznačena přímo na trubici zhotovené z průhledného materiálu. Na horním okraji tělíska jsou šikmé zářezy, takže účinkem proudícího prostředí se uvede tělísko do rotačního pohybu, čímž se stabilizuje jeho poloha v trubici.



Obr. 12.17. Rotametr

Při určitém konstantním průtoku zaujme tělísko určitou polohu a v té setrvá, pokud se průtok nezmění. Za tohoto stavu jsou v rovnováze všechny síly, působící na tělísko. Směrem dolů působí tíha tělíska F_G , nahoru působí vztlak F_V a síla proudícího média F_M . Síla F_M se skládá ze síly tlakové F_P a ze síly třecí F_T . Na velikost tlakové a třecí síly má vliv způsob otáčení tělíska. Způsob obtékání lze měnit tvarem tělíska. Při velkých hodnotách Reynoldsova čísla převládají síly setrvačné; uplatňuje se hlavně hustota a nezávisí na viskozitě média. Při

malých hodnotách Reynoldsova čísla převládají síly třecí a uplatňuje se zde hlavně viskozita média. Rovnováha sil v těžišti tělíska je obecně dána vztahem

$$F_G = F_V + F_P + F_T$$

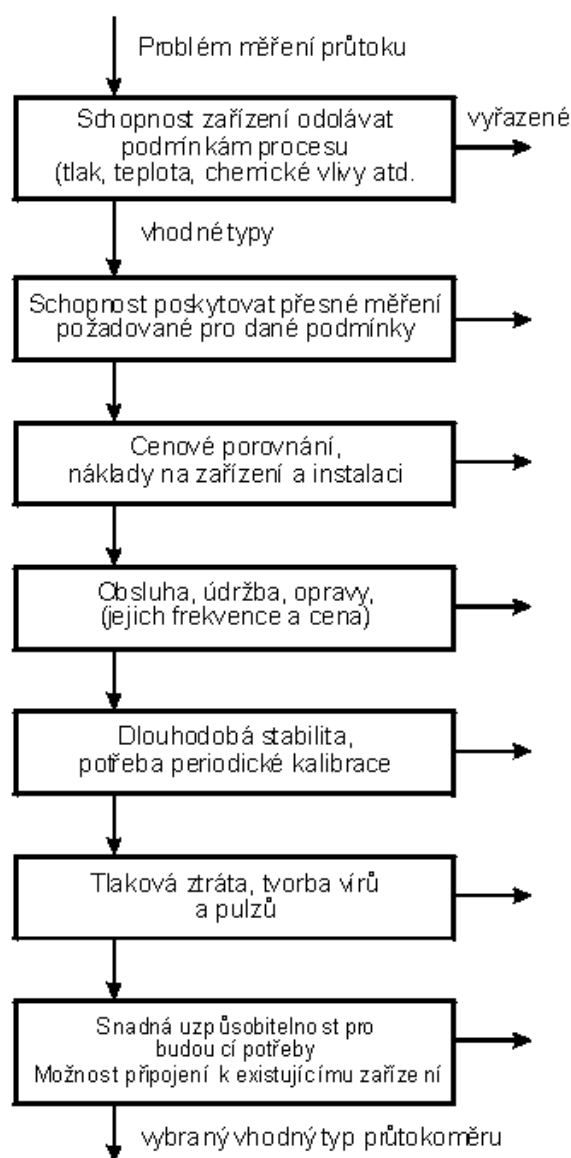
Průřez mezikruží je funkcí polohy rotačního tělíska. Má-li být stupnice průtoku lineární, lze odvodit, že trubice by měla mít tvar rotačního paraboloidu. Při menších nárocích na přesnost vyhovuje i trubice kuželovitého tvaru. Údaj přístroje závisí na hustotě měřené látky. Při měření jiné látky, než na kterou byl přístroj kalibrován, je nutno provést přepočet.

Rotametry umožňují měřit průtoky homogenních tekutin s nejrůznějšími fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Používá se jich při měření v potrubích s menším průměrem než 100 mm. Rotametry se vyrábějí s měřicími rozsahy pro měření průtoku vody od $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ až do $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, nebo vzduchu od $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ do $630 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Měřicí trubice bývá nejčastěji skleněná a poloha tělíska je snímána vizuálně. Skleněné trubice umožňují měření až do teplot 200°C a do tlaku 1 MPa. Polohu tělíska lze snímat i magneticky, pneumaticky, fotoelektricky, pomocí indukčního vysílače apod. Tak lze získat signál vhodný k dalšímu zpracování.

