

Měření neelektrických veličin

Část IV

Studijní opora

Ing. Libor Kupka, Ph.D.



Měření neelektrických veličin

Téma 12: Měření výšky hladiny

Studijní cíl

Základní principy měření a indikace výšky hladiny s využitím nespojitých a spojitých senzorů. Přehled mechanických, hydrostatických, elektrických, optických, ultrazvukových, radarových a radioizotopových hladinoměřů.

Doba nutná k nastudování

4 hodiny

Klíčová slova

Výška hladiny, hydrostatický tlak, Boyle-Mariottův zákon, hladinoměr, stavoznak, plovák, provozní nádoba, radar, anténa, ultrazvuk, mikrovlnné záření, radioaktivní záření, gama záření, Geiger-Müllerův detektor, scintilační detektor

1 Základy měření výšky hladiny

Měření výšky hladiny kapalin i sypkých hmot v nejrůznějších nádržích a zásobnících je v průmyslové praxi velmi častou úlohou. Poměrně často je důležité také zjištění množství dané látky v nádrži, která obecně může být nejen válcového tvaru, ale především v nádržích, v nichž se mění s výškou jejich průřez. Může jít o horizontální válcovou nebo kulovou nádrž, nebo může být změna průřezu způsobena vyklenutími či vestavbami. Závislost objemu náplně nádrže nebo zásobníku na výšce hladiny pak bývá nelineární, viz obr. 1.

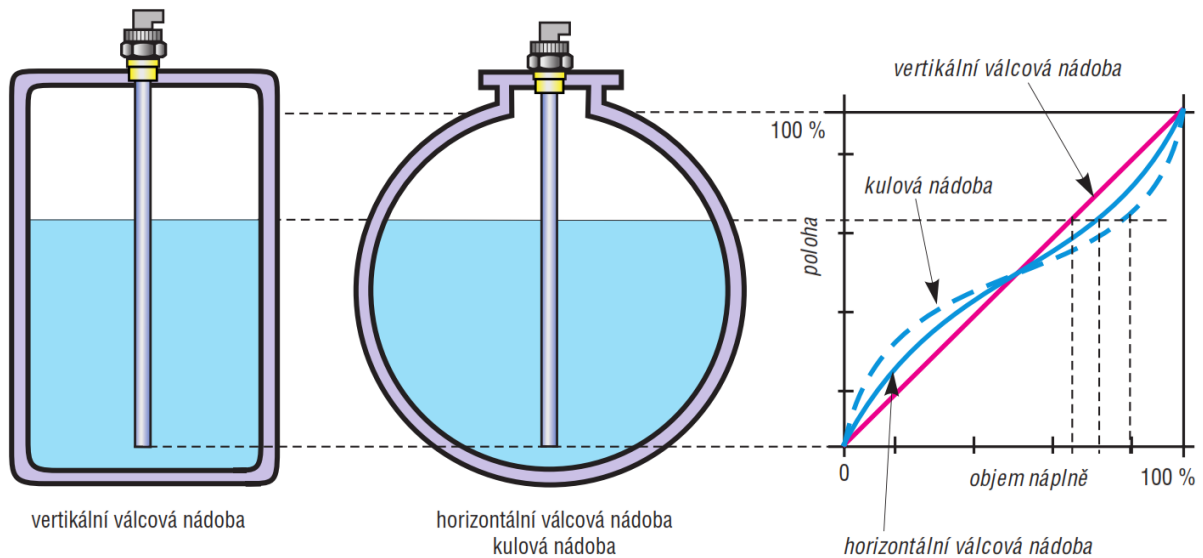
V nádržích mohou být kapaliny, suspenze nebo sypké materiály různé povahy a vlastností, obecně od čisté vody, přes kapaliny hořlavé, korozivní, viskózní či lepkavé až po volně tekoucí prášky, hrudkující sypké látky nebo suspenze s abrazivními účinky. Nezanedbatelný pro měření hladiny je samozřejmě také vliv okolního prostředí, které může být velmi různorodé – od vakua až po prostředí s vysokými tlaky, při současně širokém rozmezí teploty. Z uvedených důvodů je zřejmé, že senzorů hladiny musí být pro průmyslové použití k dispozici celá řada. Sensory hladiny lze v základu dělit na:

- **senzory se spojitou funkcí** – určené ke spojitému měření hladiny v daném rozsahu;
- **senzory s nespojitou funkcí** (limitní, mezní a bodové) – určené ke zjišťování mezních poloh hladiny, které se také označují jako **hladinové spínače**.

Tab. 1 – Základní přehled snímačů hladiny, zdroj autor dle (Kadlec, 2016)

| Skupina snímačů | Typ snímačů | Princip měření | Možné použití |
|-----------------|------------------------------|--|---|
| Mechanické | Tyčové a páskové, průhledové | Vizuální posouzení | Pouze orientační měření |
| | Plovákové | Měření polohy plováku | Měření čistých a neviskózních kapalin |
| | Vztlakové | Měření a kompenzace vztlakové síly | Měření čistých a neviskózních kapalin, měření výšky mezihladin (závislost na hustotě) |
| | Elektromechanické | Periodické spouštění závaží | Spojité měření sypkých látek |
| | Vibrační | Vyhodnocování útlumu vibrací | Spojité i limitní měření kapalin a sypkých látek |
| | Lopátkové | Vyhodnocování útlumu otáčení | Limitní měření sypkých látek a granulátů |
| Hydrostatické | Hydrostatického tlaku | Měření hydrostat. tlaku | Měření čistých kapalin (závislost na hustotě) |
| | Pneumatické s probubláváním | Měření hydrostat. tlaku při probublávání média | Měření čistých i kalných kapalin (závislost na hustotě) |
| Elektrické | Vodivostní | Měření změny elektrické vodivosti | Měření elektricky vodivých kapalin a odpadních vod |
| | Kapacitní | Měření změny kapacity snímače | Měření elektricky vodivých i nevodivých kapalin a sypkých hmot, měření mezihladin |
| | Tepelné | Měření změny odvodu tepla rezistoru | Limitní měření kapalin |
| Optické | Transmisní | Vyhodnocování průchodu světla | Limitní měření kapalin a kalů |
| | Reflexní | Vyhodnocování odrazu světla | Bezdotykové měření čistých kapalin |
| | Refrakční | Vyhodnocování lomu světla | Limitní měření čistých kapalin |
| Ultrazvukové | Spojité | Měření doby šíření ultrazvukového sig. | Bezdotykové měření prakticky všech typů kapalin a pastovitých i sypkých hmot |
| | Limitní | Měření útlumu ultrazvukového sig. | Limitní měření kapalin nebo mezihladin |
| Radarové | Bezkontaktní | Měření doby šíření mikrovlnného sig. | Bezdotykové měření kapalin (i velmi agresivních a viskózních), past, kalů a zkvalněných plynů i ve velmi obtížných podmínkách |
| | Reflektometrické | Měření doby odrazu pulzu mikrovlnného signálu vedeného kovovým tělesem | Měření kapalin a sypkých látek, mezihladin, při přítomnosti pěny nebo prachu, ale nevhodné pro kapaliny s nízkou permitivitou |
| Radioizotopové | | Vyhodnocování absorpce radioaktivního záření | Bezdotykové měření toxických, agresivních i abrazivních médií za extrémních podmínek, při jakýchkoliv teplotách a tlacích |

Senzory pro měření výšky hladiny, často označované jako **hladinoměry**, někdy i jako **stavoznaky**, se nejčastěji podrobněji rozdělují podle funkčního principu. Základní přehled senzorů pro měření hladiny je v tab. 1. (Ďaďo, 2011; Kadlec, 2016; Kadlec, 2017a a Kadlec, 2017b)



Obr. 1 – Závislost objemu nádrže na výšce hladiny, zdroj (Kadlec, 2016)

2 Mechanické snímače

Snímače mechanické jsou historicky nejstarší měřidla výšky hladiny. Používají se dodnes, především k orientačním měřením nebo pro sledování stavu zaplnění nádrží, zásobníků apod. Jejich výhodou je jejich jednoduchost, nevýhodou pak fakt, že neposkytují žádný signál pro následné zpracování či přenos naměřených hodnot.

2.1 Průhledové hladinoměry

Jedná se o **skleněné průzory** (obr. 2) nebo **trubice** (obr. 4). V případě trubice se jde o tzv. **obtokové stavoznaky**, jejichž využití je zejména u menších kotlích a nádrží. Často se používají jako doplňky elektronických snímačů, neboť fungují na principu spojených nádob bez zdroje elektrické energie a téměř za každých podmínek.

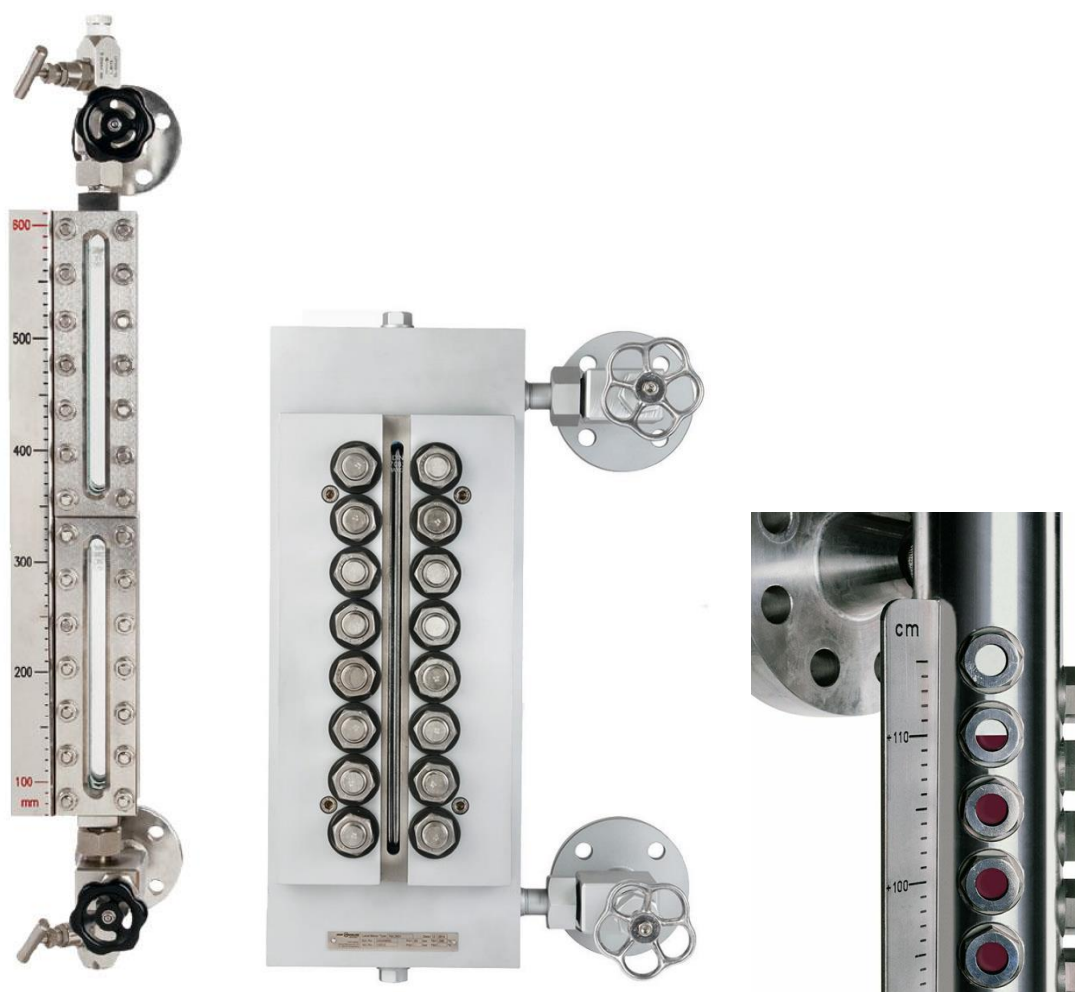


Obr. 2 – Jednoduché stavoznaky, zdroj (RS Components, 2022)

Princip obtokového stavoznaku je znázorněn na obr. 3. Značnou nevýhodou je, že se často zanášejí nečistotami, např. rzí či jinými úsadami a je nutné je čistit. Proto bývají doplněny ventily před a za trubicí, což umožňuje čištění i bez nutnosti vypuštění nádrže.



Obr. 3 – Princip obtokového stavoznaku, zdroj (D-Ex Instruments, 2022)



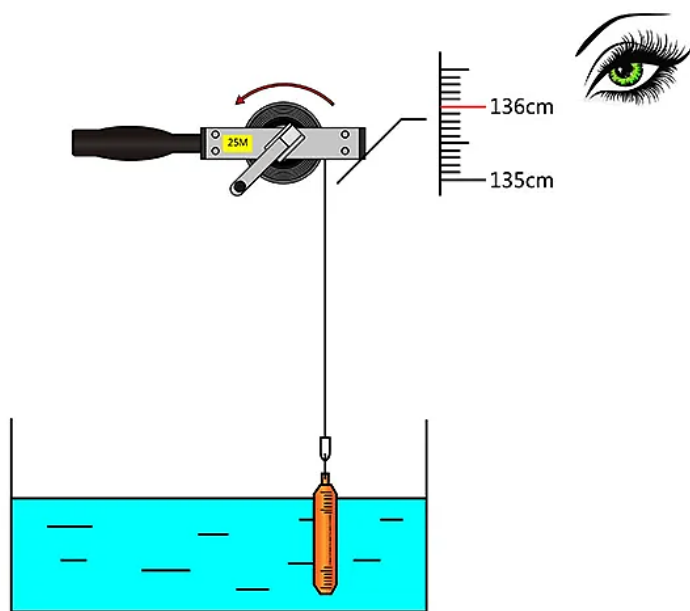
Obr. 4 – Různá provedení přímých skleněných obtokových stavoznaků, zdroj (D-Ex Instruments, 2022)

Největší výhodou klasických skleněných stavoznaků je „přímé“ a na ničem nezávislé zobrazení hladiny v průzoru. Jejich jednoduchost konstrukce prakticky vylučuje technické závady, což je jejich hlavní přednost. Jistým nebezpečím však zůstává možnost rozbití skla a již zmíněné zanášení průzoru nečistotami a s tím spojená větší náročnost údržby. Také z nich nelze získat, a to ani dodatečně, žádnou jinou doplňkovou informaci o hladině. Různá provedení obtokových stavoznaků jsou na obr. 4. (Kupka, 2022)

2.2 Tyčové a páskové

Mezi pravděpodobně vůbec nejstarší snímače výšky hladiny lze řadit **pásky s olovnicí** (obr. 5) a **měrné tyče**. Pásky, resp. pásma s olovnicí se nejčastěji používají pro měření stavu vody ve studních. Používají se ale i např. v ropném průmyslu, pro měření výšky hladiny v nádržích, cisternách a tancích. Mohou být opatřeny píšťalkou, která vydává při ponoření do vody zvukový signál a pomocí drážek lze zjistit hloubku ponoru. Elektronická verze má plastový pásek zesílený dvěma ocelovými drátky a ocelovou olovnici s elektrodou; umožňuje navíc světelnou nebo zvukovou signalizaci. (Unimetra, 2023)

Nejjednodušší cejchované měrné tyče jsou např. u koryt řek (tzv. vodočty nebo vodočetné latě), ale používají se také v podobě tyčkových měrek v automobilech při kontrole hladiny motorového oleje.



Obr. 5 – Měření výšky hladiny pomocí pásky s olovnicí, zdroj (Instrumentation Tools, 2022)

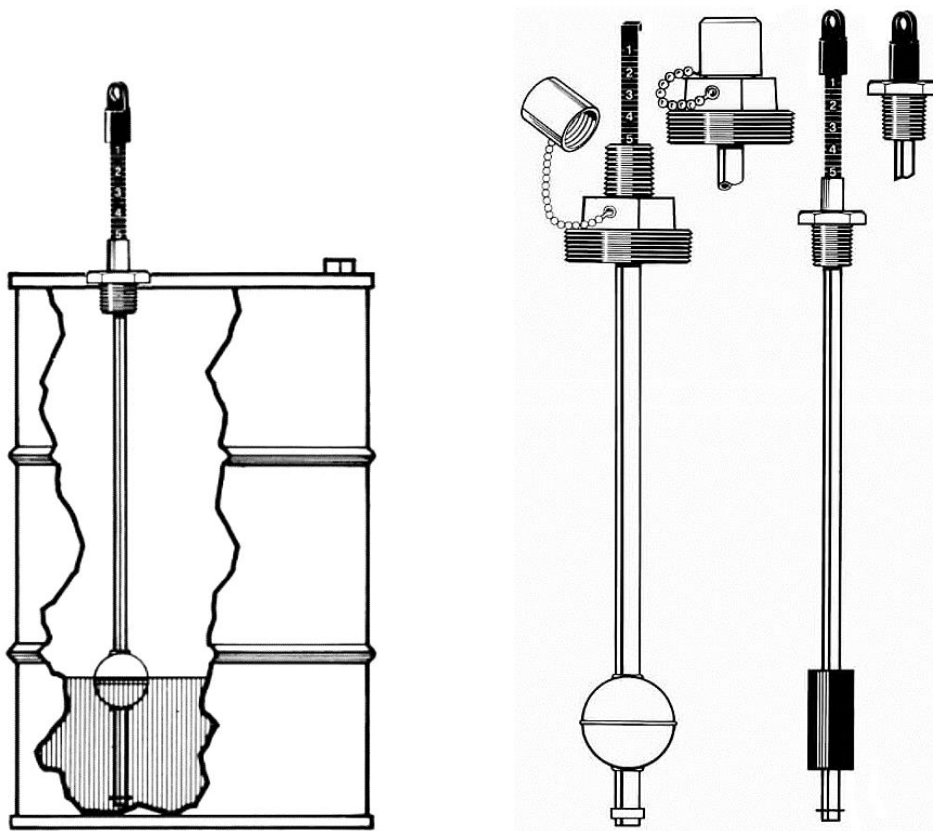
2.3 Plovákové

Základem těchto snímačů a senzorů výšky hladiny je plovák, který je díky vztlakové síle udržován na hladině. Jeho hustota musí být logicky výrazně nižší než hustota média, jehož výšku sledujeme. V případě měření polohy rozhraní dvou kapalin, pak musí hustota materiálu plováku ležet mezi hustotami kapalin. Může mít různý tvar a velikost, avšak bez horizontálních

ploch na nichž by se mohla udržovat kapalina nebo nečistoty a bývá vyroben z různých materiálů v duté (mosaz, nerezová ocel, PE, PP) i v plné variantě (PE, PP, pěnový PS).

2.3.1 Mechanické

Plovákový stavoznak může být realizován buď s pákovým či překlápěcím mechanismem nebo s vodící tyčí. Mechanická varianta s vodící tyčí a výsuvnou měřicí tyčkou se stupnicí je na obr. 6. Oblast použití nachází při měření výšky hladiny v sudech a mobilních kontejnerech. Výhodou je možnost použití i v místech bez dostupného elektrického napájení a při měření hladiny hořlavých a výbušných látek.

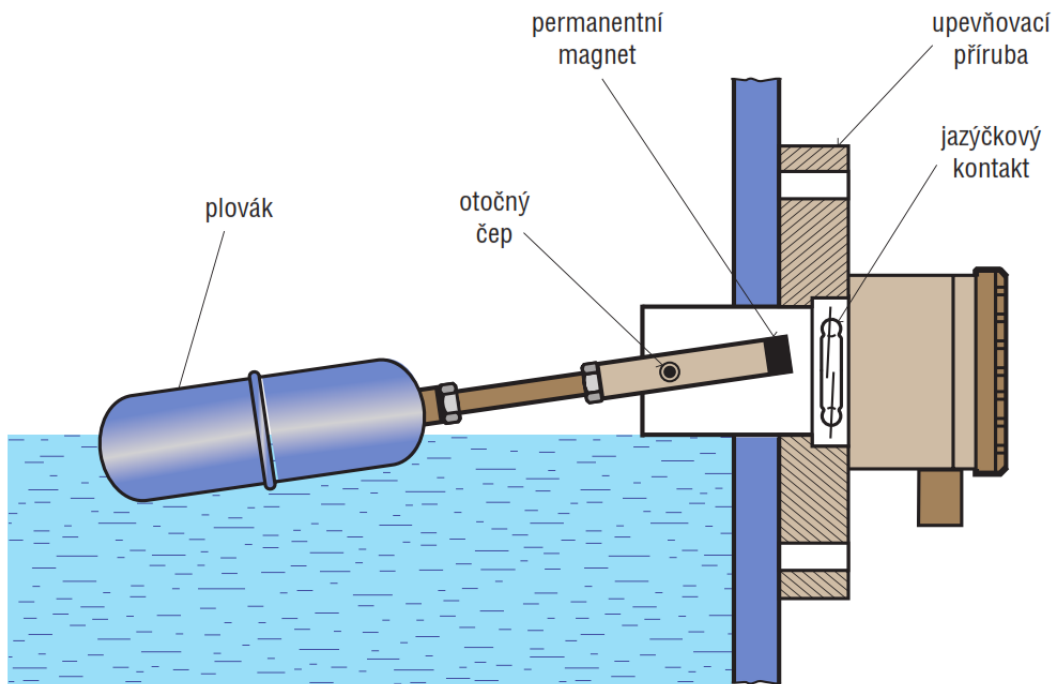


Obr. 6 – Mechanický plovákový stavoznak, zdroj (National Magnetic Sensors, 2022)

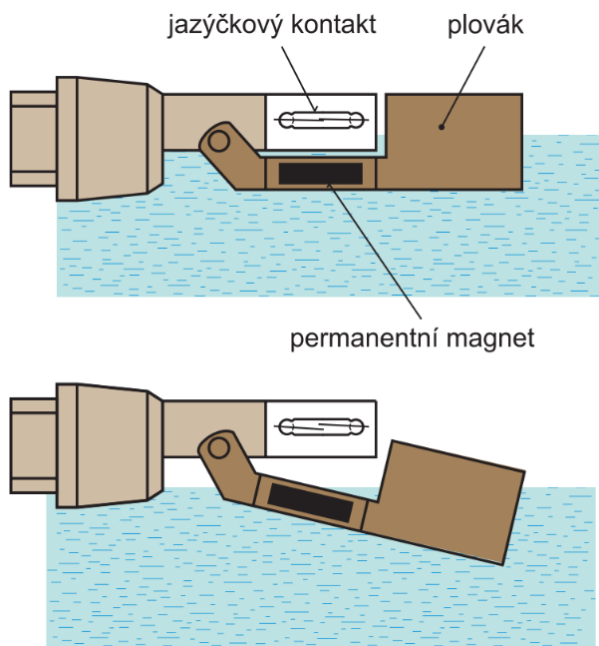
2.3.2 S pákovým mechanismem

Pohyb plováku je snímán nejčastěji dvouhodnotovým senzorem polohy. Používají se buď mikrospínače, nebo magnetické jazýčkové (Reedovy) spínače. V tomto případě se používá označení plovákový spínač s magnetickou spojkou, viz obr. 7. Magnet v rameni plováku ovládá jazýčkový kontakt umístěný v přípojovací krabici, která je umístěna vně nádrže.

U miniaturního provedení na obr. 8 je permanentní magnet přímou součástí těla plováku a jazýčkový kontakt je v tomto případě v konzoli nad plovákem uvnitř nádrže. Příklady obou zmiňovaných typů plovákových spínačů jsou pak na obr. 9.



Obr. 7 – Schéma plovákového spínače s magnetickou spojkou, zdroj (Kadlec, 2016)



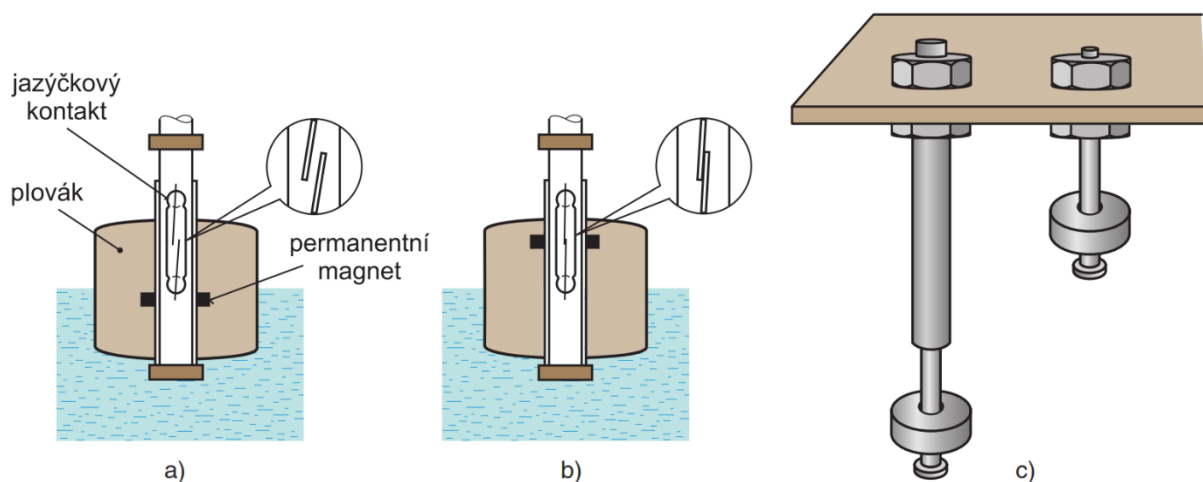
Obr. 8 – Schéma miniaturního plovákového spínače s jazýčkovým kontaktem, zdroj (Kadlec, 2011)



Obr. 9 – Provozní plovákové spínače NIVOMAG a miniaturní HLS-M, zdroj (Nivelco Process Control, 2022b) a (D-Ex Instruments, 2023)

2.3.3 S vodící tyčí

Alternativně může být plovák ve tvaru válce či koule umístěn na svislé vodící tyči z plastu nebo nerezové oceli, viz schéma na obr. 10 a provozní plovákové spínače na obr. 11. Pohyb jednoho, dvou či více plováků pohybujících se v závislosti na poloze hladiny po tyči je omezen dorazovými kroužky. V případě více plováků postačuje použití jednoho hladinového spínače namísto několika, je-li potřeba signalizovat více poloh hladiny (dolní, horní, vyprázdnění nádrže). Součástí plováku je prstencový permanentní magnet, který lze umístit dvěma základními způsoby, viz obr. 10a a obr. 10b. Buď je spínač při nízké úrovni hladiny rozepnutý a při pohybu plováku směrem nahoru sepne (a), nebo je naopak sepnut a při pohybu plováku směrem nahoru rozepne (b). Ve vodící tyči pak může být jeden nebo více jazýčkových kontaktů, které mohou být spínány jedním plovákem v různých polohách hladiny (minimální, střední, maximální, havarijní maximální atp.). Plovákové spínače se ve vertikální poloze upevňují do víka nádoby, viz obr. 10c.



Obr. 10 – Schéma plovákového spínače s vodící tyčí, zdroj (Kadlec, 2011)

Hladinové spínače se umísťují do nádob dvěma způsoby. Buď se umístí horizontálně na sledovaných úrovních jeden nebo více spínačů z boku nádoby (obr. 12a). Praktickou nevýhodou tohoto řešení je hrozící únik kapaliny z nádrže a nutnost vypuštění nádoby při opravě či výměně spínače. Případně lze umístit spínač vertikálně (obr. 12b) do horního víka nádoby. Toto řešení se často používá u zásobníků s hořlavinami, ale je nevhodné u nádob s míchadly. Použije se buď plovákový spínač s vodící tyčí (obr. 11) nebo plovákový spínač se speciálním ramenem (obr. 13).

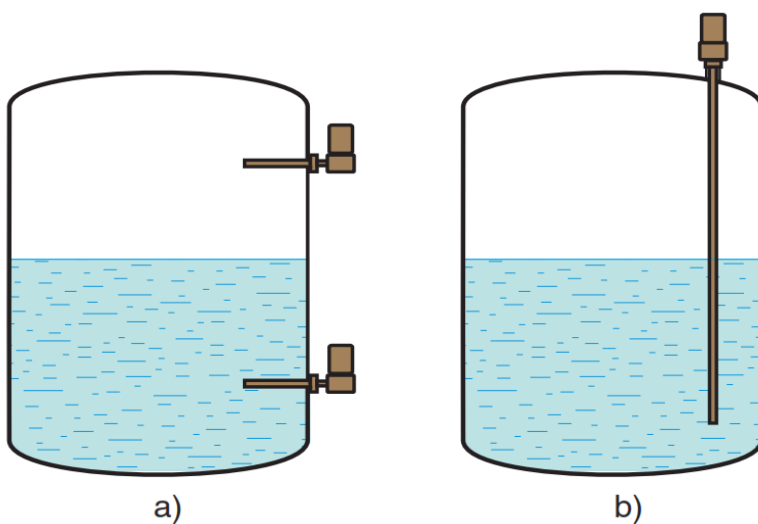
V případě nebezpečí vzniku turbulencí se spínače umísťují do speciálních tzv. uklidňovacích trubic, čímž se zamezí nebezpečí vícenásobného sepnutí.

Plovákové hladinoměry jsou vhodné pro měření v provozních nádobách s nelepavými a málo viskózními kapalinami. Přesnost měření, resp. indikace dosažení určité výšky hladiny, je dána tvarem plováku, pasivními odpory v převodových mechanismech a případnými změnami v hustotě kapaliny.



Obr. 11 – Provozní plovákové hladinoměry s vodící tyčí NIVOMAG a jedno- a vícebodové FLS (Nivelco Process Control, 2022b) a (D-Ex Instruments, 2023)

V případě potřeby měření kalných či jinak znečištěných kapalin, lze použít níže popisované závěsné překlápěcí kabelové plovákové spínače (princip na obr. 14 a reálné provedení na obr. 15), dobře známé z domácích ponorných čerpadel.



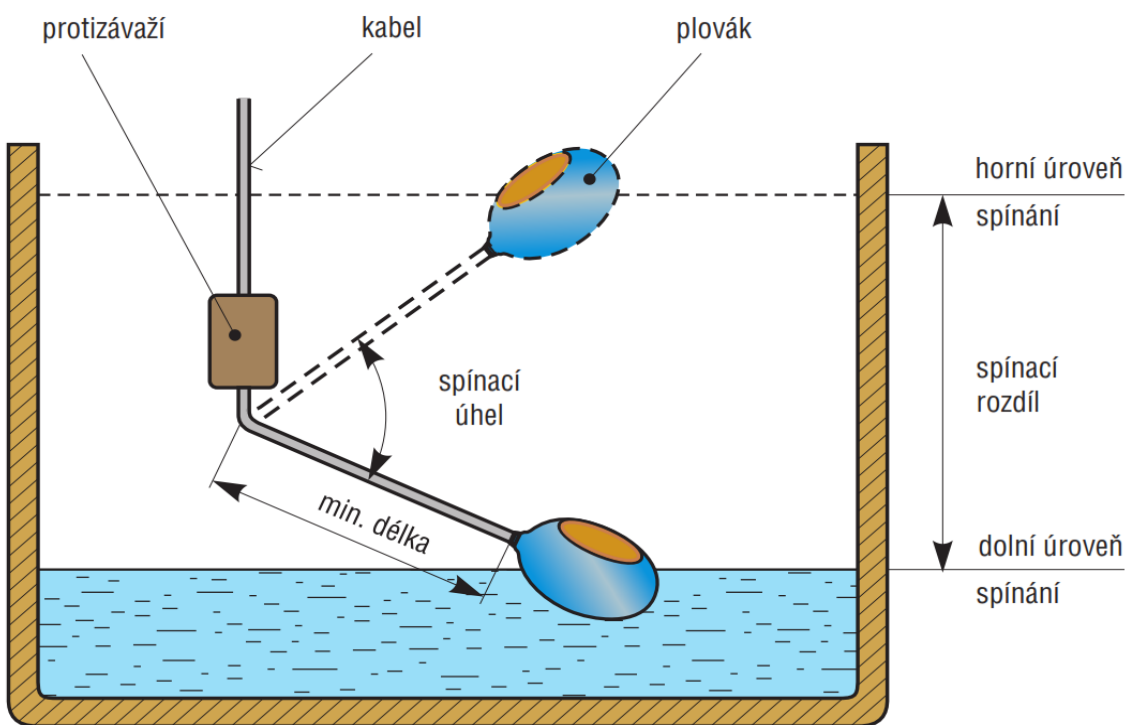
Obr. 12 – Možné umístění hladinových spínačů v nádrži: a) horizontální, b) vertikální, zdroj (Kadlec, 2011)



Obr. 13 – Provozní plovákové spínače NIVOMAG se speciálními rameny: pro vertikální montáž (vlevo a uprostřed) a pro horizontální montáž (vpravo), zdroj (Nivelco Process Control, 2022b)

2.3.4 Překlápěcí

Jinou variantu plovákových spínačů představují tzv. překlápěcí, resp. klopné či zavěšené kabelové spínače. Princip jejich činnosti je patrný z obr. 14. V hermeticky uzavřené komoře v plováku je mikrospínač, který je ovládán těžkou ocelovou kuličkou. Spínací diference je nastavitelná protizávažím posuvným po kabelu.



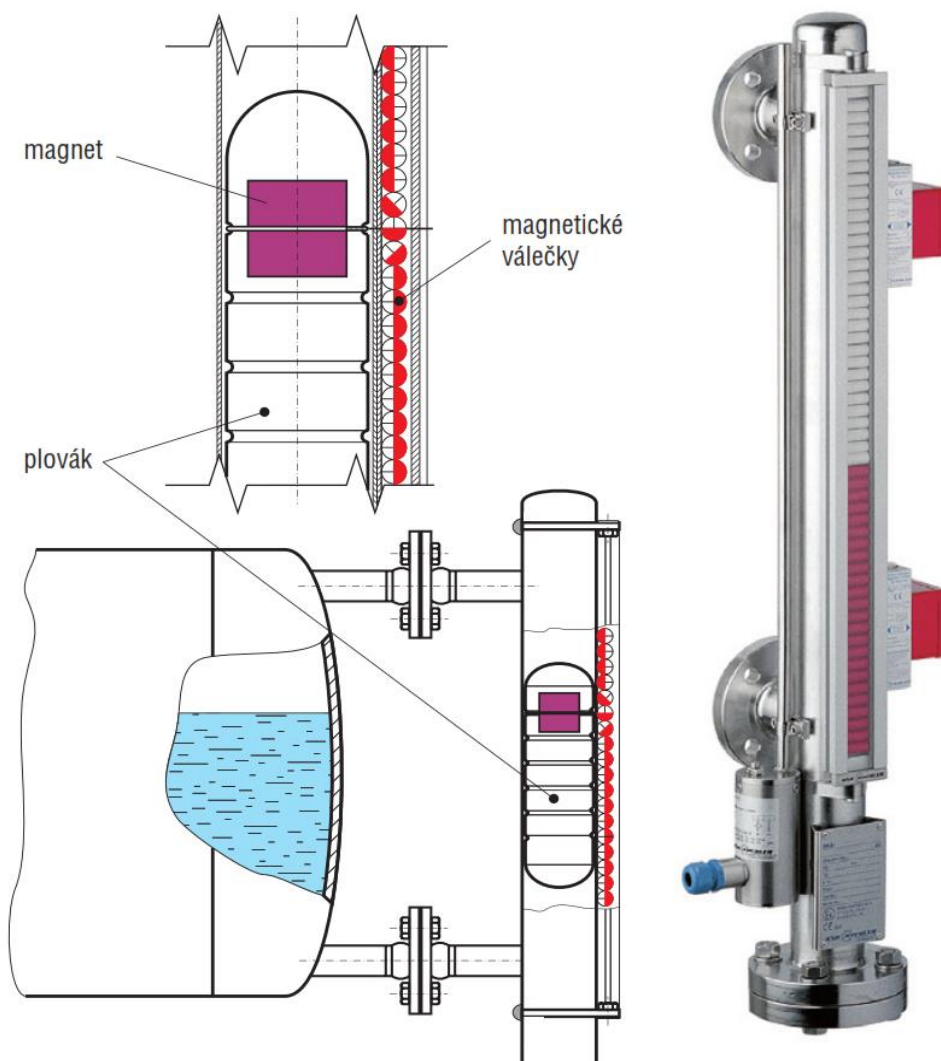
Obr. 14 – Schéma překlápěcího plovákového spínače, zdroj (Kadlec, 2016)



Obr. 15 – Kabelové plovákové spínače NIVOFLOAT, zdroj (Nivelco Process Control, 2022b)

2.3.5 Obtokové

Další, speciální typ plovákového hladinoměru je na obr. 16. Jedná se o obtokový hladinoměr s magnetickými válečky, který je modernější alternativou k osvědčeným skleněným obtokovým stavoznakům.

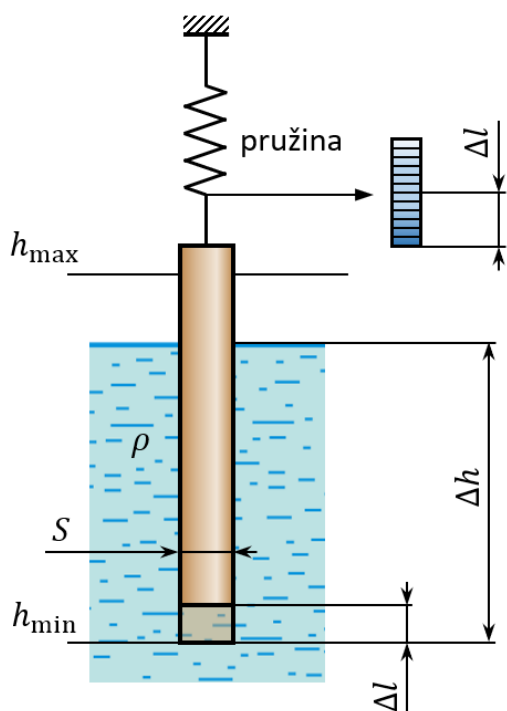


Obr. 16 – Schéma a praktické provedení obtokového hladinoměru, zdroj (Kadlec, 2016)

Plovák opatřený permanentním magnetem se pohybuje v obtokové vertikální trubici a indikuje výšku hladiny pomocí dvojbarevných magnetických válečků, které se poblíž magnetu plováku přetáčí. Alternativně může magnet plováku spínat jazýčkové kontakty potenciometrického (odporového) vysílače, který bude na svém výstupu mít kvazikontinuální elektrický signál.

2.4 Vztlakové

Vztlakové hladinoměry s ponorným tělesem pracují na základě Archimédova zákona, viz schéma principu na obr. 17. Válcové ponorné těleso je v tomto případě zavěšeno v kapalině na pružině, takže velikost síly, která na pružinu působí, je určena tíhou tělesa sníženou o velikost vztlakové síly. Dojde-li ke změně polohy hladiny o Δh , změní se i vztlaková síla a tím i poloha tělesa o Δl . Z uvedeného dále plyne, že délka ponorného tělesa nemůže být menší než hodnota rozdílu $\Delta h - \Delta l$, zároveň také hmotnost tělesa musí být taková, aby jím vyvolaná tíhová síla byla větší než vztlaková síla při úplném ponoření. (Kadlec, 2005a)

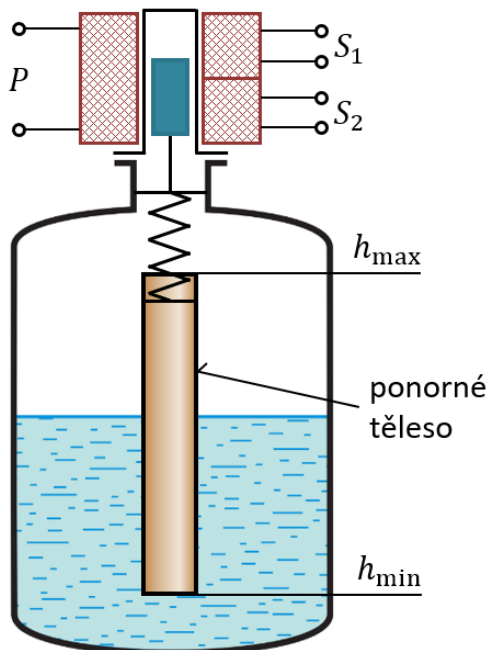


Obr. 17 – Princip ponorného tělesa, zdroj autor dle (Kadlec, 2005a)

V praxi může být zdvih ponorného tělesa i v rámci maximální změny hladiny relativně malý, např. v řádech jednotek milimetrů. Existuje více možností snímání změny polohy tělesa, ale prakticky nejvíce používaný je indukční snímač v diferenčním zapojení, viz obr. 18. Primární i sekundární vinutí jsou navinuty na kostře tvořené trubkou z nemagnetického materiálu. Sekundární vinutí jsou navíc zapojena s navzájem opačnou polaritou. Vlivem pohybu železného jádra uvnitř trubky spojeného přes pružinu s ponorným tělesem, se mění vzájemná indukčnost primárního a sekundárních vinutí.

