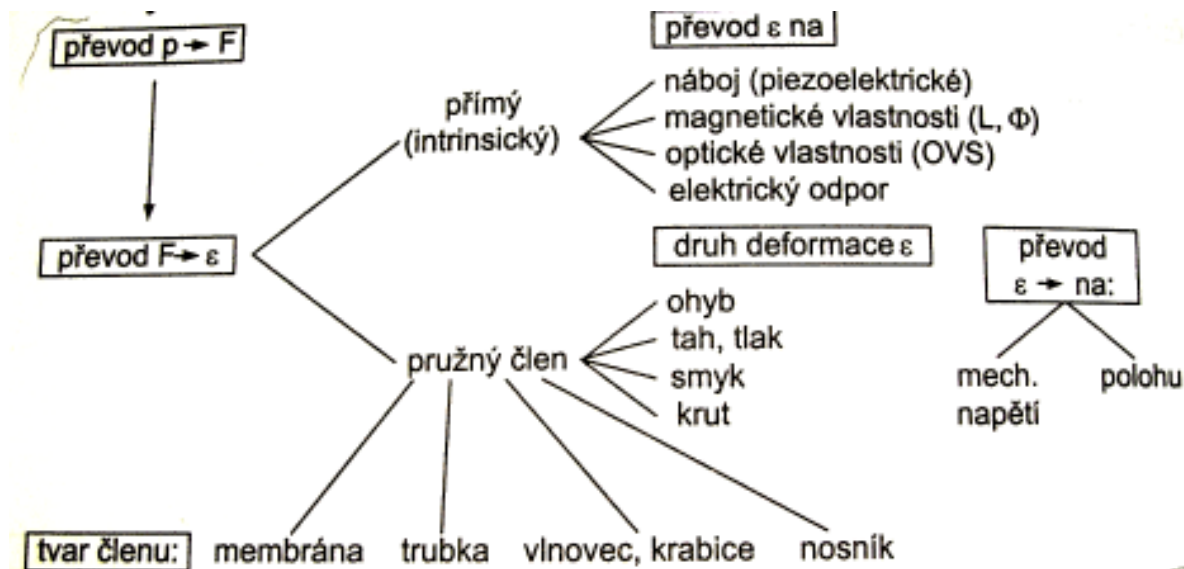


Senzory tlaku

Základní principy senzorů tlaku

Jelikož je vždy možné vystavit působení tlaku známou plochu, lze převést měření tlaku na měření síly. Proto jsou principy senzorů tlaku a sil podobné. Konstrukčním provedením se však mohou oba typy senzorů zásadně odlišovat.

Dělení senzorů tlaku:



Deformační senzory tlaku membránové

Neužívanějším pružným členem jsou *membrány* nejrůznějšího provedení. Nejvhodnější je, když membrána a těleso jsou vyrobeny z jednoho kusu. Ideálním tenzometrem pro membrány je fóliová *rozeta* se dvěma senzory na okraji pro radiální a dvěma uprostřed pro tangenciální složku napětí



Obr. 4.2 Fóliová rozeta pro membránové senzory tlaku

Směrové účinky *polovodičových tenzometrů*, často užívaných v tlakových senzorech pro hromadné aplikace, jsou dány tvarem polovodičových tenzometrů vytvořených *difúzí* na Si

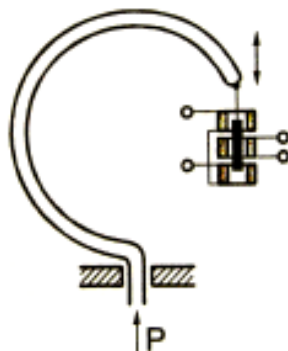
Senzory tlaku

membráně. *Monolitické integrované senzory tlaku* s Si membránou jsou vyráběny obdobně jako integrované obvody. Mají malé rozměry a dobré dynamické vlastnosti.

Ponorné senzory tlaku, určené k měření úrovně kapalin v nádržích nebo vodní hladiny, vyžadují oddělovací membránu a tlaku odolávající kryt. Pro přesnější aplikace je nutné spojení s tlakem nad hladinou hadicí uloženou v hermeticky uzavřeném přívodním kabelu. Pro kompenzaci teplotní chyby celého měřicího řetězce s polovodičovými tenzometry, se užívá teplotních korekcí nebo *automatické korekce* připojováním známého tlaku v jistých intervalech ve spolupráci s vyhodnocovacími postupy *inteligentních senzorů*.

Deformační senzory tlaku trubcové

Pružný člen je navržen tak, aby byla snadné měřit jeho maximální deformaci senzory polohy – př. Bourdonova trubice.



Obr. 4.4 Senzor tlaku s Bourdonovou trubicí

Tento patrně nejstarší pružný člen a existující v různých formách (šroubovice, spirála, zkroucená trubka) „zesiluje“ účinky deformace a je stále hojně užíván.

Hlavní problémem při výrobě je zajištění těsnosti a stabilizace parametrů teplotními a tlakovými cykly. Dále jsou Bourdonovy trubice spirálové nebo šroubovicové citlivé na otřesy a vibrace, útlumu vibrací se dosahuje umístěním trubice do viskózní kapaliny, např. silikonového oleje nebo glycerinu.

Kapacitní senzory tlaku

Typickým pružným členem těchto senzorů je předpjatá kovová membrána, tvořící současně jednu (uzemněnou) elektrodu senzoru. Druhá elektroda je upevněna na izolovaném držáku proti membráně, takže průhyb membrány představuje změnu vzduchové mezery.

Teplotní dilatace a nelineární závislost kapacity na tlaku, modifikovaná ještě tím, že membrána nekoná pístový pohyb, omezují použitelnost kapacitních senzorů tohoto typu. Proto převážná většina senzorů tlaku s kapacitním snímáním polohy membrány je řešena jako

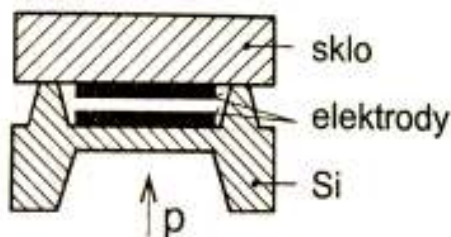
Senzory tlaku

diferenční. Diferenční kapacitní senzor ve spojení s obvodem měřícím rozdíl kapacity, jak známo, potlačuje vlivy souhlasně působící na obě části, např. právě teplotní dilatace.

Diferenční kapacitní senzor je také vhodný pro *senzory tlakové difference*, často užívané zejména při měření rychlosti průtoku metodou škrticích orgánů, při měření výšky hladiny, hustoty, viskozity aj. společným konstrukčním rysem všech senzorů tlakové difference a měřících obvodů je veliká *rozlišovací schopnost a ochrana pružného členu senzoru před přetížením*.

Nejznámější je provedení diferenčního senzoru tlak se střední elektrodou – membránou – a pevnými elektrodami vytvořenými jako vrstva na nosiči z izolantu (sklo), tvarovaném tak, aby změna kapacity byla co největší a současně tvořil mechanickou zádržku při přetížení.

Kombinace výhod mikromechanicky vyrobené křemíkové membrány a kapacitního senzoru vyhodnocení výchylky přináší senzory dle



Obr. 4.6 Mikromechanický senzor tlaku

Kapacitní snímání polohy Si membrány umožňuje dosáhnout vyšší přesnosti a menší teplotní závislosti než u častěji používaných senzorů s difúzními piezorezistory.

Kapacitní senzory tlakového rozdílu jsou vhodné pro *zpětnovazební* konfiguraci s vrácením membrány do nulové polohy silovými účinky elektrostatické přitažlivé síly. S využitím měřících obvodů potlačujících vliv přívodů.