12.5. Volba vhodného typu průtokoměru

Při výběru vhodného typu průtokoměru i při jeho vlastní instalaci se uživatelé dopouštějí často mnoha chyb. Výběr průtokoměru je náročný úkol, při kterém je zapotřebí zvažovat celou řadu kritérií. Patří mezi ně: měřené médium, podmínky měření, měřicí rozsah, linearita, přesnost, opakovatelnost, způsob zpracování výstupního signálu (místní ukazování, dálkový přenos, komunikace s počítačem), montáž měřidla, uspořádání potrubního vedení, tlaková ztráta, servis a údržba přístroje, finanční náklady. Důležitý je účel měření; např. u průtokoměru pro bilanční účely je důležitá přesnost, u průtokoměru pro regulační účely je důležitá opakovatelnost.

Různé typy přístrojů vykazují vždy určité výhody i nevýhody a odtud pak vyplývá i stupeň uspokojení uživatele. Důležité jsou i cenové relace. Např. rotametry patří k nejlevnějším (okolo 3 000,- Kč), hmotnostní průtokoměry bývají nejdražší a jejich cena se pohybuje i výše než 200 000,- Kč. Při nákupu průtokoměru je třeba si uvědomit, že kromě vlastního průtokoměru je obvykle zapotřebí pro instalaci ještě další pomocné zařízení. Např. clonový kotouč může stát 1 500,- Kč, ale převodník pak 15 až 20 tisíc Kč a další náklady si vyžádá vlastní instalace. Příklad rozvahy při výběru průtokoměru je uveden na následujícím schématu (obr. 12.18.).



Obr. 12.18. Schéma volby průtokoměr



Shrnutí pojmů 12

Objemový průtok. Hmotnostní průtok. Spotřeba. Membránový plynoměr. Bubnový plynoměr. Oválné měřidlo. Clony. Dýzy. Bernoulliho rovnice. Rovnice kontinuity. Prantlova trubice. Kolenový průtokoměr. Woltmanův průtokoměr. Turbínový průtokoměr. Rotametr. Indukční průtokoměr.



Otázky 12

1. Vyjmenujte základní metody měření průtoku a vysvětlete jejich podstatu.
2. Zopakujte si princip indukčního průtokoměru

13. PRŮMYSLOVÉ MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat principy měření výšky hladiny
- klasifikovat metody měření výšky hladiny
- popsat provedení hladinoměrů



Výklad

Zjišťování výšky hladiny kapalin a případně sypkých hmot v zásobnících a provozních nádobách, jako jsou různé tanky, rezervoáry, nádrže, destilační kolony, odparky, krystalizátory, mísicí nádoby apod., je jedním z velmi častých úkolů provozního měření. Ačkoli mluvíme o měření výšky hladiny, jedná se většinou o zjišťování množství. Z údajů zjištěných měřením výšky hladiny je možno toto množství vypočítat, přičemž samozřejmě záleží na tvaru zásobníku, ve kterém se kapalina nachází. Pokud se měření provádí v nádobách, u kterých se průřez s výškou nemění, je vyčíslení velmi snadné. Obtížnější z tohoto hlediska je měření např. v ležatých zásobnících, kde závislost objemu na výšce hladiny je dána nejen válcovým tvarem, ale i vyklenutím dna.

Různorodost požadavků se na měření odráží ve velkém počtu měřících metod a přístrojů, které byly vyvinuty pro měření stavu hladiny. Volba vhodné metody je ovlivněna celou řadou faktorů. Jsou to hlavně tlak (otevřené, uzavřené nádoby), teplota, korozivní účinky měřeného média, rozsah a citlivost, potřeba plynulého měření či indikace mezních stavů atd. Pro vizuální sledování stavu hladiny se nejčastěji používají průhledové stavoznaky se skleněnou trubicí nebo průzorů. Jejich hlavní předností je jednoduchost, nevýhodou je nutnost častého čištění od rzi a dalších nečistot, které se na skle usazují. Přístroje pro měření stavu hladiny můžeme rozdělit do tří hlavních skupin:

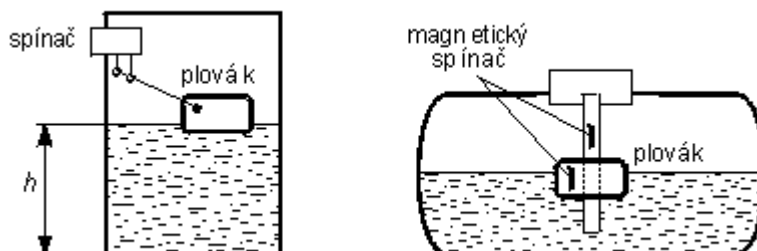
- stavoznaky mechanické,
- stavoznaky hydrostatické,
- stavoznaky elektrické (některé již byly objasněny v předešlých kapitolách).