Popsané měření hladiny lze realizovat i v uzavřených provozních nádobách, u nichž se pohyb ponorného tělesa vyvede pomocí torzní trubky. Mechanický moment torzní trubky lze

následně převést na elektrický, příp. pneumatický výstupní signál. U nádob bez proudění a rizika vzniku turbulencí se ponorné těleso umístí přímo do nich. V opačném případě je těleso nutné umístit do pomocné přídavné spojené nádoby. Pomocí vztlakových hladinměřů lze měřit také polohu rozhraní dvou kapalin s různou hustotou. Vztlakové těleso se musí být v tomto případě celé ponořeno a musí se nacházet přímo na rozhraní. (Kadlec, 2005a)



Obr. 18 – Princip ponorného tělesa s diferenčním transformátorem, zdroj autor dle (Kadlec, 2005a)

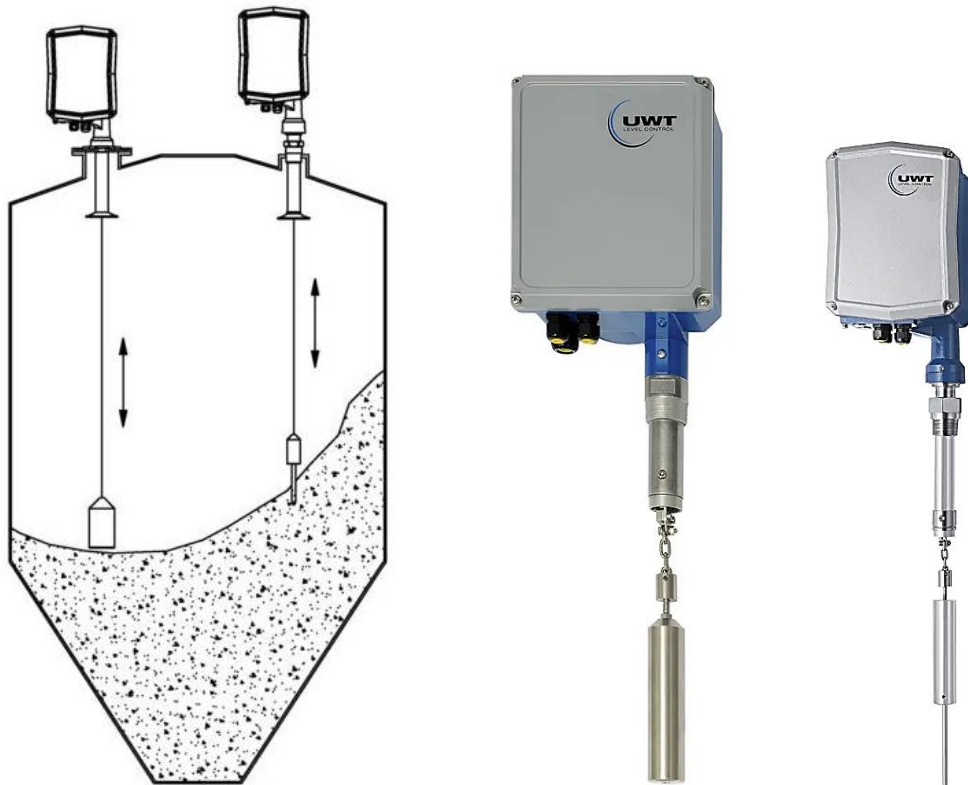


Obr. 19 – Různé typy provozních vztlakových hladinměřů Tecfluid LP a Modulevel, zdroj (Hennlich, 2023a)

Několik různých provedení provozních vztlakových hladinoměů je na obr. 19. Je zde i varianta se zavěšeným vztlakovým tělesem, u níž se výška hladiny odvozuje z natočení navíjecího bubnu. Hladinoměry mohou být v provedení analogovém, nejčastěji s ručkovým ukazatelem, nebo osazeny hlavicí s elektronickými obvody, možností dálkového přenosu a displejem.

2.5 Elektromechanické

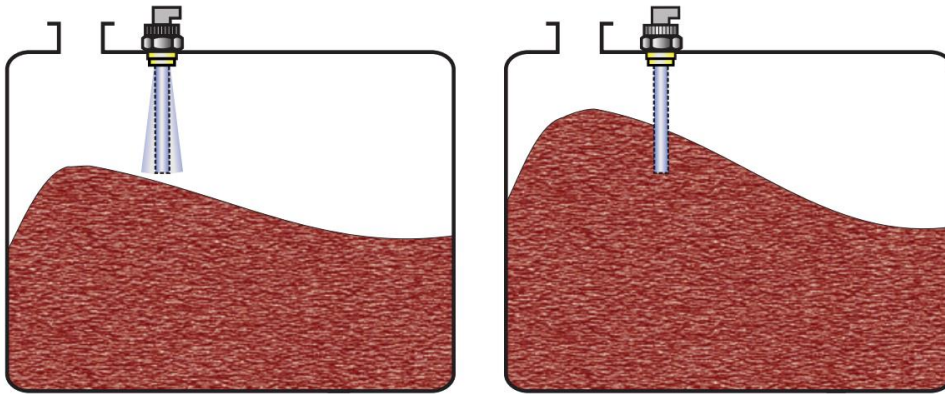
Elektromechanické olovnicové hladinoměry pracují na principu cyklického spouštění olovnice (závaží ve tvaru válce, příp. talíře) zavěšené na lanku, řetízku nebo pásce do zásobníku se sypkým materiálem, viz schéma a praktická provedení hladinoměů na obr. 20. Aktuální návin na měřicím bubnu je úměrný výšce hladiny. Okamžik styku olovnice s hladinou je detekován na základě uvolnění jinak napnutého lanka, které navíjí elektromotor. Přesnost měření je nezávislá na hustotě a zrnitosti materiálu, ani na změnách teploty či vlhkosti. Měření je tedy velmi spolehlivé, používá se především v silech a jiných zásobnících se sypkými materiály a možným měřicím rozsahem až 70 metrů.



Obr. 20 – Princip použití a reálné provedení elektromechanických olovnicových hladinoměů, zdroj (UWT, 2022)

2.6 Vibrační

Principem činnosti vibračních spínačů hladiny je efekt zklidnění kmitů ve volném prostoru po kontaktu kmitavého prvku (vidlice, příp. tyče) senzoru se sypkým materiálem (obr. 21) nebo kapalinou. Vidlice je uvedena do rezonančního kmitání pomocí piezoelektrického nebo elektromechanického měniče.



Obr. 21 – Princip vibračního spínače hladiny, zdroj (Kadlec, 2016)

Mimo měřené médium tedy kmitá vidlice na rezonanční frekvenci a po kontaktu s médiem dochází k útlumu amplitudy i frekvence kmitů, což je snímáno a vyhodnocováno elektronickými obvody senzoru. Měří se buď útlum, nebo se vyhodnocuje změna frekvence. Pro různé druhy měřených médií se používají kmitavé prvky různého typu:

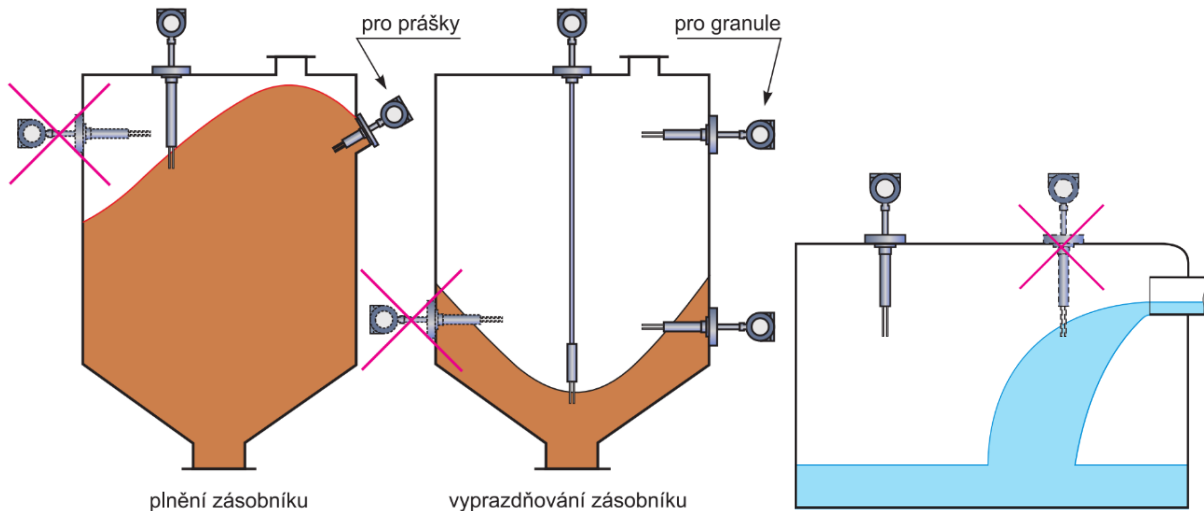
- s krátkou vidlicí pro kapaliny;
- s dlouhou vidlicí pro sypké látky a granuláty;
- s tyčí pro sypké látky.



Obr. 22 – Různé typy provozních vibračních hladinoměrů NIVOSWITCH a Soliphant: pro kapaliny s krátkými vidličkami (první dva zleva), pro sypké látky s dlouhými vidličkami (třetí a čtvrtý zleva) a pro sypké látky s tyčí (zcela vpravo), zdroj (Nivelco Process Control, 2022b) a (Endress+Hauser Czech, 2023b)

Mezi výhody vibračních hladinoměrů patří téměř výhradní nezávislost jejich funkce na vlastnostech média. U varianty s krátkou vidlicí není funkce ovlivněna ani prouděním, turbulencemi, bublinami, pěnou, obsahem pevných částic nebo vibracemi. Z důvodu jejich samočisticí funkce vlivem vibrací, nehrozí ani vytváření povlaků na jejich povrchu. Pokud jde o možnosti správného umístění senzorů v zásobnících a v nádržích, lze se orientovat podle obr. 23. Senzory by neměly být exponovány padajícím materiálu nebo proudu tekutiny při plnění

provozní nádoby. Budou-li instalovány v horizontální poloze, ramena vidlice musí být s horizontální orientací, aby při kmitání mohl materiál volně padat směrem dolů. Neměly by být instalovány ani příliš blízko dna, protože pak hrozí jejich překrytí zbytkovým materiálem po vyprázdnění zásobníku. (Kadlec, 2011)



Obr. 23 – Umístění vibračních spínačů v zásobníku a v nádrži, zdroj (Kadlec, 2011)

2.7 Lopatkové

U lopatkových, resp. vrtulkových hladinoměů (spínačů hladiny, viz obr. 24), se také využívá útlumu či zastavení otáčivého pohybu lopatky. Ta je zavěšena nad hladinou a poháněna pomocí elektromotoru. Při styku s materiálem dojde k jejímu zpomalení, nebo úplnému zastavení a tím je indikováno dosažení sledované výšky hladiny.



Obr. 24 – Průmyslové lopatkové spínače hladiny NIVOROTA: s jednou lopatkou (vlevo) a se třemi lopatkami (vpravo), zdroj (Nivelco Process Control, 2022b)

Lopatky mohou být různého tvaru i velikosti, podle hustoty média s malou či velkou plochou, takové, aby byl dosažen dostatečný brzdný moment. Nejčastěji se používají pro sypké materiály v zemědělské a potravinářské produkci, např. v zásobnících s obilovinami, cukrem, moukou, kávou atp. (Kadlec, 2011) a (Nivelco Process Control, 2013)

3 Hydrostatické senzory

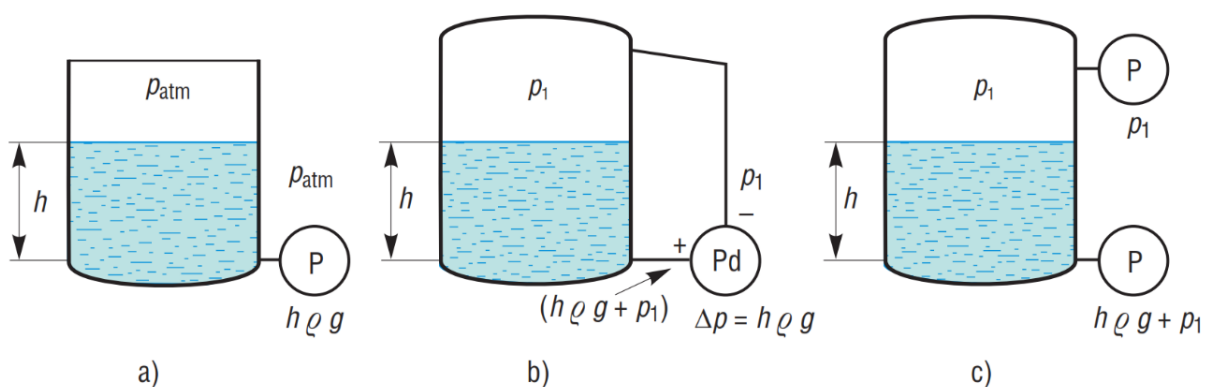
Jedná se o v principu jednoduché spolehlivě pracující senzory, které využívají ke své funkci měření hydrostatického tlaku. Ten je vytvářen tíhovou silou sloupce kapaliny a je úměrný výšce sloupce, hustotě a tíhovému zrychlení

$$p = h\rho g \quad (1)$$

S uvažováním Pascalova zákona působí tlak v kapalině rovnoměrně, tj. do všech stran, takže lze pro jeho měření použít prakticky jakkoliv orientovaný snímač tlaku.

3.1 Hydrostatického tlaku

Hydrostatické hladinoměry mohou být založeny na přímém měření tlaku. Velmi důležité je, zda měření bude probíhat v otevřené nebo v uzavřené nádobě, viz obr. 25. V otevřené nádobě je nad hladinou atmosférická tlak p_{atm} , zatímco v uzavřené nádobě může jít o přetlak nebo podtlak (hodnota p_1 se mění). V případě a) na obr. 25 je možné použít k měření buď snímač přetlaku nebo i diferenční snímač s druhým vstupem otevřeným do atmosféry. Ve variantě b) je použit diferenční snímač a ve variantě c) pak dva snímače přetlaku. V současnosti se nejčastěji používají pro měření tlaku níže popisované senzory s tenzometrickým nebo kapacitním snímačem. Jejich podrobnější popis byl již proveden ve studijní opoře věnované senzorům tlaku.



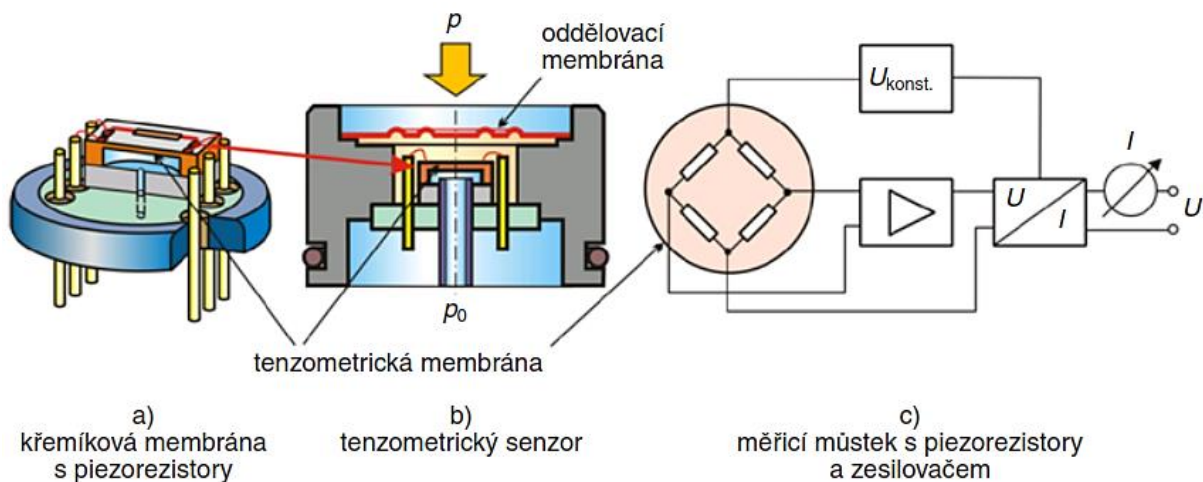
Obr. 25 – Měření hydrostatického tlaku, zdroj (Kadlec, 2017a)

3.1.1 Tenzometrické

Základem tenzometrického senzoru je křemíková membrána s polovodičovými tenzometry (tj. piezorezistory) zapojenými v měřicím můstku, viz obr. 26. Pro průmyslové využití je křemíkové

čidlo chráněno ještě kovovou oddělovací membránou. Prostor mezi membránou a křemíkovým prvem je vyplněn olejem.

Na obr. 27 je fotografie průmyslového senzoru s možností měření relativního i absolutního tlaku s piezorezistivním snímačem a čelní krycí membránou z korozi-vzdorné oceli. Jsou standardně realizovány pro použití v prostředích s nebezpečím výbuchu, umožňují měřit i kapaliny s pěnou či vrstvou plynů nad hladinou, kapaliny viskózní a agresivní, i při vysokých teplotách a tlacích. Disponují obvody s mikroprocesorem pro automatickou teplotní kompenzaci, běžnými analogovými i digitálními výstupy s možností komunikace s protokolem HART, Profibus nebo Fieldbus. Někteří výrobci nabízejí také senzory s bezdrátovým datovým přenosem s využitím protokolu Wireless HART.



Obr. 26 – Schéma tenzometrického senzoru hladiny, zdroj (Kadlec, 2014)



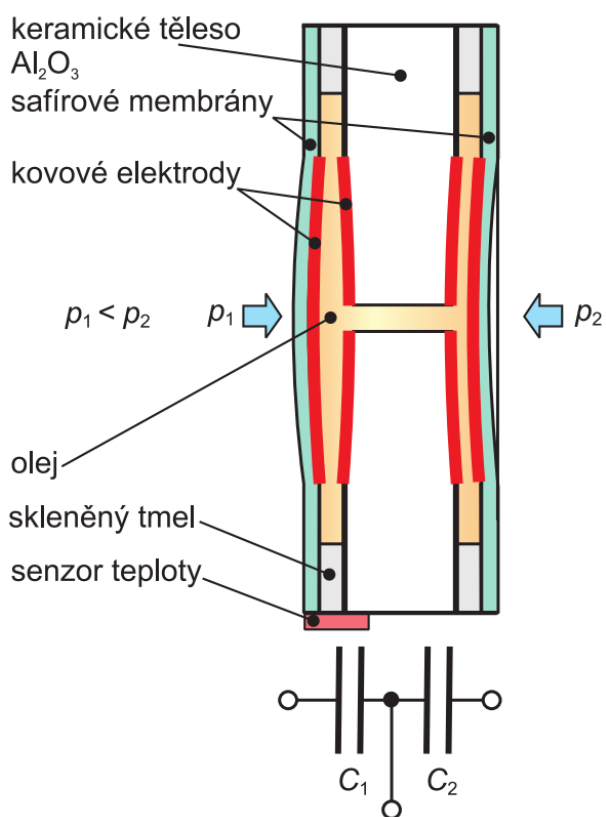
Obr. 27 – Provozní hydrostatické senzory hladiny NICOPRESS D s piezorezistivním snímačem tlaku, zdroj (Nivelco Process Control, 2022a)

3.1.2 Kapacitní

Moderní kapacitní senzory disponují keramickou membránou s nanesenými kovovými elektrodami dohromady tvořícími dva deskové kondenzátory, viz obr. 28 (podrobněji viz také

studijní opora věnovaná měření tlaku). Princip činnosti je poměrně jednoduchý – jestliže je $p_1 < p_2$, tak se vzdálenost elektrod u C_1 zvětší, zatímco u C_2 se zmenší, čímž se změní kapacity a pak $C_1 < C_2$. Změnu kapacity je vyhodnocována mikroprocesorově řízenými elektronickými obvody s plně automatickou kompenzací parazitního vlivu teploty. Možnosti výstupů a komunikačních protokolů jsou obdobné jako u senzorů tenzometrických popsanych v předchozím odstavci.

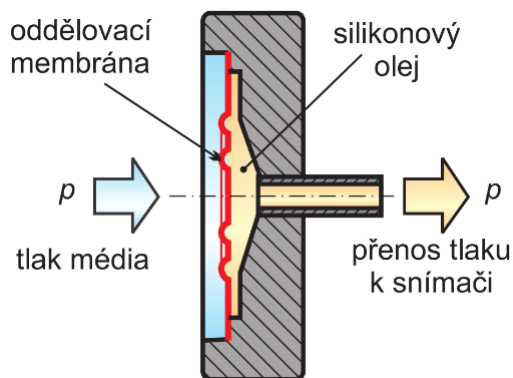
Průmyslová provedení senzorů musí být velmi odolná a zároveň splňovat podmínky pro provoz v chemických i potravinářských provozech. Veškeré části přicházející do styku s měřeným médiem tak jsou nejčastěji vyrobeny z nezávadné a zároveň velmi odolné korozivzdorné oceli. Pouzdra sensorických hlav s elektronickými obvody, příp. i s displejem, se vyrábí buď ze slitin hliníku nebo z vhodných plastických hmot s požadovaným krytím IP.



Obr. 28 – Schéma keramické membrány kapacitního senzoru tlaku, zdroj (Kadlec, 2014)

Měření s membránovými oddělovači

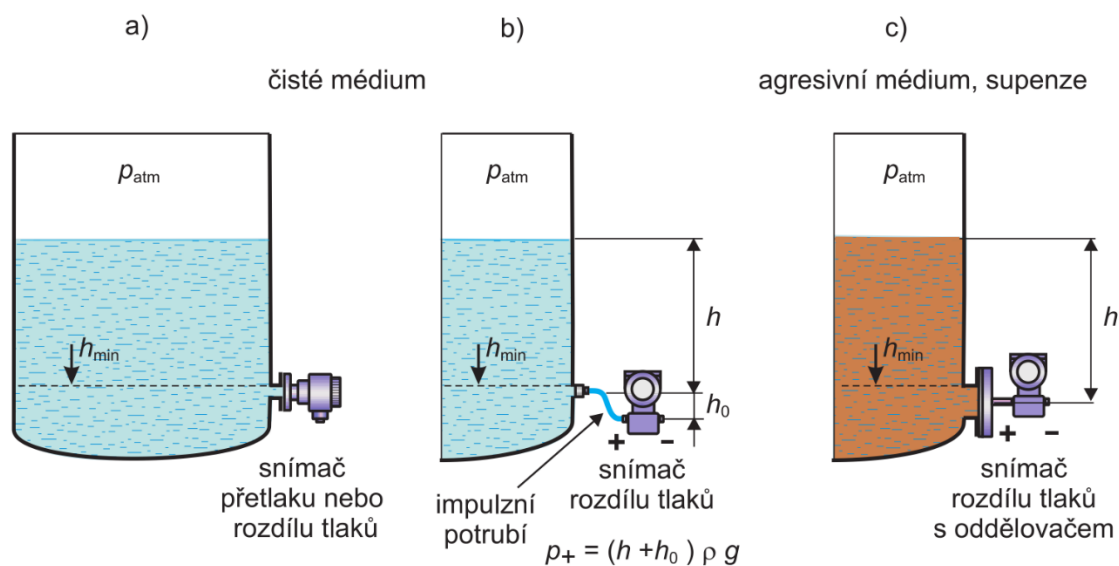
V situacích, kdy nepřichází v úvahu možnost styku citlivé části senzoru s měřeným médiem, musí být senzorům předřazen **membránový oddělovač**, jehož schéma je na obr. 29. Membrána oddělovače, která je při měření ve styku s médiem, je vyrobena z ušlechtilých materiálů (titan, zirkon, tantal atp.), korozivzdorných slitin (např. Hastalloy, Monel), příp. může být potažena teflonem.



Obr. 29 – Schéma membránového oddělovače, zdroj (Kadlec, 2014)

Měření v otevřené nádobě

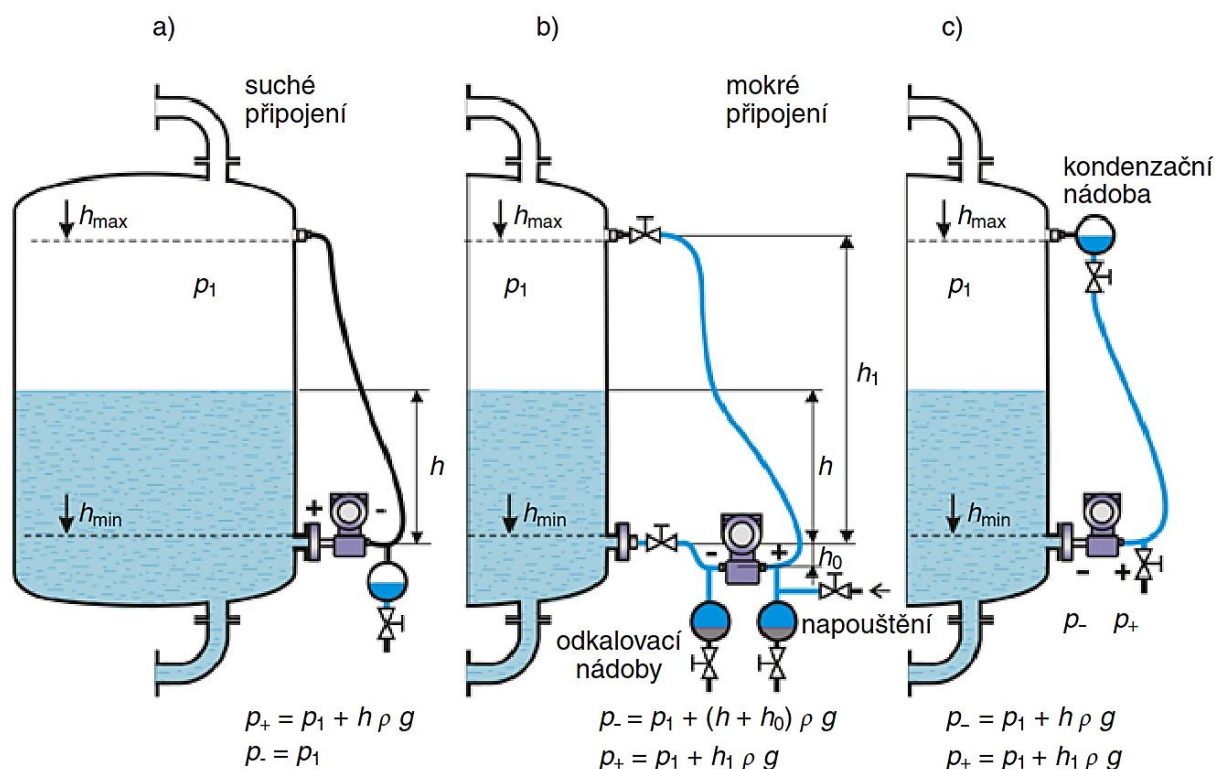
Existuje několik variant připojení senzorů hydrostatického tlaku k provozním nádobám. Jak již bylo zmíněno výše, tak zcela zásadní je, zda je nádoba otevřená či uzavřená. Pak také záleží, jaké médium je měřeno – buď čisté (v obrázcích dále modře), nebo agresivní (hnědou barvou). V případě otevřené nádoby s čistým médiem je možné senzor připojit přímo (obr. 30a) nebo přes tzv. impulzní (signálové) potrubí (obr. 30b). Bude-li médium vykazovat nepříznivé vlastnosti, senzor se připojí až za membránový oddělovač (obr. 30c).



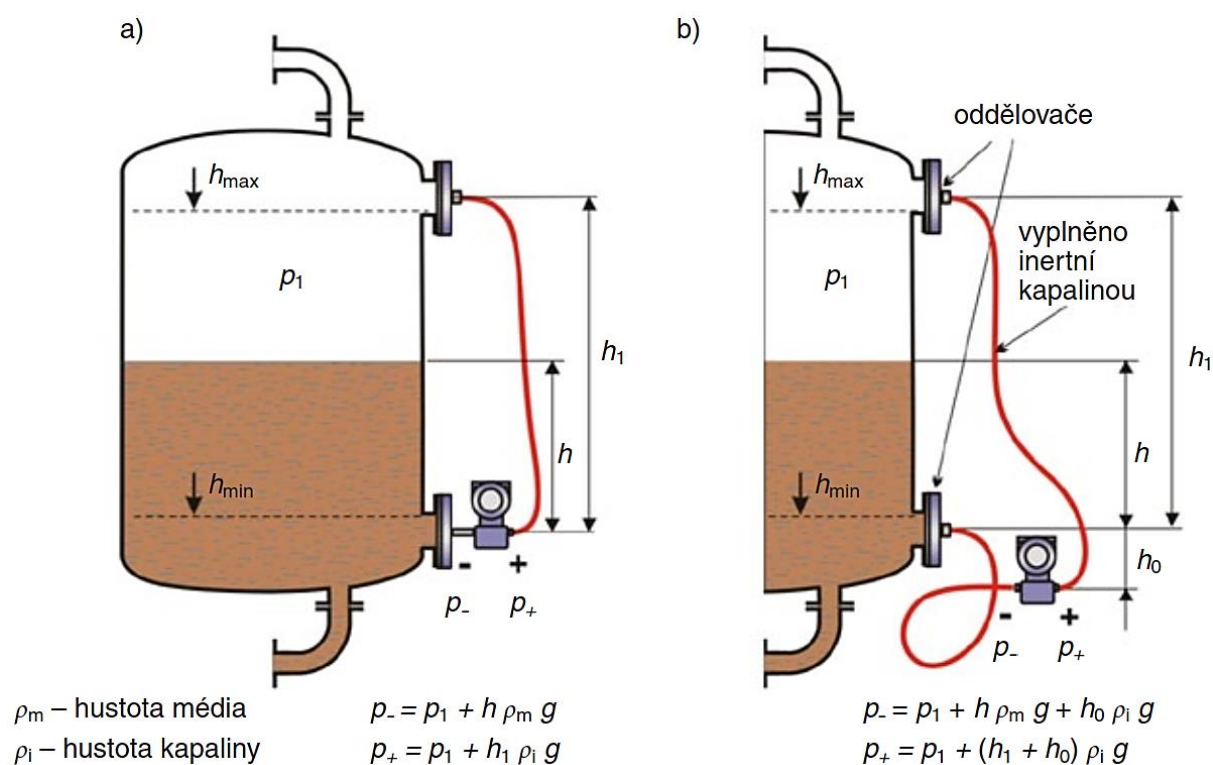
Obr. 30 – Možnosti měření výšky hladiny v otevřené nádobě, zdroj (Kadlec, 2014)

Měření v uzavřené nádobě

Komplikovanější situace nastane v případě nádoby uzavřené, v níž se tlak nad hladinou mění. Použít lze tzv. **suché připojení** (dry leg, viz obr. 31a). Prostor nad hladinou média je pomocí impulzního potrubí připojen k diferenčnímu senzoru tlaku. Z důvodu časté kondenzace par ve větvi bez média, bývá do této větve zařazena kondenzační nádoba.



Obr. 31 – Možnosti měření výšky hladiny v uzavřené nádobě, zdroj (Kadlec, 2014)



Obr. 32 – Možnosti měření výšky hladiny v uzavřené nádobě s využitím membránových oddělovačů, zdroj (Kadlec, 2014)

Pravděpodobně častěji se používá tzv. **mokré připojení** (wet leg, viz obr. 31b, c). Pak platí, za předpokladu, že hustota kapaliny obsažené v impulzním potrubí, je stejná jako hustota média v nádobě, uvedené vztahy. Diferenční tlakový senzor v reverzním režimu, takže indikuje

minimální tlak při maximální výšce hladiny a naopak. Mohou být zařazeny také odkalovací nádoby, aby potrubí zůstalo co nejdéle čisté. Pokud je měřena hladina v nádobách, v nichž se tvoří páry, osadí se navíc ještě kondenzační nádoba (obr. 31c). Hrozí-li, že impulzní potrubí zamrzne, může být vyhříváno.

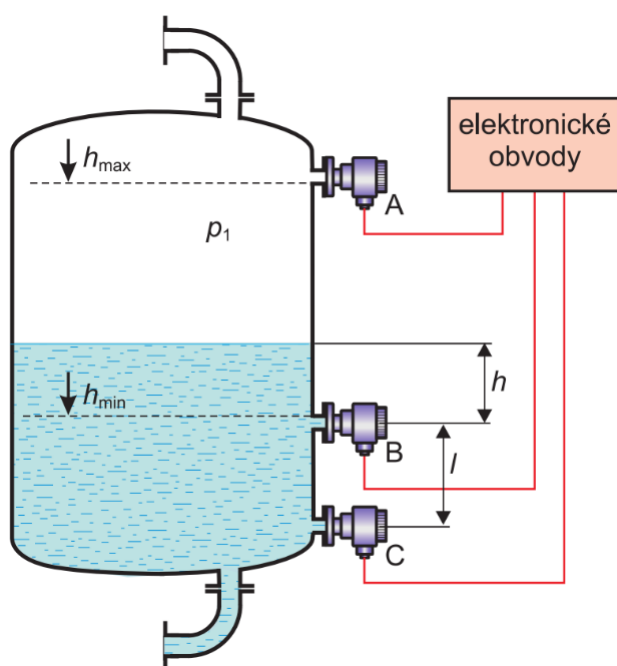
V případě měření agresivních médií se použijí výše zmiňované membránové oddělovače, a to i u větve pro měření tlaku nad hladinou média, viz obr. 32. Impulzní potrubí je naplněno inertní kapalinou s odlišnou hustotou, než má měřené médium. Nejčastěji se jedná o k tomuto účelu vhodný olej. Tepelnou roztažnost kapaliny v impulzním potrubí je možné kompenzovat zapojením na obr. 32b, v němž mají obě větve potrubí co nejvíce podobnou délku a kapalina v nich ideálně shodnou teplotu.

Při měření hladiny pomocí hydrostatických hladinoměřů je jeho přesnost závislá především na možných změnách hustoty a teploty měřeného média. Ke kompenzaci tohoto jevu lze využít zapojení měřicího obvodu na obr. 33 se třemi senzory přetlaku. Jejich výstupy jsou v tomto případě zpracovávány doplňkovými elektronickými obvody. Funkce senzorů označených jako A a B odpovídá schéma uvedenému na obr. 25c. Senzor C je umístěn v dané vzdálenosti pod senzorem B. Z naměřeného tlakového rozdílu se vypočítává hustota média

$$\rho = \frac{p_C - p_B}{lg} \quad (2)$$

a podle její okamžité hodnoty se poté korigují hodnoty hydrostatických tlaků měřených senzory A a C. Výška hladiny se stanoví výpočtem podle vztahu

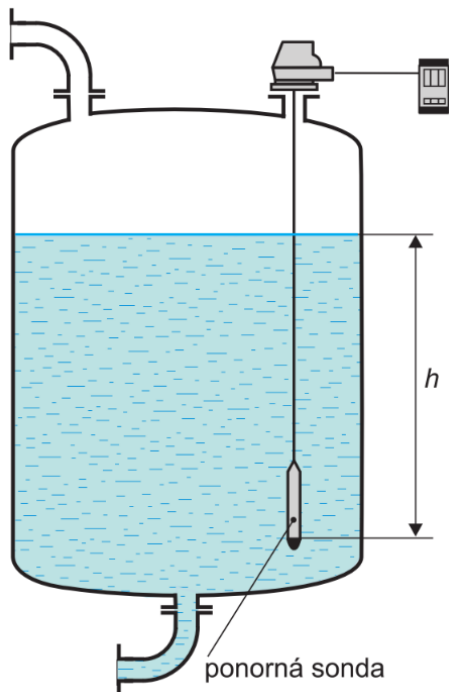
$$h = \frac{p_B - p_A}{\rho_C - \rho_B} l \quad (3)$$



Obr. 33 – Princip kompenzace vlivu změn hustoty média, zdroj (Kadlec, 2014)

3.1.3 S ponornou sondou

Další variantou je měření s využitím ponorné sondy zavěšené na lanu či kabelu, nebo připevněné na tyči, viz obr. 34. Sonda je tvořena konstrukčně upraveným senzorem tlaku, který umožňuje měřit hydrostatický tlak v místě ponoru.



Obr. 34 – Schéma měření hladiny pomocí ponorné sondy, zdroj (Kadlec, 2014)



Obr. 35 – Provozní hydrostatické senzory hladiny s ponornou sondou NIVOPRESS N, postupně zleva doprava: tři typy ponorných sond, hlavice s převodníkem UniCONT a vyhodnocovací a vizualizační modul MultiCONT, zdroj (Nivelco Process Control, 2022a)

Nejčastěji se používá tenzometrický nebo kapacitní senzor, v obou případech s oddělovací membránou. Senzor měří přetlak vzhledem k atmosféře, takže musí být pomocí dlouhé kapiláry vedené společně s elektrickým kabelem propojen s atmosférou. Případně může

senzor měřit absolutní tlak, takže je potřeba ještě druhý referenční senzor tlaku atmosférického. Hydrostatický tlak se pak vypočítá z rozdílu obou tlaků. Pokud se měří výška hladiny ve velkém rozsahu (od cca 30 metrů vodního sloupce), je možné kolísání atmosférického tlaku zanedbat a referenční senzor potom není zapotřebí.

Rozsah měření je od 0,6 metrů (nádrže a zásobníky) až do 200 m (hluboké studny a vrty). Na obr. 35 jsou tři různé typy ponorných sond, které visí díky své nízké hmotnosti přímo na kabelu, nebo se v případě velkých hloubek zavěšují na lanko. Sondy jsou spojeny s měřicí hlavicí umístěnou na povrchu s možností připojení k vyhodnocovacímu a vizualizačnímu modulu.

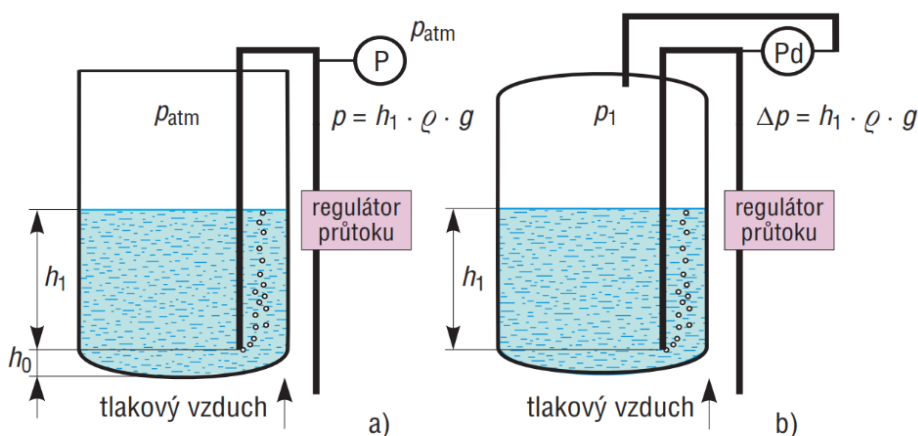
3.2 Pneumatické hladinoměry

K měření výšky hladiny je možné také využít metody pneumatické. Může jít o variantu měření s tzv. probubláváním, nebo lze použít hladinoměr pracující na bázi Boyle-Mariottova zákona. Uvedená dvě varianty nelze ale použít pro měření výšky sypkých látek.

3.2.1 S probubláváním

Princip metody označované jako probublávací (příp. provzdušňovací, či bubbler) je na Obr. 36. Základem je trubka s ústím v blízkosti dna, jíž proudí malé množství vzduchu či jiného neutrálního plynu, který musí následně překonat hydrostatický tlak měřené kapaliny. Průtok vzduchu by měl být dostatečně malý, aby bylo možné zanedbat tlakovou ztrátu, a současně konstantní a nezávislý na velikosti hydrostatického tlaku, což zajistí regulátor průtoku. V případě otevřených provozních nádob se měří přetlak v systému, který je úměrný výšce hladiny (Obr. 36obr. 35a). V uzavřených nádobách musí být napájecí tlak vyšší, než je tlak uvnitř nádoby a pak lze měřit rozdíl tlaků vhodným diferenčním tlakoměrem.

Díky skutečnosti, že senzory tlaku jsou umístěny mimo měřené médium, navíc z venku nádoby, je popisovaná probublávací metoda velmi vhodná v případě měření agresivních, znečištěných a viskózních kapalin. Nevýhodou metody je nižší přesnost oproti přímému měření hydrostatického tlaku.



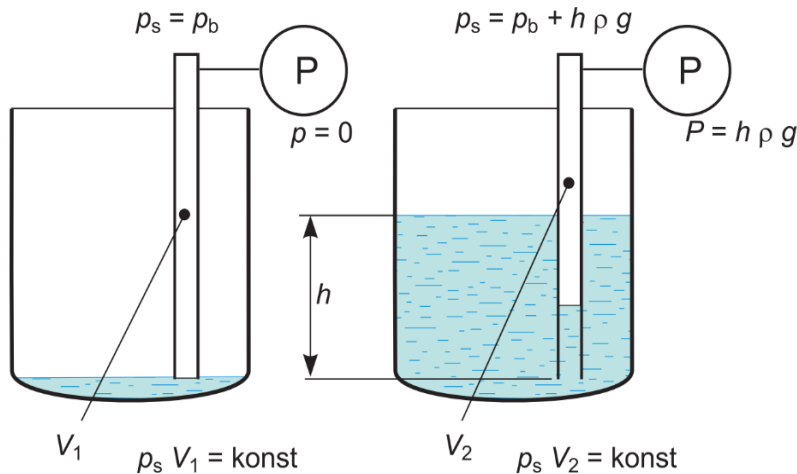
Obr. 36 – Schéma měření hladiny s probubláváním, zdroj (Kadlec, 2017a)

3.2.2 S využitím Boyle-Mariottova zákona

Pro méně náročné aplikace lze využít hydrostatické hladinoměry využívající Boyle-Mariottova zákona, který za předpokladu konstantní teploty $T = \text{konst}$ říká, že součin objemu a tlaku je stálý

$$pV = \text{konst} \quad (4)$$

Do nádrže se umístí trubka nebo hadice, jejíž dolní konec je otevřený a na horní konec se připojí tlakoměr, viz Obr. 37 obr. 36.