Senzory průtoku a hladiny

Senzory průtoku

Senzory průtoku tekutin (tj. kapalin i plynů) určují objemový průtok Q_v nebo hmotnostní průtok Q_m tekutiny proteklé zvoleným průřezem za jednotku času. Ze známé plochy průřezu S a střední rychlosti proudění v lze určit Q_v a Q_m z definičních vztahů

$$Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \bar{v} \cdot S [m^3 s^{-1}] \quad Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \cdot \bar{v} \cdot S [\text{kg/s}]$$

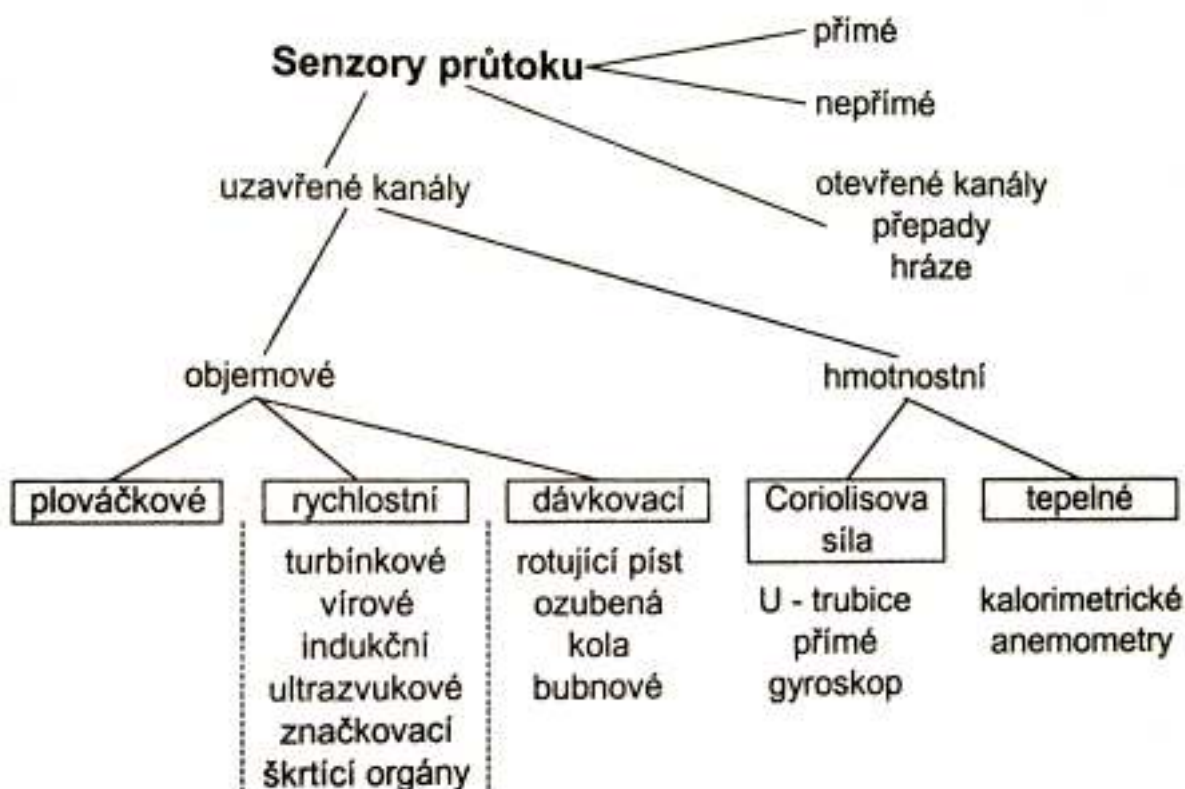
Senzory tlaku

Nepřímé určení Q_m z Q_v předpokládá znalost a stálost hustoty tekutiny ρ a v obou případech se uplatní závislost střední rychlosti proudění na typu proudění. *Laminární* proudění nastává pro Reynoldsova čísla $Re < 2000$ a je charakteristické *parabolickým* rychlostním profilem. Většina aplikací procuje s *turbulentním* prouděním, vyskytujícím se pro $Re > 3000$ u větších rychlostí a malých viskozit. proudění se rozpadá na víry a rychlostní profil je blízký *rovnoměrnému*.

Přímé měření průtoku je možné dávkovacími senzory, rozdělujícími tekutinu na přesně definované díly a transportujícími je ve směru proudění. Většina měření je *nepřímých* a vychází z rychlosti nebo změny kinetické energie

Průtoky v *otevřených* kanálech vyžadují specifické měřicí metody, jelikož na rozdíl od potrubí má tekutina proměnný průřez S . Používá se kalibrovaných měřících kanálů, u kterých je známá závislost mezi hladinou a průtokem. Dalším způsobem je měření rychlosti a hladiny v místě se známým profilem.

Dělení senzorů



Obr. 5.1 Přehled senzorů průtoku

Plováčkové senzory průtoku

Rotametry (průtokoměry s proměnným průřezem) používají plovák pohybující se v kuželovité nádobě jako indikátor rovnováhy sil. Tekutina proudící zespodu nadnáší plovák

Senzory tlaku

(drážky na obvodu vyvolávají stabilizační rotaci) a mění se štěrbinu mezi nádobkou a plováčkem. Tím klesá tlakový spád na plováčku. K usnadnění jeho polohy dojde, když síly působící směrem dolů (tíhová síla zmenšená o vztlak) jsou v rovnováze se silou působící nahoru (účinek tlakové diference mezi spodní a vrchní plochou plováčku). Poloha plováčku je odečítána na stupnici nebo může být snímána např. bezdotykovým senzorem polohy.

Rychlostní senzory průtoku

Ty se dělí na:

- **Turbínové a lopatkové senzory průtoku**
- **Vírové senzory průtoku**
- **Ultrazvukové senzory průtoku**
- **Senzory na principu Dopplerova jevu**
- **Značkovací senzory průtoku**
- **Indukční senzory průtoku**
- **Senzory průtoku se škrťícími orgány**
- **Pitotova trubice**
- **Senzory s převodem průtoku na deformaci**

Pro jejich velký počet podrobně zmíním jen několik z nich.

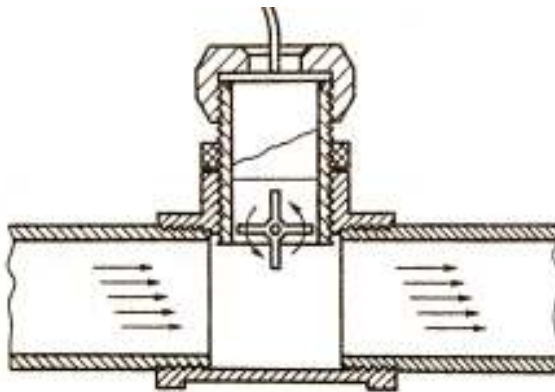
Turbínové a lopatkové senzory průtoku

Protékající tekutina uvádí do rotačního pohybu soustavu vhodně uspořádaných ploch – optimalizovaných lopatek turbíny nebo plochých lopatek vodního kola.

Turbínové senzory při minimalizaci ztrát třením mají široký rozsah lineární závislosti úhlové rychlosti rotoru ω_r na rychlosti proudění v . Úhlová rychlost se snímá počítáním průchodů lopatek pod senzorem polohy. Nejčastěji se užívá magnetických sensorů, někdy též optických sensorů.

Jedním z hlavních problémů těchto sensorů je opotřebení ložisek. Používá se proto i „bezložiskových“ konstrukcí, v nichž je tvarem statoru proud tekutiny formován tak, že „rotor“-kulička-obíhá po kruhové dráze. Dalšími typy turbínových průtokoměrů jsou *ponorné senzory* pro velké průměry potrubí, turbínky se dvěma rotory apod.

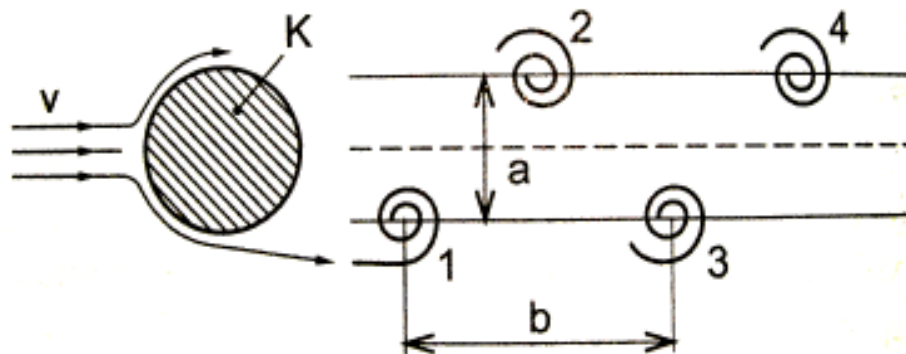
Senzory s lopatkovými koly mají na rozdíl od turbínek lopatky orientovány kolmo na směr proudění.



Obr. 5.2 Lopatkový průtokoměr

Vírové senzory průtoku

Vhodně deformovaný objekt v cestě proudící tekutiny může vyvolat její oscilační pohyb, jehož parametry jsou úměrné objemovému průtoku. Pro měření průtoku se využívá svou typů oscilací tekutiny: *nucené a přirozené oscilace*. Nucenými oscilacemi se rozumí generace vírů těsně za žebrovitou překážkou na straně vtoku a jejich spirálový pohyb ve směru proudění. Většina vírových senzorů pracuje však s přirozenými oscilacemi, kdy víry jsou oddělovány za překážkou (střídavě na horní a dolní straně), jelikož proudící tekutina není schopna sledovat tvar překážky.