13.1. Mechanické hladinoměry

13.1.1 Plovákové hladinoměry

Pro otevřené nádrže se používají plovákové hladinoměry. Pohyb plováku, který plave na hladině měřené kapaliny, je vyveden z nádrže přes kladku lankem nebo řetízkem, obvykle ve spojení s protizávažím. Plovák zavěšený na lanku či řetězu je obvykle veden tak, aby nedocházelo k jeho rozkývání při neklidné hladině. Výška hladiny, tj. poloha plováku se

určuje buď přímo odečtením polohy protizávaží na podložené stupnici, nebo se převádí na elektrický signál pomocí převodníku. Vhodným převodníkem může být odporový vysílač mechanicky spojený např. s kladkou plovákového snímače. Odporový vysílač je speciálně uzpůsobený měřicí potenciometr, u něhož se působením měřené veličiny mění poloha kontaktu (jezdce), který se posouvá po odporové dráze. Snímače tohoto typu jsou jednoduché a spolehlivé. Musí být dokonale mechanicky provedeny, aby vykazovaly malý třecí moment a dlouhou životnost.



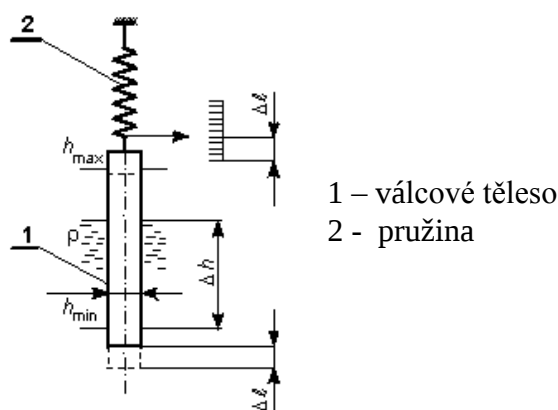
Obr. 13.1. Plovákové hladinoměry

V uzavřených nádržích se používá plováku obvykle ve tvaru prstence, jehož pohyb je usměrněn pomocí vodící tyče. Poloha plováku je snímána např. prostřednictvím jednoho či několika magnetických spínačů (obr. 13.1. vpravo). Plovákové hladinoměry se používají i pro měření hladiny v tlakových nádobách. Pohyb plováku, který bývá v těchto případech upevněn na rameni páky, se vyvádí z tlakového prostoru např. magnetickou spojkou (obr. 13.1. vlevo).

Přesnost měření je dána především tvarem plováku a jeho průřezem, pasivními odpory v převodovém mechanismu a změnami hustoty měřené kapaliny. Tvar plováku by měl být takový, aby neobsahoval pokud možno žádné horizontální plochy, na kterých se mohou udržívat kapky kapaliny a usazovat případné nečistoty. To pak vyvolává změnu hmoty plováku, a tím i změnu jeho ponoření. Plováky, určené pro tlakové prostory, mají nejčastěji kulový tvar a v některých případech bývají naplněny inertním plynem na tlak odpovídající maximálnímu tlaku v nádrži.

13.1.2 Hladinoměry s ponorným tělesem

Snímače jsou založeny na platnosti Archimedova zákona a pracují na principu vyrovnání sil. Ponorné těleso válcového tvaru je zavěšeno na pružině (obr. 13.2.). Síla působící na pružinu je dána vlastní tíhou tělesa, zmenšenou o sílu vztlakovou.



Obr. 13.2. Ponorné těleso

Změnou výšky hladiny o Δh se změní vztlaková síla a dojde k ustavení nové rovnováhy sil v jiné poloze tělesa. Pro rovnováhu ponorného tělesa pak platí

$$S \cdot (\Delta h - \Delta l) \cdot g \cdot \rho = k \cdot \Delta l, \text{ kde}$$

S je průřez ponorného tělesa,

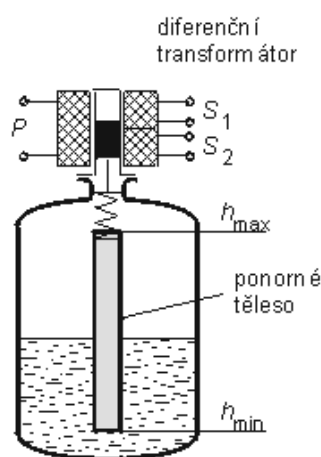
Δh - změna výšky hladiny,

Δl - změna polohy tělesa (stlačení pružiny),

ρ - hustota kapaliny,

k - konstanta pružiny.

Z čehož vyplývá, že při měření hladiny musí být konstantní hustota měřené kapaliny. Délka ponorného tělesa pro daný měřicí rozsah nesmí být menší než hodnota výrazu $(\Delta h - \Delta l)$. Tíha tělesa musí být větší než vztlak při plném ponoření. Zdvih ponorného tělesa při maximální změně hladiny měřené kapaliny je poměrně malý. Způsob, jakým se snímá změna polohy tělesa, závisí na typu dálkového přenosu. Převod polohy na elektrický signál s využitím diferenčního transformátoru je znázorněn na obr. 13.3.