Obr. 37 – Schéma měření hladiny podle Boyle-Mariottova zákona, zdroj (Kadlec, 2014)

Bude-li hladina pod úrovní dolního ústí, bude uvnitř sondy vzduch o objemu V_1 a barometrickém tlaku p_b (situace vlevo). Stoupne-li hladina o h , tlak vzduchu uvnitř sondy vzroste a zároveň se v souladu s Boyle-Mariottovým zákonem sníží jeho objem na hodnotu V_2 (situace vpravo). Výška hladiny je úměrná vyhodnocované tlakové změně.



Obr. 38 – Provozní pneumatické hladinoměry: v analogovém provedení, typ Unitel (vlevo) a v digitálním provedení, typ DTA (vpravo), zdroj (Afriso, 2023)

Uvedený způsob je silně závislý na změnách teploty, kdy dochází k porušení podmínky stálé teploty a není tedy příliš přesný. Přesnost měření je ovlivňována i odpařováním kapaliny a absorpcí vzduchu v kapalině. Příklady provozních pneumatických hladinoměrů využívajících Boyle-Mariottova zákona jsou na Obr. 38 obr. 37. Umožňují měřit hladinu v nádržích s vodou, olejem, naftou atp. Typ DTA umožňuje bezdrátové připojení k nadřazenému systému a tím i vzdálené sledování.

4 Elektrické senzory

Využívají k měření výšky hladiny změnu některé své charakteristické elektrické veličiny. Nejčastěji se jedná o senzory vodivosti, kapacitní a kalorimetrické (odporové, tepelné). Jejich výhodou je, že jejich výstup je v podobě elektrické veličiny. Často se do této skupiny řadí i senzory optoelektrické, které jsou ale v rámci této studijní opory uvedeny v samostatné kapitole.

4.1 Vodivostní

Základem vodivostních hladinoměrů jsou elektrody, které se při měření umístí do provozní nádoby s elektricky vodivou kapalinou. Mohou být se spojitým výstupem, nebo i limitní, tj. určené k detekci přítomnosti hladiny.



Obr. 39 – Vodivostní senzory a spínače hladiny Liquipoint FTW: dvouelektrodotový senzor se spojitým výstupem pro nevodivé provozní nádoby (vlevo), třielektrodotový spínač s tyčovými elektrodami (uprostřed) a dvou vodičový spínač s lanovými elektrodami (vpravo), zdroj (Endress+Hauser Czech, 2023a)

U hladinoměřů **se spojitým výstupem** je měřena změna elektrické vodivosti (resp. odporu) při změně výšky hladiny. Přesněji se vyhodnocuje odpor buď mezi dvojicí elektrod, nebo mezi hrotem měřicí sondy a kovovou stěnou provozní nádoby. **Limitní spínače** mají elektrod více, běžně 3 až 5. Na Obr. 39 obr. 38 jsou uvedeny základní tři varianty – dvouelektrodivý senzor se spojitým výstupem, tříelektrodivý spínač s tyčovými elektrodami a dvouelektrodivý spínač s lanovými elektrodami.

Vodivostní senzory a spínače jsou konstrukčně jednoduché, jejich instalace je bezproblémová, nelze je ale použít pro měření v případě nevodivých kapalin. Spínače nacházejí nejčastější využití u nádrží při jejich napouštění a vypouštění, kdy jejich dvoustavový výstupní signál lze použít při logickém řízení chodu čerpadel nebo ke dvoupolohové regulaci.

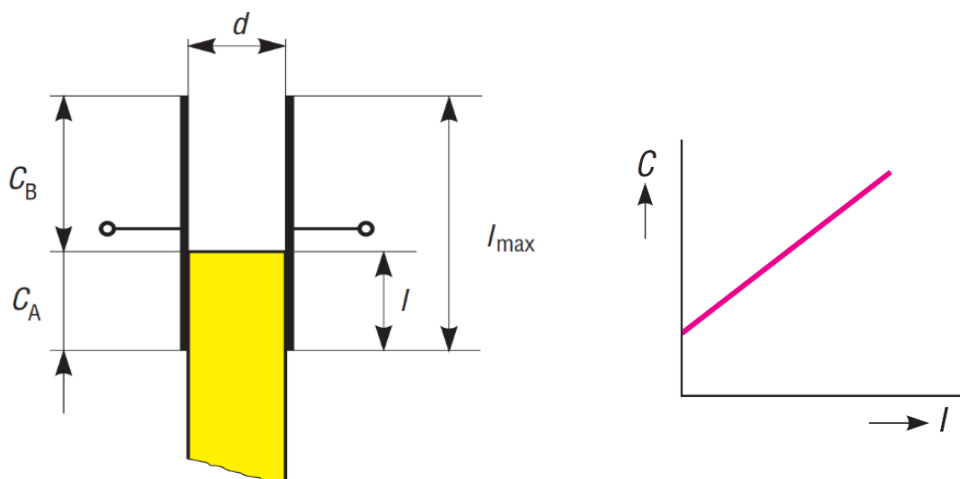
4.2 Kapacitní

Nejvýznamnější a v praxi nejpoužívanější skupinu elektrických senzorů tvoří senzory pracující na principu změny kapacity. Základní princip kapacitního hladinoměru pro měření nevodivých kapalin je na obr. 40. Vysvětlení je podáno na schématu deskového kondenzátoru s posuvným dielektrikem – nevodivou kapalinou zaplavující prostor mezi deskami. Celková kapacita je tvořena součtem kapacit C_A a C_B a tedy platí

$$C = C_A + C_B = \varepsilon_A \frac{al}{d} + \varepsilon_B \frac{a(l_{\max} - l)}{d} = \frac{\varepsilon_0 a}{d} [(\varepsilon_{rA} - \varepsilon_{rB})l + \varepsilon_{rB}l_{\max}] = k_1 l + k_2 \quad (5)$$

přičemž ε_A a ε_B jsou permitivity dielektrika a plynu (vzduchu), a je šířka desky kondenzátoru.

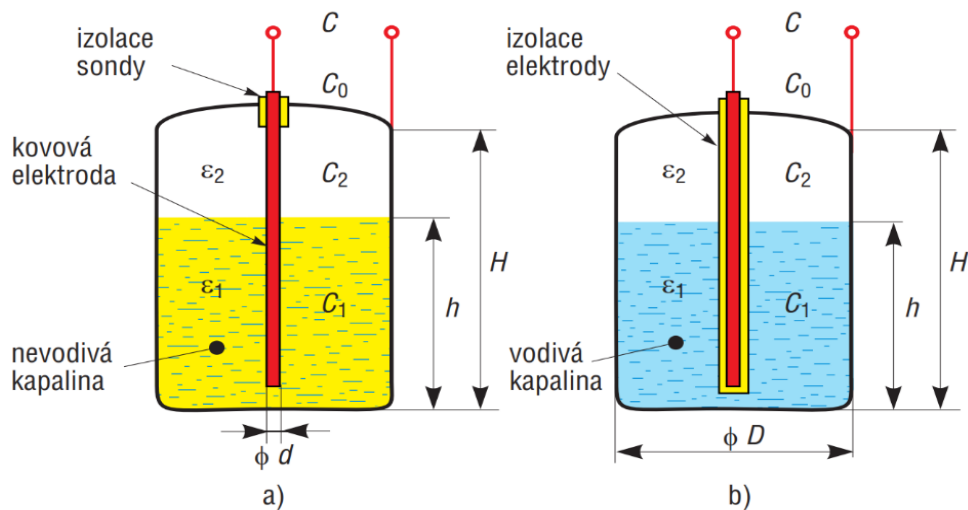
Ze vztahu (5) přímo plyne, že se změnou výšky hladiny l dochází k lineární změně kapacity C . Statickou charakteristikou senzoru je tedy přímka, viz obr. 40 vpravo.



Obr. 40 – Základní princip a statická charakteristika kapacitního senzoru výšky hladiny, zdroj (Kadlec, 2017a)

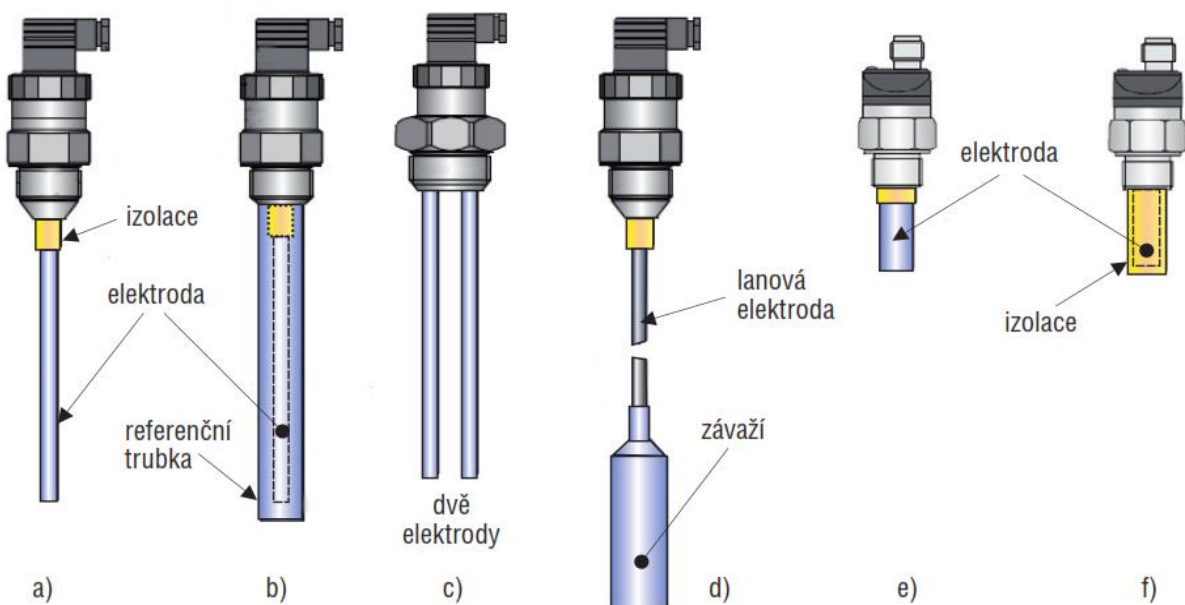
V praktickém provedení se spíše používá válcová sonda (obr. 42a, b), ale i dvě elektrody (c) nebo příp. lanová elektroda (d). Délky elektrod tyčových jsou typicky v rozsahu od 0,2 až do 5 m, lanových od 1 až do 20 m. Elektrody kapacitních spínačů (indikátorů hladiny) jsou výrazně kratší, nejčastěji od 3 cm do 1 m. Sondy kapacitních senzorů jsou obvykle realizovány jako dva soustředné vertikální válce, nebo v podobě válcové tyče či lana tvořící jednu z elektrod,

příčemž druhou elektrodou je pak stěna nádrže (obr. 41a) pro případ, je-li měřena výška hladiny nevodivé kapaliny (např. olej, benzín, nafta atp.). V případě vodivých kapalin (voda, různé vodné roztoky atp.) se použije izolovaná snímací elektroda (obr. 41b). Dielektrikum je pak tvořeno izolací elektrody a vodivá kapalina potom vlastně tvoří druhou elektrodu kondenzátoru.

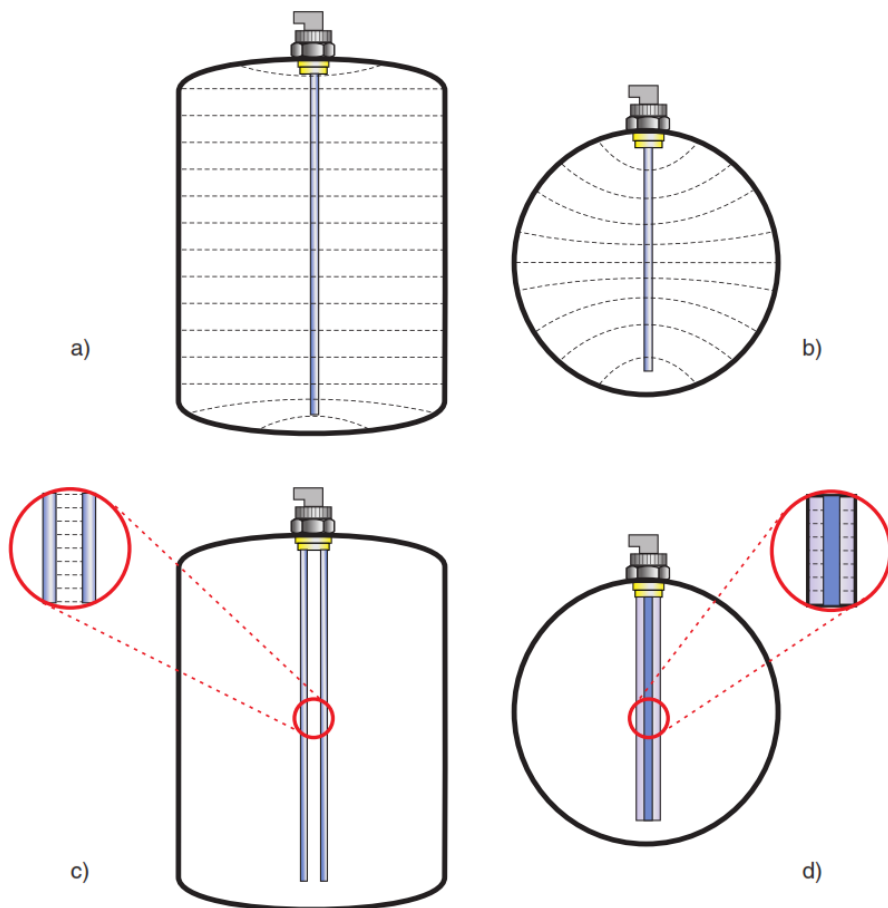


Obr. 41 – Schéma kapacitního snímače hladiny, pro kapaliny: a) nevodivé, b) vodivé, zdroj (Kadlec, 2017a)

Spojité kapacitní senzory, resp. jejich elektrody, se ve vertikální poloze osazují do víka provozní nádoby. Při montáži je nutné zajistit rovnoběžné umístění elektrody vzhledem ke stěně nádoby, protože jinak by byla statická charakteristika nelineární. V případě nádob se svislými stěnami (obr. 43a) bude závislost lineární takřka v celém rozsahu měření, u kulových či ležatých válcových nádob (obr. 43b) či nádob jinak tvarovaných, vyklenutých nebo s vestavbami to ale neplatí a je vhodnější použít senzor se dvěma elektrodami (obr. 43c) nebo s referenční trubicou okolo elektrody (obr. 43d).



Obr. 42 – Různá provedení kapacitních senzorů hladiny, a, b, c, d) spojitě snímače, e, f) spínače hladiny, zdroj (Kadlec, 2017a)

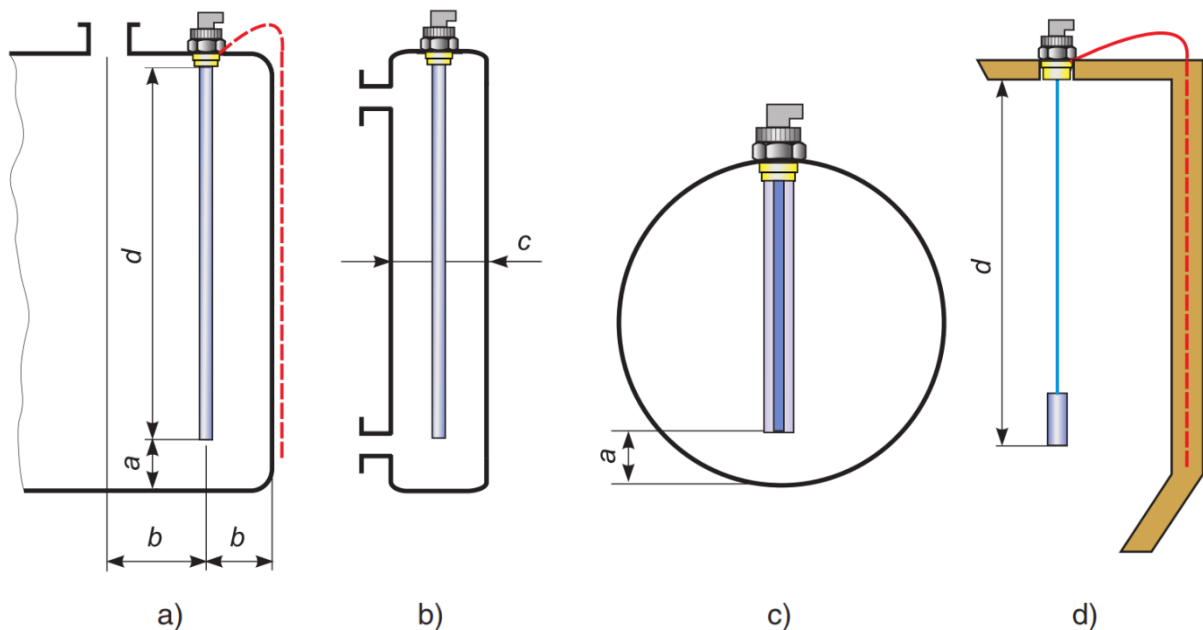


Obr. 43 – Vliv tvaru nádrže na linearitu měření u různých tvarů provozních nádob a, b) a použití vhodných typů senzorů c, d), zdroj (Kadlec, 2012)



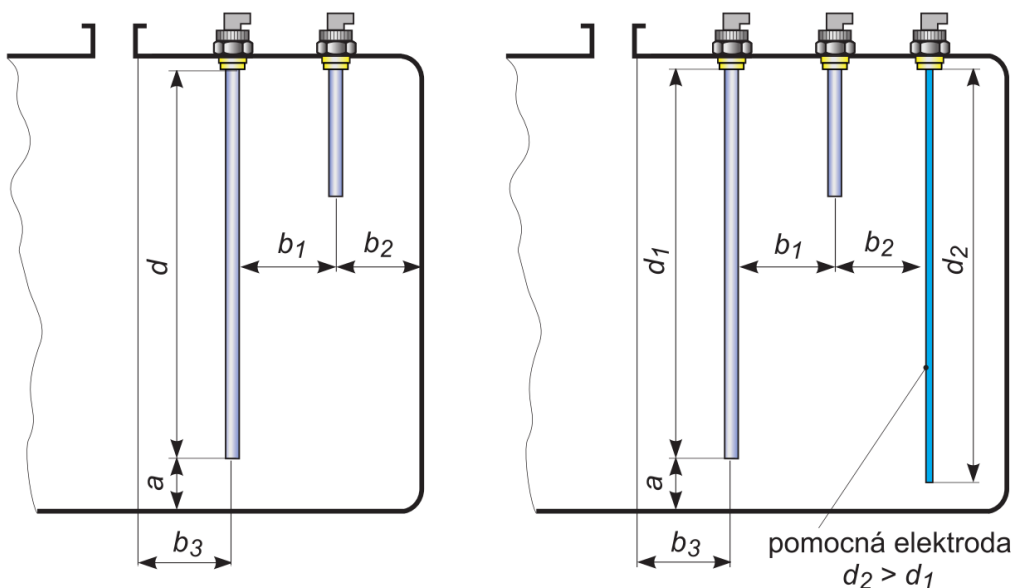
Obr. 44 – Průmyslové kapacitní snímače hladiny pro limitní a spojitě měření v různých provedeních, zdroj (Dinel, 2023a) a (Dinel, 2023b)

Na obr. 44 jsou různé varianty průmyslových kapacitních senzorů výšky hladiny od spol. Dinel. Uvedeny jsou jak typy se spojitým výstupem s tyčovými i lanovými elektrodami, tak i limitní detektory, v obou případech s izolovanými i neizolovanými elektrodami.



Obr. 45 – Možné způsoby instalace kapacitních senzorů hladiny se spojitým výstupem, varianty s nádobou: a) kovovou, nebo nevodivou s senzorem s pomocnou elektrodou, b) kovovou válcovou s malým průměrem, c) ležatou válcovou se senzorem s referenční trubicou a d) betonovým zásobníkem a senzorem s lanovou elektrodou, zdroj (Kadlec, 2012 – upraveno dle prospektů Dinel)

Instalace kapacitních senzorů vyžaduje dodržování určitých pravidel, resp. vzdáleností od stěn, dna, jiných senzorů, příp. od pomocných elektrod, viz obr. 45 (senzory se spojitým výstupem) a obr. 46 (limitní senzory). Např. při použití běžné tyčové sondy u nevodivých nádob, se instaluje pomocná elektroda (obr. 45a). V armovaných betonových zásobnících nebo silech může jako pomocná elektroda posloužit přímo ocelová výztuž (obr. 45d).



Obr. 46 – Možné způsoby instalace limitních kapacitních senzorů, varianty s nádobou: a) kovovou, b) z nevodivého materiálu, zdroj (Kadlec, 2012 – upraveno dle prospektů Dinel)

U úzkých provozních nádob bývá předepsán jejich minimální průměr (obr. 45b) a u nádob kulových nebo ležatých válcových (obr. 45c) se použije senzor s referenční trubicou.

Při měření v chemických a potravinářských provozech se mohou objevit problémy s tvorbou usazenin nebo pěny. K tomu účelu byly vyvinuty průmyslové vysokofrekvenční kapacitní senzory. Na obr. 47 jsou jejich různá provedení od spol. Dinel. Senzory řady RFLS jsou určeny do technologicky náročných provozů pro měření výšek různých pěnivých, kašovitých a pastovitých hmot. Mohou nahrazovat senzory vibrační, neboť jsou odolné vůči adhezi viskózních a ulpívajících médií. Disponují také unikátní funkcí rozlišení druhu média podle nastavitelné hodnoty permitivity. Lze je přímo montovat do nádrží, jímek, trubek, i nejrůznějších nálevků a zásobníků. Jsou vhodné i do prostředí výbušných, ale i s methanem nebo uhelným prachem v důlních provozech.



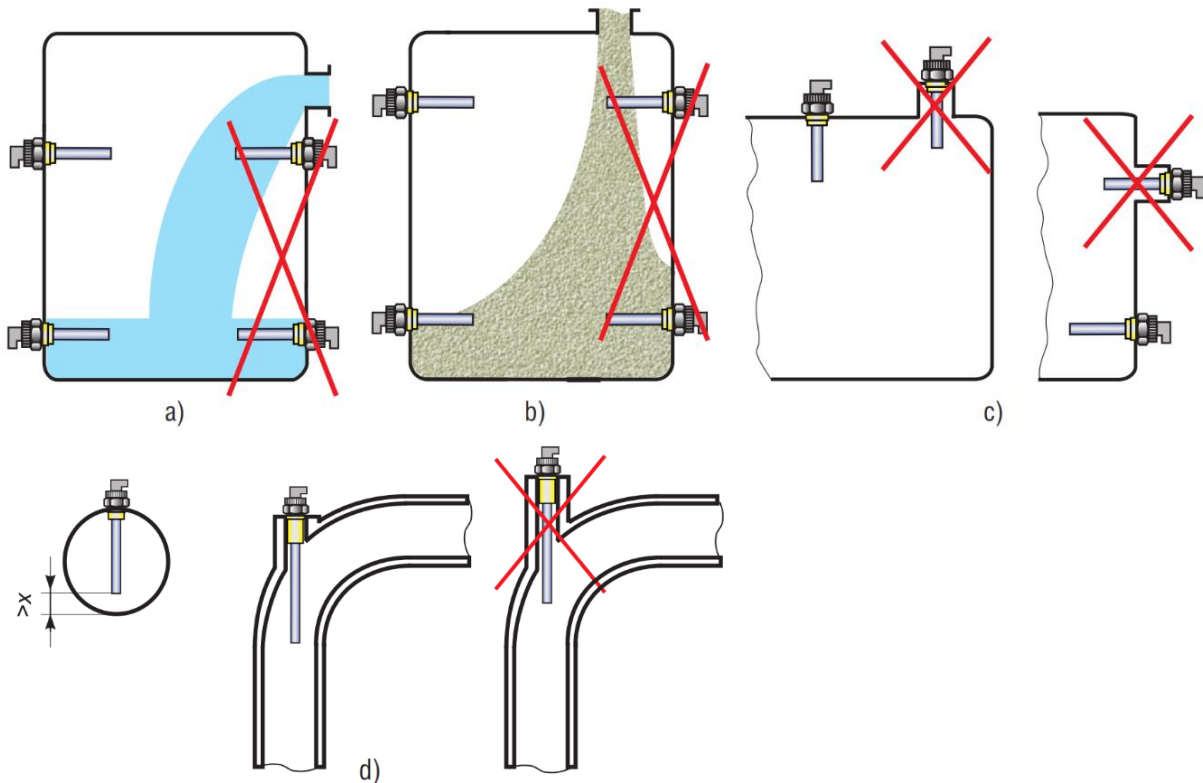
Obr. 47 – Průmyslové vysokofrekvenční kapacitní senzory řady RFLS, zdroj (Dinel, 2023c)

Důležitou skupinu senzorů tvoří kapacitní senzory přiblížení, používané k indikaci přítomnosti látek za elektricky nevodivými stěnami provozních nádob, potrubí nebo např. stavoznaků na obr. 48. Mohou být v klasickém provedení se závitem, ale i přeložkové, které lze upevnit pomocí stahovacích pásek nebo nalepením i na mírně zakřivené plochy. Varianta GPLS je pak přímo určená pro válcové stavoznaky.



Obr. 48 – Limitní kapacitní senzory hladiny: snímač přiblížení CPS (vlevo), příložné snímače pro skleněné nebo plastové stavoznaky GPLS (uprostřed) a pro nevodivé nádoby FLD (vpravo), zdroj (Dinel, 2023b)

Mezní kapacitní senzory umožňují také montáž horizontální, viz obr. 49. Měly by být osazovány mimo přímý přítok médií a nevhodná je i jejich instalace v úzkých hrdlech, ať už ve svislé nebo vodorovné poloze.



Obr. 49 – Umístění kapacitních senzorů a, b, c) a limitních spínačů d) hladiny, zdroj (Kadlec, 2012 a Kadlec, 2017a)

4.3 Kalorimetrické

Základem snímacího prvku kalorimetrického (tepelného, či také odporového) senzoru výšky hladiny je sonda s vyhříváním elektrickým rezistorem, nejčastěji termistorem.



Obr. 50 – Kalorimetrické hlídače hladiny, rozhraní hladiny a průtoku Thermatel TG a TD, zdroj (Hennlich, 2023b)

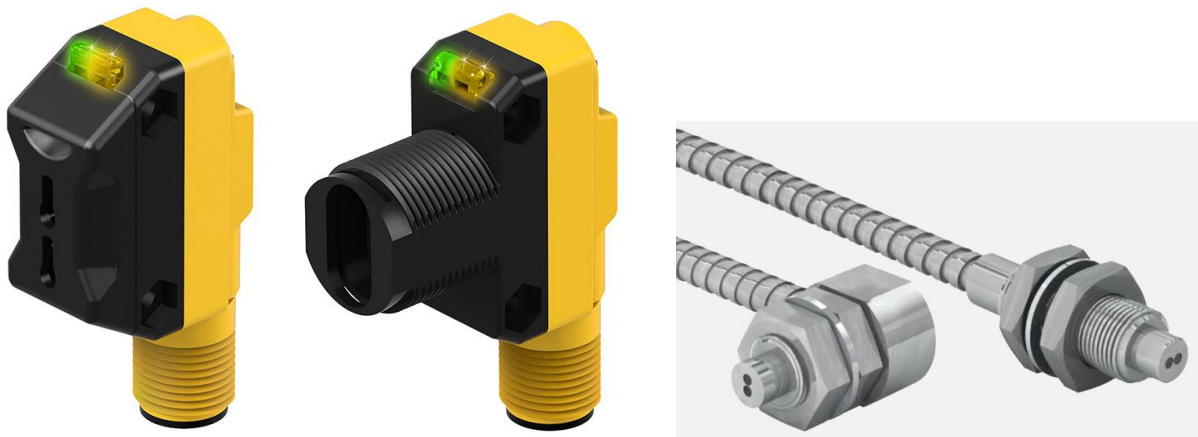
Okolní prostředí sondy totiž ovlivňuje přenos tepla z tepelného elementu do okolí. Odvod tepla do kapaliny je výrazně intenzivnější než např. do vzduchu. Při styku sondy s hladinou dojde k náhlému ochlazení vyhřívaného termistoru, čímž dojde ke změně jeho odporu. Tepelné hladinoměry se v praxi nejčastěji používají jako limitní indikátory hladiny, viz např. hlídače hladiny a rozhraní hladin Thermatel od spol. Hennlich na obr. 50. (Kadlec, 2005)

5 Optické senzory

Optické (fotoelektrické) senzory hladiny jsou principiálně poměrně jednoduché. Jsou tvořeny vhodným zdrojem IR nebo viditelného světelného záření (LED nebo laserová dioda) a detektorem (fotodioda, fototranzistor, fotorezistor). Fotoelektrické snímače jsou vhodné i pro extrémní teploty (až do 400 °C) a lze je montovat i do nádrží s agresivními kapalinami.

5.1 Reflexní

Tyto senzory využívají pro detekci výšky hladiny odrazu světla. Měřené médium může být jak kapalina, tak i sypká látka. Světelný paprsek je zdrojem světla v senzoru směřován přímo k povrchu měřeného média a po odrazu zpět je senzorem detekován (zdroj i detektor jsou v jednom pouzdře), viz provozní provedení senzorů na obr. 51. Výhodou těchto senzorů je především bezproblémová detekce prakticky jakýchkoliv médií, kapalin vodivých i nevodivých, barevných či zakalených, s různou permitivitou, hustotou atp. Nevýhodou je možné nebezpečí znečištění senzoru, které vede k jeho chybné funkci.



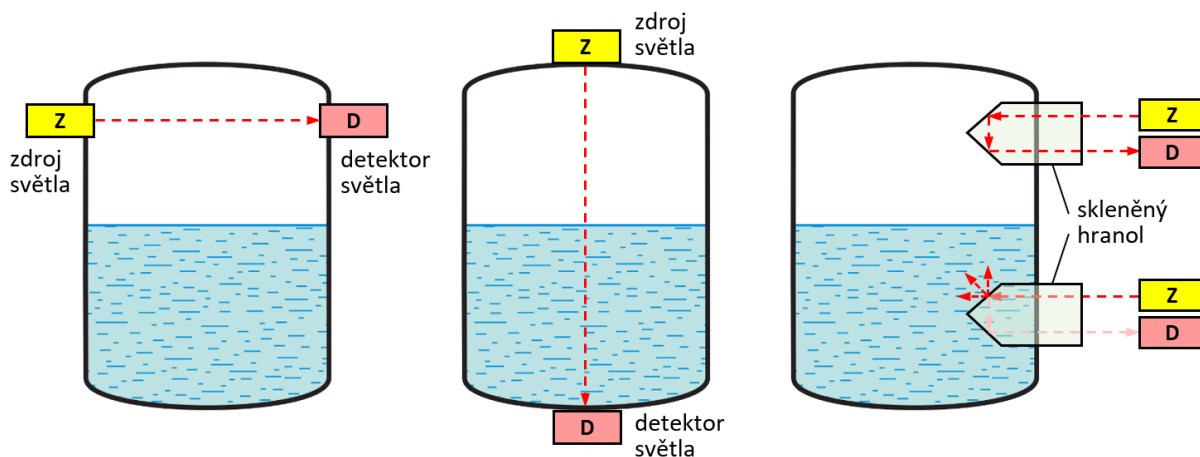
Obr. 51 – Optické senzory hladiny (vlevo) a čidla s plastovými světlovody (vpravo), zdroj (Hans Turck, 2023)

5.2 Transmisní

Transmisní (absorpční) optické senzory využívající průchodu světla médiem, viz obr. 52 vlevo a uprostřed. K tomu účelu se využívá skleněná nebo plastová průhledná nádoba, nebo nádoba opatřená průhledovými okénky. Mohou pracovat jako mezní spínače nebo i ve spojitém režimu, kdy se se změnou výšky hladiny mění intenzita detekovaného světla.

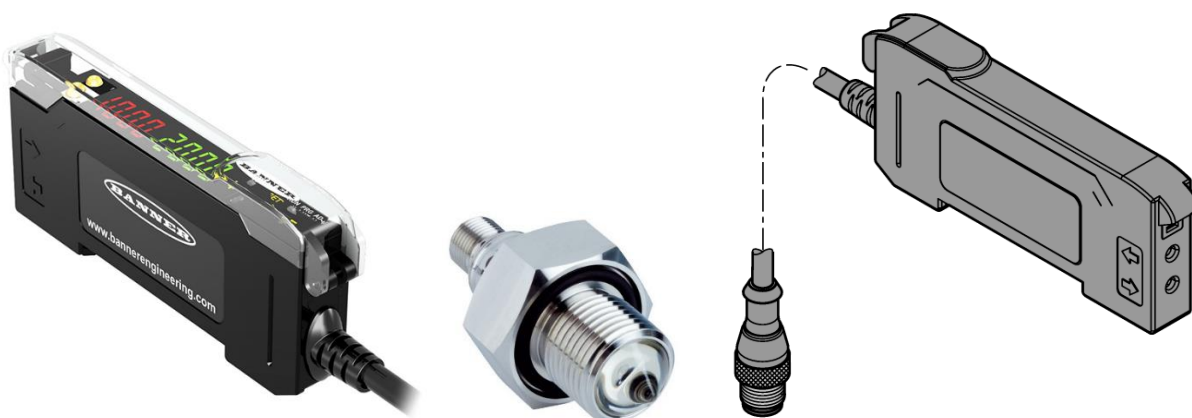
5.3 Refrakční

V případě senzoru s hranolem nebo světlovodem se využívá změna indexu lomu při změně okolního prostředí, resp. na rozhraní dvou optických prostředí (rozhraní médium – volný prostor). Veškeré emitované světlo se při poloze hranolu ve volném prostoru odrazí zpět do detektoru (totální odraz), nebo v případě přítomnosti média se v médiu rozptýlí a detektor je nezaznamená, viz obr. 52 vpravo. Senzory jsou použitelné i pro měření transparentních kapalin.



Obr. 52 – Schéma limitních fotoelektrických snímačů výšky hladiny: transmisní (vlevo a uprostřed) a refrakční s optickým hranolem (vpravo), zdroj autor dle (Kadlec, 2005a)

Variálně je možné použít refrakční senzor s optickým vláknem, viz obr. 53. Není-li přítomno měřené médium, světelný paprsek se odrazí od hladiny a je odveden zpět světlovodem k detektoru. Je-li optické vlákno zcela nebo částečně ponořené do kapaliny, část světla se láme směrem do kapaliny, takže intenzita světla snímaná detektorem se zmenší.



Obr. 53 – Optický senzor hladiny s plastovým světlovodem, zdroj (Hans Turck, 2023)

Dalším řešením je použití speciálního optického senzoru se šikmou špičkou na obr. 54. Dosažení hladiny je indikováno, když se kapalina dotkne šikmé plochy na konci senzoru. Senzor se v tomto případě umísťuje ve vertikální poloze.



Obr. 54 – Reflexní fotoelektrický detektor hladiny, zdroj (Omega Engineering, 2023)

6 Fyzikální senzory

Princip fyzikálních sensorů vychází ze změny některé z fyzikálních neelektrických veličin při změně výšky hladiny nebo při její indikaci. Do této skupiny patří senzory ultrazvukové, radarové (mikrovlnné) a radioizotopové (radiační).

6.1 Ultrazvukové

Základní princip činnosti ultrazvukových sensorů hladiny může být dvojitý. V případě spojitého měření je měřena doba šíření UZ vlny od jejího vyslání, přes odraz od hladiny až po detekci přijímačem (již dříve zmiňovaná metoda Time of Flight – ToF) a při známé rychlosti ultrazvuku, tj. zvuku s frekvencí větší než 20 kHz, v daném prostředí lze vypočítat výšku hladiny. Připomeňme, že v suchém vzduchu je při teplotě 0°C je rychlost zvuku $c = 331 \text{ ms}^{-1}$.

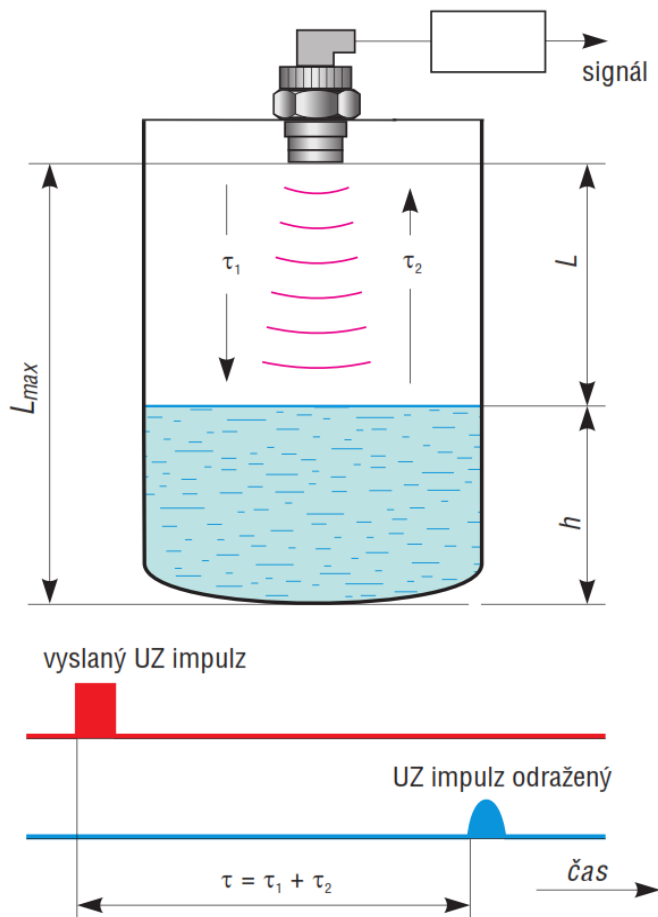
Při limitním měření se využívá buď útlumu (absorpce) UZ vln v souvislosti se složením okolního prostředí, nebo stejně jako u spojitého měření, doba šíření UZ vlny, s tím rozdílem, že senzor může být umístěn na boku nádoby z její vnější strany.

6.1.1 Spojité

Na obr. 55 je základní princip činnosti ultrazvukového hladinoměru využívajícího metodu ToF. Vysílač s přijímačem tvoří jeden celek umístěný v jednom pouzdře, které instaluje zpravidla ve víku provozní nádrže. Po vyslání UZ pulzu se měří doba letu až po návrat pulzu do přijímače. Skládá se ze dvou stejných úseků – od vysílače k hladině (doba τ_1) a od hladiny k přijímači (doba τ_2), tedy $\tau = \tau_1 + \tau_2$ a vzdálenost $L = c \tau / 2$. Výška hladiny se následně určí odečtením poloviny dráhy UZ paprsku od vzdálenosti L_{\max} ke dnu nádrže

$$h = L_{\max} - c \frac{\tau}{2} \quad (6)$$

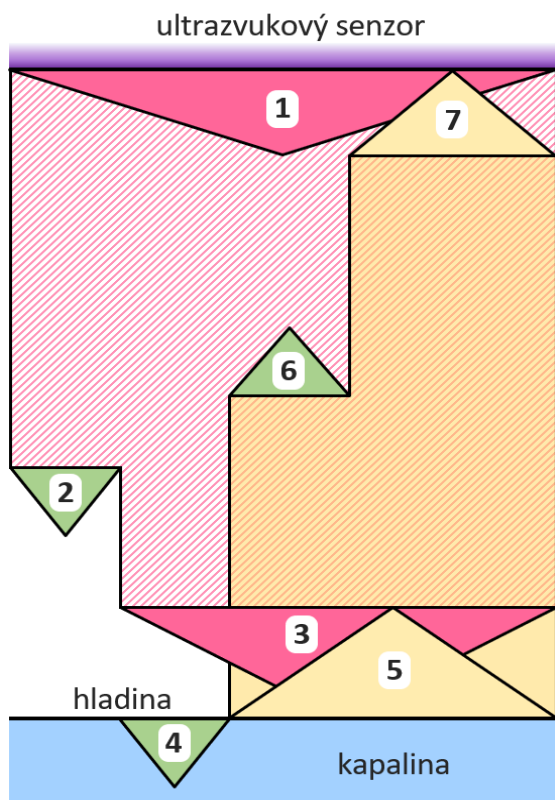
Naměřené doby se pohybují v rozmezí od desetin až po stovky ms. Jak již bylo uvedeno v opoře zabývající se měřením vzdálenosti, jako vysílače i přijímače se používají nejčastěji piezoelektrické, nebo méně častěji magnetostrikční měniče.



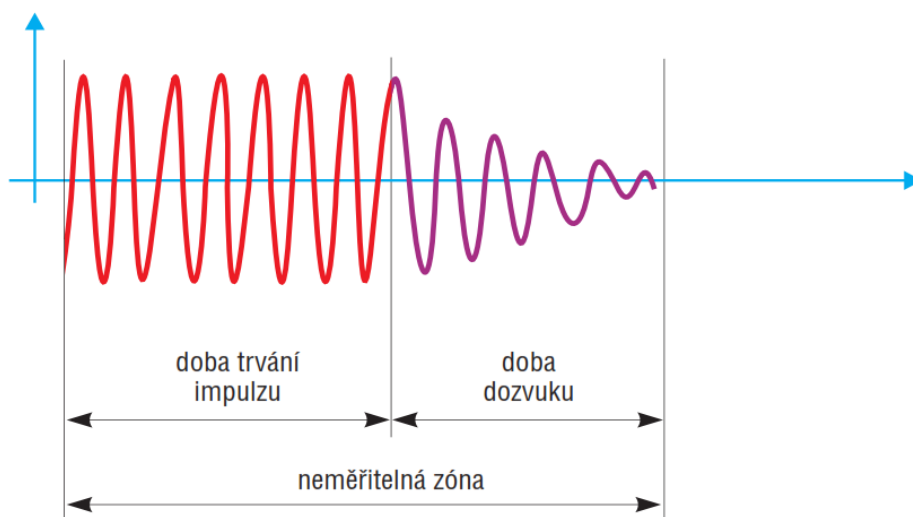
Obr. 55 – Základní princip ultrazvukového hladinoměru, zdroj (Kadlec, 2017b)

Povrch měřeného média zásadním způsobem ovlivňuje kvalitu odrazu UZ signálu. Odražená vlna musí mít z důvodu správné funkce senzoru dostatečnou energii. V případě kapaliny s pěnou na povrchu nebo sypkých granulátů se od povrchu bude odrážet významně méně energie, takže je nutné použít signál s vyšší počáteční energií. Základní energetické poměry jsou ilustrovány na obr. 56. Z uvedeného plyne, že **měřicí dosah senzoru** je závislý na energetických ztrátách (útlumu) UZ signálu cestou od vysílače nazpět k přijímači.