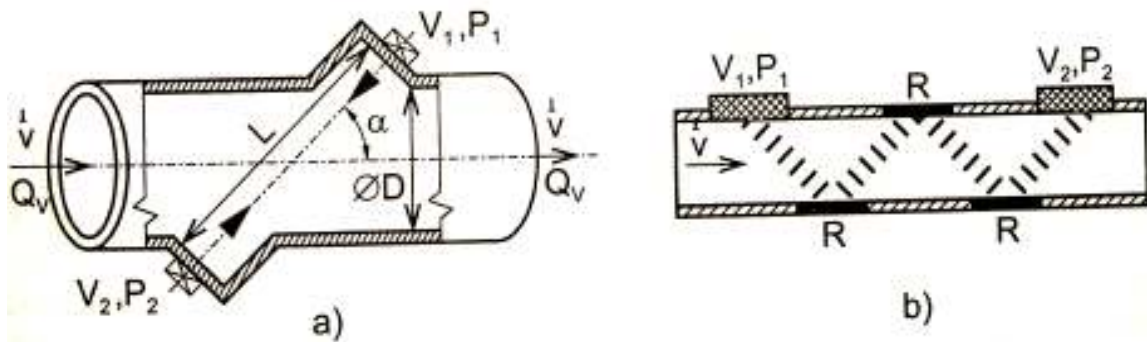


Obr. 5.3 Princip vírových senzorů

Ultrazvukové senzory průtoku

Jsou založeny na skládání vektoru rychlosti tekutiny v a rychlosti šíření ultrazvukové vlny c_0 . Ultrazvuková vlna se od měniče (V_2, P_2) k měniči (V_1, P_1) bude šířit rychlostí $c_0 + v \cdot \cos \alpha$ a změnou rychlostí $c_0 - v \cdot \cos \alpha$, když postupuje proti směru v k měniči (V_2, P_2) .

Senzory tlaku



Obr. 5.4 Ultrazvukové senzory průtoku: a) princip, b) prodloužení dráhy reflektory

Dobu šíření od (V_2, P_2) k (V_1, P_1) , tj. Δt_1 a od (V_1, P_1) k (V_2, P_2) , tj. Δt_2 , určíme z rovnic

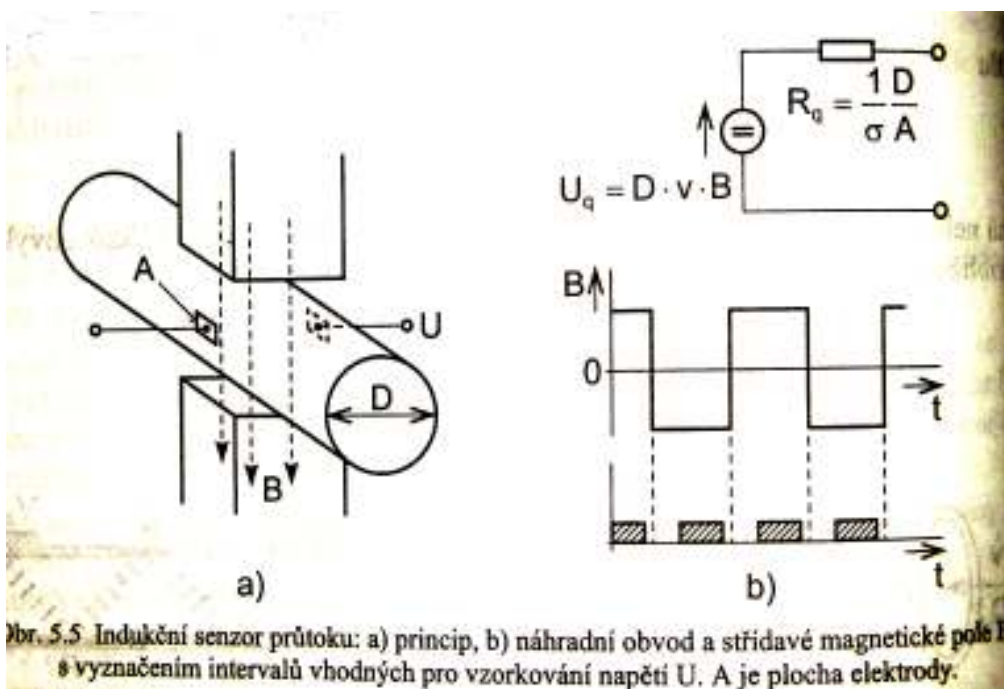
$$\Delta t_1 = \frac{L}{c_0 + v \cos \alpha}; \quad \Delta t_2 = \frac{L}{c_0 - v \cos \alpha}$$

Výhodou uspořádání na **obr. 5.4 b** je prodloužení dráhy L reflektory R . Měří se opět doby Δt_1 a Δt_2 a obdobným vyhodnocením se dosáhne parametrů vyhovujících i nárokům pro měření odběru plynu v domácnosti.

Indukční senzory průtoku

Tyto senzory jsou určeny pro vodivé, tj. ionty obsahující kapaliny. Ion s nábojem q pohybující se rychlostí v v magnetickém poli B (**OBR 5.5**) je vychylován silou $F_m = qvB$ k elektrodám na stěnách potrubí. Náboje na elektrodách vytvoří elektrické pole o intenzitě E působící na ionty silou $F_e = qE$. Obě síly směřují proti sobě a pro rovnováhu platí

$$qvB = qE = q \frac{U}{D}; \quad U = DBv$$



Obr. 5.5 Indukční senzor průtoku: a) princip, b) náhradní obvod a střídavé magnetické pole B s vyznačením intervalů vhodných pro vzorkování napětí U . A je plocha elektrody.

Na elektrodách vzniká napětí U (naprázdno).

Použití stejnosměrného magnetického pole je nevhodné, jelikož na elektrodách vzniká rušivé elektrochemické napětí. Používá se proto střídavého pole (nejčastěji obdélníkového) vytvářeného cívkami.

Hlavním problémem indukčních průtokoměrů je tvorba usazenin na elektrodách. Používá se samočisticích elektrod, ze kterých se po ohřátí nebo přiložení napětí usazeniny sloupnou. Indukční průtokoměry se vyrábějí i v bezkontaktním provedení, kdy měřicí elektrody jsou od kapaliny oddělené izolací a napětí se snímá přes dvojnásobný kondenzátor elektroda-měřená kapalina. V tomto případě se používá sinusového průběhu magnetického pole, dosažitelné přesnosti jsou však menší.

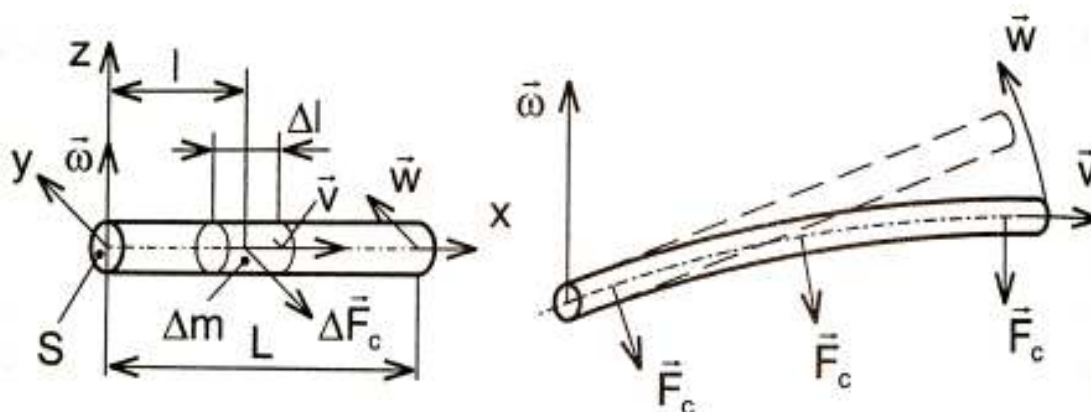
Senzory hmotnostního průtoku s Coriolisovou silou