Obr. 13.3. Spojení ponorného tělesa s jádrem diferenčního transformátoru

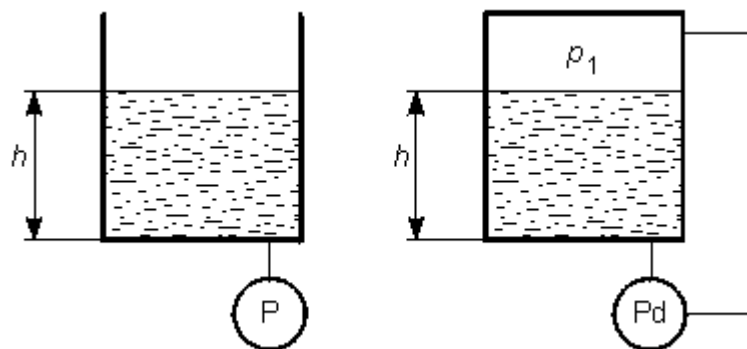
Diferenční transformátor je příkladem indukčního snímače. Na trubce z nemagnetického materiálu je navinuto primární a sekundární vinutí. Sekundární vinutí je vinuto od poloviny opačným směrem. Uvnitř uzavřené trubky se pohybuje železné jádro, které je mechanicky spojeno s ponorným tělesem zavěšeným na pružině. Změnou polohy jádra, ke které dochází změnou měřené veličiny, se mění koeficient vzájemné indukčnosti mezi primárem a sekundárem. Maximálního rozdílu se dosáhne při zasunutí jádra přesně do poloviny cívky. Tímto způsobem je možno měřit hladinu i v uzavřených tlakových nádobách. Z tlakových prostorů se pohyb tělesa vyvádí rovněž torzní trubkou, která vedle kompenzačního momentu plní i funkci dokonalé ucpávky. Pohyb konce torzní trubky se převádí na pneumatický nebo elektrický signál.

13.2. Hydrostatické hladinoměry

Výška hladiny h se vyhodnocuje z hydrostatického tlaku p sloupce kapaliny v nádrži dle rovnice

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g}.$$

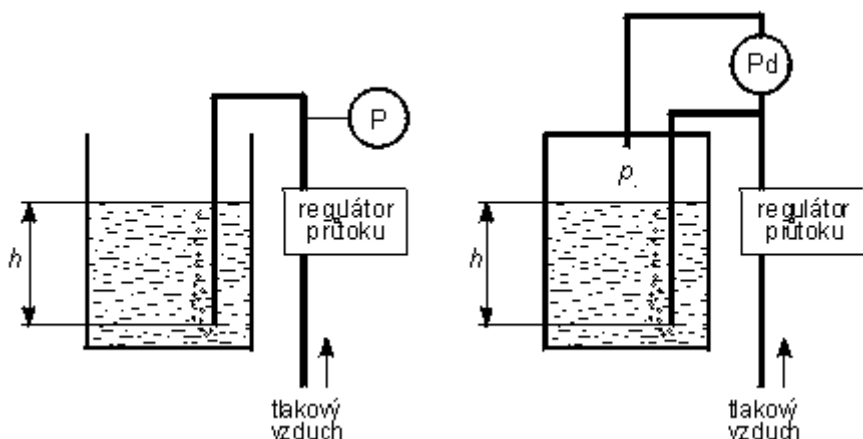
Výsledek měření závisí na hustotě ρ a tedy i na teplotě kapaliny. K měření hydrostatického tlaku (obr. 13.4.) se používá vhodného kapalinového nebo deformačního tlakoměru.



Obr. 13.4. Měření hydrostatického tlaku v otevřené nádobě a v tlakovém zásobníku

Pneumatický stavoznak

Přístroje založené na probublávání plynu kapalinou je vhodná zvláště pro měření agresivních, silně znečištěných a viskózních kapalin, tzv. pneumatický stavoznak (obr. 13.5.). Trubkou přivedenou ke dnu nádrže, proudí stále malé množství vzduchu nebo jiného neutrálního plynu. Unikající vzduch musí překonat hydrostatický tlak kapaliny. Je-li průtok vzduchu tak malý, aby bylo možno zanedbat odpor trubky, pak přetlak v systému, měřený vhodným tlakoměrem, bude úměrný výšce hladiny. V přívodním potrubí pro vzduch je zařazen regulátor, který udržuje konstantní průtok vzduchu bez ohledu na velikost hydrostatického tlaku.



Obr. 13.5. Probublávací hladinoměr pro otevřené a v uzavřené nádobě

Stejného způsobu lze použít i pro uzavřené nádoby (obr. 13.5b), pokud napájecí tlak je vyšší než tlak v nádobě. K měření je pak zapotřebí vhodný diferenční tlakoměr.