Také minimální měřená vzdálenost je limitována, takže poblíž senzoru se nachází **neměřitelná zóna**. To je dáno faktem, že kmity vyslaného UZ impulzu po vypnutí piezoměniče doznívají po určité době. Zmiňovaná neměřitelná zóna je tedy dána tzv. **mrtvou dobou**, tj. součtem doby trvání impulzu a doby dozvuku (obr. 57) a je s ní nutné při instalaci senzoru počítat. V rámci provozní nádoby ji lze eliminovat např. pomocí delšího nátrubku, viz obr. 58.

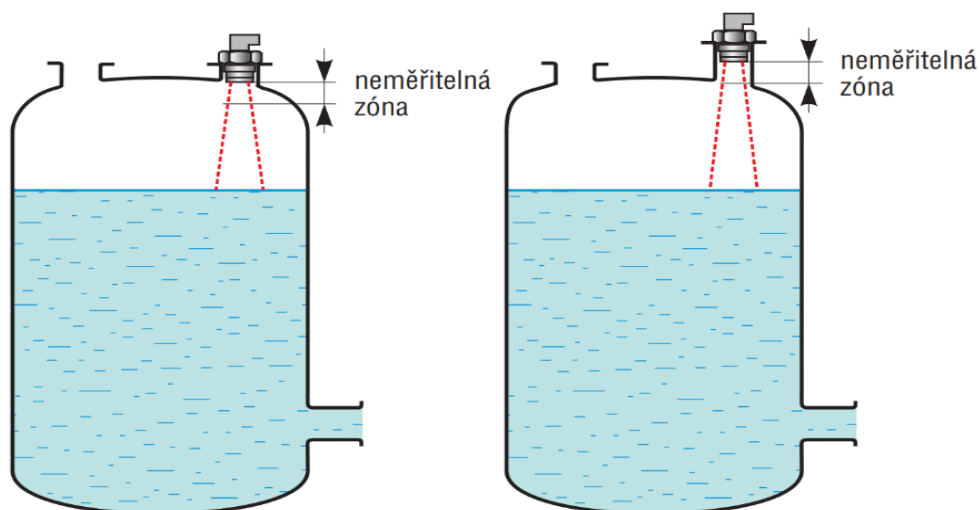


Obr. 56 – Energetická bilance ultrazvukového signálu: 1) energie vyslaného signálu, 2) energetická ztráta útlumem prostředí, 3) energie dopadající na hladinu, 4) energetická ztráta absorpcí v kapalině, 5) odražená energie, 6) energetická ztráta útlumem v prostředí, 7) energie signálu přijatého senzorem, zdroj autor dle (JSP, 2023)



Obr. 57 – Průběh dozívání kmitů vysílače, zdroj (Kadlec, 2017b)

Příklady spojitých průmyslových ultrazvukových senzorů hladiny jsou na obr. 59. Senzory mohou být realizovány buď v kompaktním provedení (s hlavicí s vestavěnou elektronikou a zobrazovacím displejem), nebo v provedení integrovaném s dálkovým přenosem výstupního signálu a to jak pro kapaliny, tak i pro sypké látky. Rozlišovací schopnost těchto snímačů může být v závislosti na typu až 1 mm, měřicí rozsah od desetin až po desítky m s chybou 0,1 % z rozsahu.



Obr. 58 – Neměřitelná zóna ultrazvukového senzoru, zdroj (Kadlec, 2017b)

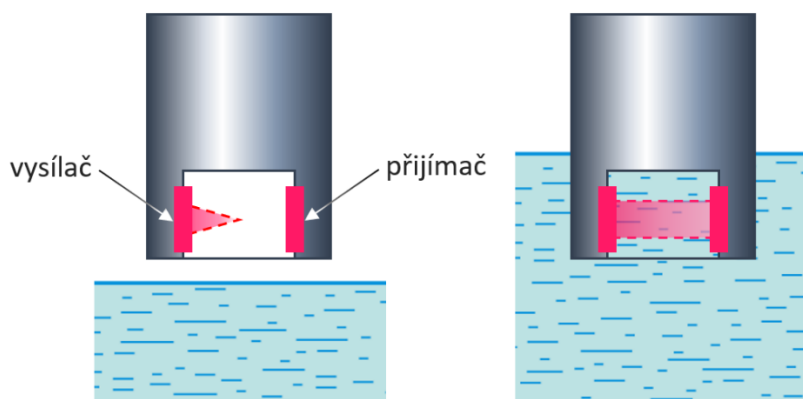


Obr. 59 – Průmyslové ultrazvukové senzory EasyTREK: kompaktní (vlevo) a integrované pro kapaliny (uprostřed) a sypké látky (vpravo), zdroj (Nivelco Process Control, 2022a)

6.1.2 Limitní

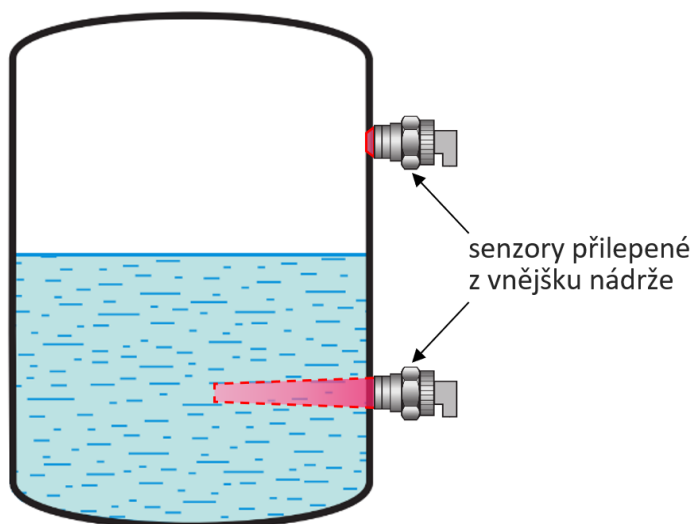
Při detekci hladiny ultrazvukovými senzory se využívá jevu absorpce UZ vln, ale i metoda ToF podobně jako u senzorů spojitých. Senzory nacházejí uplatnění při limitním bezdotykovém snímání hladiny kapalných látek, pastovitých hmot a sypkých materiálů v otevřených i uzavřených jímkách, otevřených kanálech, nádobách apod.

V případě senzoru pracujícího **na principu absorpce**, je při průchodu UZ vlnění vzduchem tlumena amplituda a přijímač umístěný naproti vysílači signál nedetekuje. Jakmile bude v prostoru senzoru kapalina, signál jí snadno projde a je detekován přijímačem, viz obr. 60.



Obr. 60 – Princip ultrazvukového limitního hladinového senzoru, zdroj autor dle (JSP, 2023)

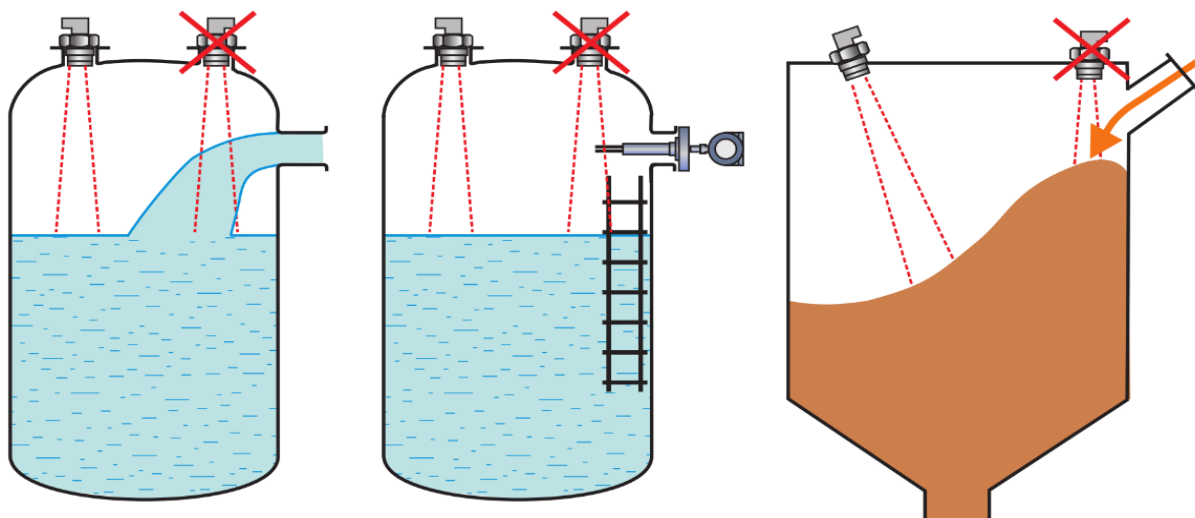
V případě tzv. **reflexního limitního senzoru**, který se obvykle instaluje z boční strany nádoby (k navařenému hrdlu, nebo nalepením), a v závislosti, je-li v rovině snímače vzduch nebo měřená kapalina, se buď z větší části odrazí zpět, nebo naopak kapalinou projde, viz obr. 61. Přijímačem je tedy detekován buď přichodzí signál s velkou energií (vzduch) nebo s energií velmi malou (kapalina). Praktická provedení obou uvedených variant senzorů jsou na obr. 62.



Obr. 61 – Princip ultrazvukového reflexního limitního senzoru, zdroj autor dle (JSP, 2023)



Obr. 62 – Limitní ultrazvukové senzory hladiny: Hennlich Echotel s absorpcí (první dva zleva) a Dinel řady ULS na principu ToF, zdroj (Dinel, 2023b)



Obr. 63 – Vhodná a nevhodná umístění ultrazvukových senzorů hladiny, zdroj (Kadlec, 2017b)

6.2 Radarové

Senzory radarové (resp. mikrovlnné) pracují obdobným způsobem jako ultrazvukové. Rozdílem je využití mikrovlnného elektromagnetického záření o vysokých frekvencích v rozmezí 1 až 300 GHz. U hladinoměřů se používají typicky frekvence od 5,8 do 26 GHz, u některých speciálních aplikací někdy i vyšších. Mikrovlnné záření se ve vakuu a přibližně i ve vzduchu šíří rychlostí světla $v_s = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$. Rychlost šíření v jiných médiích je závislá na permitivitě. Při dosažení hladiny dobře vodivých kapalin dochází k téměř dokonalému odrazu vlnění. U kapalin nevodivých je účinnost odrazu vlnění dána permitivitou kapaliny.

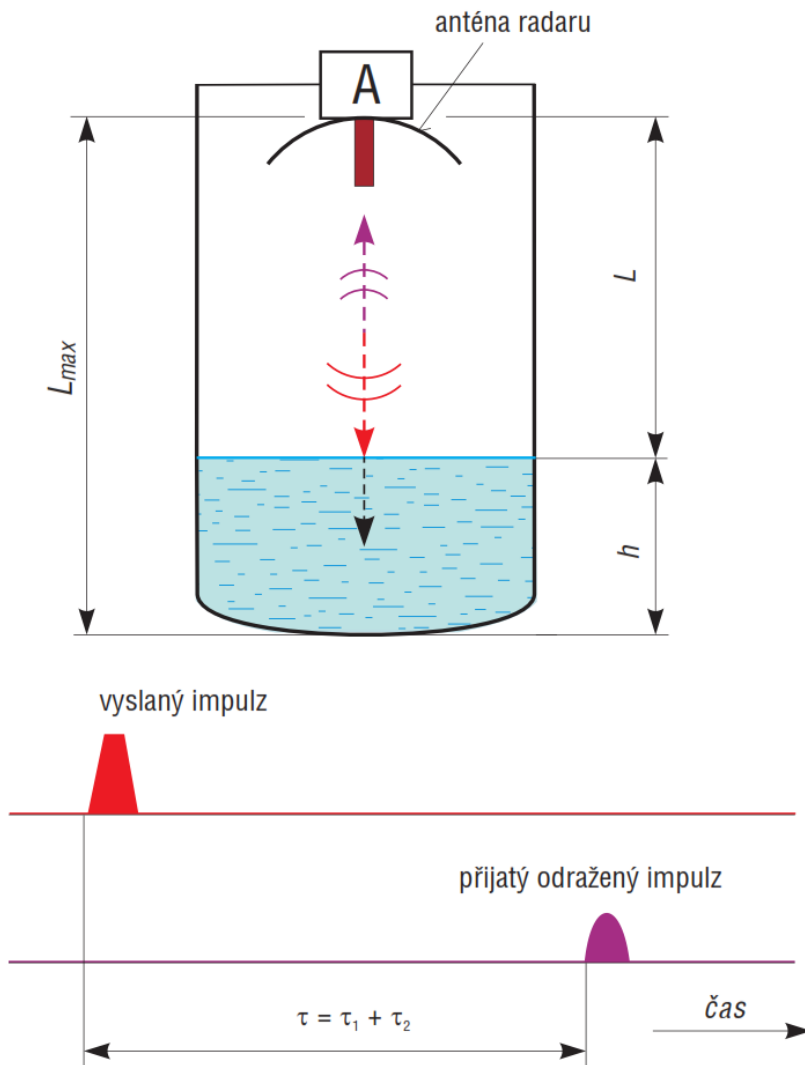
6.2.1 Bezkontaktní

Pulzní radarový senzor hladiny vysílá pomocí antény mikrovlnné pulzy (např. s frekvencí 6 GHz a dobou trvání cca 1 ns) v normálovém směru k hladině. Při jejím dosažení se většina mikrovln odrazí zpět k senzoru a část projde do měřeného média. Podobně jako u ultrazvukových senzorů se měří metodou ToF čas potřebný k dosažení hladiny a k návratu zpět k senzoru, viz obr. 63. Výška hladiny se určí dle výše uvedeného vztahu (6), ale s respektováním rychlosti šíření mikrovln, tedy $c = v_s$.

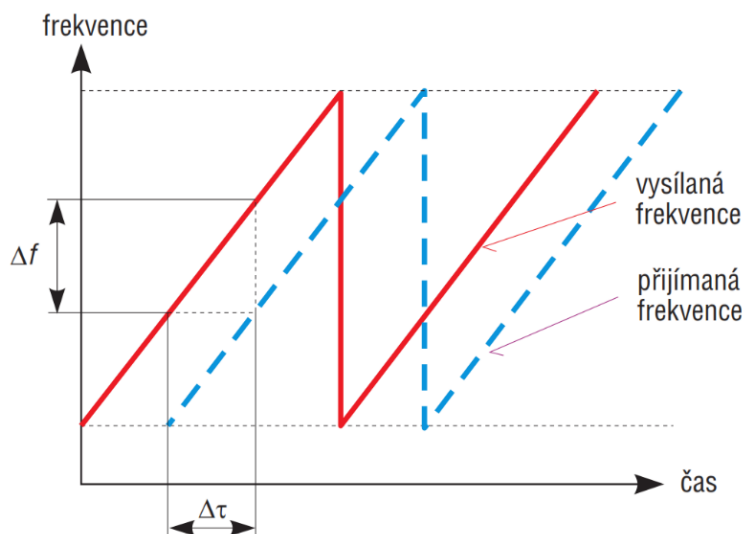
Kvůli značným nárokům na přesnost měření času v případě pulzního radaru se spíše používá radar s frekvenčním rozmítáním. Uvažme, že jedna perioda měření trvá řádově 10^{-6} s a při přesnosti měření s chybou menší než 1 mm je potom nezbytně nutné měření času s rozlišením $6 \cdot 10^{-12}$ s.

Činnost **radaru s frekvenčně rozmítaným spojitým signálem** je založena na vysílání tzv. FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) signálu s pilovou modulací, viz obr. 65. frekvence se mění lineárně v daném pásmu (např. od 24 do 26 GHz). Výška hladiny se určí na základě naměřených hodnot frekvencí vyslaného a přijatého odraženého signálu, resp. ze zpoždění

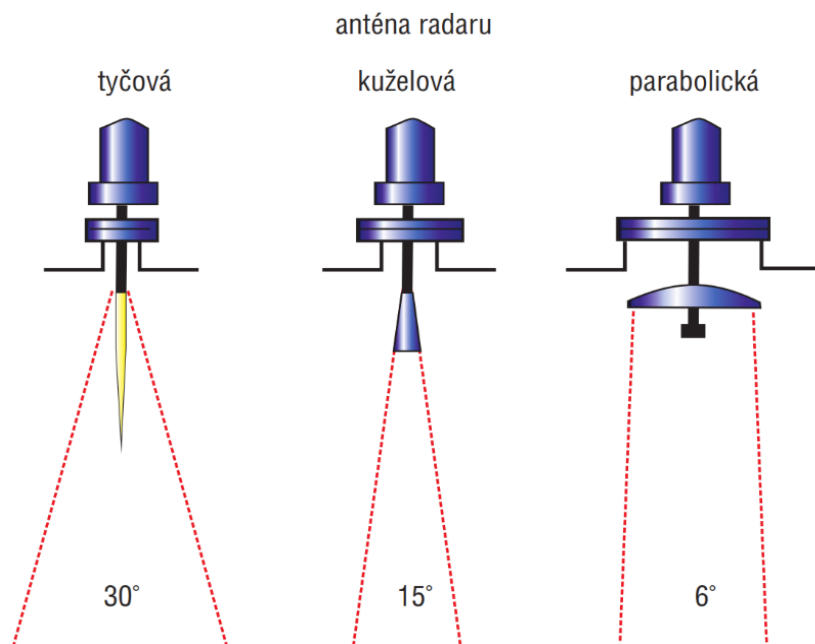
odraženého signálu. Rozdílu frekvencí Δf pak odpovídá časový interval $\Delta\tau$ úměrný aktuální poloze hladiny. Výhodou tohoto přístupu je, že rozdíl frekvencí lze i při požadované přesnosti měření s rozlišením 1 mm určit velmi přesně.



Obr. 64 – Princip pulzní metody měření výšky hladiny, zdroj (Kadlec, 2017b)



Obr. 65 – Průběh vysílaného a přijímaného signálu u frekvenční metody, zdroj (Kadlec, 2017b)



Obr. 66 – Základní typy radarových antén, zdroj (Kadlec, 2017b)

Radarové senzory hladiny jsou dodávány s více typy antén. Nejpoužívanější jsou tři typy antén, viz obr. 66. Senzor s **tyčovou anténou** lze jednoduše instalovat v úzkém hrdle nebo nátrubku, má ale příliš široký vyzařovací úhel (cca 30°) a nižší citlivost, takže je použitelné pouze pro kratší vzdálenosti, jen cca do 10 m. Při použití **kuželové antény** je vyzařovací úhel nižší (cca 15°) a zvýší se i citlivost a měřicí rozsah (až do 20 m). Nejpřesnější jsou **parabolické antény**, které mají příznivý vyzařovací úhel (cca 6°), vysokou citlivost a lze s nimi měřit až vzdálenosti okolo 40 m. Vzhledem ke svojí šířce se ale hůře instalují, neboť potřebují velký montážní otvor. Příklady provedení sensorů s uvedenými typy antén jsou na obr. 67.



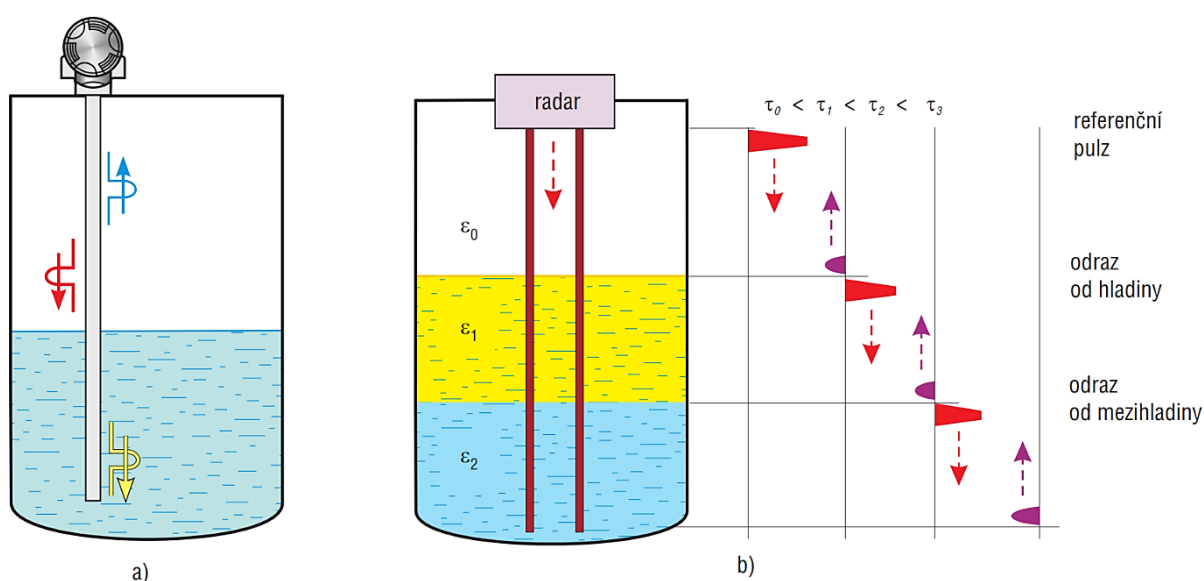
Obr. 67 – Průmyslové radarové senzory hladiny PiloTREK s různými anténami: tyčovou (vlevo), kuželovou (uprostřed) a parabolickou (vpravo), zdroj (Nivelco Process Control, 2022a)

6.2.2 Reflektometrické

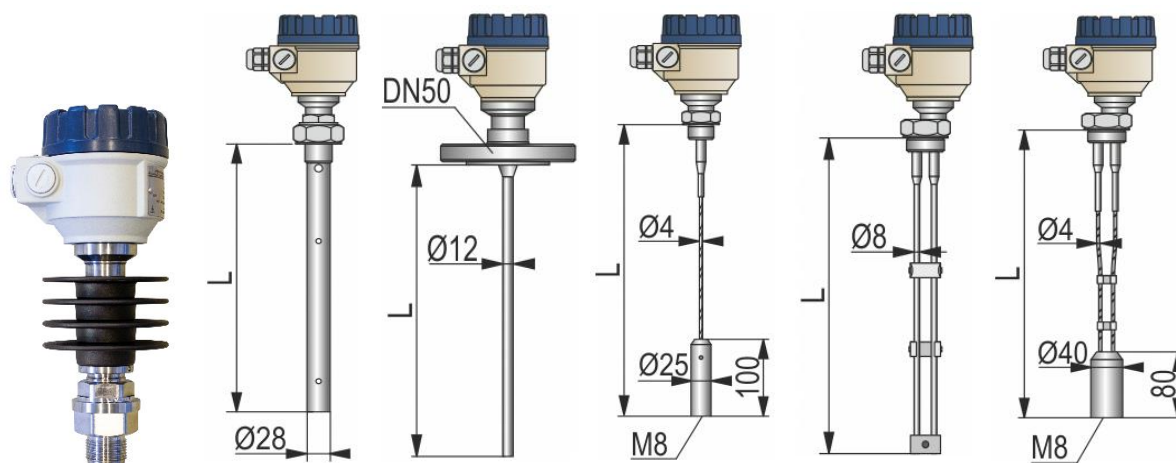
Reflektometrické hladinoměry, přesněji označované jako kontaktní radarové hladinoměry s vedenou vlnou, využívají k šíření mikrovlnných pulzů speciální vlnovody. Vlnovod může být

v podobě koaxiálního kabelu, dvojlinky, tyče, dvojice tyčí, nebo lana s teflonovým povlakem. Princip funkce je založen na faktu, že pokud vedení není impedančně zakončeno, dochází k odrazu mikrovln v úrovni hladiny a intenzita odražených vln je úměrná permitivitě měřeného média. Lze měřit i polohu rozhraní dvou kapalin o různé permitivitě.

U médií s vyšší relativní permitivitou ($\epsilon_r > 1,8$) může být měřena přímo doba mezi vysláním pulzu a přijetím pulzu odraženého. Metoda je označována TDR (Time Domain Reflectometry). V případě měření polohy rozhraní, viz obr. 68b, musí být známá hodnota permitivity horní (zde žluté) kapaliny a zároveň musí být její permitivita menší než u kapaliny pod ní (modré). Příklady různých reflektometrických radarových senzorů v průmyslovém provedení jsou uvedeny na obr. 69. Nevýhodou těchto typů senzorů je kontakt s měřeným médiem, nicméně funkce radaru není zatížena falešnými odrazy a nevádí ani přítomnost pěny, páry a prachových částic.



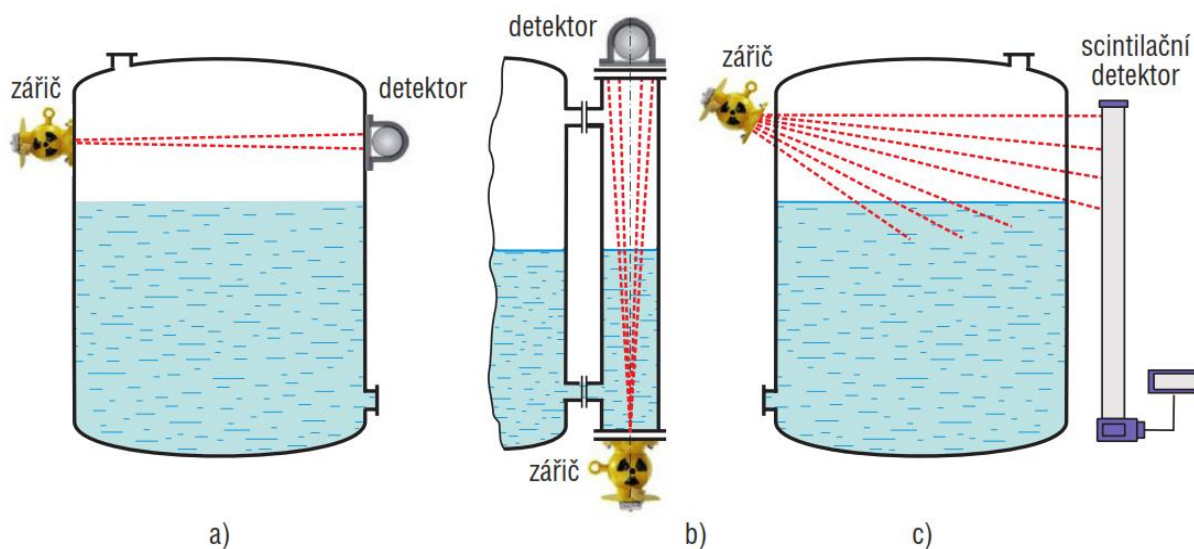
Obr. 68 – Schéma radarového hladinoměru s vedenou vlnou, a) základní princip, b) měření rozhraní dvou kapalin zdroj (Kadlec, 2017b)



Obr. 69 – Průmyslové radarové senzory hladiny s vedenou vlnou MicroTREK: hlavice s převodníkem (vlevo) a schéma možných provedení s tyčemi nebo lany (Nivelco Process Control, 2022a)

6.3 Radioizotopové

Využívá se u nich poklesu intenzity radioaktivního záření s šířkou vrstvy média mezi zdrojem záření a detektorem. Intenzita záření dopadajícího na detektor je přímo závislá na mocnosti vrstvy měřeného materiálu, takže samozřejmě mění i při změně výšky hladiny. Na obr. 70a je konfigurace zářiče a detektoru při limitních měřeních, kdy dochází ke skokové změně absorpce. Ke spojitě změně intenzity dochází při měření výšky hladiny (obr. 70b). Měření se v tomto případě provádí v obtokovém kanálu. Lze také využít scintilační detektor, který může být umístěn zcela mimo nádrž (obr. 70c).



Obr. 70 – Princip radioizotopových hladinoměrů, měření: a) limitní, b) spojitě, c) se scintilačním detektorem, zdroj (Kadlec, 2017b)



Obr. 71 – Průmyslové systémy pro radiometrické měření výšky hladiny, postupně zleva doprava: zdroj gama záření VEGASOURCE s ochranným krytem, detektor POINTRAC, zdroj gama záření FSG, ochranný kontejner FQG a detektor Gammapiilot FMG, zdroj (VEGA Controls, 2023) a (Endress+Hauser Czech, 2023)

Zdroje potřebného **radioaktivního gama záření**, které prochází prakticky všemi materiály, ale zároveň nezpůsobuje jejich aktivaci (radioaktivitu), obsahují izotopy s delším poločasem rozpadu, např. cesium a kobalt. Izotop cesia Cs 137 má poločas rozpadu 30,5 roku, u izotopu kobaltu Co 60 je to 5,5 roku. Zdroj gama záření musí být v olověném ochranném krytu s tloušťkou v řádu desítek cm.

Záření se detekuje buď s využitím **Geiger-Müllerova detektoru** nebo pomocí **scintilačního detektoru s fotonásobičem**. Příklady zářičů a senzorů s Geiger-Müllerovými detektory jsou na obr. 71, několik provedení scintilačních detektorů pak na obr. 72. Zmiňované detektory jsou citlivé na okolní teplotu, což se u Geiger-Müllerových detektorů řeší při teplotách nad 60 °C oddělením elektroniky od detektoru. U scintilačních detektorů je nutné zajistit, aby nebyla překročena teplota 55 °C.



Obr. 72 – Různá provedení scintilačních sond Victoreen pro detekci ionizujícího záření, zdroj (Blue Panther, 2023)

Hlavní výhodou radioizotopových senzorů je, že se instalují vně provozních nádob. Lze s nimi měřit prakticky jakékoliv médium a to i při velmi nepříznivých podmínkách, kdy všechny ostatní způsoby měření selhávají. Je však zároveň nutné, chránit obsluhu před účinky radioaktivity a provádět zákonem předepsané pravidelné kontroly měřicího zařízení.

7 Otázky a úkoly

- 1) Vyjmenujte a stručně popište vám známé typy plovákových snímačů hladiny.
- 2) K čemu jsou určeny a na jakých principech pracují elektromechanické senzory hladiny?
- 3) Uveďte základní princip činnosti hydrostatických senzorů hladiny? Jak se liší měření v otevřené a uzavřené nádobě a k čemu se dají využít tzv. membránové oddělovače?
- 4) Vyjmenujte základní typy elektrických senzorů hladiny. Načrtněte možné způsoby jejich instalace.
- 5) Co jsou to fyzikální senzory hladiny? Na jakých principech pracují?

8 Použitá literatura

AFRISO, spol. s r. o., 2023. Pneumatické hladinoměry [online]. [citováno 30. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://eshop.afriso.cz/mereni-vysky-hladiny/pneumaticke-hladinomy/c-204>>

BLUE PANTHER, s. r. o., 2023. *Sondy pro detekci ionizujícího záření: scintilační sondy, Geiger-Mullerovy sondy, GM sondy pro detekci alfa, beta, gama a rentgenového záření od společnosti Victoreen* [online]. [citováno 30. 5. 2023]. Dostupné z WWW:

<<https://www.blue-panther.cz/sondy-pro-detekci-ionizujiciho-zareni>>

D-EX INSTRUMENTS, s. r. o., 2022. *Přímý skleněný stavoznak LGG* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.dex.cz/produkt/primy-skleneny-stavoznak-igg/>>

D-EX INSTRUMENTS, s. r. o., 2023. *Hladinové spínače* [online]. [citováno 30. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.dex.cz/kategorie_produkty/limitni_spinace_hladiny/>

ĎAŘO, Stanislav, Ludvík Bejček a Antonín Platil, 2011. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-313-5.

DINEL, s.r.o., 2023a. *Kontinuální hladinoměry* [online]. [citováno 29. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.dinel.cz/vyrobky/kontinualni-hladinomery>>

DINEL, s.r.o., 2023b. *Limitní hladinové snímače* [online]. [citováno 29. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.dinel.cz/vyrobky/limitni-hladinove-snimace>>

DINEL, s.r.o., 2023c. *Vysokofrekvenční hladinové snímače RFLS-35* [online]. [citováno 29. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.dinel.cz/vyrobky/limitni-hladinove-snimace/vysokofrekvencni-hladinove-snimace-rfls-35>>

ENDRESS+HAUSER Czech, s.r.o., 2023a. *Konduktivní měření hladiny: detekce limitní hladiny ve vodivých kapalinách* [online]. [citováno 29. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-hladiny/konduktivni-mereni-hladiny>>

ENDRESS+HAUSER Czech, s.r.o., 2023b. *Vibronic Point level detection Soliphant FTM20* [online]. [citováno 29. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-hladiny/Vibronic-level-Soliphant-FTM20>>

HANS TURCK, GmbH & Co. KG, 2023. *Snímače hladiny* [online]. [citováno 26. 5. 2023]. Dostupné z WWW:

<<https://www.turck.cz/cs/productgroup/Senzory/SnC3%ADma%C4%8De%20Hladiny>>

HENNLICH, s.r.o., 2023a. *Hladinoměry* [online]. [citováno 26. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.hennlich.cz/meres/hladinomery/>>

HENNLICH, s.r.o., 2023b. *Hladinové spínače* [online]. [citováno 26. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.hennlich.cz/meres/hladinove-spinace/>>

INSTRUMENTATION TOOLS, 2022. *What is Dip Tape Level Measurement?* [online]. [citováno 25. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://instrumentationtools.com/wp-content/uploads/2019/12/Dip-Tape.png?ezimgfmt=ng:webp/ngcb2>>

JSP, s. r. o., 2023. *Měření hladiny: principy ultrazvukových hladinoměrů* [online]. [citováno 25. 6. 2023]. Dostupné z WWW:

http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_hladiny/teorie-hladina/ultrazvukove-hladinomeru/principy-ultrazvukovych-hladinomeru.html

KADLEC, Karel, 2005a. Snímače polohy hladiny – principy, vlastnosti a použití (část 1). *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **11**(5). ISSN 1210-9592.

KADLEC, Karel, 2005b. Snímače polohy hladiny – principy, vlastnosti a použití (část 2). *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **11**(6). ISSN 1210-9592.

KADLEC, Karel, 2011. Plovákové a vibrační hladinové spínače. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **17**(5), 20-22. ISSN 1210-9592.

KADLEC, Karel, 2012. Kapacitní snímače polohy hladiny. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **18**(5), 38-41. ISSN 1210-9592.

KADLEC, Karel a Jan Vaculík, 2014. Hydrostatické hladinoměry – princip, vlastnosti a použití. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **20**(7), 35-38. ISSN 1210-9592.

KADLEC, Karel, 2016. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření hladiny (část 1.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **132**(12), 394-398. ISSN 1805-9708.

KADLEC, Karel, 2017a. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření hladiny (část 2.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **133**(1), 34-38. ISSN 1805-9708.

KADLEC, Karel, 2017b. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření hladiny (část 3.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **133**(2), 74-78. ISSN 1805-9708.

KUPKA, Libor, 2022. *Základy mechatroniky: výukový materiál*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

NATIONAL MAGNETICS SENSORS, Inc., 2022. *Non-Electric Indicators* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://nationalmagnetic.com/products/non-electric-indicators/>

NIVELCO PROCESS CONTROL, spol. s r. o., 2013. *Nivorota: rotační lopatkové snímače pro sypké látky*.

NIVELCO PROCESS CONTROL, spol. s r. o., 2022a. *Snímače hladiny* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.nivelco.com/products#!/category/1>

NIVELCO PROCESS CONTROL, spol. s r. o., 2022b. *Spínače hladiny* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.nivelco.com/products#!/category/2>

RS COMPONENTS, Sp. z o.o., 2022. *Indikátory hladiny kapaliny* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://cz.rs-online.com/web/c/pneumatika-a-hydraulika/pristroje-a-spinace-pro-hydrauliku/indikatory-hladiny-kapaliny/>

UNIMETRA, spol. s r. o., 2023. *Měřicí pásma speciální: měřicí pásma pro měření výšky hladin a měřicí pásma pro ropný průmysl* [online]. [citováno 25. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <http://www.unimetra.cz/cz/katalog/carkova-a-delkova-meridla/merici-pasma/110-merici-pasma-specialni.html>

UWT, GmbH, 2022. *NivoBob – Electromechanical Lot system / plumb bob sensor* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW:

<<https://www.uwtgroup.com/en/products/continuous-level-measurement/electromechanical-lot-system/nivobob.html>>

VEGA CONTROLS Ltd., 2023. *PROTRAC: Radiation-based level measurement* [online].

[citováno 25. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.vega.com/en-uk/products/product-catalog/level/radiation-based>>

Seznam zkratek

| | |
|------|--|
| DN | diamètre nominal (jmenovitý vnitřní průměr potrubí / světlost potrubí) |
| FMCW | frequency modulated continuous wave (frekvenčně modulovaný spojitý signál) |
| HART | highway addressable remote transducer (komunikační protokol) |
| IP | ingress protection (stupeň krytí) |
| PE | polyetylén |
| PP | polypropylén |
| PS | polystyrén |
| TDR | time domain reflectometry |
| ToF | time of flight (doba letu) |
| UZ | ultrazvuk |

Rejstřík

Boyle-Mariottův zákon, 29
energetická bilance ultrazvukového signálu, 43
fotoelektrické. viz optický senzor
Geiger-Müllerův detektor, 52
HART protokol, 21, 55
hladinoměr, 1, 13, 28
 elektrický senzor, 30
 kalorimetrický, 38
 kapacitní, 31, 32, 33, 34, 35
 vysokofrekvenční, 36
 vodivostní, 30, 31
fyzikální senzor, 40
 radarový, 3, 46, 49
 bezkontaktní, 3, 47
 reflektometrický, 50, 51

- radioizotopový, 1, 3, 51
- ultrazvukový, 3, 41, 42, 43, 44, 46
- hydrostatický senzor, 20
 - hydrostatického tlaku, 20, 54
 - kapacitní, 22
 - s ponornou sondou, 27
 - tenzometrické, 21
 - tenzometrický, 22
 - pneumatický, 28, 30, 53
 - s probubláváním, 28, 29
 - využívající Boyle-Mariottův zákon, 29
- mechanický snímač, 4
 - elektromechanický olovnicový, 17
 - lopatkový, 2, 19
 - měrná tyč, 6
 - páska s olovníci, 6
 - plovákový, 2, 7, 9, 10, 54
 - mechanický stavoznak, 7
 - obtokový, 13, 14
 - překlápěcí, 11, 12, 13
 - kabelový, 13
 - s pákovým mechanismem, 8
 - miniaturní s jazýčkovým kontaktem, 9
 - s magnetickou spojkou, 8
 - s vodící tyčí, 9, 11
 - se speciálním ramenem pro vertikální montáž, 12
 - průhledový, 4
 - obtoková trubice, 4
 - obtokový stavoznak, 4, 5, 6
 - skleněný průzor, 4
 - vibrační, 18
 - vztlakový, 14, 15, 16
- optický senzor, 38, 39
 - reflexní, 2, 38, 40
 - refrakční, 2, 39
 - s optickým vláknem, 40
 - transmisní, 2, 39
- keramická membrána, 23
- kompensace vlivu změn hustoty, 26
- limitní senzor. viz spínač hladiny
- membránový oddělovač, 23, 24
- mikrovlnný. viz radarový
- mrtvá doba. viz neměřitelná zóna
- neměřitelná zóna, 42
- Pascalův zákon, 20
- plovák, 1, 7, 9
- ponorné těleso, 14, 15, 16

připojení
 mokré, 25
 suché, 24
radarová anténa
 kuželová, 49
 parabolická, 49
 tyčová, 49
radioaktivní gama záření, 52
s vedenou vlnou. *viz* reflektometrický
scintilační detektor, 1, 51, 52
scintilační sonda. *viz* scintilační detektor
spínač hladiny, 2
 fotoelektrický, 40
 kalorimetrický, 38
 kapacitní, 31, 33, 36
 příložný, 37
 lopatkový, 20
 ultrazvukový, 45
 absorpční, 44
 reflexní, 45
 vibrační, 17, 18, 19
 vodivostní, 31
stavoznak. *viz* hladinoměr
Time of Flight, 41
vrtulkový hladinoměr. *viz* lopatkový hladinoměr

Měření neelektrických veličin

Téma 13: Stručný přehled metod měření vlastností pevných látek, kapalin a plynů

Studijní cíl

Základní principy měření vlhkosti v pevných látkách, hustoty kapalin, viskozity, pH, složení plyných směsí, barvy a optických vlastností kapalin.