Proudí-li tekutina rychlostí v v potrubí rotujícím úhlovou rychlostí ω , pak na každý element tekutiny o hmotnosti Δm (**OBR 5.8**) působí Coriolisova síla

$$\Delta \vec{F}_c = \Delta m \cdot 2(\vec{v} \times \vec{\omega})$$

se směrem kolmým na rovinu vektorů v, ω . Vektory v, ω jsou navzájem kolmé, takže platí

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}; \quad \Delta \vec{F}_c = \frac{\Delta m}{\Delta t} 2\omega \Delta l = 2Q_m \omega \Delta l$$



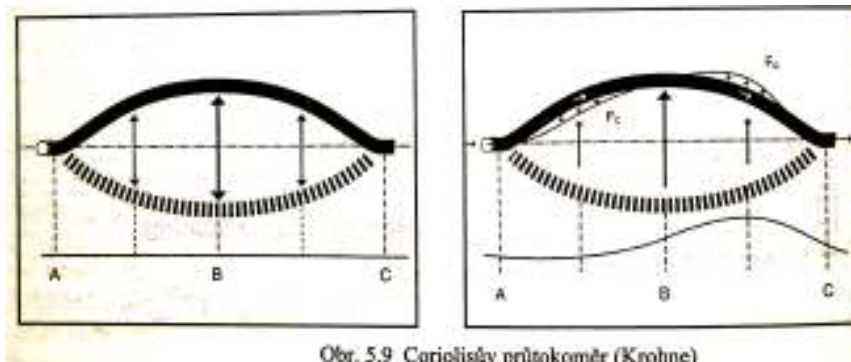
Obr. 5.8 Princip senzoru hmotnostního průtoku s Coriolisovou silou (w je obvodová rychlost odpovídající úhlové rychlosti ω).

Coriolisova síla působící na každý element tekutiny je úměrná *hmotnostnímu* průtoku Q_m , jde tedy o *přímý* převod Q_m na sílu ΔF_c .

Při praktickém využití Coriolisovy síly pro konstrukci senzorů s přímou trubicí je nahrazen otáčivý pohyb kmitáním kolem osy ω . Trubka je ukotvena na obou koncích a rozkmitávána elektromagneticky na rezonančním kmitočtu (**OBR. 5.9**) Optoelektronickými senzory polohy

Senzory tlaku

se měří průběh kmitů v jisté vzdálenosti od vetknutí. Při nulové rychlosti proudění jsou výstupní signály obou senzorů stejné. Coriolisova síla vyvolá při proudění zvětšení amplitudy kmitů v měřicím místě vzdálenějším ve směru proudění. Z nesymetrie výstupních signálů senzorů polohy lze pak určit Q_m .



Obr. 5.9 Coriolisův průtokoměr (Krohne)

Senzory hladiny

Dělí se na:



Obr. 5.12 Rozdělení senzorů hladiny

Senzory pro nespojité měření

Plováčkové senzory převádějí pohyb plováku udržujícího se na hladině vztakovou silou zpravidla mimo nádobu, kde je umístěn spojitý nebo dvouhodnotový senzor polohy.

Vibrační senzory indikují dotek s hladinou vysazením kmitů elektromechanického oscilátoru s vidlicovitým tvarem rezonátoru. Používají se zejména pro sypké látky.

Vodivostní senzory pro bodové měření jsou vhodné pro vodivé kapaliny a detekují zvýšení vodivosti při ponoření elektrod senzoru pod hladinu. Jako druhé elektrody lze využít stěny vodivé nádoby. Je nutno dodržet zásady platné pro senzory elektrické vodivosti, tj. měření střídavým proudem a respektování kapacitní složky impedance kapaliny.

Senzory pro spojité měření

Senzory tlaku

Senzory síly určená *hmotnost* nádoby s kapalinou je vstupním údajem pro výpočet hladiny s respektováním tvaru nádoby a měrné hustoty náplně.

Vztlakový senzor

Senzor síly snímá výslednou sílu F_z , působící na válec o průřezu S , výšce l a hmotnosti m , ponořený do kapaliny v délce h . Výsledná síla je součtem tíhové a vztlakové

$$F_z = mg - \rho_2 gSh - \rho_1 gS(l - h) = mg - hgS(\rho_2 - \rho_1) - \rho_1 gSl$$

Rozšířené jsou *senzory tlakové*, snímající rozdíl hydrostatického tlaku p_2 a tlaku nad hladinou p_1 . Tyto senzory jsou používány např. pro měření hladiny vodních toků.

Radarové hladinometry jsou velmi přesné. Hladinoměry pracují v kontinuálním režimu s lineární časovou změnou kmitočtu. Směšováním vyslané a odražené vlny pak vznikne signál, jehož frekvence je funkcí časového zpoždění a tedy měřené vzdálenosti. Stejný princip se využívá v parkovacích radarech pro automobily.

Senzory tepelných veličin

Základní jednotkou termodynamické teploty je Kelvin [K]. Jednotkou teploty je také stupeň Celsia [°C] definovaný vztahem $\vartheta = T - T_0$ kde $T_0=273,15\text{K}$.

Rozdělení senzorů teploty:

- senzory pro dotykové měření teploty
 - a) elektrické (odporové kovové, odporové polovodičové, polovodičové s PN přechodem, termoelektrické)
 - b) dilatační (kapalinové, plynové, bimetalové)
 - c) speciální
- senzory pro bezdotykové měření teploty
 - a) tepelné
 - b) kvantové
 - c) akustické

Odporové kovové senzory teploty

Principem je teplotní závislost odporu kovu na teplotě. Ve většině případů odpor kovů s teplotou roste.

V rozsahu teplot 0-100 °C lze použít vztah: $R = R_0(1 + \alpha T)$ kde

α [K⁻¹] teplotní součinitel odporu

R_0 odpor teploměru při teplotě 0°C

Senzory tlaku

Pro větší teplotní rozsahy platí nelineární rovnice v závislosti na použitém kovu. Nejrozšířenějšími odporovými kovovými teploměry jsou teploměry platinové. Dále se používá nikl a měď.

Platinový odporový teploměr

Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí s vysokou teplotou tání.

Měřicí odpor se vyrábí:

- a) drátkovou technologií
- b) tenkovrstvou technologií
- c) tlustovrstvou technologií

Drátkový měřicí odpor je tvořen spirálovitě stočeným platinovým drátkem zataveným do keramiky, popřípadě do skla. Nebo platinová vrstva nanesená na keramické podložce.

Niklový odporový teploměr

Vyráběny většinou tenkovrstvou technologií na keramické podložce z korundu.

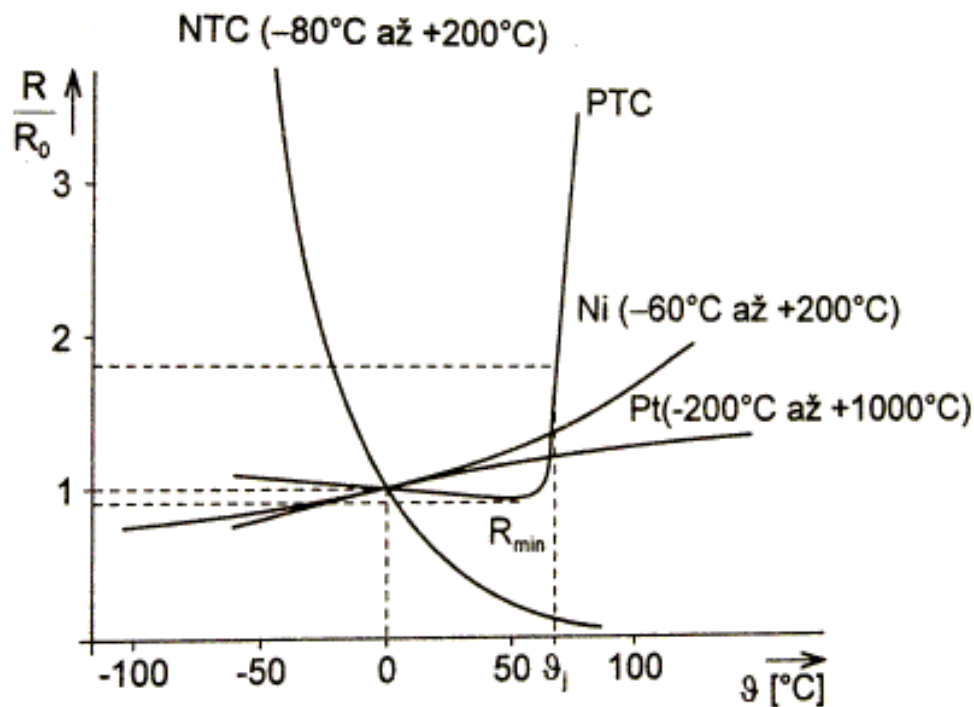
Výhodou je velká citlivost, rychlá časová odezva a malé rozměry.