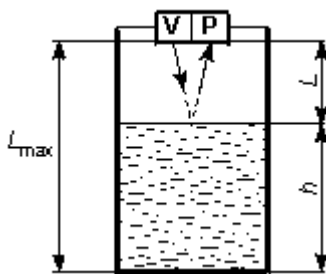
13.3. Elektrické hladinoměry

Některé elektrické principy již byly objasněny (hladinoměry využívající změn kapacity a odporu, vodivostní) v předchozích kapitolách. Dále pak hladinoměry ultrazvukové, radarové a izotopové.

13.3.1 Ultrazvukové hladinoměry

Princip ultrazvukových hladinoměrů je založen na měření dráhy ultrazvukového impulsu mezi vysílačem a přijímačem (obr. 13.6.). Nejčastěji se měří tak, že se ultrazvukový impuls odráží od fázového rozhraní a měření délky dráhy se převádí na měření času. Senzor stavu hladiny tvoří:

- generátor a vysílač ultrazvukového signálu,
- přijímač ultrazvuku a zesilovač signálu,
- elektronické vyhodnocovací zařízení.



Obr. 13.6. Ultrazvukový hladinoměr

Vysílač a přijímač ultrazvukových impulsů pracující např. na piezoelektrickém principu tvoří konstrukční celek, který je umístěn v horní části nádrže. Funkci celého zařízení řídí generátor pulsů. Na počátku měřicího cyklu je vyslán z vysílače ultrazvukový impuls, který se po odrazu od hladiny vrací k přijímači. Čas t naměřený elektronickým obvodem závisí na velikosti dráhy ultrazvuku, a tím i na stavu hladiny. Výška hladiny se vyhodnocuje na základě vztahů:

$$L = c \cdot \frac{t}{2}$$

$$h = L_{\max} - c \cdot \frac{t}{2}, \text{ kde}$$

c je rychlost šíření ultrazvuku v daném prostředí,

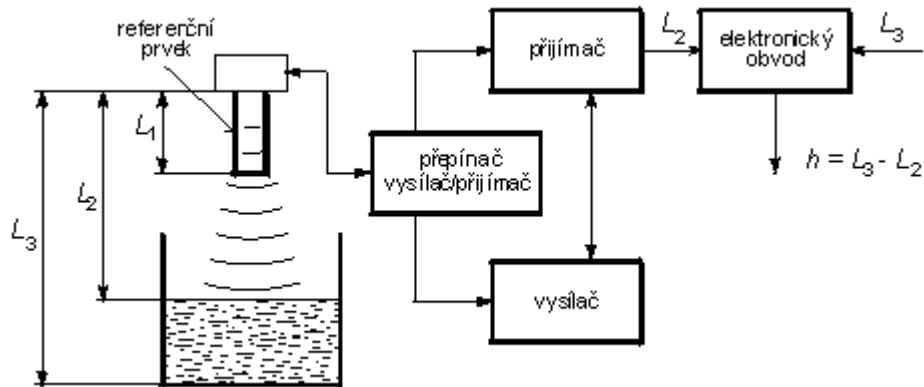
t - naměřený čas,

L - vzdálenost hladiny od snímače,

$L_{\max}$ - výška nádrže.

Údaj ultrazvukového hladinoměru je ovlivňován hustotou a teplotou prostředí, přítomností míchadla, tvarem a kvalitou povrchu fázového rozhraní, přítomností pěny i činností míchadla. Poněvadž rychlost ultrazvuku závisí na hustotě a tedy i na teplotě prostředí, bývají přesné ultrazvukové hladinoměry vybaveny příslušným korekčním obvodem. Korekci je možno provádět na základě měření teploty. Výstupní signál je zpracován v analogové nebo číslicové formě elektronickými obvody. Při měření kapalin lze určit hladinu s chybou ± 2 mm. Bude-li

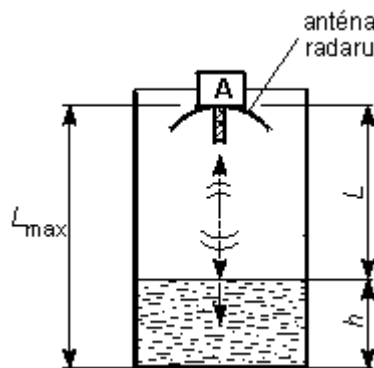
docházet ke změnám hustoty prostředí i z jiných příčin než je změna teploty, je možno aplikovat ultrazvukový hladinoměr s automatickou korekcí, který je vybaven referenčním prvkem např. ve tvaru U, který vymezuje pevnou referenční vzdálenost. Elektronický obvod změří jednak dobu, kterou potřebuje ultrazvukový signál pro překonání referenční vzdálenosti a jednak dobu pro vzdálenost k hladině a zpět. Čas pro překonání referenční vzdálenosti slouží pro výpočet rychlosti ultrazvuku v daném prostředí. Výšku hladiny h stanoví elektronický obvod na základě znalosti vzdálenosti, naměřené při nulovém stavu hladiny. Informace o stavu hladiny získané touto měřicí metodou nezávisí na změnách rychlosti ultrazvuku v prostředí nad hladinou.