Doba nutná k nastudování

4 hodiny

Klíčová slova

Coulometrie, volumetrie, vlhkoměr, spektrometr, hustoměr, průtokoměr, viskozimetr, pH, elektrochemický článek, analyzátor, fotometr, refraktometr, polarimetr, turbidimetr, nefelometr, mikrovlnné záření, gama záření

Úvodní poznámka

Mnoha z níže popsaných principům měření byla již věnována detailní pozornost v předchozích studijních oporách. I vzhledem k omezenému prostoru a značnému rozsahu možných způsobů a variant měření, bude jejich popis v následujících odstavcích uveden pouze ve stručnosti. V některých případech se navíc omezíme jen na popis principu a nebudou již ve všech případech uváděny konkrétní příklady existujících průmyslových řešení a konkrétních senzorů jako tomu bylo v předešlých oporách.

1 Měření vlhkosti v pevných látkách

Mezi velmi důležitá laboratorní i průmyslová měření se řadí měření obsahu vody v pevných látkách. Často se vlivem nadměrné vlhkosti mohou měnit parametry skladovaného materiálu, může docházet k jeho následnému znehodnocení anebo může být omezena jeho další skladovatelnost. V souvislosti s tím, zejména v potravinářském průmyslu, existuje celá řada provozních předpisů a požadavků na jakost. Vlhkost v sušeném vzorku X lze vypočítat

$$X = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_0 - m_s}{m_0} \cdot 100 \quad (1)$$

kde m_v představuje hmotnost vody, m_0 počáteční hmotnost vzorku a m_s hmotnost vysušeného vzorku. Obsah zbytkové vlhkosti se vyjadřuje v procentech.

1.1 Chemické a gravimetrické metody

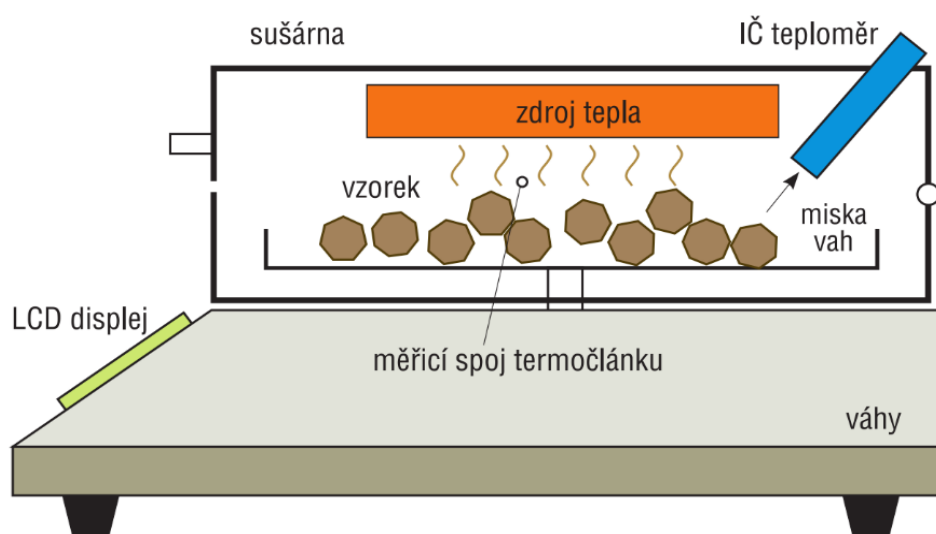
1.1.1 Chemické

Chemické metody jsou velmi přesné, ale zároveň náročnější na provedení a na k tomu potřebný čas. Nejvýznamnější je metoda známá jako **Karl Fisherova titrace** (KF titrace). Jedná se o chemickou reakci na bázi oxidace oxidu siřičitého jódem a metanolovým roztokem hydroxidu. Provádí se coulometricky nebo volumetricky s potenciometrickým vyhodnocením. Coulometrie spočívá v měření náboje potřebného k úplné přeměně sledované látky. Oproti tomu volumetrie je založena na postupném přidávání roztoku titračního činidla známé koncentrace ke vzorku.

1.1.2 Gravimetrické

V praxi se rozlišují dvě základní metody. První z nich je založena na vážení vzorku před a po vysušení (odejmutí veškeré vlhkosti), druhá pak na vážení zkondenzované vody nebo příp. vody absorbované pomocí sušidla.

Pravděpodobně nejvíce rozšířená praktická metoda určování vlhkosti v pevných látkách je založena na sušení látky v sušárně se současným vážením, k čemuž se používají tzv. sušicí váhy, viz obr. 1. Vlhký vzorek látky se položí na misku vah a při jeho sušení je zároveň kontinuálně vážen. Jakmile dojde k ustálení hmotnosti, považuje se vzorek za vysušený. Rozdíl hmotností pak odpovídá hmotnosti postupně odpařené vody.



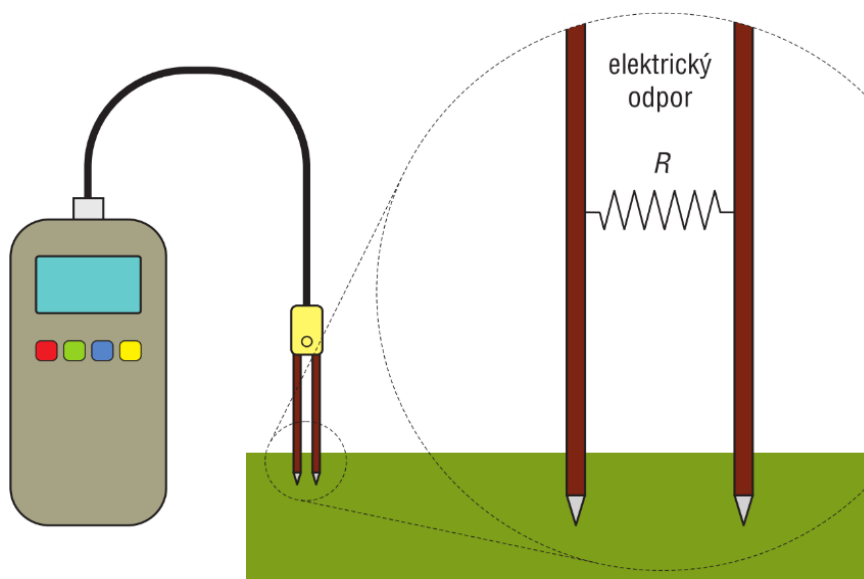
Obr. 1 – Schéma sušicích vah, zdroj (Kopecký, 2019)

1.2 Metody založené na měření elektrických veličin

Dělí se dále na metody impedanční (odporové) a dielektrické (kapacitní). Vlhkoměry založené na těchto dvou principech se v praxi používají jak pro měření vlhkosti dřeva, tak i pro různé zemědělské plodiny jako jsou např. obiloviny, len, řepka, rýže, sója, káva, seno atp.

1.2.1 Odporové vlhkoměry

Vlhkoměry odporové jsou konstrukčně velmi jednoduché. Tvoří je dvě elektrody s fixovanou vzájemnou vzdáleností, které se zasouvají do měřeného vzorku, viz obr. 2. Mezi elektrodami následně prochází elektrický proud a dle Ohmova zákona lze pak stanovit odpovídající odpor, který se se vzrůstající vlhkostí snižuje.



Obr. 2 – Schéma měření vlhkosti pomocí odporového vlhkoměru, zdroj (Kopecký, 2019)

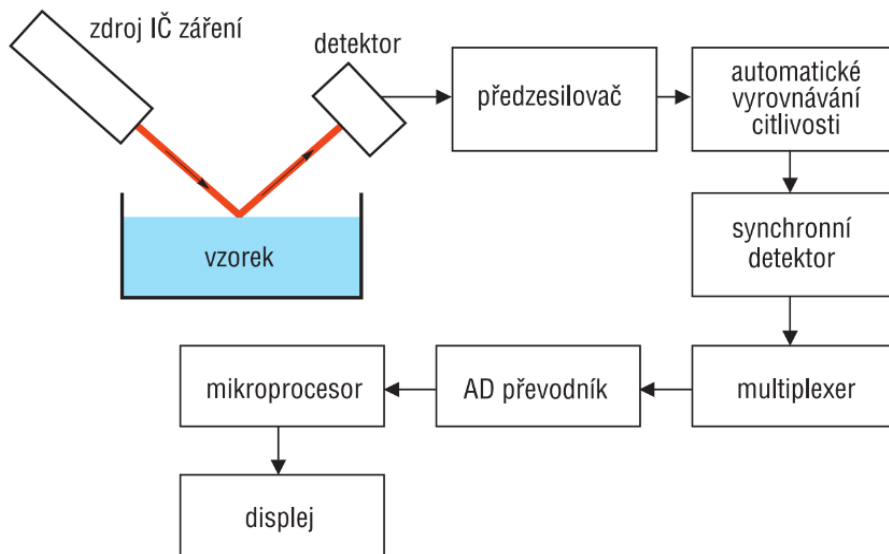
1.2.2 Kapacitní vlhkoměry

U kapacitních vlhkoměrů se využívá vysoké relativní permitivity vody $\epsilon_r = 80$, z čehož plyne výrazná disproporce mezi mokrým a suchým vzorkem z pohledu jejich chování jako dielektrika. Konstrukčně jsou, podobně jako vlhkoměry odporové, velmi jednoduché a levné.

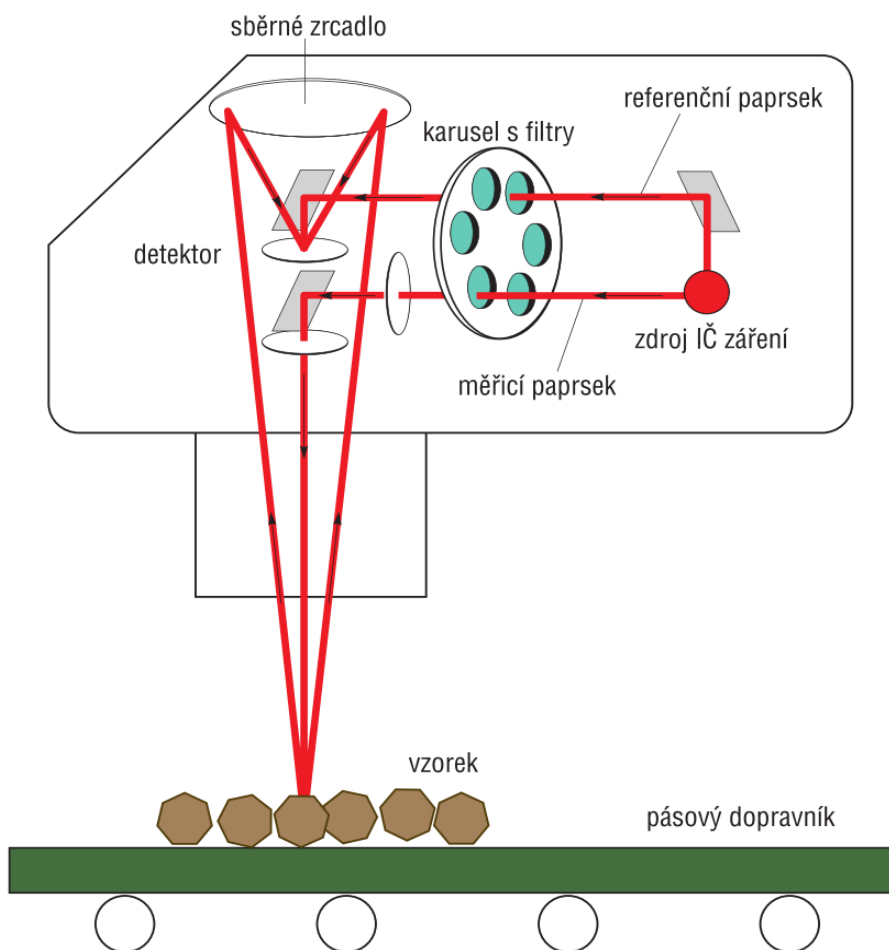
1.3 Spektrometrické metody

Vychází ze skutečnosti, že molekuly vody disponují trvalým dipólovým momentem, díky němuž jsou schopny absorbovat elektromagnetické záření v infračerveném spektru. Přítomnost vody v látce je indikována pomocí tzv. charakteristických absorpčních pásů v oblastech 1,4 až 1,45 μm a 1,9 až 1,94 μm . Jejich množství odpovídá intenzitě těchto pásů. V praxi se ale používají spíše než metody absorpční metody reflexní, protože intenzita odraženého záření je nepřímo úměrná vlhkosti vzorku. Blokové schéma reflexního analyzátoru je na obr. 3. Na následujícím

obr. 4 je řez multifunkčním analyzátozem vlhkosti a složení látek. Jeho součástí je karusel s filtry pro výběr určité vlnové délky světelné záření.



Obr. 3 – Blokové schéma reflexního infračerveného analyzátoru vlhkosti, zdroj (Kopecký, 2019)



Obr. 4 – Princip multifunkčního infračerveného analyzátoru vlhkosti a složení látek, zdroj (Kopecký, 2019)

Výhodou infračervených analyzátorů vlhkosti pracujících v tzv. blízkém IR spektru o vlnových délkách 0,78 až 2,5 μm (NIR, Near-Infrared Region), je vysoká rychlost měření velmi nízkých

koncentrací vlhkosti (do cca 10 %) bezdotykovým a nedestruktivním způsobem. V rámci výrobních linek lze měření vlhkosti realizovat např. při přesunech sledovaných produktů na pásovém dopravníku (obr. 4).

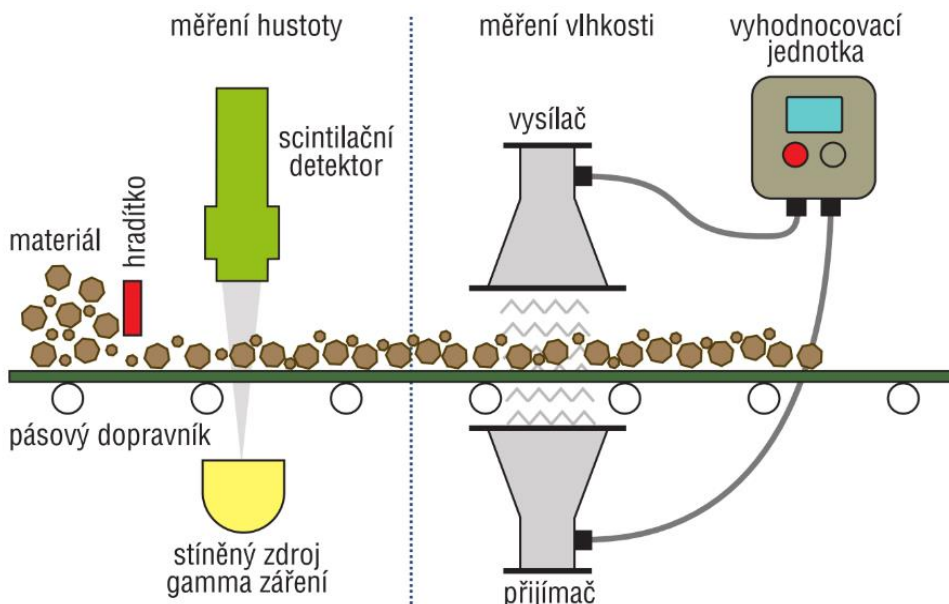
1.4 Metody založené na mikrovlnné spektrometrii

Spektrum mikrovlnného elektromagnetického záření o frekvencích od 100 MHz do 100 GHz je v rozsahu vlnových délek 3m až 3 mm. Velká část mikrovlnných snímačů však pracuje jen v úzkém frekvenčním pásmu např. od 2 do 4 GHz a aby nedocházelo k elektromagnetické interferenci, je generováno záření s nízkým výkonem v řádech mW. Opět se využívá vysoké permitivity vody, která v důsledku toho tlumí selektivně mikrovlnné záření.

Dnes již historický způsob měření byl založen na **měření změny amplitudy** záření při konstantní frekvenci, kdy v důsledku Lambert-Beerova zákona absorpce formulovaném již v roce 1729 P. Bouguerem, později znovu v roce 1760 objeveném J. H. Lambertem a v roce 1852 upřesněném A. Beerem ve tvaru

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

dochází při průchodu záření látkou k jeho zeslabení. V rovnici (2) představuje I_0 počáteční energii elektromagnetické vlny dopadající do látky a I energii vlny ve vzdálenosti x od vysílače, $\alpha = \varepsilon_\lambda c$ je absorpční koeficient (konstanta závisící na permitivitě látky). ε_λ je tzv. molární absorpční koeficient při vlnové délce λ (útlum na jednotku délky) a c je koncentrace absorpční složky.



Obr. 5 – Schéma měření vlhkosti mikrovlnným spektrometrem s měřením hustoty s využitím gama záření, zdroj (Kopecký, 2019)

Dalším způsobem je využití tzv. **reflektančního měření**. Základem jsou vlnovody nebo koaxiální vedení, na jejichž konci dochází vlivem měřené látky ke změně impedance. Součástí praktické realizace senzoru jsou vhodně tvarované směrové antény. Přesnost měření ovlivňují

především změny hustoty, kterou je tak vhodné měřit, typicky s využitím zdroje gama záření a scintilačního detektoru, viz obr. 5. Při aplikaci nad dopravníkovými pásy se navíc ještě do cesty sledované látky zařazuje hradítko, které homogenizuje vrstvu látky na dopravníku a zajistí i hladkost povrchu.

2 Měření hustoty kapalin

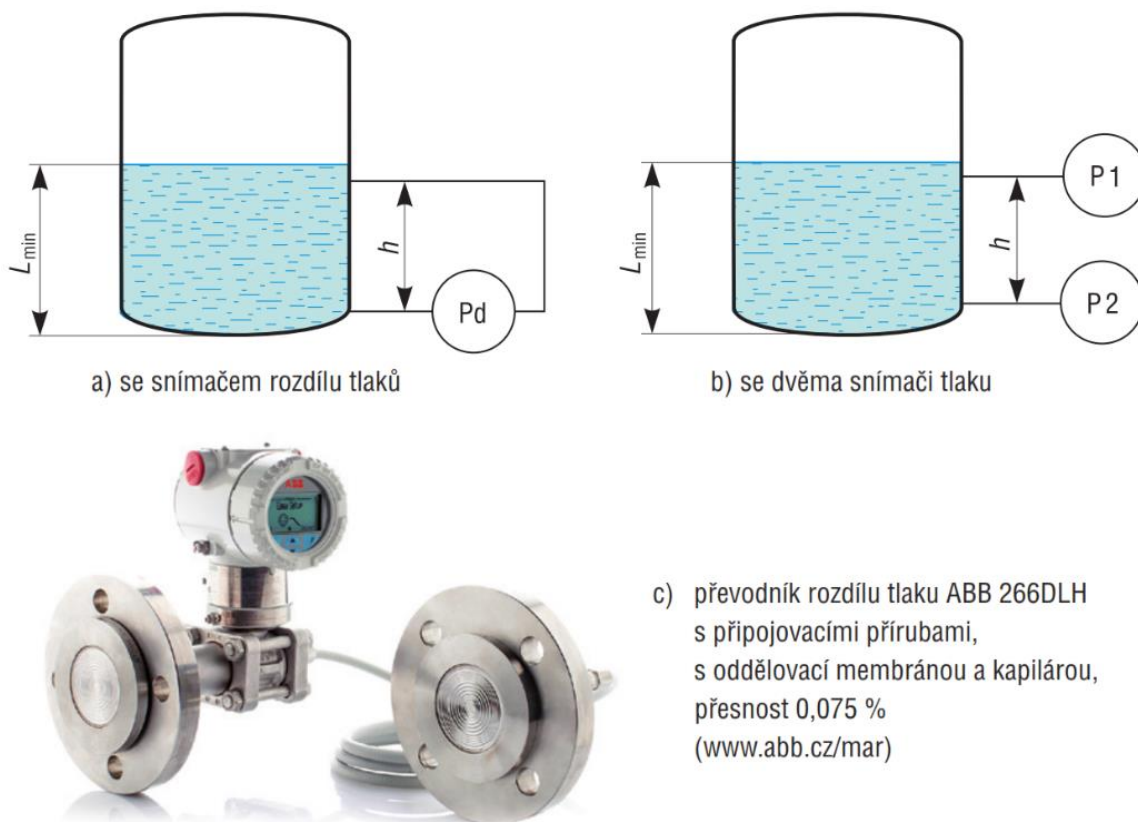
Jelikož je hustota jednou z charakteristických základních fyzikálních veličin, může její znalost být využitelná při určování složení měřené látky. K provoznímu měření se používá celá řada metod a přístrojů, jejichž základní přehled je uveden v následujících odstavcích.

2.1 Hydrostatické senzory

Využívá se u nich závislosti hydrostatického tlaku na hustotě dle vztahu

$$p = h\rho g \quad (3)$$

kdy při zachování $h = \text{konst}$ je tlak přímo úměrný hustotě.



Obr. 6 – Hydrostatický hustoměr, a, b) princip, c) průmyslové provedení, zdroj (Kadlec, 2018c)

Uspořádání hydrostatického hustoměru je na obr. 6. Tlak lze měřit buď jedním diferenčním tlakoměrem (obr. 6a) nebo dvěma senzory v různých výškách (obr. 6b). Hladina v provozní nádobě však nesmí klesnou pod úroveň L_{\min} . Pak platí, že rozdíl tlaků

$$\Delta p = h\rho g = k\rho \quad (4)$$

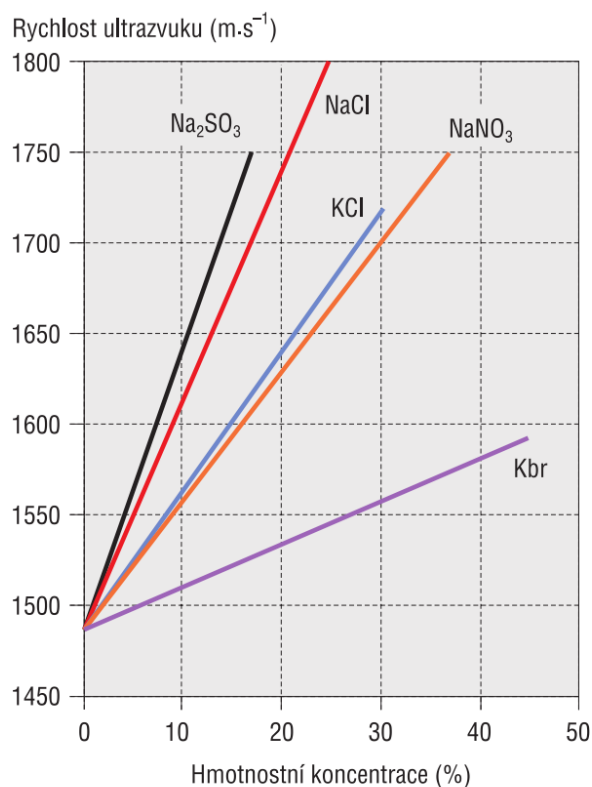
je úměrný hustotě, k je konstanta hustoměru. Hydrostatické hustoměry jsou levné a jednoduše se instalují. Problémem může být zajištění dostatečné výšky hladiny v nádobě a stav, kdy je v nádobě několik vrstev média s různými hustotami.

2.2 Ultrazvukové senzory

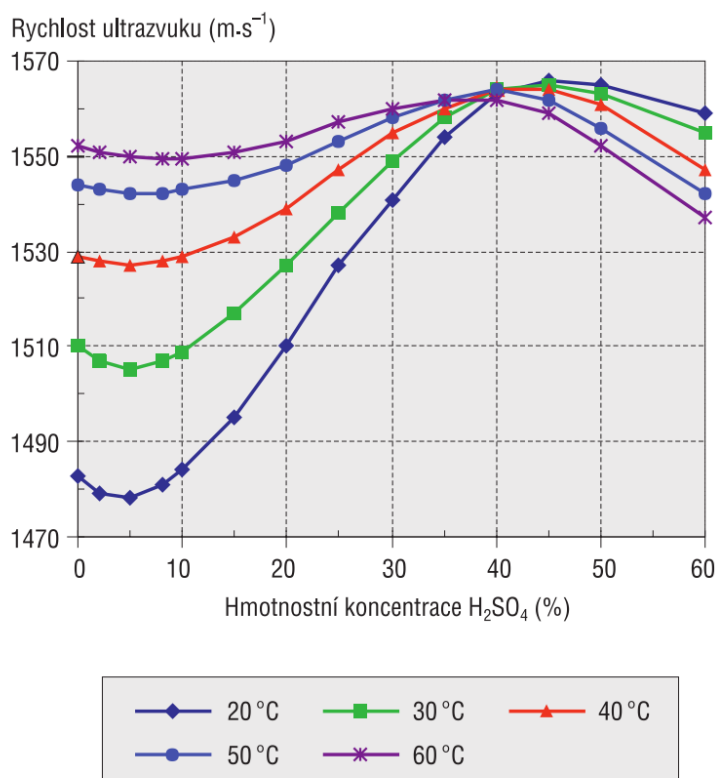
Ultrazvukové vlnění se v kapalinách šíří rychlostí závislou na jejích složení, na hustotě, viskozitě a také na teplotě. Rychlost šíření ultrazvuku závisí na hustotě dle vztahu

$$v = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad (5)$$

v níž C je modul objemové pružnosti média. Např. u vodných roztoků soli je závislost lineární v širokém rozsahu koncentrací (obr. 7a), ale u kyselin, např. u kyseliny sírové (obr. 7b) je závislost nelineární a navíc ji ovlivňuje teplota.



a)



b)

Obr. 7 – Průběh závislosti rychlosti ultrazvuku na koncentraci a na teplotě, zdroj (Kadlec, 2018c)

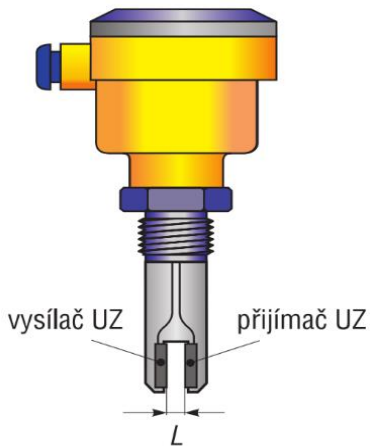
Rychlost šíření ultrazvuku se určuje na základě měření času τ potřebného k překonání úseku L mezi vysílačem a přijímačem

$$v = \frac{L}{\tau} \quad (6)$$

Provozní senzory jsou konstruovány ve dvou základních variantách – jako ponorné, nebo jako průtočné.

2.2.1 Ponorné

Vysílač a přijímač jsou umístěny ve vzdálenosti $L = konst$ v ramenech měřicí vidlice senzoru, viz obr. 8. Ta se vyrábí z odolných materiálů, typicky z korozi-vzdorné oceli potažené zlatem.



Obr. 8 – Ponorný ultrazvukový senzor hustoty, zdroj (Kadlec, 2018c)

2.2.2 Průtočné

Na obr. 9 je schéma průtočného ultrazvukového hustoměru. UZ signál se po vyslání odrazí od plošky na protější straně potrubí zpět a je detekován přijímačem. Dráha, kterou musí urazit je tedy dvojnásobná a na základě potřebného času pro její překonání lze postupně určit rychlost a po kompenzaci parazitních vlivů teploty a znalosti koncentrace pro různá média stanovit výslednou hustotu měřeného média.

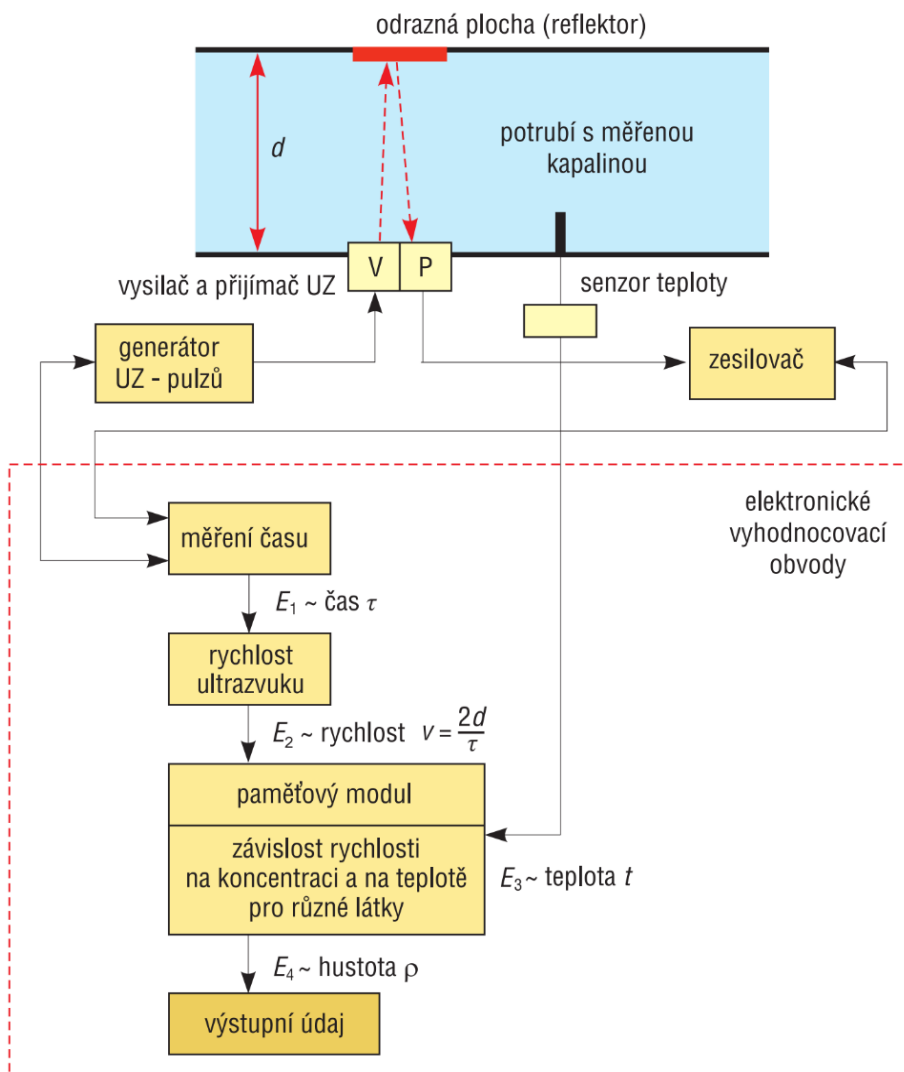
2.3 Vibrační

Součástí vibračních senzorů hustoty se využívá více druhů vibrujících prvků. Existuje tedy celá řada typů vibračních hustoměrů. V průmyslové praxi jsou to především hustoměry s kmitajícími trubicí nebo vibrujícími vidlicí.

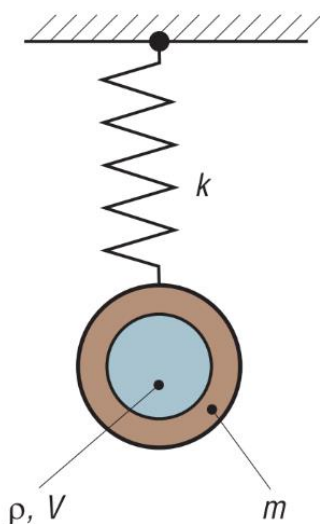
2.3.1 S kmitajícími trubicí

V tomto případě jsou měřeny oscilace vznikající v soustavě pružinového rezonátoru s dutinou vyplněnou známým objemem kapaliny, viz obr. 10. Rezonanční frekvence rezonátoru je funkcí hmotnosti celé soustavy a jelikož dutina je konstantního objemu, jde vlastně o funkci hustoty kapaliny

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m + \rho V}} \quad (7)$$



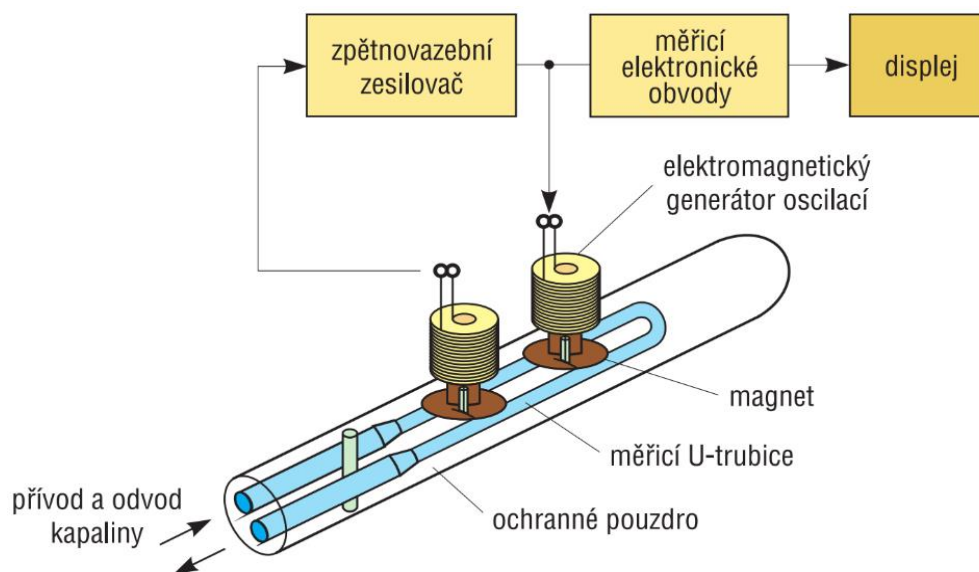
Obr. 9 – Schéma průtočného ultrazvukového senzoru hustoty, zdroj (Kadlec, 2018c)



Obr. 10 – Základní princip vibračního snímače hustoty, zdroj (Kadlec, 2018c)

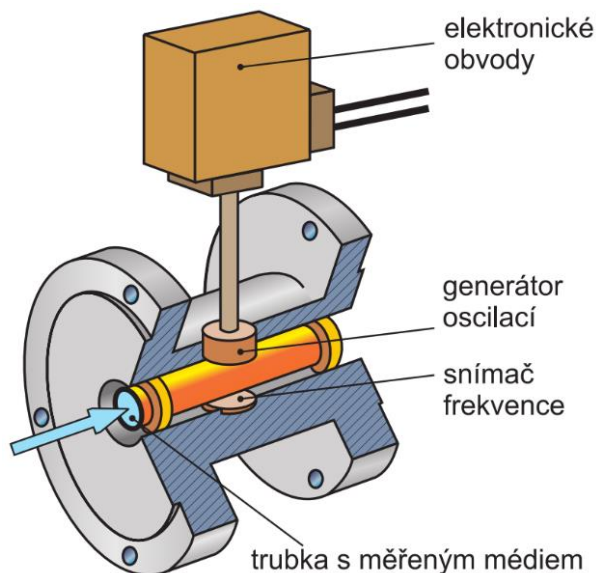
V praxi používané přístroje mají obvykle čidlo v podobě pružně připojené trubky tvaru U, viz obr. 11. V elektromagnetickým generátorem rozkmitávané trubce se nachází měřená látka.

Trubka je součástí elektromechanického oscilátoru, jehož rezonanční frekvence je pak závislá dle výše popsaného principu na hustotě látky. Součástí senzoru jsou obvykle také obvody pro automatickou kompenzaci vlivu teploty.



Obr. 11 – Schéma vibračního snímače s U-trubicí, zdroj (Kadlec, 2018c)

Používají se také na stejném principu pracující provozní přístroje s přímou trubicí, viz obr. 12. Jsou vhodné zejména tehdy, je-li požadována při měřeních nízká tlaková ztráta a snadné čištění, především v potravinářských provozech.



Obr. 12 – Schéma vibračního snímače s přímou trubicí, zdroj (Kadlec, 2011a)

2.3.2 Na bázi Coriolisova průtokoměru

Dalším způsobem měření hustoty je použití Coriolisova hmotnostního průtokoměru s vibrující trubicí, viz obr. 13. Jelikož je rezonanční frekvence dle výše uvedeného vztahu (7) úměrná

celkové hmotnosti trubice a jejího obsahu v podobě měřené kapaliny o konstantním objemu, bude hustota

$$\rho = \frac{k}{4\pi^2 V f^2} - \frac{m}{V} \quad (8)$$

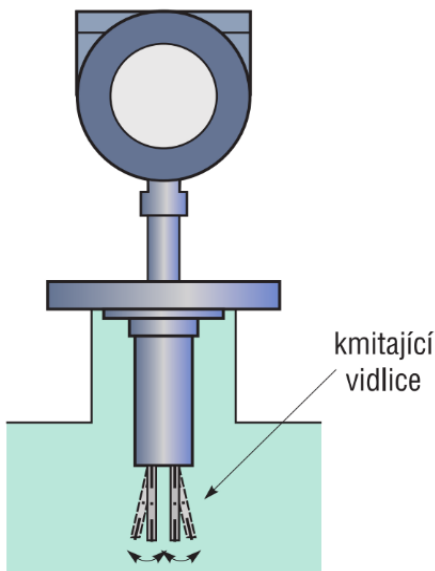
Zmiňovaný způsob měření má tu výhodu, že je vhodný i pro měření kalů či kašovitých hmot.



Obr. 13 – Princip snímače na bázi Coriolisova průtokoměru, zdroj (Kadlec, 2018c)

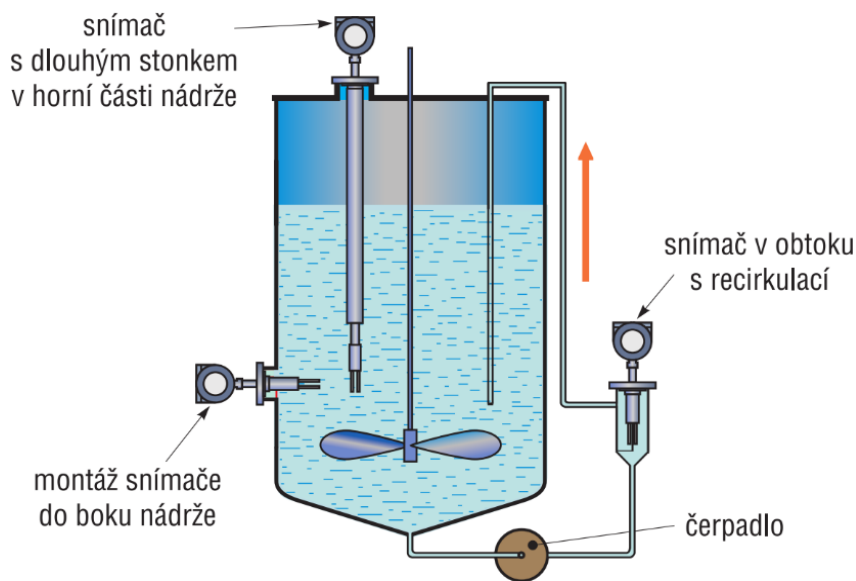
2.3.3 S kmitající vidlicí

Základem těchto senzorů je jednoduchá vidlicová ladička, která se ponoří do měřeného média, viz obr. 14. Elektromagneticky buzené vibrace jsou elektronikou senzoru udržovány na rezonanční frekvenci, jež je závislá na hustotě média.



Obr. 14 – Schéma senzoru s kmitající vidlicí, zdroj (Kadlec, 2018c)

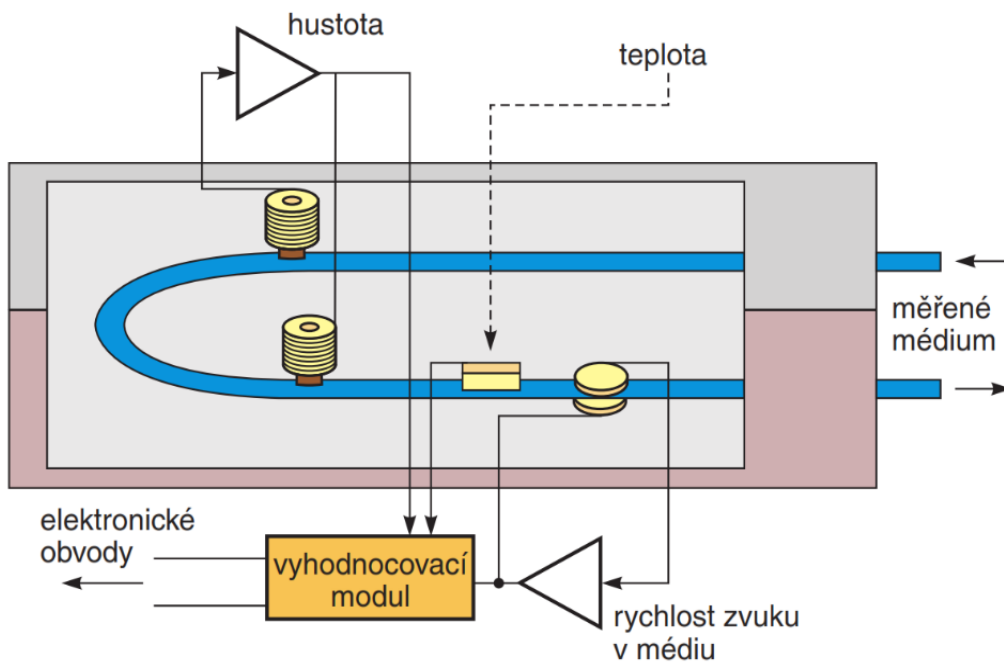
Doporučované způsoby umístění vibračních senzorů hustoty jsou na obr. 15. U provozních nádob obsahujících míchadla, je vhodnější umístit senzor do obtoku s recirkulací zajišťovanou čerpadlem. Možná je ale samozřejmě montáž z boku nádoby, nebo montáž s využitím senzorů s dlouhým stonkem ve víku.