Termistory

Dělí se dle struktury na amorfní a polykrystalické. Teplotní rozsah je dán použitým materiálem.

NTC termistory

Mají záporný teplotní součinitel odporu. Vyrábějí se práškovou technologií ze směsi oxidu kovů. Teplotní závislost odporu NTC a PTC termistorů v porovnání s kovovými odporovými senzory:



Obr. 6.5 Teplotní závislosti odporových senzorů teploty

Závislost odporu NTC termistoru na teplotě je dána: $R_1 = R_r e^{B(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_r})}$ kde

R_1 je odpor termistoru při T_1

R_r je odpor termistoru při referenční teplotě T_r (obvykle 25°C)

B [K] teplotní konstanta (závisí na materiálu)

V porovnání s platinovými senzory jsou NTC termistory méně stabilní. Výhodou jsou velmi malé rozměry a vyšší hodnota teplotního součinitele. Základní nevýhodou je nelinearita.

PTC termistory

Jsou termistory s kladným teplotním součinitelem odporu. Odpor pozistoru se stoupající teplotou nejprve mírně klesá. Nad *Curieovou teplotou* θ_i (dle chemického složení od 60 do 180°C) se u pozistoru projevuje exponenciální nárůst rezistivity materiálu v závislosti na teplotě dle obr. 6.5. Po nárůstu o cca 3 řády hodnota odporu pozistoru opět mírně klesá.

Měřicí obvody pro odporové senzory teploty

Požadavky:

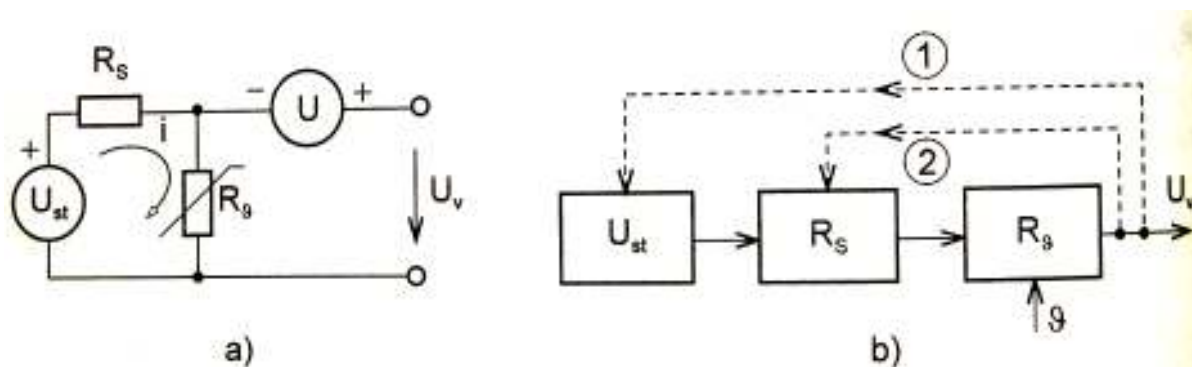
Senzory tlaku

- minimalizace vlivu měřicího proudu (průchodem měřicího proudu dochází k chybě měření vlivem oteplení senzoru)
- minimalizace vlivu odporu přívodů k senzoru (čtyřvodičové zapojení- obr 6.10)
- analogová nebo číslicová linearizace

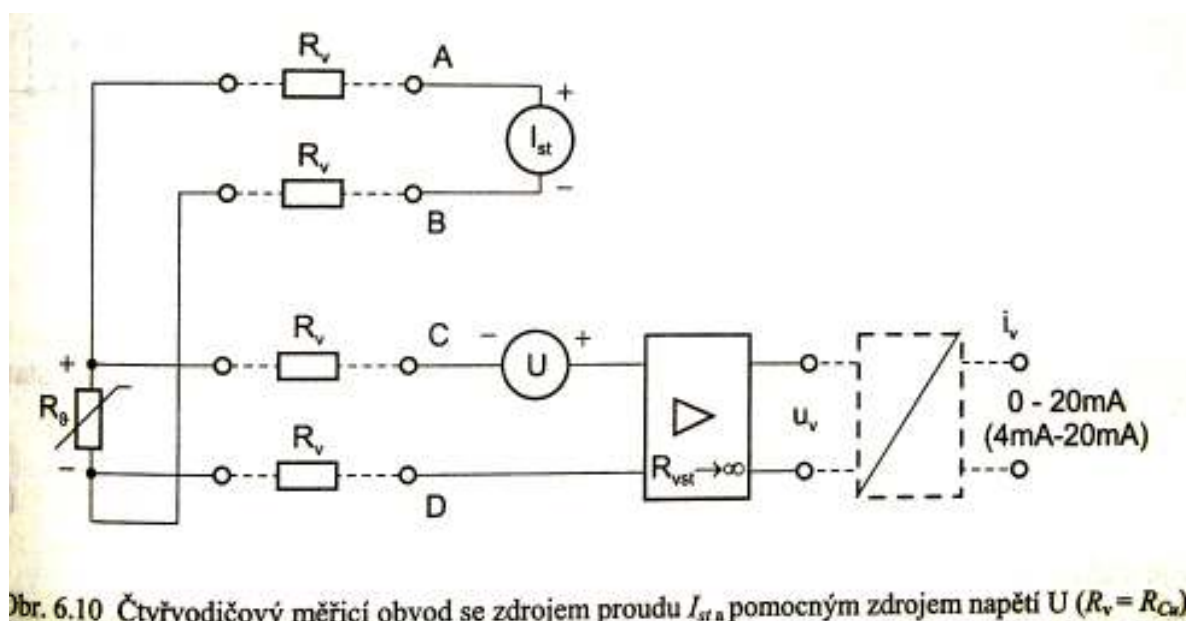
Linearizace charakteristiky zpětnovazebním zapojením:

Princip spočívá v regulaci měřicího proudu nebo napájecího napětí dle obr 6.12.

Vzhledem ke konkávní charakteristice měřicího odporu musí proud dle obr 6.12 narůstat s teplotou tak, aby výstupní napětí bylo lineárně závislé na teplotě.



Obr. 6.12 Linearizační převodník s platinovým senzorem teploty

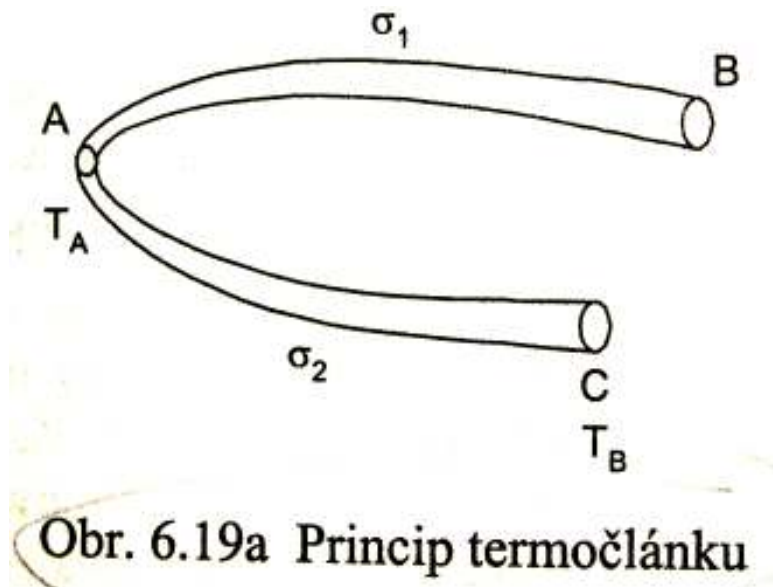


Obr. 6.10 Čtyřvodičový měřicí obvod se zdrojem proudu I_{st} a pomocným zdrojem napětí U ($R_v = R_{Ck}$)

Termoelektrické senzory teploty

Termoelektrické senzory jsou založeny na Seebeckovu jevu, tj. na jevu převodu tepelné energie na elektrickou. V každém vodiči, jehož teplota není konstantní, vzniká termoelektrické napětí. Napětí $U_{A,B}$ mezi konci vodiče A,B je závislé pouze na rozdílu teploty těchto konců.