Obr. 13.7. Ultrazvukový hladinoměr s kompenzací

13.3.2 Radarové hladinoměry

Radarové snímače hladiny využívají podobný princip jako ultrazvukové hladinoměry. V tomto případě nejde o akustický signál, ale o elektromagnetické vlnění (mikrovlnné záření), které se šíří prostředím rychlostí světla. Měří se čas potřebný k průchodu elektromagnetických vln z vysílače k hladině a zpět k přijímači. Elektromagnetické záření o frekvenci kolem 10 GHz je směřováno do prostoru pomocí antény (obr. 13.8.). Vyslaná vlna se na fázovém rozhraní částečně odrazí zpět k vysílači a částečně dále prochází do druhého prostředí. Z časového údaje mezi vyslanou a přijatou vlnou se stanoví výška hladiny.

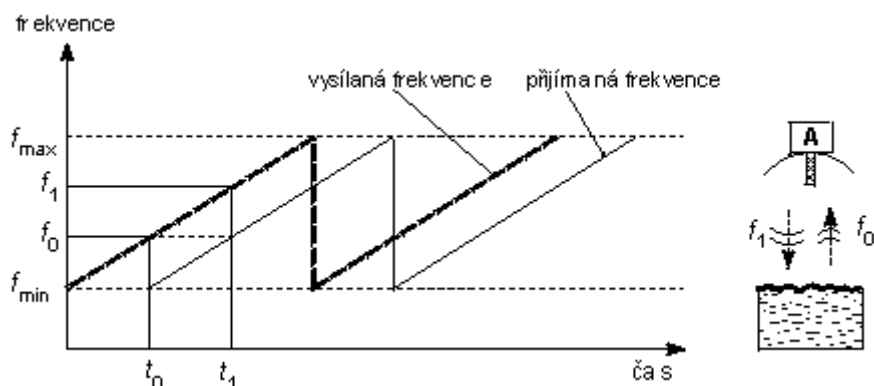


Obr. 13.8. Měření výšky hladiny radarem

Pulsní metoda využívá toho, že mikrovlnný signál je vysílán periodicky v krátkých intervalech. Metoda je velmi náročná na přesnost měření času, protože se jedná o časové intervaly řádově v pikosekundách.

Frekvenční metoda (je vhodnější) je založená na vysílání spojitého signálu s proměnnou frekvencí (obr. 13.9.). Vysílaný signál mění plynule svoji frekvenci od $f_{\min}$ do $f_{\max}$. Ze známé

rychlosti přeladování a změřených hodnot frekvencí vyslaného a přijatého signálu v čase t_1 je možno vypočítat vzdálenost odpovídající výšce hladiny. Ze zjištěné difference frekvence $\Delta f = f_1 - f_0$ se stanoví odpovídající $\Delta t = t_1 - t_0$ a vypočte se vzdálenost hladiny. Hlavní předností frekvenční metody je, že frekvenční rozdíl lze měřit velmi přesně, a to umožňuje stanovit výšku hladiny s přesností až ± 1 mm.



Obr. 13.9. Princip frekvenční metody

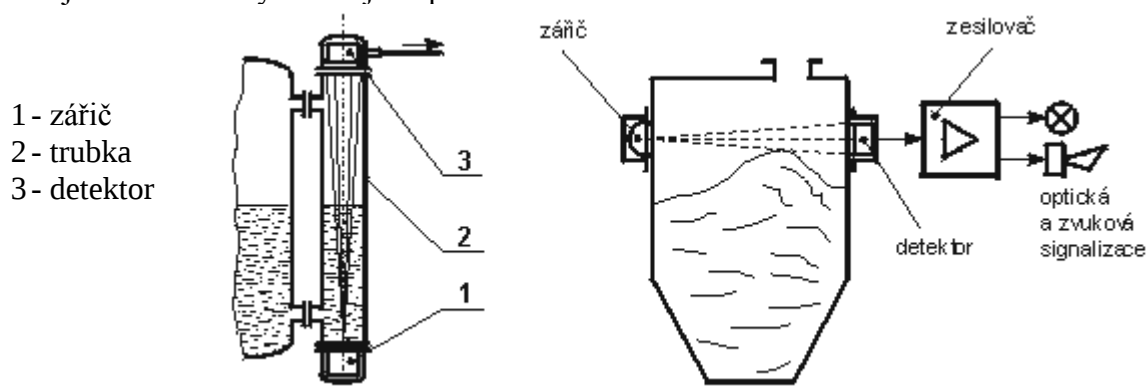
Složení atmosféry nemá vliv na rychlost šíření mikrovln, ale při vysoké koncentraci par může docházet k útlumu signálu. Pro aplikaci radarových snímačů je důležitá znalost relativní permitivity ϵ_r měřeného média. Materiál s nízkou permitivitou má vyšší propustnost pro elektromagnetické záření, a proto velký podíl záření proniká rozhraním. Pro úspěšnou aplikaci se obecně požaduje, aby $\epsilon_r > 2$. Elektronické vyhodnocovací zařízení radarových snímačů spolu s příslušným programovým vybavením umožňuje odlišit parazitní odrazy od stěn, vnitřních částí aparatur či míchadel. Radarové snímače vykazují vysokou přesnost a spolehlivost i ve velmi náročných provozních podmínkách (vysoká teplota, tlak, agresivní prostředí). Jsou vhodné i pro měření vysoce viskózních a lepivých médií, pro pasty a kaly, pro zkapalněné plyny i těkavé a agresivní kapaliny. Nevýhodou je poměrně vysoká cena zařízení a nevhodnost aplikace pro kapaliny s nízkou permitivitou.