Obr. 15 – Možnosti umístění senzorů hustoty s kmitající vidlicí, zdroj (Kadlec, 2018c)

2.3.4 Kombinované senzory hustoty a rychlosti zvuku

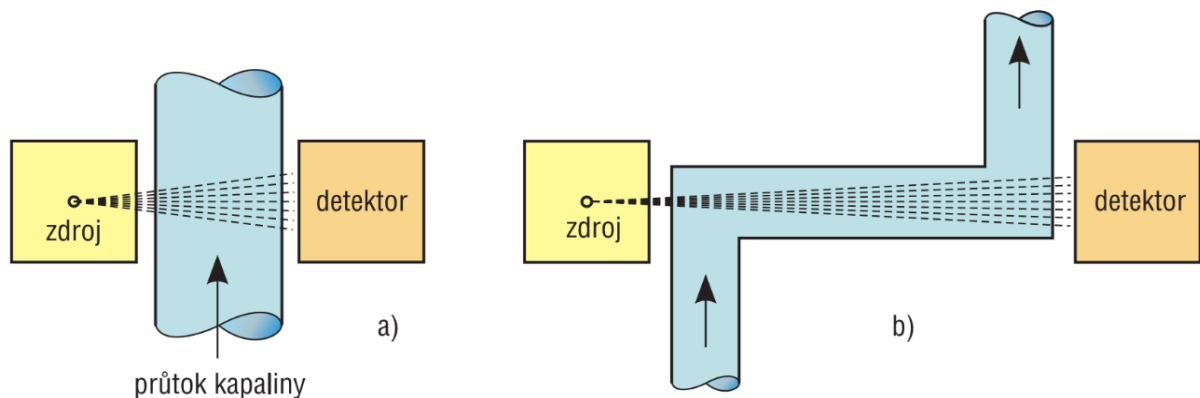
Schéma kombinovaného multifunkčního senzoru je na obr. 16. Mimo hustoty se v tomto případě měří také rychlost šíření zvuku v médiu a příp. také teplota pro potřeby kompenzace jejího vlivu. Uvedený způsob měření se využívá hojně při určování koncentrace alkoholu, chmelového extraktu a vody při výrobě piva. Roste-li totiž koncentrace alkoholu v kapalině, klesá hustota roztoku a naopak roste rychlost zvuku. V extraktu však roste s jeho rostoucí koncentrací hustota, tlak i rychlost zvuku.



Obr. 16 – Schéma kombinovaného senzoru hustoty a rychlosti zvuku, zdroj (Kadlec, 2011b)

2.4 Radiační

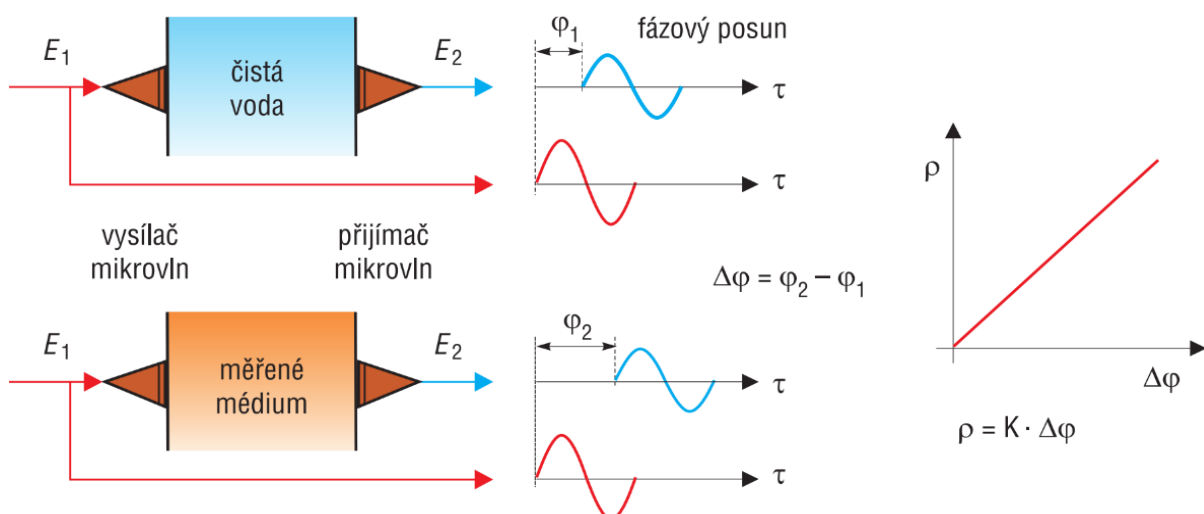
Průchodem radioaktivního gama záření médiiem se na základě platnosti již uvedeného Lambert-Beerova zákona (2) jeho tok tlumí, čehož lze využít pro stanovování hustoty. Sensory jsou nejčastěji vyráběny jako průtočné. U potrubí s dostatečně velkým průměrem se zdroj a detektor osadí k rovné části potrubí (obr. 17a). V případě potrubí s nižší světlostí, by byla dráha záření napříč potrubím příliš krátká, což by vedlo ke snížení citlivosti a přesnosti měření, takže musí být úsek potrubí dvakrát zalomen (obr. 17b).



Obr. 17 – Způsob umístění radiačního senzoru hustoty, zdroj (Kadlec, 2018d)

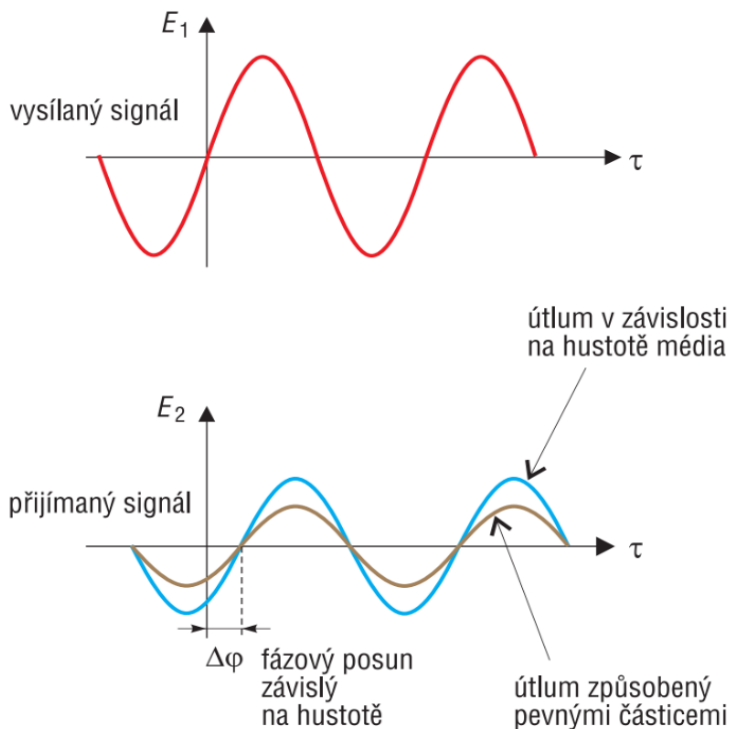
2.5 Mikrovlnné

U mikrovlnných senzorů se využívá při měření hustoty změny rychlosti šíření mikrovln při průchodu médiiem. Buď se používá již několikrát zmiňovaná metoda ToF, nebo metoda měření rozdílu fází vyslaného a přijatého signálu. Druhá z metod je přesnější a navíc i méně náchylná vůči rušivým vlivům. Její princip je zřejmý z porovnání fázových posunů φ_1 a φ_2 mikrovlnných signálů šířících se ve vodě a v médiiu s odlišnou hustotou na obr. 18.



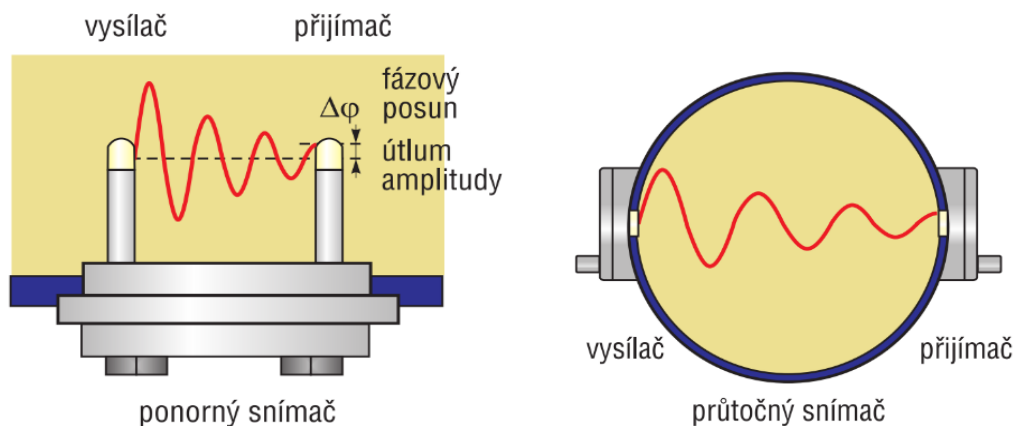
Obr. 18 – Základní princip mikrovlnného senzoru hustoty, zdroj (Kadlec, 2018d)

Další možností je využití vlivu útlumu amplitudy mikrovlnného signálu na hustotě média jímž signál prochází, viz obr. 19. Projevuje se zde ale oproti měření rozdílu fázového posuvu navíc vliv přítomnosti v médiu rozptýlených pevných částic.



Obr. 19 – Útlum amplitudy a rozdíl fází mikrovlnného signálu, zdroj (Kadlec, 2018d)

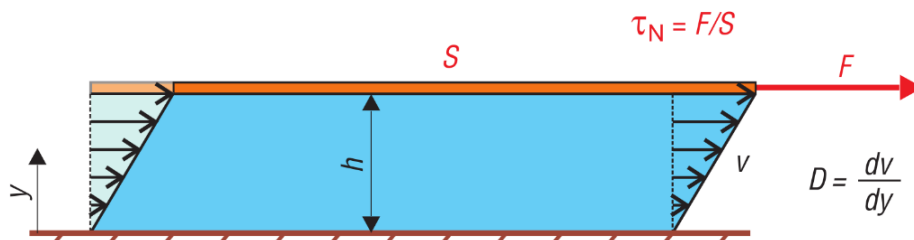
Praktické uspořádání průtočného mikrovlnného hustoměru je zřejmé z obr. 20. Antény vysílače i přijímače jsou v tomto případě v přímém styku s měřeným médiem, takže musí být vyrobeny z hygienicky nezávadných polymerů vhodných pro aplikace v chemickém a potravinářském průmyslu. Sensory jsou doplněny o měření teploty z důvodu kompenzace jejího vlivu, pracují nejčastěji s vlněním o frekvenci 2,45 GHz a jejich výstupem bývá unifikovaný proudový signál 4 – 20 mA s komunikací s protokolem HART. Některé senzory mohou být doplněny o speciální zařízení pro oplach antén.



Obr. 20 – Schéma ponorného a průtočného mikrovlnného snímače, zdroj (Kadlec, 2018d)

3 Měření viskozity

Viskozitu proudící kapaliny lze vysvětlit tak, že pokud její jednotlivé molekuly jsou vůči sobě v relativním pohybu, mají pak na sousedních vrstvách rozdílnou rychlost, dochází mezi nimi ke tření a tím i ke vzniku smykového napětí. Při uvažování laminárního proudění s rovnoběžnými proudnicemi a pokud se kapalina nepromíchává, byl I. Newtonem formulován zákon, dle něž je tečné napětí τ_N v kapalině úměrné viskozitě a gradientu rychlosti.



Obr. 21 – K definici viskozity, zdroj (Kadlec, 2019g)

Situaci lze ilustrovat na schématu na obr. 21. Mezi dvěma navzájem rovnoběžnými deskami, z nichž dolní je nepohyblivá a horní s plochou S se naopak pohybovat může, je tenká vrstva kapaliny o výšce h . Jsou-li rozměry desek mnohem větší než vrstva kapaliny, lze zanedbat okrajové podmínky a při stálé rychlosti pohybu horní desky vznikne lineární rychlostní profil. K tomu, aby se deska udržela v pohybu, je nutná síla o velikosti

$$F = S \eta \frac{dv}{dy} \quad (9)$$

kde η představuje dynamickou viskozitu a $D = dv/dy$ gradient rychlosti. Budeme-li dále uvažovat tečné napětí $\tau_N = F/S$, vyjde po dosazení do (9) rovnice představující Newtonův zákon viskozity

$$\tau_N = \eta D \quad (10)$$

Tekutiny, které se chovají v souladu s tímto zákonem, tj. plyny, páry a velkém množství běžných kapalin, jsou pak tzv. **newtonovské**. Některé viskozimetry, u nichž je hnací silou gravitace, udávají namísto dynamické viskozity kinematickou viskozitu

$$\delta = \frac{\eta}{\rho} \quad (11)$$

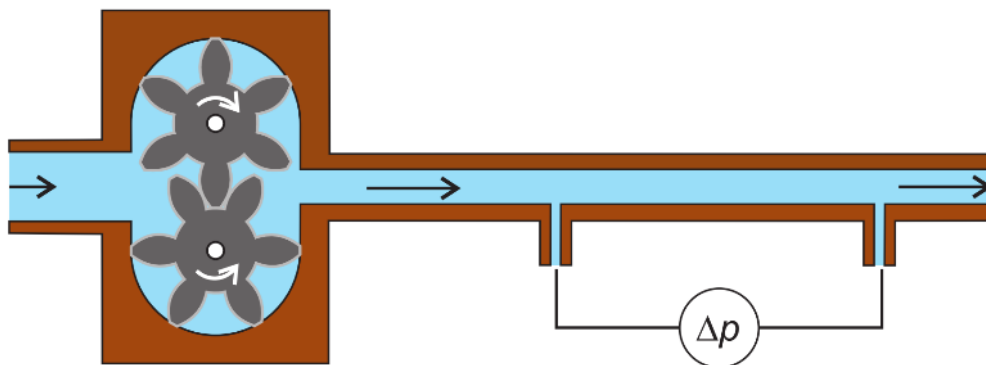
V obecném případě viskozita tekutin závisí na teplotě a tlaku. U kapalin s teplotou klesá, u plynů naopak roste. Při měřeních se v souvislosti s tím nutně udržovat teplotu na konstantní hodnotě.

3.1 Kapilární viskozimetry

U kapilárních viskozimetrů se provádí měření tlakové ztráty při laminárním proudění kapilárou, viz obr. 22. Mimo konce kapiláry je v platnosti Hagen-Poiseuillova rovnice

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8Q_V l} \Delta p \quad (12)$$

v níž je r poloměr kruhového průřezu kapiláry, l je vzdálenost, k níž je vztažen tlakový rozdíl Δp a Q_V je odpovídající objemový průtok.



Obr. 22 – Schéma kapilárního viskozimetru, zdroj (Kadlec, 2019g)

V praxi se měří po dobu $\Delta\tau$ během níž hladina kapaliny změní polohu mezi dvěma značkami. Při známém průměru a délce kapiláry a známém rozdílu výšek hladin, a současně při platnosti vztahu $\Delta p = \Delta h \rho g$ plyne z Hagen-Poiseuillovy rovnice

$$\delta = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\pi r^4}{8Q_V l} g \Delta h \quad (13)$$

Při konstantním objemu mezi značkami pak

$$\delta = \frac{\pi r^4 g \Delta h}{8V l} \Delta \tau \quad (14)$$

a po provedení kalibrace viskozimetru pomocí kapaliny se známou viskozitou zjednodušeně

$$\delta = K \Delta \tau \quad (15)$$

se namísto nutnosti znát všechny rozměry použije konstanta K .

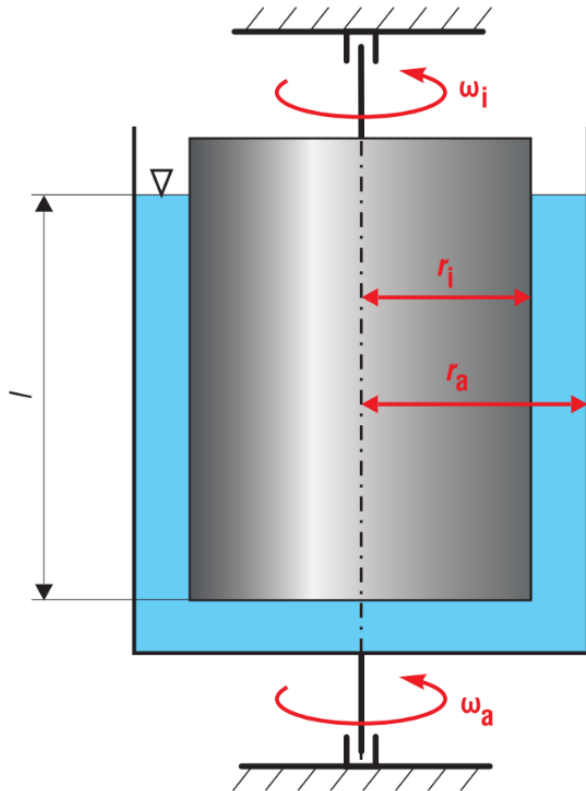
3.2 Rotační viskozimetry

V případě rotačních viskozimetrů je měřená kapalina ve spáře mezi dvěma sousými válci otáčející se každý rozdílnou, ale konstantní rychlostí, viz schéma na obr. 23. Moment síly vznikající mezi nimi je funkcí viskozity měřené kapaliny. V souladu s definicí výše, musí být proudění mezi oběma válci laminární.

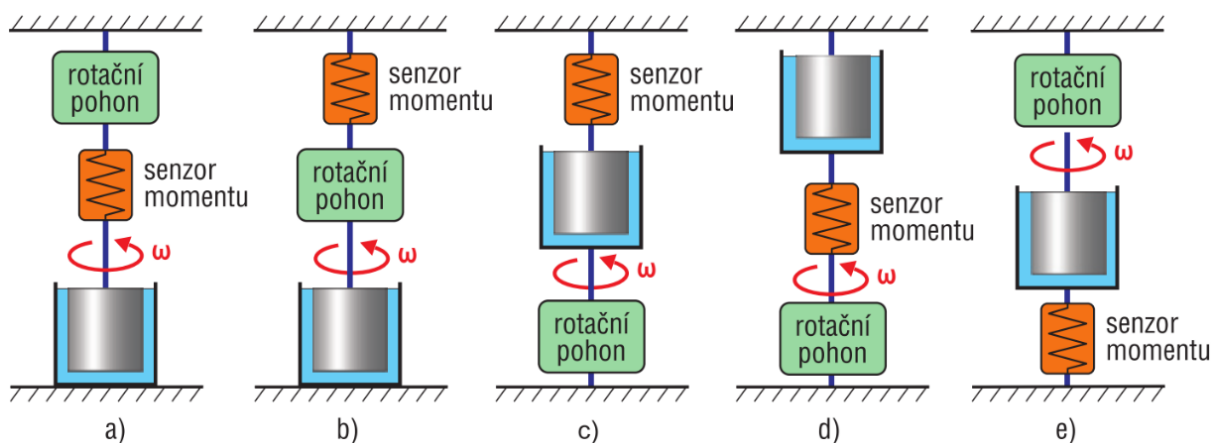
Viskozimetry tzv. **Couettova typu** se liší od výše popsaných tím, že se u nich otáčí jen vnější válec. U varianty viskozimetru **Searlova typu** se pro změnu otáčí pouze vnitřní válec. Všechny typy rotačních viskozimetrů musí mít pohon otočného válce a snímačem momentu vznikajícího vlivem vnitřního tření v kapalině. Možné konfigurace pohonu a senzoru momentu jsou na obr. 24. Z nich prakticky nejpoužívanější jsou varianty a) až c).

Do rodiny rotačních viskozimetrů patří i viskozimetr typu Stabinger na obr. 25. V tomto případě je poháněn vnější válec s měřenou kapalinou, který má vyšší rychlost, než unášené vnitřní válcové těleso se zalitým permanentním magnetem. Zmiňovaná sestava válců je

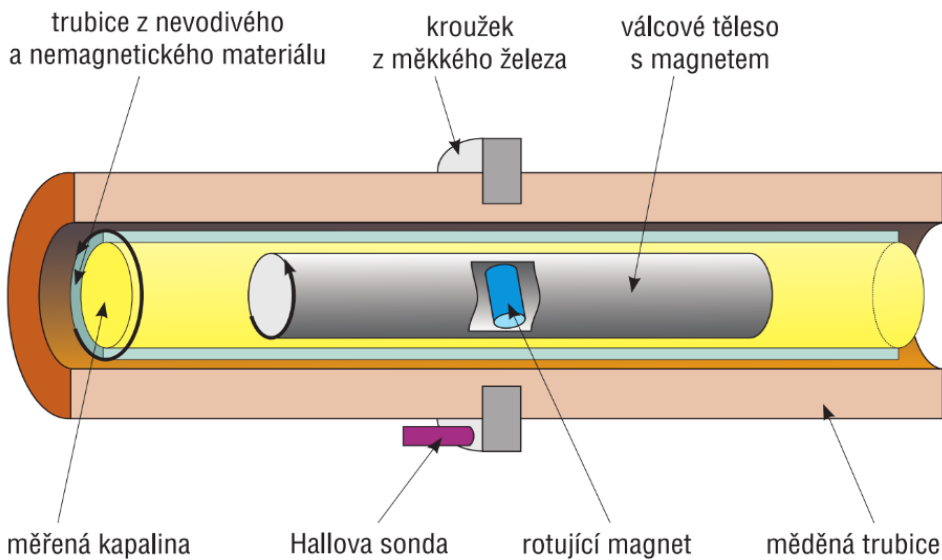
umístěna ve vnější měděné trubici na níž je kroužek z měkkého železa. Magnet, který spolu s vnitřním tělesem rotuje, vytváří ve stabilní měděné trubici vířivé proudy, jež působí proti smyslu jeho otáčení a brzdí ho. Po velmi krátké době dojde k dosažení rovnováhy mezi momentem kapaliny a brzdícím momentem vyvolaným vířivými proudy. Ke snímání rychlosti otáčení se používá Hallova sonda umístěná z vnější strany měděné trubice.



Obr. 23 – Schéma rotačního viskozimetru, zdroj (Kadlec, 2019g)



Obr. 24 – Možná uspořádání pohonu a senzoru momentu rotačních viskozimetrů, zdroj (Kadlec, 2019g)



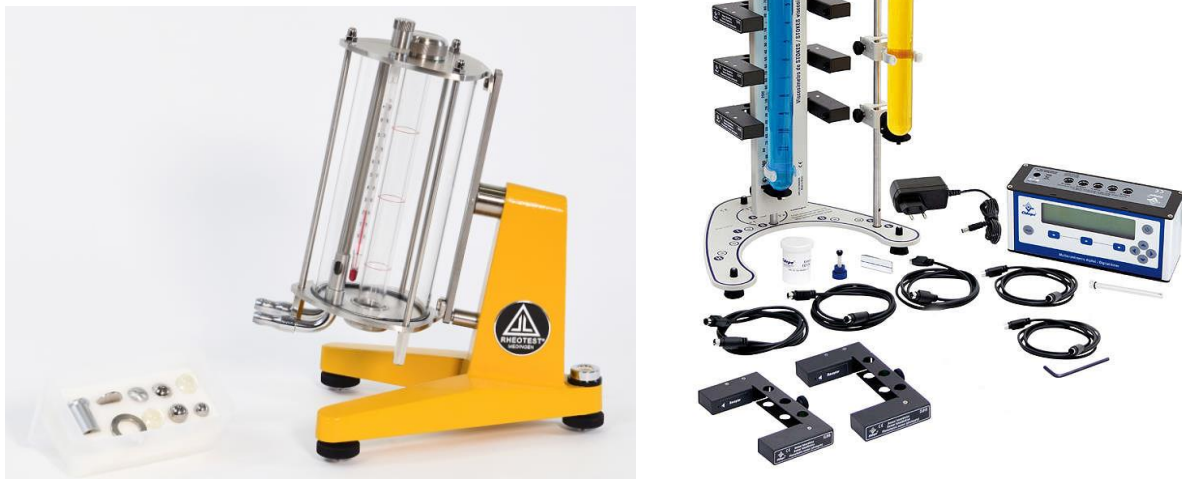
Obr. 25 – Schéma viskozimetru typu Stabinger, zdroj (Kadlec, 2019g)

3.3 Tělískové viskozimetry

Mezi tělískové viskozimetry, resp. viskozimetry s padající kuličkou patří Stokesův a Höpplerův viskozimetr na obr. 26. Skleněná nebo čirá plastová trubice je buď u Stokesova viskozimetru svislá, nebo u Höpplerova viskozimetru má sklon 10°. Na trubici jsou dvě rysky, mezi nimiž se měří doba průchodu kuličky. Princip vychází z vyjádření viskozity při poklesu kuličky vlivem vlastní hmotnosti v měřené kapalině

$$\eta = \frac{2r^4(\rho_k - \rho_v)g}{9V} \quad (16)$$

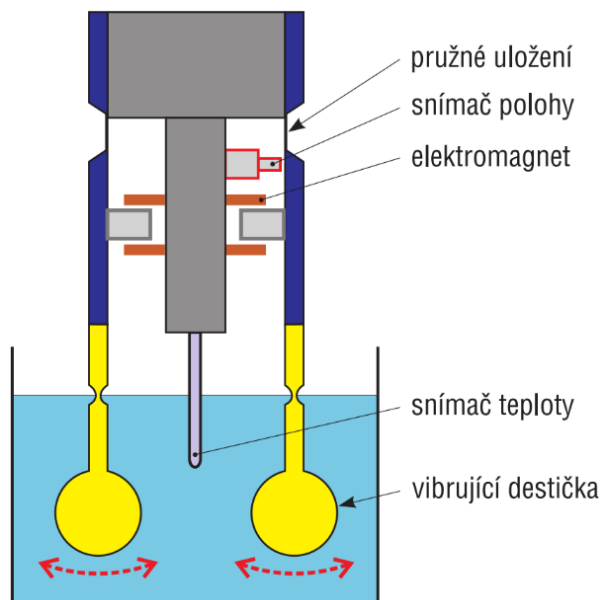
přičemž ρ_k je hustota materiálu kuliček a ρ_v měřené kapaliny.



Obr. 26 – Höpplerův a Stokesův viskozimetr, zdroj (Rheotest, 2022 a Cidepe, 2022)

3.4 Vibrační viskozimetry

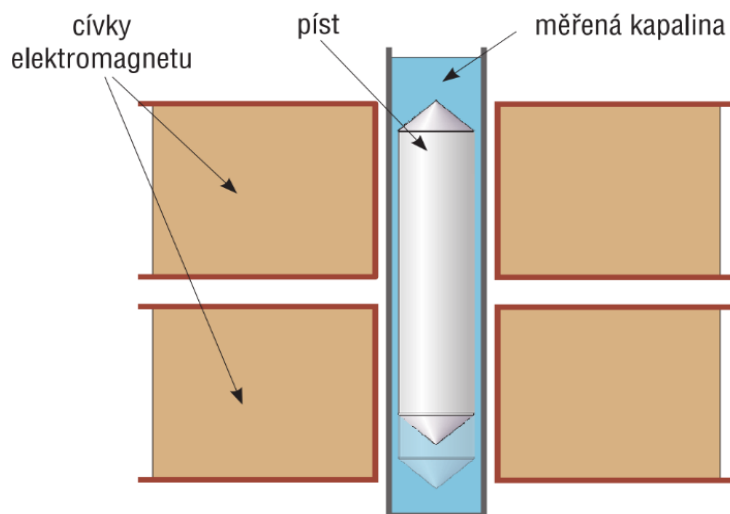
Jejich princip je založen na útlumu oscilujícího elektromechanického rezonátoru v podobě speciální ladičky ponořené do měřené tekutiny, viz obr. 27. Čím vyšší je zmiňovaný útlum, tím vyšší je potom viskozita. Útlum lze zjišťovat buď měřením výkonu nutného k udržení stálé amplitudy kmitů rezonátoru, nebo na základě měření času, za který kmity ustanou, příp. měřením frekvence kmitů.



Obr. 27 – Schéma vibračního viskozimetru, zdroj (Kadlec, 2019g)

3.5 Viskozimetry s oscilujícím pístem

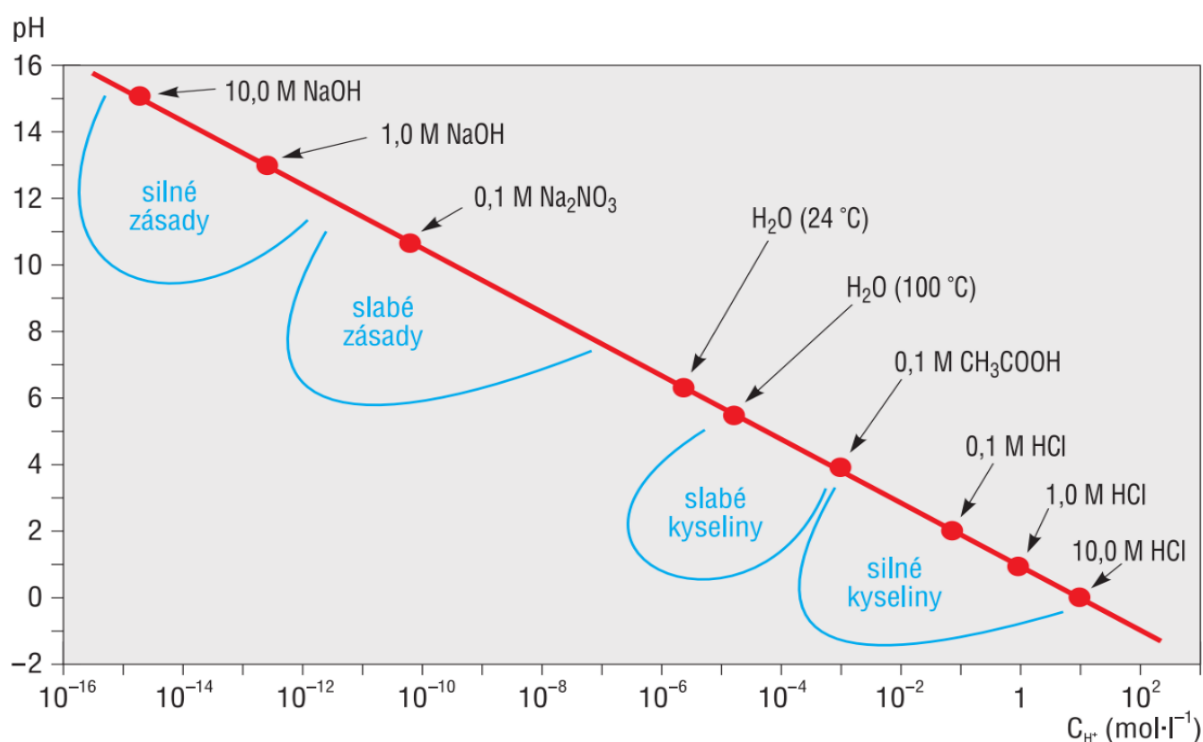
Tzv. elektromagnetické viskozimetry s oscilujícím pístem sestávají z měřicí komory s kapalinou, elektromagneticky ovládaného pístu a dvojice cívek budicího elektromagnetu, viz obr. 28. Tekutina proudí v úzké spáře mezi pohybujícím se pístem a komorou nepřetržitě střídavě směrem nahoru a dolů. Proudění je ovlivňováno tečným napětím vzniklým pohybem pístu. Viskozita se stanoví podle času, za který píst urazí definovaný úsek.



Obr. 28 – Schéma viskozimetru s oscilujícím pístem, zdroj (Kadlec, 2019g)

4 Měření pH

Prostřednictvím pH – potenciálu vodíku (anglicky *potential of hydrogen*, latinsky *potentia hydrogenii*) nebo též vodíkového exponentu – se vyjadřuje kyselost či zásaditost vodného roztoku látky. Na obr. 29 je uvedena závislost pH na koncentraci vodíkových iontů. Logaritmicke stupnici pH vytvořil v roce 1909 dánský chemik Søren Peder Lauritz Sørensen (1868 – 1939). Základní měření pH lze provést s využitím pH indikátorů, např. v podobě lakmusového papírku, který mění svoji barvu od červené (kyselý roztok, pH 4,8) až po modrou (zásaditý roztok, pH 8,3).

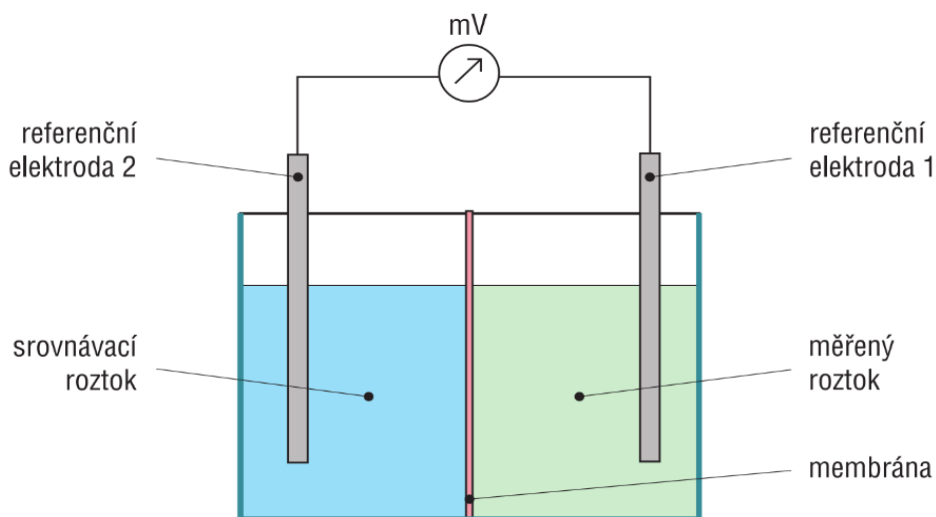


Obr. 29 – Závislost pH na koncentraci vodíkových iontů, zdroj (Kadlec, 2018a)

4.1 Elektrochemické (potenciometrické) snímače

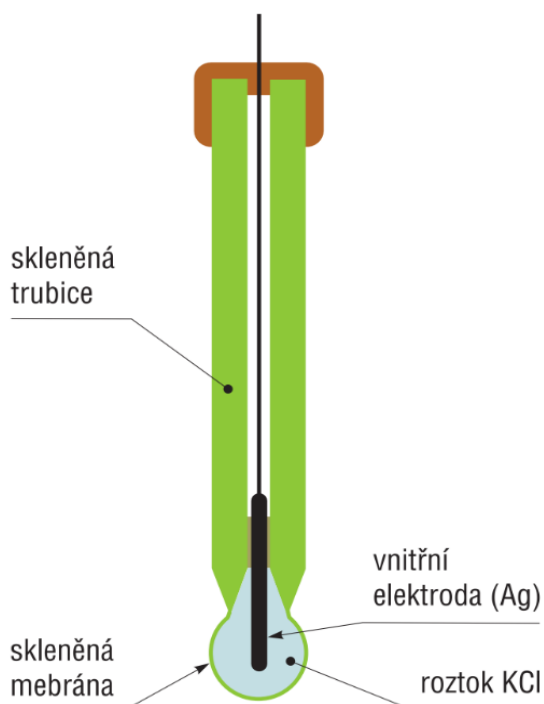
V případě elektrochemických senzorů se využívá průběhu elektrochemických reakcí, k nimž dochází mezi elektrodami ponořenými v elektrolytu, viz obr. 30. Elektrolyt umožňuje migraci iontů k elektrodám.

Na rozhraní mezi kovovou elektrodou (referenční elektroda 1) a elektrolytem (měřeným roztokem, na obr. 30 zeleně) vznikne elektrický potenciál. Bude-li současně druhá elektroda (referenční elektroda 2) umístěna do srovnávacího roztoku (modře), tak na základě stejného principu se na ní objeví také potenciál, ale jiné velikosti. Mezi oběma elektrodami lze pak naměřit napětí o velikosti v řádu mV. Prostory s měřeným roztokem a srovnávacím roztokem jsou navzájem odděleny iontově selektivní membránou, která může být skleněná, krystalická nebo kapalná.



Obr. 30 – Schéma elektrochemického článku s membránou, zdroj (Kadlec, 2018a)

Nejstarší tzv. iontově selektivní elektrodou pro měření pH je elektroda skleněná na obr. 31. Membrána je u ní tvořena cca 0,1 mm tenkou skleněnou vrstvou ve tvaru malé baňky, která při ponoření do vody bude mít na povrchu hydratovanou vrstvu, ve které budou sodné ionty ze skla nahrazeny hydroxoniovými ionty z roztoku. Po dané době máčení dojde k rovnováze a hydratovaná vrstva začne působit jako iontový měnič. Tím vznikne membránové napětí úměrné pH měřeného roztoku.



Obr. 31 – Schéma skleněné elektrody, zdroj (Kadlec, 2018a)

Membrány krystalické jsou buď tvořeny monokrystaly (např. fluoru lanthanitého LaF_3), nebo lisovány z polykrytalických materiálů. Základem kapalných membrán je aktivní ve vodě nerozpustná složka, typicky PVC se změkčovadlem.

4.2 Polovodičové

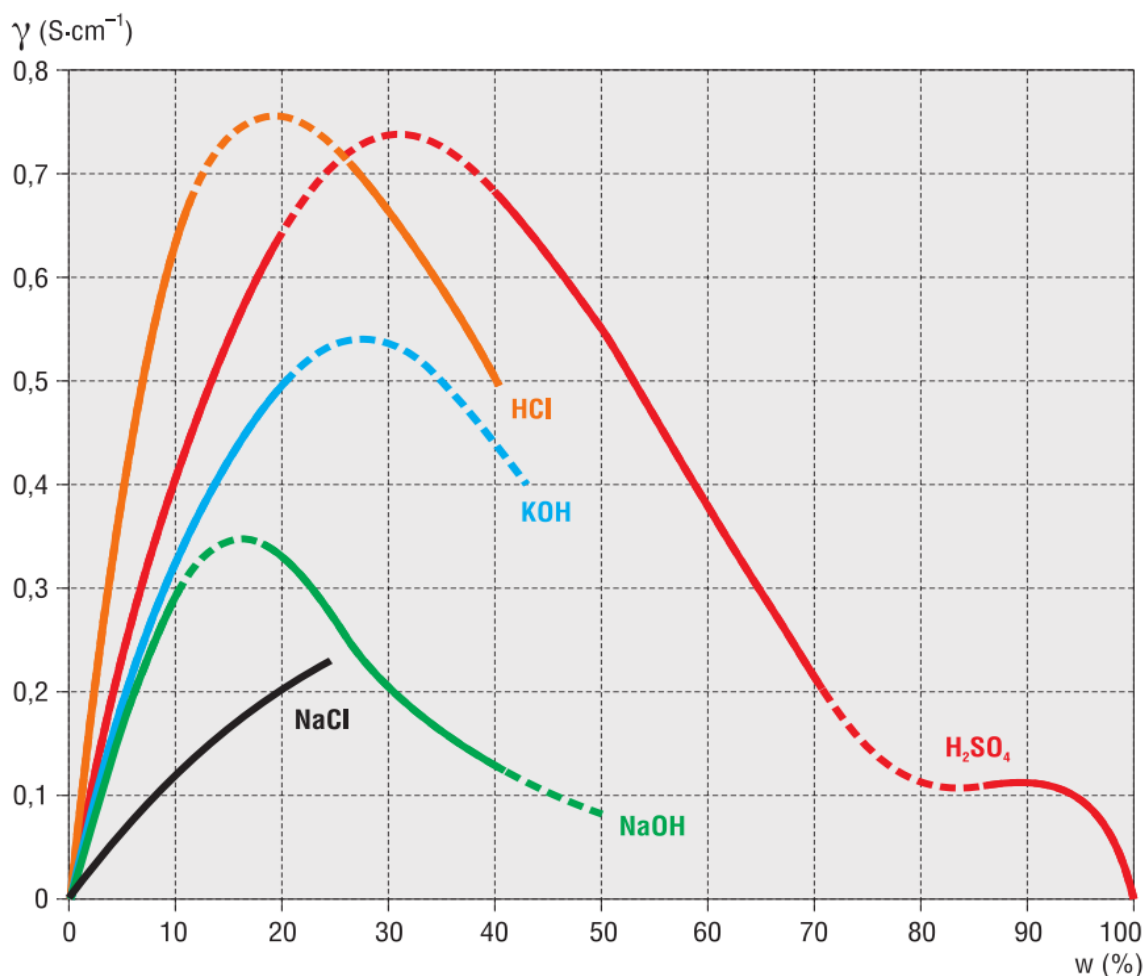
Jejich uspořádání je velmi podobné tranzistorům řízeným polem typu MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Oproti výše popsaným skleněným elektrodám jsou odolnější vůči mechanickému namáhání a jsou o něco přesnější.

5 Měření elektrolytické vodivosti kapalin

Elektrolytická vodivost roztoků, která je závislá na koncentraci iontů rozpuštěných látek, se měří pomocí dvou elektrod ponořených v roztoku. Vodivost roztoku je přímo úměrná ploše elektrod S a konduktivitě γ (měrné elektrické vodivosti) a nepřímo úměrná jejich vzdálenosti L . Platí známý vztah

$$G = \gamma \frac{S}{L} \quad (17)$$

Průběh velikosti vodivosti, jež je závislý na koncentraci, závisí také na pohyblivosti iontů. Ionty menší velikosti (např. KOH) jsou pohyblivější a více přispívají k vodivosti roztoku. Měrná vodivost se pro různé sloučeniny vyjadřuje v závislosti na koncentraci pomocí tzv. **kalibračních grafů** na obr. 32.