Toto termoelektrické napětí skutečně existuje, ale není přímo měřitelné. Spojíme-li ale dva dráty z materiálu s rozdílnými Seebeckovými koeficienty σ_1, σ_2 bude mezi jejich rozpojenými konci B, C napětí. Jestliže jsme schopni konce B a C držet na shodné známé teplotě T_B (srovnávací nebo referenční teplota), můžeme pak tuto dvojici drátů použít k měření teploty spoje A (měřená teplota) a nazýváme ji termočlánkem.



V technické praxi se místo relativního Seebeckova koeficientu $\sigma_{1,2}$ používá pojem termoelektrický koeficient α . Pro malý rozdíl teplot spojů je možno termoelektrický koeficient považovat za konstantní a platí známá rovnice pro termočlánek:

$$U = \alpha_{1,2}(\vartheta_M - \vartheta_S)$$

kde ϑ_M je teplota měřicího spoje

ϑ_S je teplota srovnávacího spoje

Termoelektrický koeficient $\alpha_{1,2}$ je u kovových termočlánků řádově jednotky až desítky mikrovoltů na stupeň, u polovodičových termočlánků dosahuje hodnot vyšších než 100 mV/°C.

Měřicí obvody pro termoelektrické senzory

Na měřicí obvody jsou kladeny tyto požadavky:

- minimalizace vlivu kolísání srovnávacích teplot
- minimalizace vlivu odporu přívodů k senzoru
- potlačení rušivých signálů

Vliv kolísání srovnávacích teplot lze vyloučit:

- umístěním srovnávacích spojů do termostatu
- kompensačními obvody (analogově)

Senzory tlaku

- číslíkovou korekcí – izotermická svorkovnice

Senzory pro bezdotykové měření teplot

Základy pyrometrie

Bezdotykové měření teplot je měření povrchové teploty těles na základě elektromagnetického záření mezi tělesem a senzorem záření a to od 0,4 μm do 25 μm vlnové délky.

Výhody bezdotykového měření teplot:

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

Nevýhody:

- chyba způsobená nepřesným stanovením emisivity měřeného tělesa
- chyba způsobená prostupností prostředí
- chyba způsobená odraženým zářením z okolního prostředí
- závislost na úhlu k měřeného povrchu

Senzory infračerveného záření

Dle interakce fotonů s materiálem senzoru členíme senzory na tepelné a kvantové

Tepelné senzory infračerveného záření

U tepelných senzorů dochází při absorpci fotonů k oteplení citlivé části senzoru a pohlcená energie se vyhodnocuje nepřímo přes senzory teploty. Nejčastěji se používají termočláňkové baterie, bolometry a pyroelektrické senzory

Kvantové senzory infračerveného záření

Kvantové senzory využívají fyzikálních jevů vznikajících při přímé interakci dopadajících fotonů na strukturu senzoru. Pro bezdotykové měření teploty se fotodiody používají obvykle ve fotonapět'ovém režimu.

Pyrometrické metody

Úhrnné (širokopásmové) radiační pyrometry

Jsou přístroje, které vyhodnocují teplotu dle Stefan-Boltzmanova zákona, tj. teoreticky pracují v celém spektru vlnových délek od $\lambda = 0$ do $\lambda = \infty$. Pro úhrnné pyrometry lze využívat pouze tepelné senzory, neboť kvantové senzory jsou spektrálně omezené.

Tepelné záření se zaostřuje na senzor soustavou čoček.

Senzory tlaku

Pyrometry jsou výrobci cejchovány prostřednictvím černého tělesa (reálné černé těleso má hodnotu emisivity $1 > \varepsilon > 0,99$). Zavedme pojem *černá teplota* T_0 . je to teplota černého zářiče, při které tento zářič vyzařuje se stejnou intenzitou jako měřený předmět o skutečné teplotě T_s . Černou teplotu reálného zářiče tedy ukáže pyrometr, jehož emisivita je nastavena na $\varepsilon=1$ při měření reálného tělesa s libovolnou hodnotou emisivity. Platí:

$$T_s = T_0 \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon \tau_p}}$$

kde τ_p je prostupnost prostředí, ε emisivita měřeného tělesa

Jednopásmové pyrometry

Jednopásmové pyrometry měří teplotu prostřednictvím záření v úzkém pásmu vlnových délek.

Dvoupásmové (poměrové) pyrometry

Poměrové pyrometry vyhodnocují teplotu objektu na základě poměru dvou září při dvou vlnových délkách.

Senzory ionizujícího záření

Rozdělení senzorů

Senzory lze dělit dle interakce ionizujícího záření s látkou na dvě základní skupiny:

Senzory pracující na fyzikálním principu, u nichž dochází při interakci záření s látkou k fyzikálním změnám vlastností

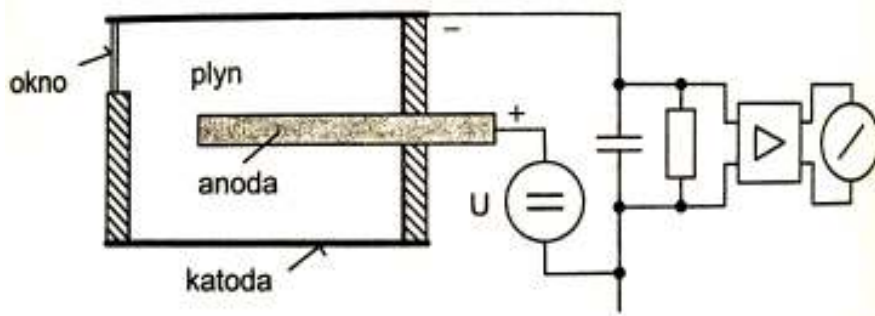
Senzory pracující na chemickém principu, u nichž dochází k chemickým změnám v látce. Nejčastěji používané senzory, pracují na fyzikálním principu s transformací na elektrický signál.

Plynové detektory

Tyto detektory jsou založeny na ionizaci plynu po dopadu ionizujícího záření. Jediná dopadlá částice může vytvořit několik iontových párů, které je možno separovat v elektrostatickém poli.

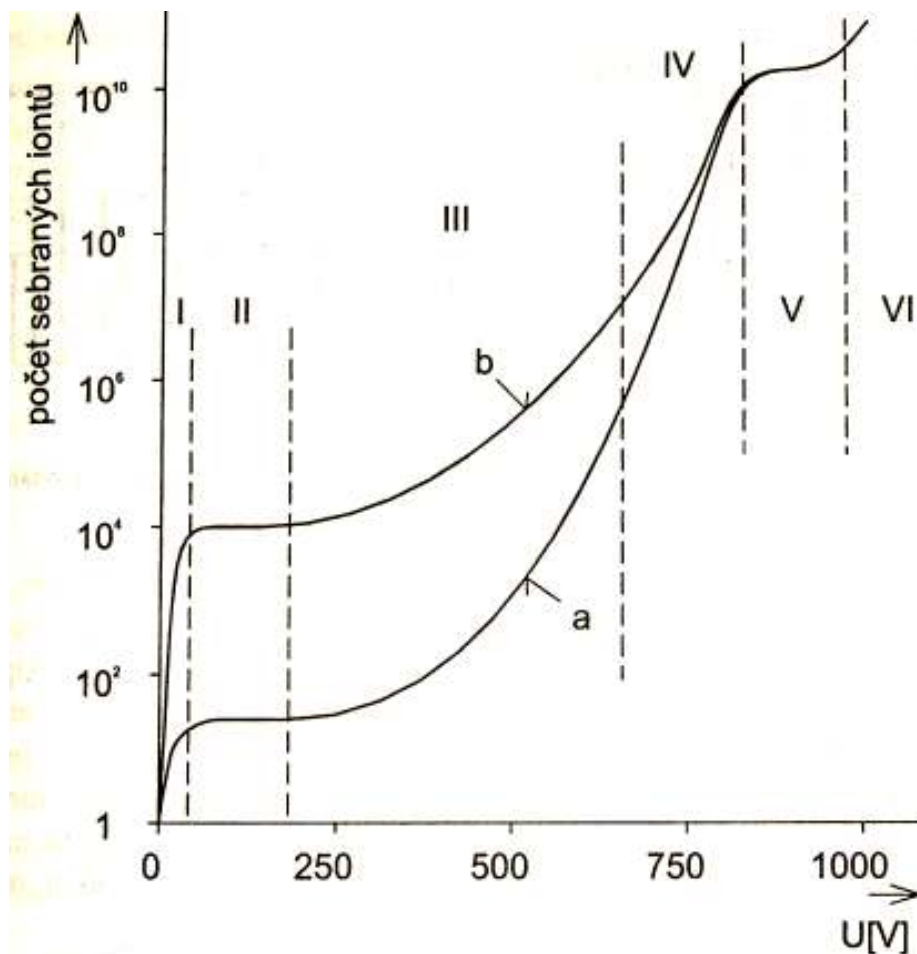
Základem plynového detektoru je systém dvou navzájem izolovaných elektrod umístěných obvykle ve válcovém plášti (**OBR. 7.1**), který může nahradit jednu z elektrod.