13.3.3 Izotopové hladinoměry

Izotopové hladinoměry využívají skutečnosti, že intenzita radioaktivního záření klesá úměrně s tloušťkou vrstvy materiálu mezi zářičem a detektorem. Jejich nevýhodou je nutnost ochrany obsluhy před účinky radioaktivního ozáření. Aplikace těchto přístrojů přichází proto v úvahu tehdy, když není možno užít jiných metod, tj. např. při měření látek silně agresivních, viskózních, při extrémně vysokých tlacích a teplotách.

Na obr. 13.10a je ukázána jedna z možností provedení izotopového hladinoměru. Radioaktivní zářič je uložen v ochranném pouzdru ve spodní části pomocné trubky, propojené s nádrží. V horní části trubky je umístěn detektor. Jako zdrojů gama-záření se používá izotopů s relativně dlouhým poločasem rozpadu (např. Co 60 či Cs 137), aby nebylo zapotřebí provádět často kalibraci. Gama-paprsky silně pronikají materiálem, ale nemají schopnost jej aktivovat (vyvolávat jeho radioaktivitu), a proto je lze používat pro účely měření a to i v potravinářském průmyslu. Důležitou předností použití gama-paprsků pro měření hladiny kapalin a sypekých látek je možnost použití zářiče i přijímače vně stěn zásobníku. Detektorem bývá zpravidla Geiger-Müllerova trubice nebo scintilační detektor. Obr. 13.10b ukazuje

zařízení pro signalizaci mezního stavu násypu sypké látky. Zářič v ochranném pouzdře i detektor jsou instalovány na vnějším plášti zásobníku.



a) spojitě měření výšky hladiny

b) snímání mezního stavu hladiny

Obr. 13.10. Izotopové hladinoměry

13.4. Výběr vhodného typu snímače hladiny

Při výběru vhodného typu snímače pro konkrétní provozní aplikaci je zapotřebí brát v úvahu:

- fyzikální a chemické vlastnosti měřeného média,
- charakter okolního prostředí a podmínky měření,
- požadavek na spojitě či nespojitě snímání stavu hladiny,
- specifikace účelu měření (signalizace mezních stavů, regulace stavu hladiny, bilanční měření),
- měřicí rozsah,
- požadavek na přesnost měření,
- ekonomické náklady na zařízení.



Shrnutí pojmů 13

Plovákový hladinoměr. Hydrostatické hladinoměry. Ultrazvukový hladinoměr. Radarový hladinoměr. Izotopový snímač. Kapacitní snímač hladiny. Vodivostní princip měření.



Otázky 13

1. Vymenujte druhy snímačů hladiny.
2. Definujte fyzikální rovnici pro hydrostatický tlak.
3. Popište kapacitní snímač výšky hladiny.



Průvodce studiem

Vážení studenti, ráda bych zakončila studijní materiály poděkováním, že jste si našli čas a energii k prostudování uvedené problematiky. Jistě jste se dověděli a poznali spoustu fyzikálních principů a zákonitostí, které jste doteď v tichosti míjeli a mnohdy Vás ani nevedli k zamyšlení. Cíl, který jsem si stanovila sama jako tvůrce podpůrné učebnice, není vysoký. Chtěla jsem Vás seznámit se širokým spektrem užitečných i méně závažných jevů a tím osvětlit technickou podstatu – tzv. hardware řídicích systémů. Je to jen začátek v chápání širších souvislostí z oblasti automatizace a řízení. Jako budoucí absolventi technické vysoké školy jsou tyto všeobecné zákony a teorie pro Vás jistě nutností. Budu ráda, když ve studovaném předmětu Prvky řídicích systémů nebudete spatřovat svého “nepřítele” a oceníte i ty informace, které zda byly navíc.