Obr. 32 – Graf závislosti konduktivity na hmotnostní koncentraci, zdroj (Kadlec, 2018b)

Nejvyšší vodivost vykazují silné kyseliny následované silnými zásadami, nejmenší pak soli. Na základě průběhů, které vykazují extrém, v jehož oblasti (v grafu čárkovaně) se nedoporučuje měřit, se volí vhodný rozsah měření. Měření je buď možné v oblasti malých nebo velkých koncentrací. Oblast velmi malých koncentrací se jeví jako vůbec nejvhodnější, neboť prakticky u všech sloučenin se průběhy jejich kalibračních grafů v této oblasti blíží přímce.

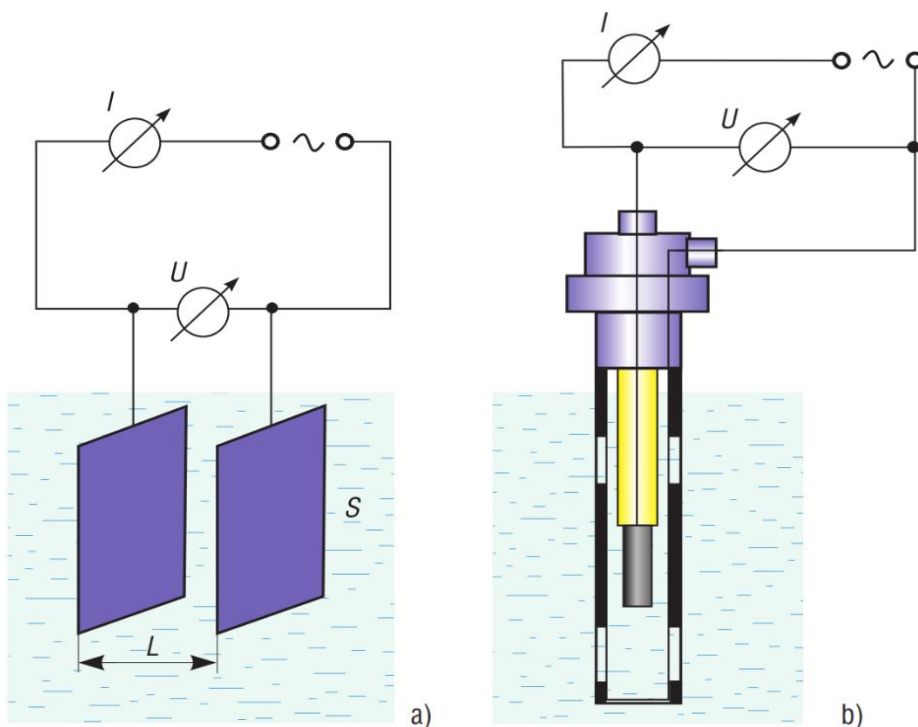
Konduktivita je navíc funkcí teploty a u roztoků s nižší koncentrací ji lze vyjádřit vztahem

$$\gamma_t = \gamma_0 [1 + \beta_1(t - t_0) + \beta_2(t - t_0)^2] \quad (18)$$

v němž β_1 a β_2 jsou teplotní koeficienty vodivosti.

5.1 Kontaktní senzory

Mohou být ponorné nebo průtočné s elektrodami z korozivzdorné oceli, slitiny titanu a paladia, nebo z grafitu. Snímače se dvěma elektrodami (obr. 33) se používají k měření čistých roztoků, snímače se čtyřmi elektrodami (obr. 34) je možné využít i při měření znečištěných kapalin a u roztoků s velkou vodivostí.

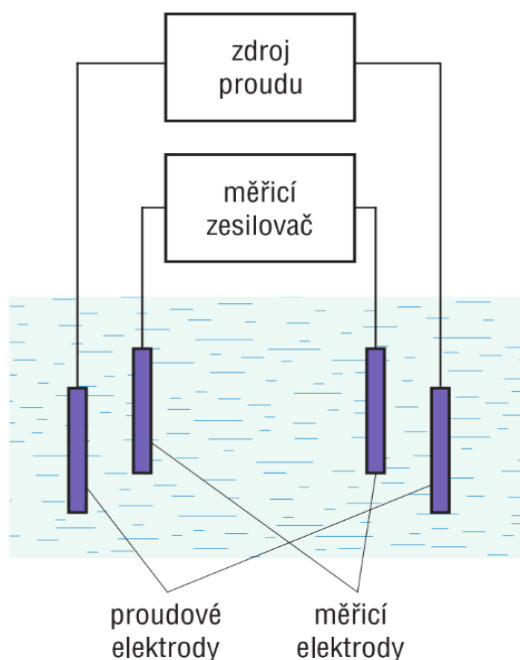


Obr. 33 – Dvouelektrodový snímač: a) základní princip, b) schéma, zdroj (Kadlec, 2018b)

Aby byl v platnosti Ohmův zákon a nikoli vztah

$$I = G(U - P) = \frac{1}{R}(U - P) \quad (19)$$

kde P je polarizační napětí na rozhraní mezi roztokem a elektrodami, musí být $P = 0$. Místo stejnosměrného napětí se používá střídavé, protože při střídání směru toku proudu o vysoké frekvenci (50 Hz až 5 kHz) se nestačí vytvořit silnější polarizační vrstva, resp. se vždy stačí při opačném směru proudu rozpustit.

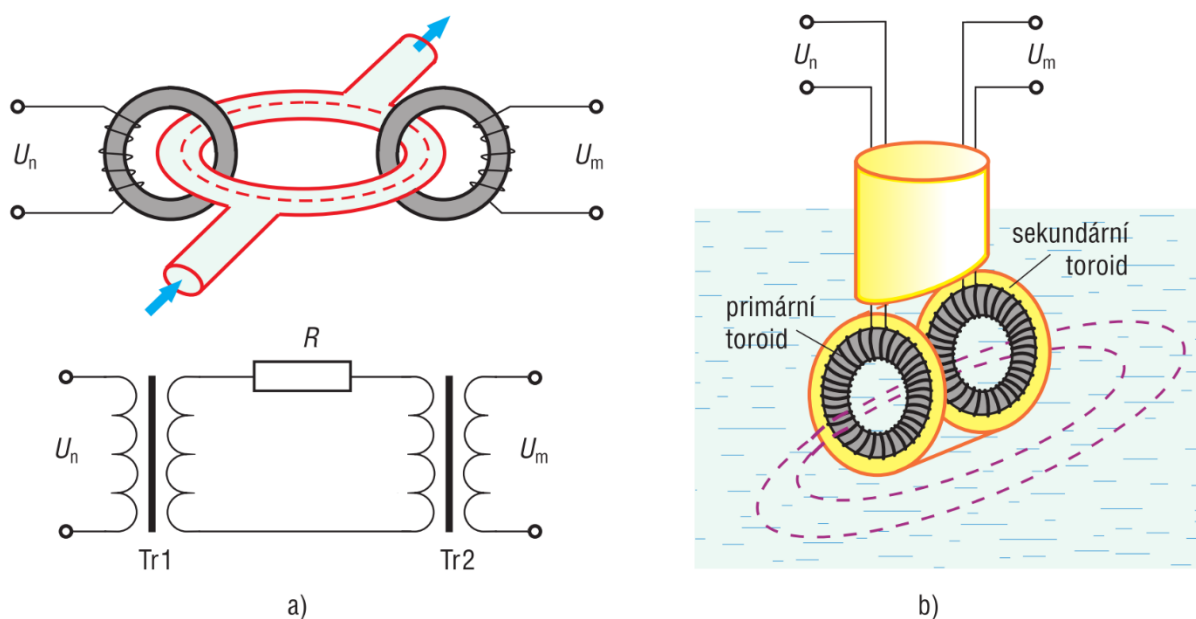


Obr. 34 – Princip čtyřelektrodeového snímače, zdroj (Kadlec, 2018b)

Střídavý napájecí proud teče na obr. 34 roztokem přes dvě proudové elektrody. Úbytek napětí v elektrolytu je snímán dvěma měřicími napěťovými elektrodami a zpracováváno měřicím zesilovačem s mikroprocesorem. Polarizace, k níž dochází na proudových elektrodách, v tomto případě neovlivní vůbec měření.

5.2 Indukční senzory

Princip činnosti indukčních senzorů vodivosti je na obr. 35.



Obr. 35 – Princip indukčního snímače, zdroj (Kadlec, 2018b)

Vzájemná vazba mezi transformátory Tr1 a Tr2 je realizována pomocí závitu z izolační trubky, uvnitř které proudí měřená vodivá kapalina. Ta je de facto sekundárním vinutím Tr1 a

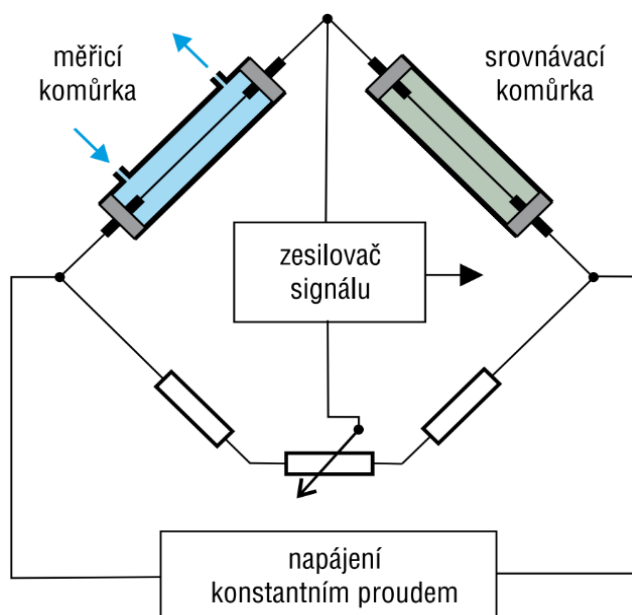
současně primárním vinutím Tr2. Bude-li napájecí napětí U_n přivedené na primární vinutí Tr1 konstantní, bude napětí U_m měřené na sekundárním vinutí Tr2 nepřímo úměrné odporu R kapaliny ve smyčce, tj. přímo úměrné její vodivosti G .

6 Měření složení plyných směsí

V průmyslu je pravděpodobně nejvíce zapotřebí měřit koncentrace CO_2 , CO, hořlavých plynů a par ve vzduchu, měřit koncentraci kyslíku v plyných směsích a sloužení kouřových plynů. K tomu se používají, i např. vzhledem k nebezpečnosti CO_2 a CO pro člověka, automatické provozní analyzátory různé konstrukce.

6.1 Tepelně-vodivostní analyzátory

Tyto analyzátory se nejvíce používají pro měření koncentrací CO_2 . K měření tepelné vodivosti se používá metoda s nejčastěji platinovým topným drátem umístěným ve válcové měřicí komůrce v níž je analyzovaný plyn. Druhá identická srovnávací komůrka je naplněna plynem srovnávacím. Obě komůrky se zapojují do Wheatstoneova můstku, viz obr. 36. Pokud rozdíly v tepelné vodivosti plynů v obou komůrkách nejsou příliš velké, je při napájení konstantním proudem, výstupní napětí můstku úměrné rozdílu tepelných vodivostí.

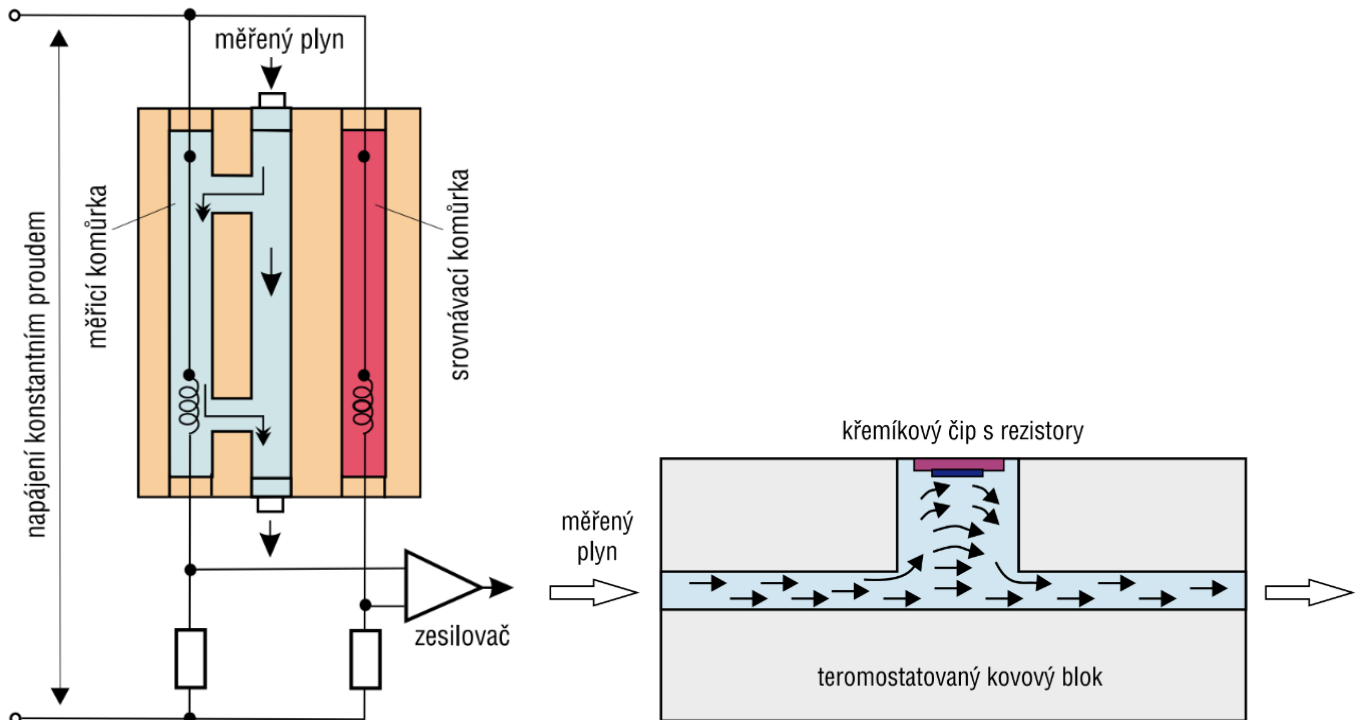


Obr. 36 – Wheatstoneův můstek s měřicí a srovnávací komůrkou, zdroj (Kadlec, 2019d)

Je-li potřeba zdvojnásobit citlivost měření, nabízí se využití dvou párů komůrek. Příklady realizací měřicích bloků komerčně dostupných analyzátorů jsou na obr. 37. Aby nedocházelo k negativnímu ovlivnění odvodu tepla vlivem prouděním, tak měřený plyn proudí do měřicí komůrky nepřímou cestou (obr. 37 vlevo).

Jiný analyzátor (obr. 37 vpravo) je realizován na bázi křemíkového čipu s membránou s tenkovrstvými rezistory u nichž je udržována konstantní teplota. Dojde-li ke změně tepelné

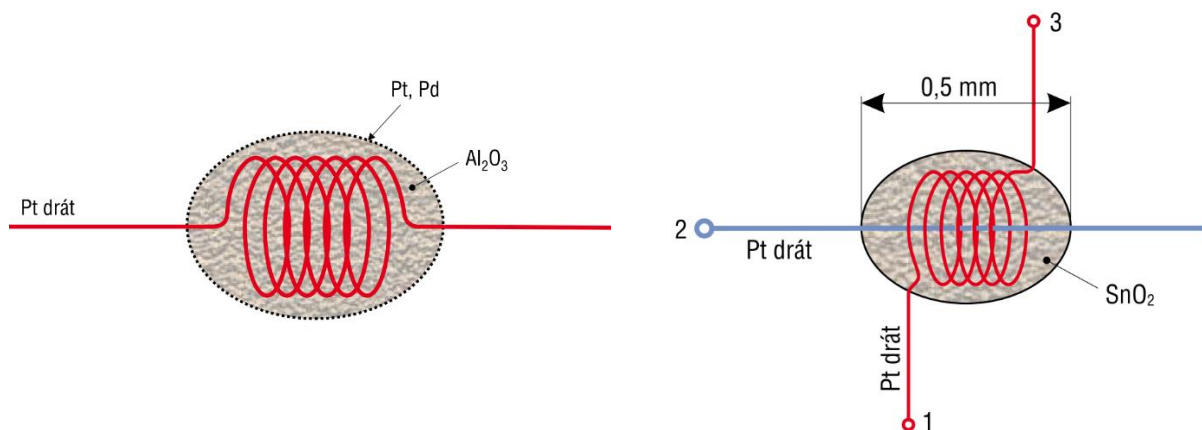
vodivosti měřeného plynu, změní se elektrický proud, který protéká zmiňovanými měřicími rezistory.



Obr. 37 – Dvě realizace měřících bloků analyzátoru, zdroj (Kadlec, 2019d)

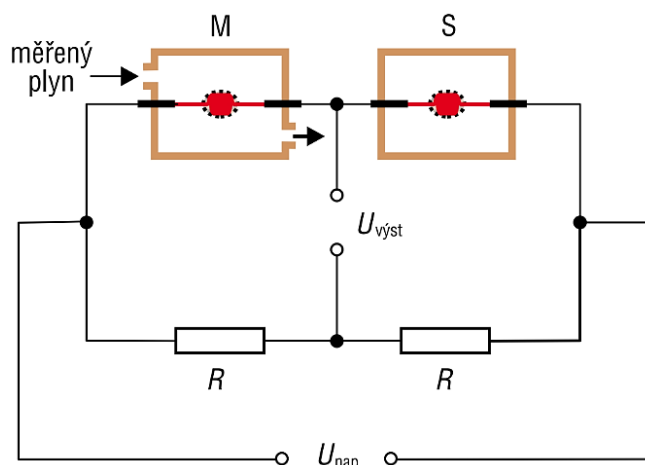
6.2 Analyzátor s katalytickými senzory

Jsou zejména vhodné pro měření koncentrací hořlavých plynů a par. Využívá se u nich chemická reakce probíhající na povrchu katalyzátoru, ideálně taková, která je spojená s tepelnými jevy. V dnešní době se využívají prakticky výhradně malé katalyzátorové perličky s vnitřním vyhříváním – tzv. **pelistory**, resp. pelistorové odpory, viz obr. 38. Mají nejčastěji tvar koule, válce nebo elipsoidu s průměrem 0,5 až 2 mm. Topné vinutí je z platinového drátku tloušťky 0,03 až 1 mm. Žáruvzdorná perlička je většinou vyrobena z materiálů na bázi oxidu hlinitého.



Obr. 38 – Schéma pelistoru a jeho perličkové provedení, zdroj (Kadlec, 2019d)

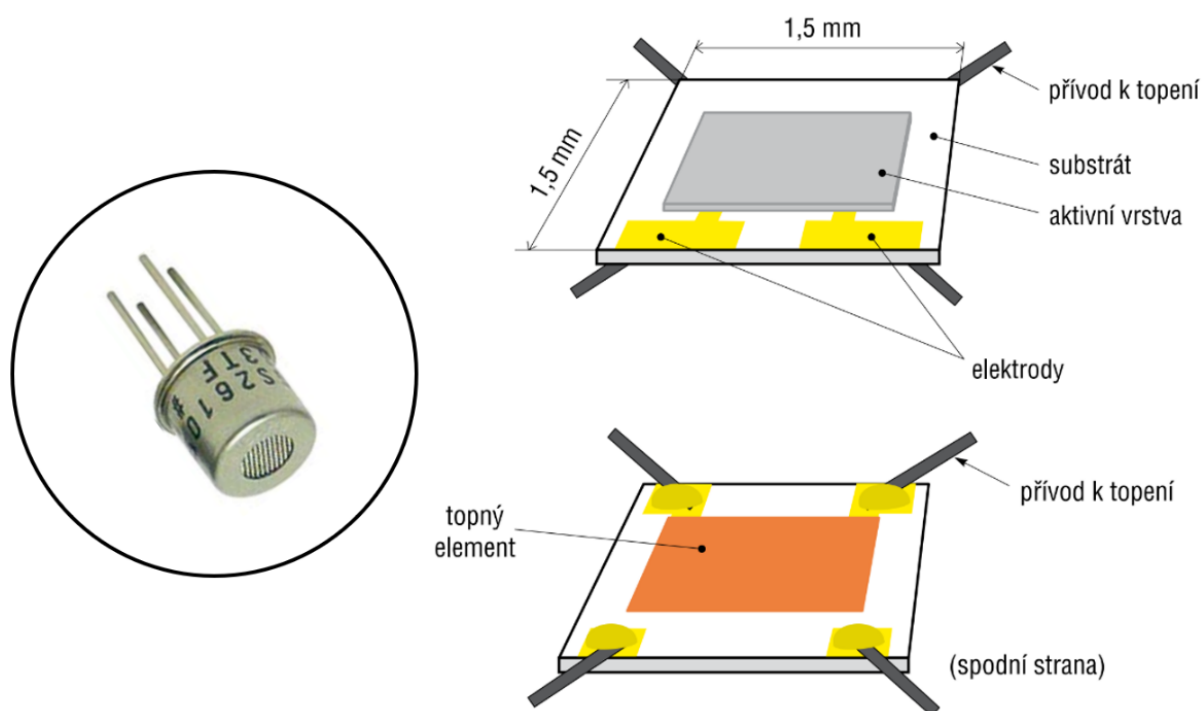
Uvnitř měřicí komory analyzátoru je umístěn pelistor s katalyticky účinným povrchem, na němž dochází ke spalovací reakci sledované hořlavé látky. Teplo, které se uvolní při spalování, zvýší teplotu měřicího tělíska, která se vyhodnocuje na základě změny odporu. Pracovní teplota se pohybuje okolo 500 °C. Vyhodnocování se provádí v můstkovém zapojení, v němž se mimo měřicího pelistoru M zapojuje ještě další srovnávací pelistor S, viz obr. 39, který kompenzuje rušivé vlivy způsobené změnami teploty.



Obr. 39 – Měřicí a srovnávací pelistor v můstku, zdroj (Kadlec, 2019d)

6.3 Analyzátoři s polovodičovými senzory

Pro stanovení koncentrací hořlavých plynů a par lze rovněž využít polovodičové senzory, které mají vyšší citlivost než senzory na bázi pelistorů. Skládají se ze substrátu, aktivní vrstvy, měřicích elektrod a topení, viz obr. 40.



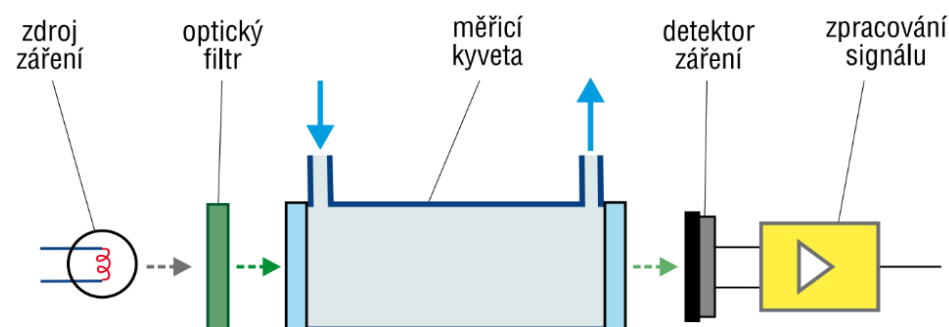
Obr. 40 – Polovodičový senzor v planárním provedení TGS2610, zdroj (Kadlec, 2019d, upraveno dle firemní literatury spol. Figaro)

Materiál organické nebo anorganické aktivní vrstvy je obvykle porézni a polykrystalický. V plynu, který obsahuje dostatečné množství kyslíku, se tento tzv. chemisorbuje na povrchu zrn v podobě aniontů, jež odčerpávají ze základního polovodičového materiálu s vodivostí typu N volné elektrony. V této konfiguraci je hodnota odporu senzoru vysoká. Bude-li se v plynu vyskytovat sledovaná redukcující složka, bude reagovat s povrchově sorbovaným kyslíkem, čímž dojde k uvolnění původně vázaných elektronů a elektrický odpor aktivní vrstvy poklesne. (Kadlec, 2019d)

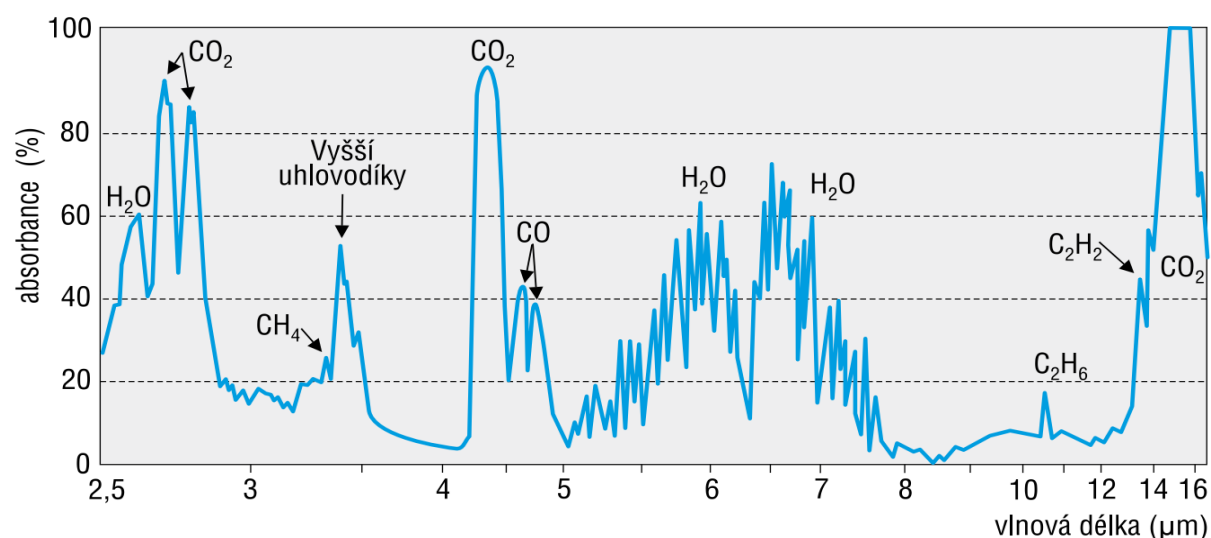
Další možné uspořádání senzoru v podobě tzv. polovodičového pelistoru je výše na obr. 38 vpravo. Tomto případě je perlička vyrobená z oxidu cínitého SnO_2 , v ní je platinová topná spirála v podobě šroubovice a její osou prochází platinová elektroda.

6.4 Fotometrické analyzátořy

Fotometrické analyzátořy využívají zeslabení elektromagnetického zářeni určité vlnové délky (UV, 200 až 400 nm a blízké IČ, 1 až 15 μm) při průchodu vrstvou plynu v měřicí kyvetě podle již dříve uvedeného Lambert-Beerova zákona (2). Schéma jednoduchého fotometru je na obr. 41.



Obr. 41 – Schéma jednoduchého fotometru, zdroj (Kadlec, 2019e)

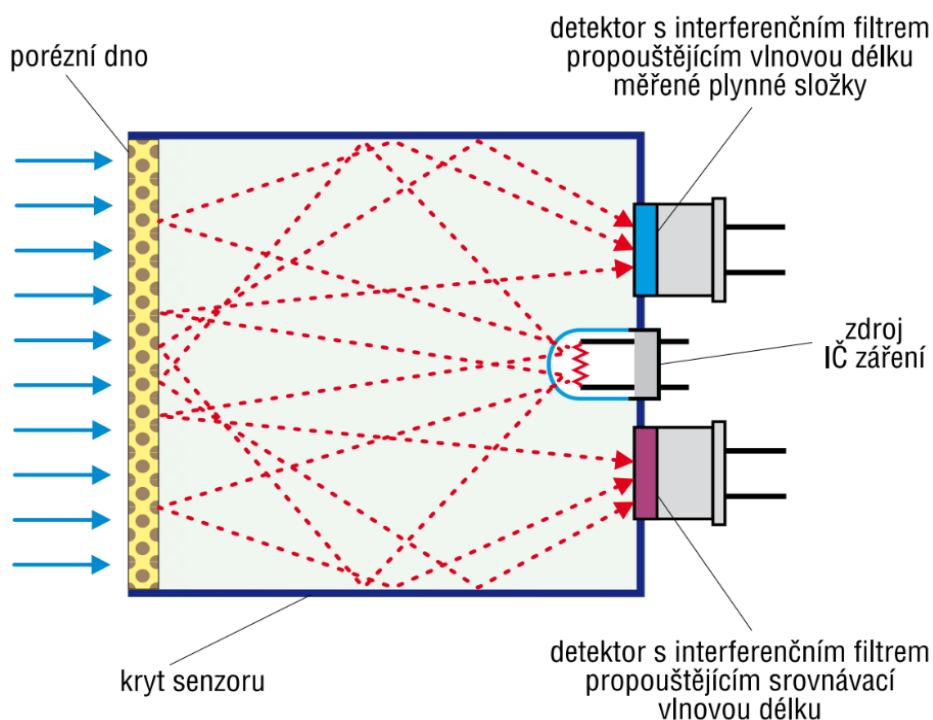


Obr. 42 – Absorpční spektra plynů v blízké infračervené oblasti, zdroj (Kadlec, 2019e)

6.5 Infračervené analyzátoři

Na obdobném principu jako výše uvedené fotometrické analyzátoři fungují IR analyzátoři. V tomto případě absorpce záření v blízkém IR spektru (4 až 15 μm) úzce souvisí se změnou energetického stavu molekul, přičemž při normálních teplotách v uvedené oblasti absorbují záření pouze plyny se složitějšími nesymetrickými molekulami, viz obr. 42.

V minulosti používané analyzátoři typu URAS (z německého Ultrarot Absorption Schreiber) a NDIR (Non Dispersive Infra Red), o kterých se lze více dozvědět např. v (Kadlec, 2019e), jsou v poslední době nahrazovány miniaturizovanými IR moduly s interferenčními úzkopásmovými filtry (schéma na obr. 43).

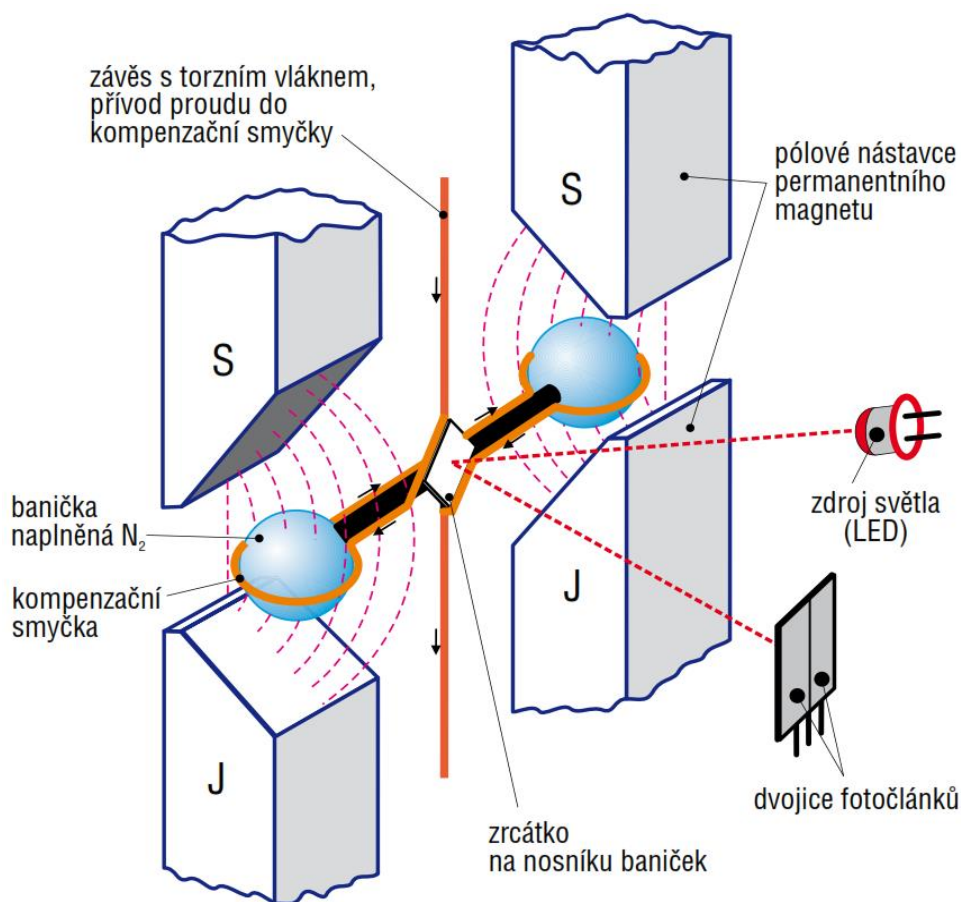


Obr. 43 – Schéma infračerveného modulu s interferenčními filtry, zdroj (Kadlec, 2019e)

6.6 Magnetické analyzátoři

Protože téměř všechny plyny jsou slabě diamagnetické, tedy až na paramagnetický kyslík a oxidy NO a NO₂, lze této vlastnosti využít v magnetických analyzátořích plynů. K určení magnetické susceptibility se používají dvě základní metody. První z nich, tzv. **statická magneto-mechanická**, jejíž princip je na obr. 44, je založena na měření síly působící na těleso obklopené analyzovaným plynem a umístěné v nehomogenním magnetickém poli.

V praktickém provedení senzoru se používají dvě duté skleněné kuličky naplněné N₂ a spojené skleněnou tyčinkou zavěšené na torzním křemenném vlákně. Při změně obsahu kyslíku v analyzovaném plynu dojde k jejich pootočení. Jelikož otáčivý moment je typicky velmi malý, používá se pro sledování pootočení optický systém se zrcátkem.



Obr. 44 – Princip magneto-mechanického analyzátoru, zdroj (Kadlec, 2019f)

Druhá metoda – **magneto-pneumatická** je založena na měření tlaku mezi póly elektromagnetu, v místě, kde je maximální intenzita elektromagnetického pole. Snímací část analyzátoru může být uspořádána dle obr. 46. K měření poměrně malého tlakového rozdílu musí být použit vhodný senzor s dostatečnou citlivostí.

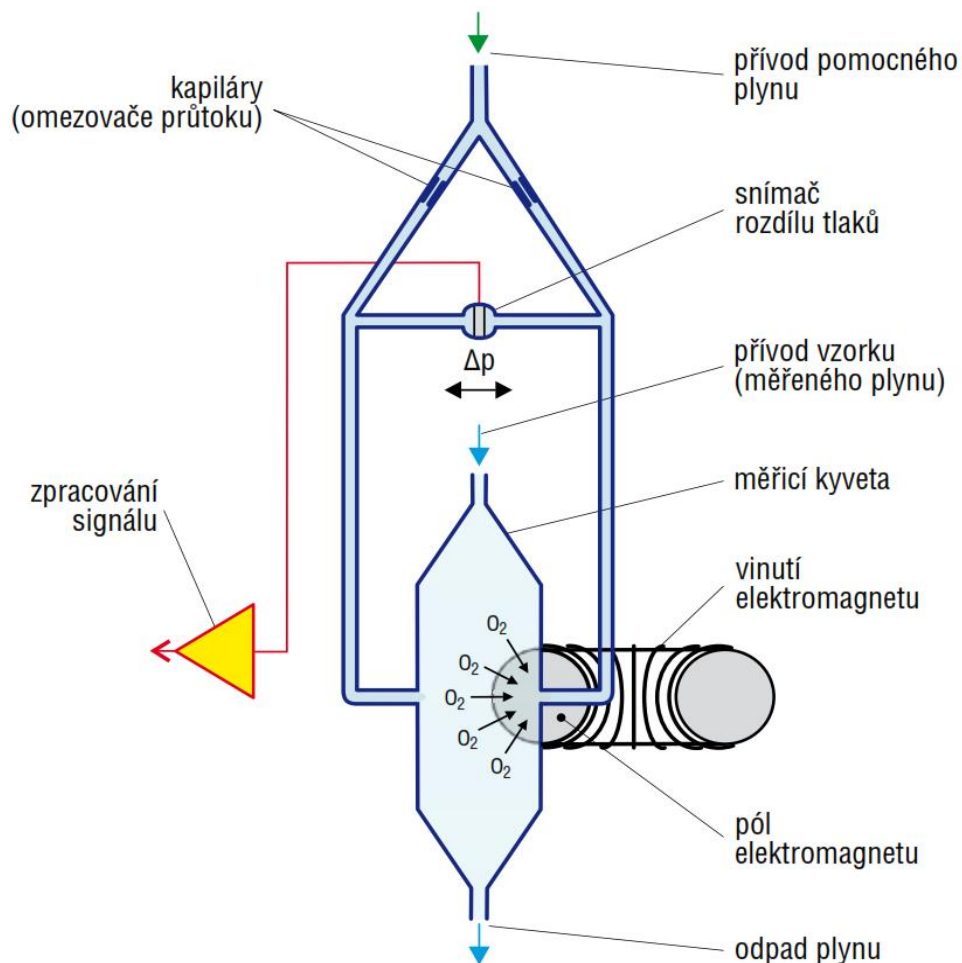
Výhodou magneto-pneumatických analyzátorů oproti magneto-mechanickým je, že neobsahují žádné pohyblivé součásti, takže jsou velmi odolné a nevyžadují složitou údržbu. Při provozních měřeních se jednoznačně upřednostňují a používají se především při kontrole složení kouřových plynů.

6.7 Elektrochemické analyzátorů

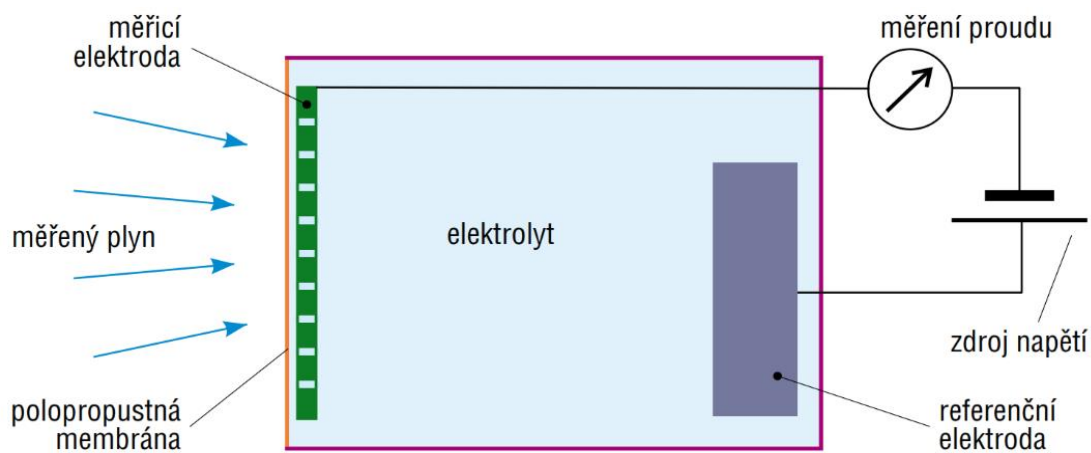
Tyto analyzátorů jsou založeny na měření napětí nebo proudu mezi elektrodami umístěnými v elektrolytu. Protože plyny za normálního stavu jsou elektricky nevodivé, musí se přivést přímo k rozhraní mezi elektrolytem a elektrodou. U tzv. **ampérometrických** senzorů (obr. 46) se měří procházející elektrický proud, zatímco u senzorů **potenciometrických** (jinak také galvanometrických) napětí mezi elektrodami.

U moderních galvanometrických senzorů se nejčastěji používají elektrochemické články s tuhým elektrolytem na bázi oxidu zirkoničitého. V tomto případě se ale musí elektrolyt

nejprve ohřát na teplotu okolo 700 °C, neboť při normálních teplotách je pohyblivost elektronů v elektrolytu velmi nízká a napětí na elektrodách by bylo špatně měřitelné.



Obr. 45 – Princip magneto-pneumatického analyzátoru, zdroj (Kadlec, 2019f)



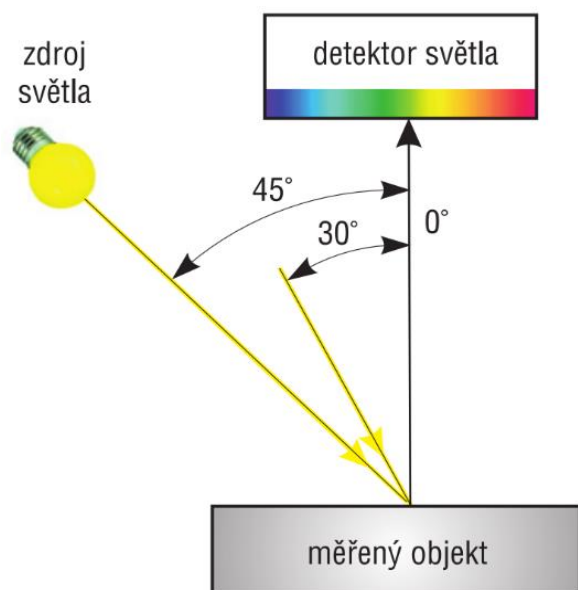
Obr. 46 – Schéma jednoduchého elektrochemického senzoru, zdroj (Kadlec, 2019f)

7 Měření barvy

Měření barvy látek v reálném čase se provádí především z důvodu potřeby monitoringu kvality sledovaného produktu. Oblasti využití jsou tedy především v chemickém a potravinářském průmyslu. Pro průmyslové měření barev byla definována řada standardů, vč. matematického modelu určeného pro přesný popis barev. Důležité jsou pojmy **chromatičnost**, sloužící k vyjádření barevnosti světla (určuje jí spektrální složení světla a jeho intenzita) a **kolorita** (barevnost), sloužící pro vyjádření barevnosti sledovaných objektů představujících tzv. druhotné zářiče (je určena spektrálním složením a intenzitou světla a dále odrazivostí a propustností objektu). Na základě uvedených dvou pojmů se přístroje pro měření barvy dělí na **kolorimetry** (fotometry) a **spektrofotometry**.