Senzory tlaku



Obr. 7.1 Principiální schéma plynového detektoru

Vnitřní prsto je naplněn plynem, nebo vzduchem. Vlivem ionizujícího záření dochází k ionizaci plynu mezi elektrodami a nevodivý plyn se stává vodivým. Připojí-li se k elektrodám stejnosměrné napětí, v elektrickém poli se ionty pohybují k elektrodám a vzniklý elektrický proud se rovná elektrickému náboji odevzdanému ionty za jednu sekundu. Závislost počtu iontů dopadajících na elektrody po příchodu *jediné* měřené částice, na hodnotě elektrického napětí je na



Obr. 7.2 Obecný průběh charakteristiky plynového detektoru (křivky a, b odpovídají dvěma dopadlým částicím s různou energií, např. křivka a platí pro β částice, křivka b pro α částice)

Senzory tlaku

Dle intenzity elektrického pole mezi elektrodami se plynové detektory dělí na

- a) Ionizační komory
- b) Proporcionální detektory
- c) Geiger-Müllerovy detektory.

Scintilační detektory (scintilátory)

Scintilátory transformují absorbovanou energii ionizujícího záření na energii vyzařených fotonů ve viditelné nebo ultrafialové oblasti elektromagnetického vlnění. Scintilátor je obvykle spojen s fotonásobičem (případně s fotodiodou), který emitované fotony převede na elektrický impulsní signál. Fyzikální proces ve scintilátoru se označuje jako *luminiscence*.

Polovodičové detektory

Účinkem ionizujícího záření částic nebo fotonového záření dochází v plodiči ke generaci párů elektron-díra a tím i k získání informace o energetickém spektru záření. Výhodou polovodičových detektorů je malá šíře zakázaného pásu, takže střední energie potřebná pro vznik jednoho páru elektron.díra je malá. Další předností polovodičových detektorů je malý dosah dopadajících nebo uvolněných elektronů v závislosti na jejich energii, takže k úplnému zabrzdění detekovaných částic postačí detektory o značně menších rozměrech. Nevýhodou polovodičových detektorů je závislost jejich parametrů na teplotě.

Chemické senzory a biosenzory

Principy chemických senzorů dle vzájemného působení senzoru a měřené látky:

Fyzikální princip je princip, při kterém je vzájemné působení molekul měřené látky a senzoru čistě kinetické, tj. nedochází k chemickým změnám analyzované látky. Fyzikální princip využívá celé řady fyzikálních veličin (hustoty, tepelné vodivosti, indexu lomu, rychlosti zvuku aj.), které mají funkční závislost na koncentraci měřené složky. Senzory založené na fyzikálním principu jsou velmi rozšířené, ale jejich základními nevýhodami jsou velmi špatná selektivita a vlivy okolního prostředí. Z těchto důvodů jsou tyto senzory použitelné jen pro binární až terciální roztoky. Kladem těchto senzorů je malá časová konstanta.

Fyzikálně-chemický princip je princip, při kterém dochází ke vzájemnému působení látky a povrchu čidla senzoru (interakce a výměny elektronů v molekulách obou materiálů) vedoucí k chemické proměně molekul. V průběhu uvedené chemické reakce se měří určitá fyzikální veličina. Vhodnou chemickou reakcí lze ovlivňovat selektivitu senzoru na sledovanou složku. Výhodou senzorů řešených na fyzikálně-chemickém principu je vyhovující selektivita, nevýhodou je delší dopravní zpoždění a časová konstanta.

Senzory tlaku

Optický a optoelektronický princip je založen na vzájemném působení mezi absorbujícími elektromagnetickém vlnění a molekulami měřené látky. K vybuzení vnitřních stavů elektronového systému dochází v ultrafialovém, viditelném infračerveném a mikrovlnném spektru. U uvedeného principu se docílí největší selektivity, neboť absorpční spektra jsou pro určité složky látky jednoznačná.

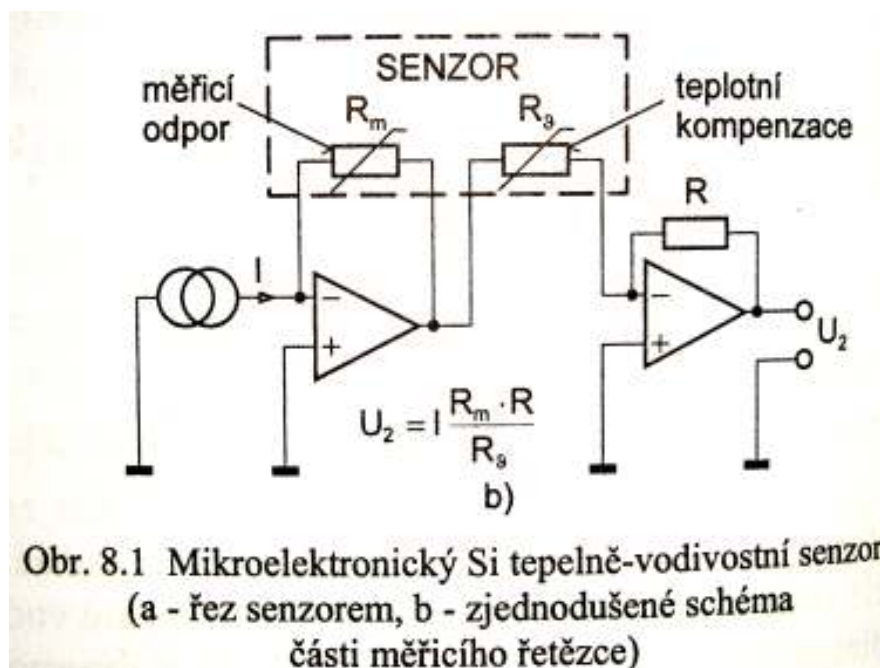
Senzory na fyzikálním principu

Patří sem:

- Rezonanční piezoelektrické senzory
- Tepelně vodivostní senzory
- Paramagnetické senzory kyslíku
- Senzory konduktivity
- Iontové spektrometry

Tepelně vodivostní senzory

Tepelně vodivostní senzory se používají zejména pro analýzu některých binárních směsí plynů. Zdroj tepla a současně měřící odpor je tvořen tenkovrstvým niklovým odporovým senzorem umístěným na tenkostěnné SiNO₂ membráně s extrémně malou tepelnou kapacitou. Analyzovaný plyn vzniká difuzí štěrbinou mezi membránou a Si krytem. Na stejném Si substrátu, ale ne na membráně, je umístěn další tenkovrstvý Ni senzor pro měření teploty. Prostřednictvím tohoto druhého teplotního senzoru je dle **obr. 8.1b** kompenzováno kolísání teploty substrátu a tím i teploty plynu.



Senzory tlaku

Vzhledem k malé teplotní časové konstantě lze teplotu modulovat a měřit tepelnou vodivost sekvenčně pro dvě různé teploty. S využitím modulace teploty lze pak analyzovat ternární plyny.

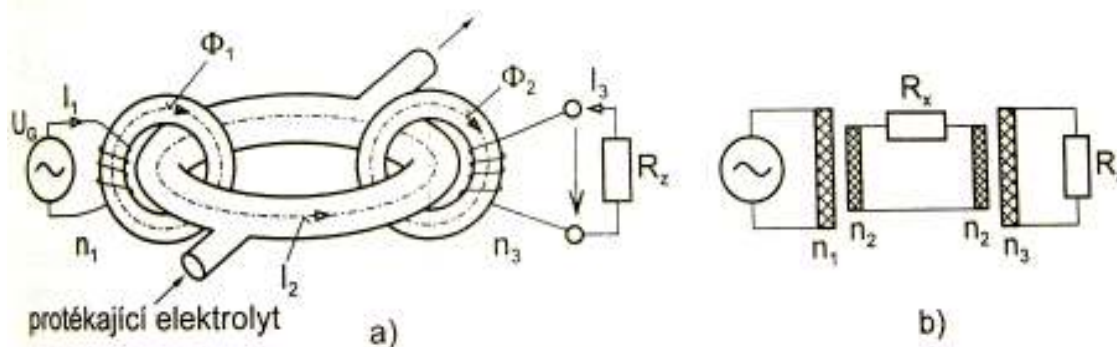
Senzory konduktivity

Konduktometrie, založená na měření elektrolytické (iontové) vodivosti roztoků, je i přes špatnou selektivitu oblíbenou metodou pro analýzu kapalin. Roztoky kyselin, solí a zásad, které vedou elektrický proud, se nazývají elektrolyty. Vodivost roztoků je podmíněna existencí iontů rozpuštěné látky nebo silných polárních vazeb a velké hodnoty permitivity rozpouštědla.