Ke studiu učiva opět (jako už stále) doporučuji přistupovat s nadhledem, a učit se skutečně ty základní a podstatné rovnice, charakteristiky či schémata zapojení. Jisté pasáže slouží k orientaci a lepšímu informačnímu přehledu a rozhodně není mým úmyslem nechat Vás trpět při biflování milionů vět a obrázků. Ráda bych také uvedla, že některé pasáže najdete v uvedených zdrojích literatury či na [www stránkách](#). Jedná se především, o některé informace ze závěrečných kapitol, které se mi již v minulosti osvědčili při výuce distančních studentů.

Přeji všem jen dobré završení studia předmětu Prvky řídicích systémů a budu se těšit při výuce navazujícího předmětu Technické prostředky řídicích systémů, kde dokončíme komplexní přehled fyzikálních realizací řídicího systému. Vše zde uvedené poslouží jako důležitý základ při studiu obecně, či dá možný nápad pro zpracování závěrečné bakalářské či diplomové práce.

LITERATURA

- [1] BERAN, V. Technická měření. 1.vyd. Plzeň : Západočeská univerzita, 1996. 129 s. ISBN 80-7082-036-5.
- [2] BRÁZDA, Aleš; JENČÍK, Josef. Technická měření. 5.vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1996. 208 s. ISBN80-01-01495-9.
- [3] ĎAĎO, S. – KREIDL, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT, Praha, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [4] ĎAĎO, S.: Měřicí převodníky fyzikálních veličin, Skriptum ČVUT Praha, 1990.
- [5] HOFMANN, D. Priemyselná meracia technika, 3. vydanie, Bratislava: Alfa, 1988, 568 s. ISBN 80-05-00139-8.
- [6] HUSÁK, M., Senzorové systémy, Skriptum ČVUT Praha, 1993.
- [7] KRÁL, Karel. Technická měření. 1. vyd. Praha : SNTL, 1990. 128 s. ISBN 80-03-003687.
- [8] LIPTAK, B.: Instrument Engineers' Handbook, Third Edition: Process Measurement and Analysis. 1995. Butterworth-Heinemann. 1 424 s. ISBN 0801981972.
- [9] MARTINEK, R. : Senzory v průmyslové praxi. BEN-technická literatura: Praha., 2004. ISBN 80-7300-114-4.
- [10] MIGEON, A. – LENEL, A. E.: Master Book of Sensors: Modular Courses on Modern Sensors. BEN: Praha, 2003. ISBN 0-12-752184-4.
- [11] MIGEON, A. – LENEL, A. E.: Pressure sensors – Modular Courses on Modern sensors. Leonardo pilot projekt, M2A Technologies France, 2002.
- [12] NUTIL, J., ČECH, V. : Měření v hutním průmyslu, SNTL. Praha 1982.
- [13] STRAKOŠ, V., NEUSTUPA, Z. Technické prostředky ASŘ. 1. vydání. Ostrava.VŠB-TU Ostrava,1988.
- [14] SZENDIUCH, I. A KOL.: Technologie elektronických obvodů a systémů. VUTIAM, VUT Brno, 2002. ISBN 80-214-2072-3.
- [15] WEBSTER, J. G.: The measurement, Instrumentation, and Sensor Handbook. 1998. CRC. 2 608 s. ISBN 0849383471.
- [16] ZEHNULA, K., Převodníky fyzikálních veličin, Skriptum FE VUT Brno, 1990.
- [17] ZEHNULA, K.: Snímače neelektrických veličin. SNTL, Praha, 1983.
- [18] ZEHNULA,K.: Čidla robotů, SNTL, Praha, 1990.

- [19] **VSCHT.** MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA. *ÚSTAV POČÍTAČOVÉ A ŘÍDICÍ TECHNIKY*. [Online] <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F0-ram.htm>.
- [20] **Kadlec, Karel.** Snímače polohy hladiny. *AUTOMA*. [Online] AUTOMA, 5 2005. http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT_INaRP/A05_0607_Kadlec.pdf.
- [21] **Vlach, Libor.** MODERNÍ MĚŘENÍ A REGULACE ENERGETICKÝCH VELIČIN. [Online] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 5 2003. <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmr/v/>.
- [22] **Havlíček, Tomáš.** Automatizace. *Elektronika a elektrotechnika*. [Online] <http://skriptum.wz.cz/autom/poloha.htm>.
- [23] **Lubomír, Smutný.** Prostředky automatického řízení 1. *e-automatizace*. [Online] Katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava. http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici_systemy_akcni_cleny/.
- [24] **Pavel, Smutný.** Měření tlaku. *e-automatizace.cz*. [Online] http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/ramce_tlak.htm.
- [25] **Martin Adámek, aj.** MODERNIZACE VÝUKY SENZOROVÉ TECHNIKY. [Online] Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT Brno. <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/Menufram.htm>.
- [26] **Martínek Roman.** Programová podpora výukových modulů z oblasti měření a sensorové techniky. *e-automatizace*. [Online] VŠB TU Ostrava. <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/senzory/>.