Elektrodové senzory vyhodnocují konduktivitu měřením odporu roztoku mezi dvěma elektrodami. Elektrody mají tvar planární, válcový nebo tyčový. Elektrodovou konstantu nelze vzhledem k existenci okrajových jevů v rozložení elektrického pole vypočítat. Konstanta se zjišťuje měřením vodivosti v normovaném roztoku. Při přiložení elektrického napětí na elektrody ponořené v elektrolytu vznikne na vnitřní straně elektrod dvojvrstva nábojů. Tato dvojvrstva je způsobena řadou jevů, které lze sloučit do pojmu *polarizace elektrod*. Polarizační jev se uplatňuje nejvíce u velmi vodivých roztoků a při napájení nízkým kmitočtem.

Čtyřelektrodová sonda odstraňuje vliv polarizačních jevů.

Bezdotykový indukční senzor:



(Obr. 8.7 Bezdotykový indukční senzor konduktivity (a - princip, b - náhradní schéma))

Senzor sestává ze dvou toroidních transformátorů. Primární vinutí n_1 transformátoru je napájeno ze stabilizovaného zdroje střídavého napětí. Jednozátvitové vinutí n_2 (sekundární vinutí transformátoru 1 a primární vinutí transformátoru 2) tvoří elektrolyt. Vzhledem k vysokým kmitočtům se neuplatní polarizační kapacita.

Senzory pracující na fyzikálně- chemickém principu

Tyto senzory dělíme na:

- polovodičové senzory plynů
- CHEMFET senzory
- termokatalické senzory
- elektrochemické senzory

Polovodičové senzory plynů

Polovodičové senzory jsou určeny pro detekci oxidačních nebo redukčních plynů. Lze je dělit na senzory s povrchovou (adsorpční) a objemovou (absorpční) detekcí.

Senzory s povrchovou detekcí (označované jako MOS) jsou založeny na výměně elektronů mezi vodivostní a valenční slupkou atomu způsobené adsorpcí plynu ve vrstvě kyslíčnicku. Redukční plyny se chovají jako donátory elektronů a při adsorpci způsobí zvětšení konduktivity povrchové citlivé vrstvy senzoru. Naopak oxidační plyny (akceptory) způsobí pokles konduktivity. Pro odfiltrování rušivých složek plynu se někdy používá filtrační vrstva.

Elektrochemické senzory

Princip této skupiny senzorů je dán elektrochemickými reakcemi, které nastávají na určité elektrodě v daném elektrolytu. K těmto reakcím dochází na třech fázových rozhraních mezi analyzovanou kapalinou (plynem) kovovou elektrodou a elektrolytem v tekuté nebo tuhé fázi. U elektrody dochází buď k anodické oxidaci resp. katodické redukci (tj. k přijímání resp. odevzdávání elektronů). Reakci lze ovlivnit volbou elektrody, elektrolytu a případně elektrodovým potenciálem. Je-li elektroda ponořena do roztoku elektrolytu, který obsahuje ionty kovu, z něhož je zhotovena, vytváří se mezi ní a roztokem elektrický potenciál, který závisí na aktivitě a tedy na koncentraci iontů kovu v roztoku. Je-li elektroda z neušlechtilého kovu, kationy z elektrody pronikají do elektrolytu a na elektrodě vzniká kladný potenciál vůči roztoku; naopak je-li elektroda z kovu ušlechtilého, část kationů z elektrolytu se vyloučí na povrch elektrody a potenciál bude záporný. Dle způsobu vyhodnocování potenciálu elektrody existují dvě metody: a) potenciometrie
b) ampérometrie

Potenciometrie je založena na bezproudovém měření rozdílového potenciálu mezi měřicí a srovnávací elektrodou, jejíž potenciál na styku s roztokem elektrolytu je nezávislý na koncentraci iontů.

Senzory tlaku

Amperometrie je založena na měření proudu procházejícího mezi dvěma elektrodami ponořenými do roztoku elektrolytu, přičemž je obvykle do měřicího obvodu zapojen zdroj stejnosměrného napětí.

Biosenzory

Biosenzory jsou chemické senzory založené na biochemických reakcích. U těchto senzorů dochází k přímému spojení biochemické látky (receptoru), jakou jsou např. enzymy, bakterie a jiné mikroorganismy, s elektronickými obvody. Při interakci receptoru a analyzované látky dochází nejprve k vytváření specifických produktů (lektinů, protilátek apod.) Použití enzymů, které jsou jako součást biosenzorů dočasně imobilizovány, zajišťuje vysokou selektivitu analýzy. Imobilizace enzymů má však časově omezený účinek na několik dnů až týdnů.

Doba odezvy biosenzorů se pohybuje řádově od 10s až do 10 minut. Využití biosenzorů je v biochemické výrobě (např. při výrobě penicilinu), v potravinářství, při kontrole životního prostředí, při detekci biologických bojových látek, v lékařství apod.

Senzory vlhkosti plynu

K vyjádření vlhkosti plynu je možno použít absolutních jednotek (absolutní vlhkost nebo směšovací poměr) nebo jednotek relativních (rosný bod nebo relativní vlhkost). Rosný bod se mění s tlakem, relativní vlhkost i s teplotou měřeného plynu. Kromě vzduchu se vlhkost měří i např. u technických plynů. Pro vzájemné přepočty mezi jednotlivými vlhkostními veličinami lze při normálním tlaku plynu s chybou kolem 1% používat stavovou rovnici ideálního plynu. Pro odlišné tlaky vznikají přídavné chyby s je nutné používat vztahy obsahující kompresibilní faktory reálného plynu.

Tyto senzory dělíme na:

- sorpční senzory vlhkosti (kapacitní a odporové)
- psychometr
- zrcadlové senzory teploty rosného bodu

Psychometr

Parciální tlak vodní páry v měřeném vzduchu a z něho vypočitatelná relativní vlhkost se stanovuje z údajů dvou senzorů teplot tzv. mokrého a tzv. suchého senzoru. Odpařováním vody z mokrého senzoru se odebírá výparné teplo z jeho těsného okolí, což způsobuje pokles teploty mokrého senzoru. Čím menší bude relativní vlhkost, tím intenzivněji se odpařuje voda ze stále vlhčeného senzoru a tím větší bude tzv. psychometrický rozdíl teplot.

Senzory tlaku

Mokrý senzor teploty je obalen mokrou punčoškou, která je u provozních vlhkoměrů trvale ovhčována vzlínající vodou z pomocné nádoby. Druhý tzv. suchý senzor teploty měří teplotu analyzovaného vzduchu. Psychometrický součinitel A závisí na rychlosti, tlaku a teplotě proudícího vzduchu kolem mokrého senzoru.

Průmyslové systémy pro měření a sběr dat

Jedná se o systém skládajícího se z většího počtu senzorů a jedné nebo více měřících ústředen, tedy jednotek, které přijímají, zpracovávají a případně ukládají hodnoty měřených fyzikálních veličin. Jednotlivé prvky systému jsou vzájemně propojeny komunikačními kanály, a to fyzickými nebo virtuálními.

Centralizované a distribuované systémy

Jedná se o způsob zpracování naměřených dat v systému. Centralizovaný systém zpracovává všechna měřená data na jediném místě. Distribuovaný systém se vyznačuje neexistencí takového centrálního bodu, hodnoty měřených fyzikálních veličin jsou zpracovávány v různých uzlech systému.

Centralizované systémy:

- vystačí s jednoduchými (neinteligentními) senzory a akčními členy
- využívají elektrické napětí (0-10V) nebo proud (0-20mA, 4-20mA) jako měřené veličiny
- mají hvězdicovou topologii kabeláže (každý senzor je připojen vyhrazeným kabelem k centrální jednotce)

Distribuované systémy

- využívají inteligentní senzory a akční členy
- přenášejí měřené hodnoty číslicově
- mají sběrníkovou, stromovou nebo kruhovou topologii kabeláže