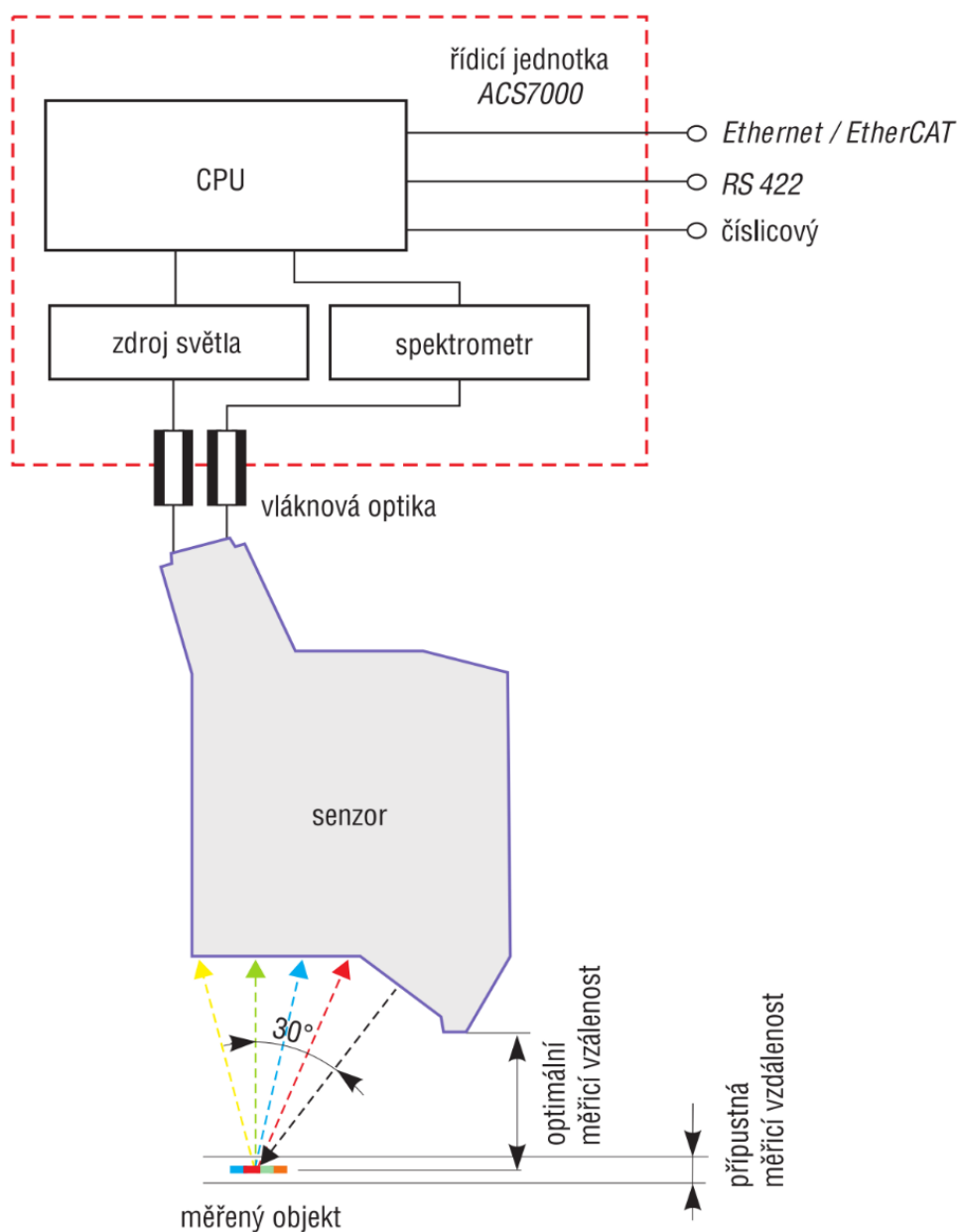
7.1 Snímače pro inline měření barvy objektů

Pro detekci a měření barvy objektů je možné použít různé typy detektorů. Obecně se kolorimetry i spektrofotometry skládají ze zdroje světla, monochromátoru, místa pro umístění měřeného vzorku a detektoru. Zdrojem světla bývá zpravidla vhodný typ žárovky nebo výbojky. Běžně se používají senzory typu ACS systému colorCONTROL spol. Micro-epsilon (schéma na obr. 47), u nichž je vzájemná konfigurace zdroje světla a detektoru pod úhly 45° či $30^\circ / 0^\circ$. Měření je bezkontaktní, ale lze použít příp. i adaptér pro měření dotykové.



Obr. 47 – Základní princip měření barvy objektu, zdroj (Kadlec, 2019)

Systém colorCONTROL (schéma senzoru na obr. 48) je pro svoji vysokou rychlost měření vhodný i pro kontinuální měření přímo v rámci výrobních procesů. K řídicí jednotce ACS7000 je možné připojit tři základní typy snímačů – standardní konstrukce (obr. 48), kruhový a pro průhledné materiály.



Obr. 48 – Schéma systému pro měření barvy colorCONTROL, zdroj (Kadlec, 2019)

7.2 Snímače pro měření barvy kapalin

Příkladem senzoru pro měření barev kapalin je absorpční fotometr SIGRIST ColorPlus na obr. 48. V In-line verzi lze tyto fotometry instalovat přímo na potrubí, čímž odpadá nutnost odběru vzorků. V praxi se nejčastěji používají verze s bypassem s průtočnou celou s délkou 5 či 10 cm. Měřené médium je do cely přiváděno odbočkou z hlavního potrubí.

Tyto fotometry mají uplatnění zejména v úpravnách vody, kde při osazení několika zdrojů světla s různou vlnovou délkou, umožňují měřit současně např. barvu (vlnová délka 436 nm), UV absorbanci (254 nm) a zároveň provádět kompenzaci vlivu detekovaných kalů (546 nm).



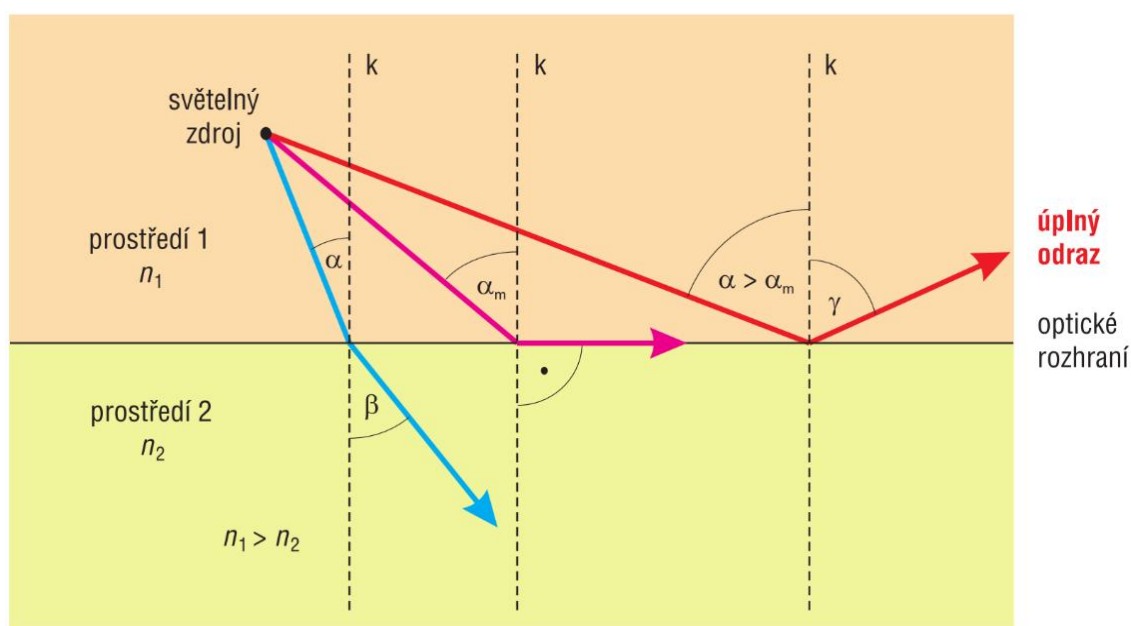
Obr. 49 – Senzor pro měření barvy kapalin SIGRIST ColorPlus 2, zdroj (Technoprocur, 2022)

8 Měření optických vlastností kapalin

Zejména v potravinářském a chemickém průmyslu je potřeba zjišťovat koncentraci různých látek rozpuštěných v kapalině. K tomu účelu se používají různé typy optických senzorů, tzv. refraktometrů a polarimetrů a senzorů zákalu, tzv. turbidimetrů a nefelometrů. Refraktometry využívají při své činnosti změny indexu lomu při přítomnosti nečistot. Index lomu je definován poměrem rychlostí šíření světla c_1 a c_2 v obou prostředích

$$n = \frac{c_1}{c_2} \quad (20)$$

Index lomu n je veličinou relativní, vztaženou k vakuu.



Obr. 50 – Schéma odrazu a lomu světla na rozhraní dvou prostředí, zdroj (Kadlec, 2019a)

Chceme-li se zabývat libovolnou směsí dvou látek, je vhodnější stanovit jejich relativní index lomu poměrem absolutních indexů lomu

$$n_{1,2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (21)$$

Velikost indexu lomu je závislá na vlnové délce světla, dále na tlaku, teplotě, koncentraci a skupenství sledované směsi. V praxi je u senzorů nutné provádět především teplotní kompenzaci, protože na tlaku je závislost indexu lomu výrazně nižší. U směsí se index lomu stanovuje pomocí vztahu

$$n_s = \sum_{i=1}^k m_i n_i \quad (22)$$

v němž k odpovídá počtu složek směsi, m_i představuje hmotnostní zlomek a n_i index lomu i -té složky.

Index lomu lze prakticky stanovit dle **Snellova zákona**, který byl objeven již v 10. století arabským matematikem Ibn Sahlem, ale pojmenován je po nizozemském matematikovi W. Snelliusovi (1580 – 1626), který jej znovuobjevil v 17. století. Při uvažování dvou prostředí s rovinným rozhraním

$$n_{1,2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (23)$$

Při přechodu světla z prostředí, které je opticky hustší, do prostředí řidšího, bude úhel lomu β mít větší velikost než úhel dopadu α , viz obr. 50. Bude-li při dopadu světla dosaženo tzv. **mezného úhlu** α_m , tak namísto lomu dojde naopak k tzv. **úplnému odrazu** pod úhlem γ . Světlo dopadající na rozhraní v normálovém směru, zcela projde do druhého prostředí beze změny směru.

8.1 Refraktometrické senzory

Existují dva základní typy provozních refraktometrů. Prvním z nich jsou **refraktometry diferenční**, jejichž zjednodušené schéma je uvedeno na obr. 52. Světlo emitované zdrojem světla prochází měřicí kyvetou s protékajícím měřeným médiem. V utěsněné referenční kyvetě, která je uvnitř měřicí kyvety, je roztok s indexem lomu odpovídajícím polovině rozsahu refraktometru.

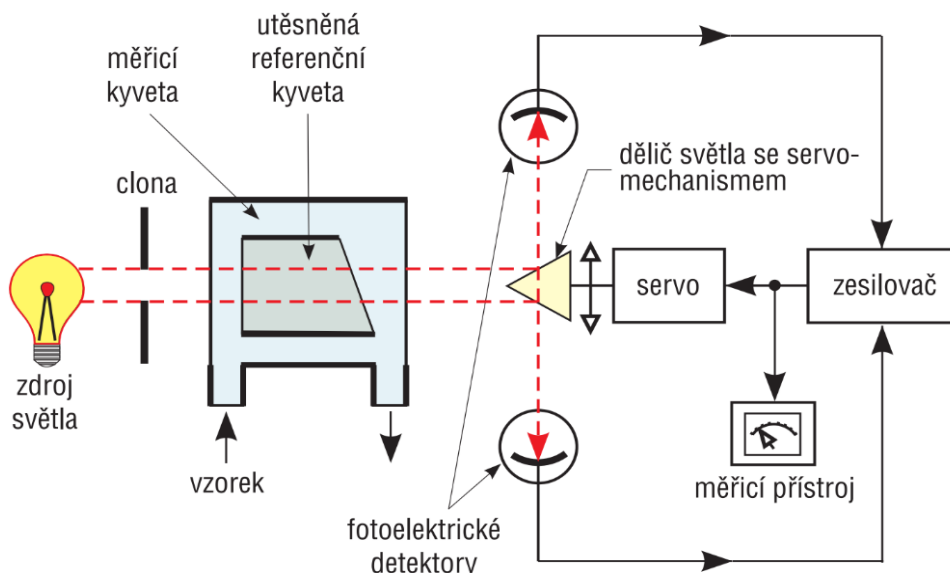
Úhel lomu je úměrný rozdílu indexů lomu měřeného média a roztoku v referenční kyvetě. Světlo z kyvety postoupí dále až na dělič ovládaný servomechanismem a dále na dvojici fotoelektrických detektorů, na základě jejichž zesílených výstupních signálů se generuje akční veličina ovládající servomechanismus. Poloha děliče se mění do té doby, dokud není dosaženo stejného osvětlení obou detektorů. Konečná poloha děliče přesně odpovídá rozdílu indexů lomů.

Mezi indexem lomu a hustotou média platí funkční závislost, obecně tedy $\rho = f(n, r)$, přičemž r je tzv. **měrná refrakce**, která charakterizuje každou látku. Dle odborné literatury zabývající

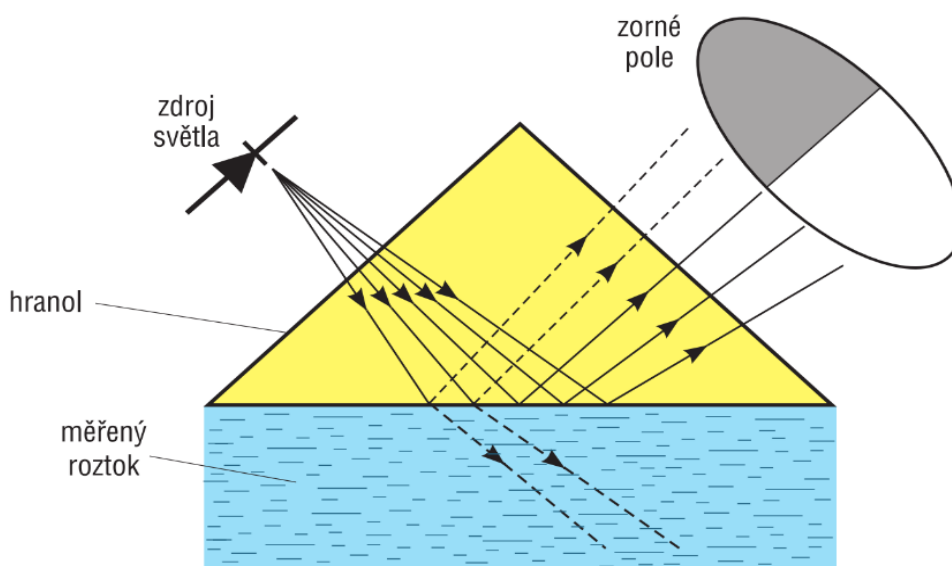
se touto problematikou, nejpřesněji popisuje závislost hustoty na indexu lomu a měrné refrakci vztah

$$\rho = \frac{n^2 - 1}{n^2 - 2} \frac{1}{r} \quad (24)$$

V provozních **refraktometrech založených na měření mezného úhlu** se vyhodnocuje světlo odražené od rozhraní mezi měřeným médiem a optickým hranolem, viz obr. 52. Světelné paprsky dopadají na rozhraní s různým úhlem, částečně projdou do měřeného média a částečně se odrazí. Po překročení mezného úhlu dochází k jejich úplnému odrazu. Výsledné zorné pole se pak skládá ze světlé a tmavé části, přičemž poloha rozhraní mezi nimi odpovídá právě meznému úhlu. S rostoucí koncentrací nečistot (a tedy i s rostoucí hustotou média) zároveň roste hodnota indexu lomu, rozhraní se posouvá a tmavá oblast začne převažovat. Poloha rozhraní je měřena fotoelektrickými detektory, jejichž součástí jsou řídicí obvody s mikroprocesorem umožňující mj. i teplotní kompenzaci.

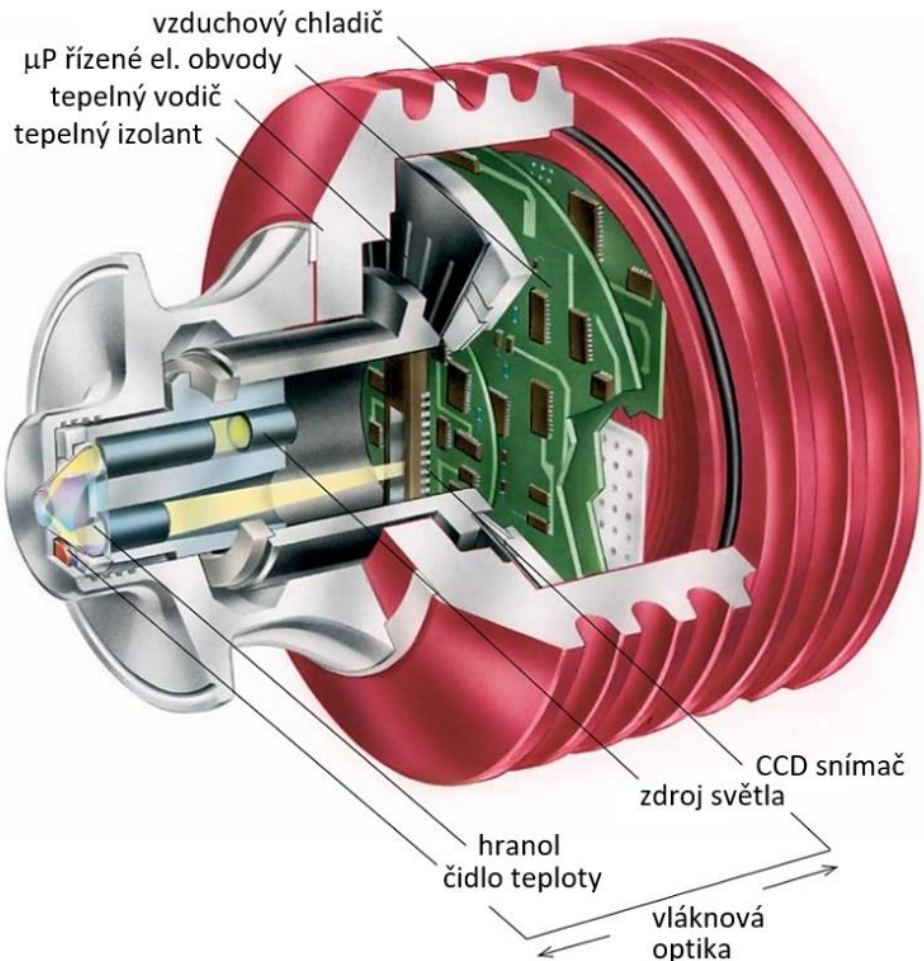


Obr. 51 – Schéma diferenčního refraktometru, zdroj (Kadlec, 2019a)



Obr. 52 – Schéma principu činnosti refraktometru s mezným úhlem, zdroj (Kadlec, 2019a)

Příkladem refraktometru pracujícího na principu měření mezního úhlu je refraktometr K-PATENTS na obr. 53. Jako zdroj světla je u něj použita LED dioda, pro detekci odraženého světla je použit řádkový CCD snímač. Měřící hranol se nachází na okraji tělesa senzoru (poblíž je i sensor teploty pro kompenzaci teplotního vlivu), které je při měření ponořeno do zkoumaného média. Vzájemné propojení mezi LED diodou, hranolem a CCD snímačem je realizováno s využitím vláknové optiky.



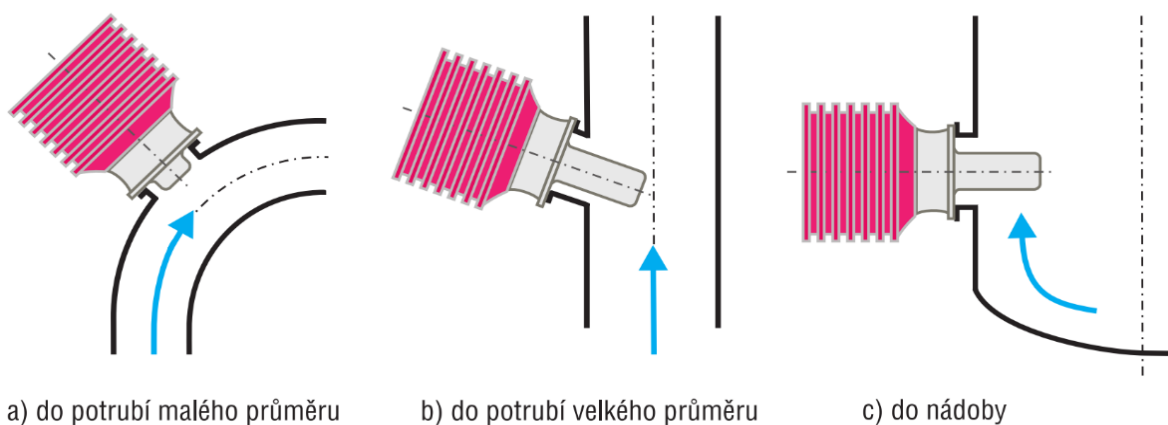
Obr. 53 – Schéma refraktometrického senzoru K-PATENTS, upraveno dle (Vaisala, 2020)

Praktické provedení ponorného a průtočného refraktometru K-PATENTS je na obr. 54. Oba tyto refraktometry mohou pracovat až při teplotách okolo 150 °C.

Při umístění ponorné verze senzoru do potrubí je nutné respektovat několik skutečností, viz obr. 55. Ideální je místo v potrubí, kde je co možná nejvyšší rychlost proudění a proudění je současně turbulentní, protože pak nedochází ke znečišťování čidla úsadami. Vhodné je u potrubí s menší světlostí umístění v jeho ohybu, příp. v kolenu. U svislých potrubí je výhodné, když kapalina proudí směrem nahoru a při umístění v provozních nádobách by mělo být uvnitř nádoby zajištěno promíchávání média, nebo se senzory mohou umístit do obtokových kanálů s nuceným oběhem.



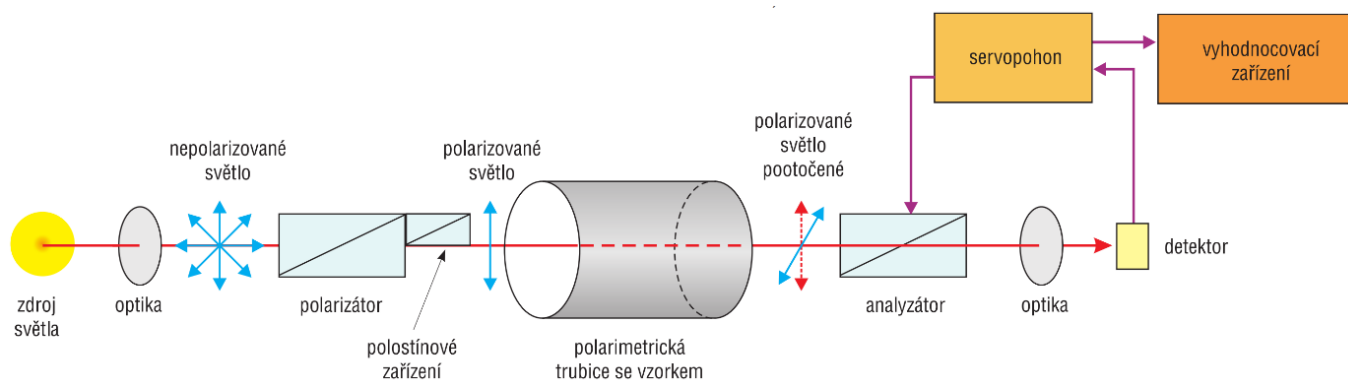
Obr. 54 – Průmyslový ponorný a průtočný refraktometr K-PATENTS, zdroj (Vaisala, 2020)



Obr. 55 – Možnosti umístění refraktometrického senzoru, upraveno dle (Vaisala, 2020)

8.2 Polarimetry

Některé typy krystalů a kapalin disponují schopností tzv. **rotační polarizace**, tj. stáčení polarizační roviny lineárně polarizovaného světla. Takové látky se označují jako **opticky aktivní**. Související teorii lze nalézt např. v (Kadlec, 2019b), zde se zaměříme především na praktickou realizaci polarimetrů.

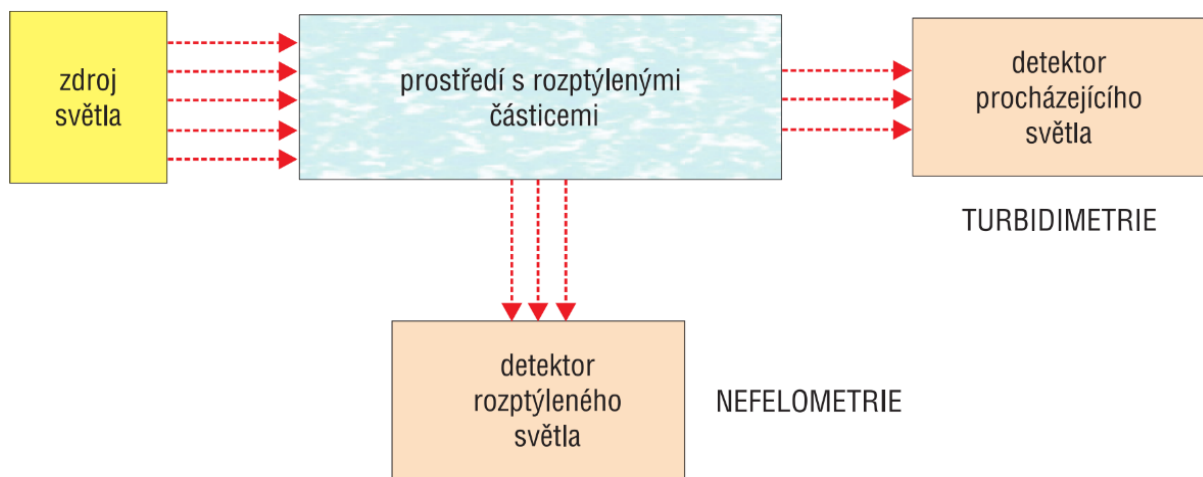


Obr. 56 – Schéma optického uspořádání polarimetru, zdroj (Kadlec, 2019b)

Schéma uspořádání polarimetru je na obr. 56. Nepolarizované světlo emitované zdrojem po průchodu optikou vytváří rovnoběžný svazek. Průchodem polarizátorem realizovaným na bázi krystalů dvojlomného islandského vápence je získáno lineárně polarizované světlo, které se dále šíří měřeným vzorkem umístěným v polarimetrické trubici. Analýza natočení roviny polarizovaného světla probíhá v analyzátoru (ve své podstatě druhém lineárním polarizátoru).

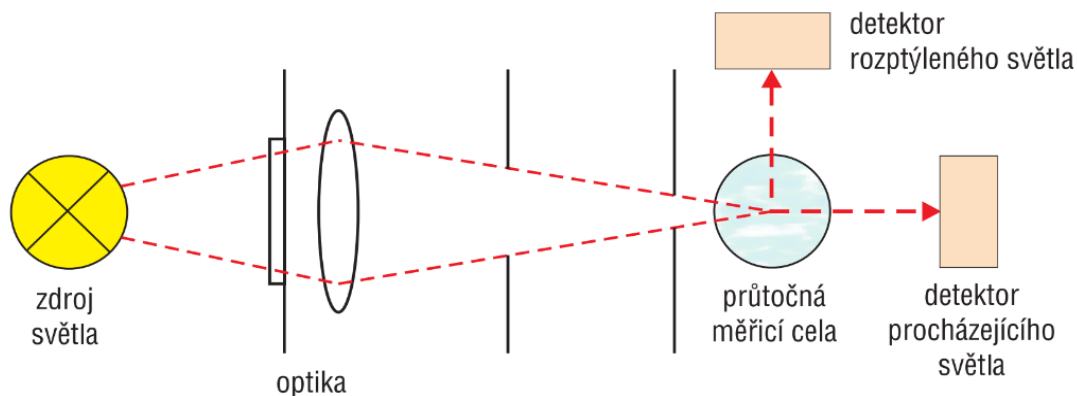
8.3 Snímače zákalu – turbidimetry a nefelometry

Průchodem světla kapalinou obsahující nerozpuštěné částice dojde při vzájemné interakci k rozptylu světla do všech směrů. Koncentraci částic je pak možné měřit způsobem uvedeným na obr. 57. Detekce procházejícího světla se nazývá **turbidimetrie**, detekce rozptýleného světla pak **nefelometrie**.



Obr. 57 – K rozdělení metod pro měření zákalu kapalin, zdroj (Kadlec, 2019c)

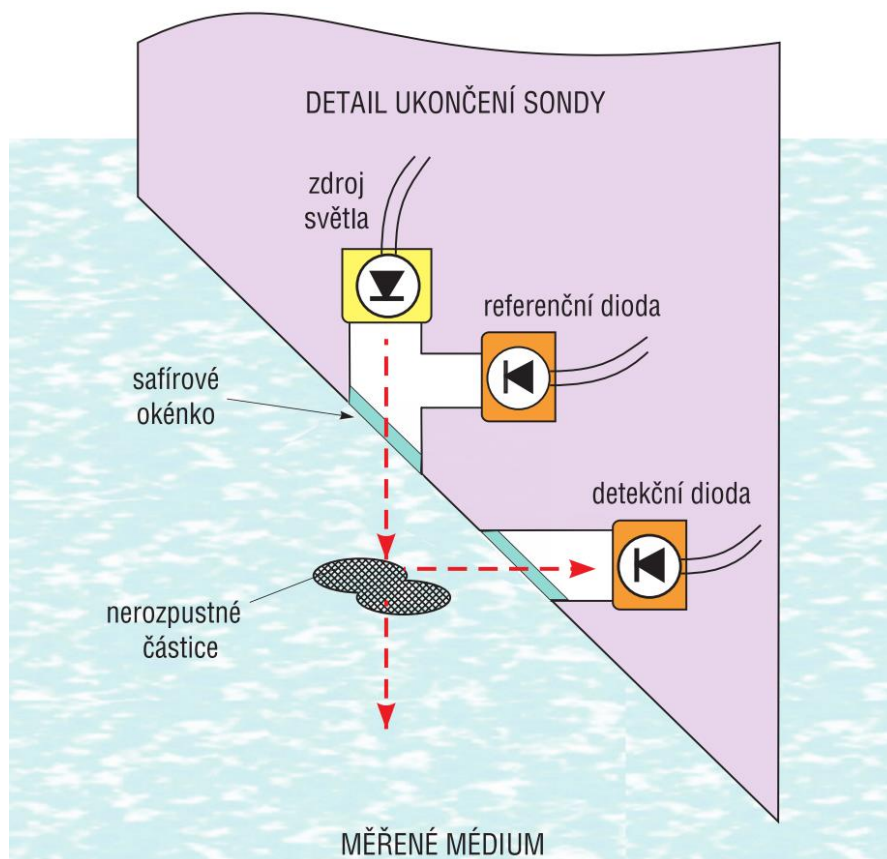
Senzory využívají k měření zákalu průtočné měřicí cely. Přístroje realizované v souladu s normou EN ISO 7027 vybavené dvěma detektory pracují na základě vyhodnocování rozptýleného světla pod úhlem 90° a procházejícího světla s vlnovou délkou 860 nm, viz obr. 58.



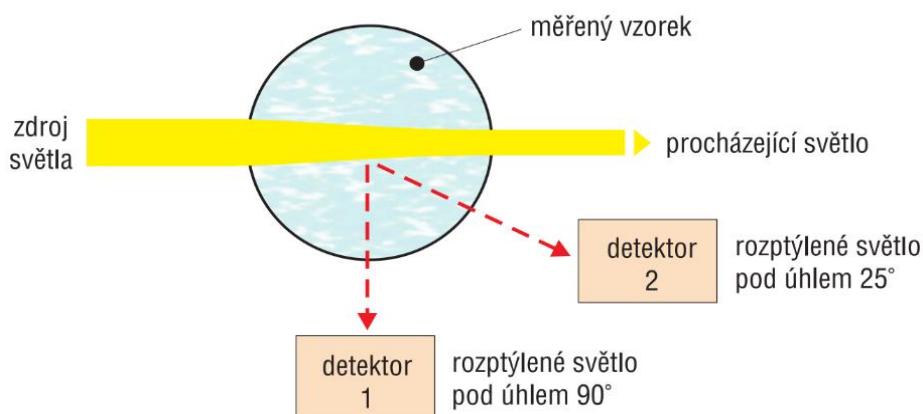
Obr. 58 – Schéma snímače zákalu s úhlem 90° , zdroj (Kadlec, 2019c)

Schéma optické části ponorného senzoru zákalu je na obr. 58. Ta vyhodnocuje jen rozptýlené světlo pod úhlem 90° . Navíc je vybavena referenční fotodiodou pro kompenzaci vlivu změny intenzity světla v důsledku několikanásobných rozptylů.

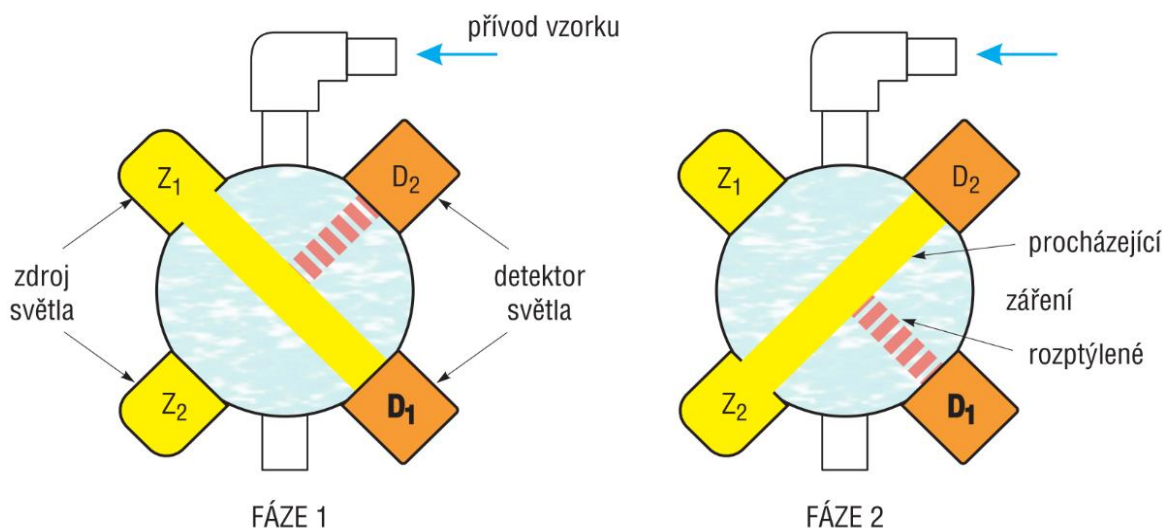
Lepší řešení přináší dvoukanálový typ senzoru (obr. 60), který umožňuje současné měření rozptýleného světla pod úhly 90° a 25° směrem dopředu. Indikací rozptýleného světla pod úhlem 90° se zjistí množství malých částic, zatímco indikací světla pod úhlem 25° se zjistí množství částic velkých. Např. u mléka po odstředění je ale vhodné indikovat zpětný úhel rozptýleného světla o velikosti 135° . Existují ale i senzory čtyřkanálové využívající čtyři modulované svazky světla, které pracují dvoufázově, viz obr. 61.



Obr. 59 – Schéma optické části ponorného senzoru zákalu, zdroj (Kadlec, 2019c)



Obr. 60 – Schéma dvoukanálového snímače zákalu, zdroj (Kadlec, 2019c)



Obr. 61 – Schéma čtyřkanálového dvoufázového snímače zákalu, zdroj (Kadlec, 2019c)

9 Otázky a úkoly

- 1) Jak lze měřit vlhkost v pevných látkách? Jaké metody a prostředky k tomu lze využít?
- 2) Jaké metody a přístroje se v praxi používají pro měření hustoty kapalin?
- 3) Jakým způsobem lze měřit viskozitu? Uveďte základní typy viskozimetrů.
- 4) Jaké jsou základní způsoby měření pH a měření elektrolytické vodivosti kapalin?
- 5) Vyjmenujte vám známé analyzátory pro měření složení plyných směsí. Co jsou to pelistory?
- 6) Jaké jsou možnosti měření barvy látek v reálném čase? Uveďte a velmi stručně popište několik principů.
- 7) Vysvětlete, k čemu se v praxi používají refraktometry, polarimetry a turbidimetry a nefelometry. Uveďte příklady jejich použití.

10 Použitá literatura

CIDEPE, 2022. *Stokes Viscometer EQ124R* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.cidepe.com.br/index.php/en/produtos-interna/stokes-viscometer-multi-timer-for-data-treatment-5-inputs/EQ124R>

KADLEC, Karel, 2011a. Provozní snímače hustoty kapalin (část 1). *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **17**(1), 44-48. ISSN 1210-9592.

KADLEC, Karel, 2011b. Provozní snímače hustoty kapalin (část 2). *Automa: časopis pro automatizační techniku*. **17**(5), 42-44. ISSN 1210-9592.

KADLEC, Karel, 2018a. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Elektrochemické snímače – měření pH. *Listy cukrovarnické a řepařské*. **134**(7-8), 282-285. ISSN 1805-9708.

- KADLEC, Karel, 2018b. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření elektrolytické vodivosti kapalin. *Listy cukrovarnické a řepařské*. **134**(5-6), 220-223. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, 2018c. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření hustoty kapalných směsí (část 1.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **134**(3), 122-127. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, 2018d. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření hustoty kapalných směsí (část 2.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **134**(4), 162-165. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, 2019a. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření optických vlastností kapalin (část 1.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **134**(9-10), 348-351. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, 2019b. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření optických vlastností kapalin (část 2.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **134**(11), 348-351. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, 2019c. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření optických vlastností kapalin (část 3.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **134**(12), 420-423. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Pavel a Karel Kadlec, 2019. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření barvy. *Listy cukrovarnické a řepařské*. **135**(1), 34-37. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, Tomáš Bártofský a Pavel Kadlec, 2019d. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření složení plyných směsí (část 1.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **135**(5-6), 218-223. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel a Tomáš Bártofský, 2019e. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření složení plyných směsí (část 2.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **135**(7-8), 282-286. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel a Tomáš Bártofský, 2019f. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření složení plyných směsí (část 3.). *Listy cukrovarnické a řepařské*. **135**(9-10), 339-343. ISSN 1805-9708.
- KADLEC, Karel, Tomáš Bártofský a Pavel Kadlec, 2019g. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření viskozity. *Listy cukrovarnické a řepařské*. **135**(4), 161-166. ISSN 1805-9708.
- KOPECKÝ, Dušan a Karel Kadlec, 2019. Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření vlhkosti v pevných látkách. *Listy cukrovarnické a řepařské*. **135**(3), 119-123. ISSN 1805-9708.
- RHEOTEST Medingen, GmbH, 2022. *Viskosimeterb Höppler KF 3.2* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.rheotest.de/koeppler-kf-3-2/>>
- TECHNOPROCUR CZ, spol. s r. o., 2022. *SIGRIST ColorPlus 2: fotometrický analyzátor DOC, TOC, CHSK* [online]. [citováno 26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.technoprocur.cz/sigrist-colorplus-2_z615/>
- VAISALA, Ltd., 2020. *A Sanitary Process Refractometer for Brix and Concentration Measurement: Vaisala K-PATENTS Sanitary Refractometer PR-23-A* [online]. [citováno

26. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <https://cms.pm/uploads/files/flowcon.co.uk_894479449.pdf>

Seznam zkratek

| | |
|--------|--|
| AD | analogově digitální |
| CPU | central processor unit (centrální procesorová jednotka) |
| IČ | infračervený |
| IR | infrared |
| LED | light emitting diode (světlo emitující dioda) |
| MOSFET | metal oxide semiconductor field effect transistor (typ tranzistoru řízeného polem) |
| N | negative (polovodič typu N) |
| NDIR | non dispersive infrared |
| NIR | near-infrared region (blízké infračervené spektrum) |
| P | positive (polovodič typu P) |
| pH | potentia hydrogenii (potenciál vodíku) |
| PVC | polyvinylchlorid |
| ToF | time od flight (doba letu) |
| URAS | ultrarot absorption schreiber |
| UZ | ultrazvuk |

Rejstřík

absorpční koeficient, 6
analyzátor plynů, 28
 elektrochemický, 34
 fotometrický, 32
 infračervený, 33
 s interferenčním filtrem, 33
 typu NDIR, 33, 49
 typu URAS, 33
magnetický, 33
 magneto-mechanický, 33
 magneto-pneumatiký, 34
s katalyckým senzorem, 30
s polovodičovým senzorem, 31

- tepelně-vodivostní, 29
- barevnost. viz kolorita
- elektrochemický článek, 24
- fotometr. viz fotometrický analyzátor, viz kolorimetr
- Hagen-Poiseuillova rovnice, 17
- hustoměr. viz senzor hustoty
- chromatičnost, 36
- index lomu, 39, 40
 - absolutní, 40
 - relativní, 40
- iontově selektivní membrána, 23
- Karl Fisherova titrace, 2
- kolorita, 36
- konduktivita, 26
- Lambert-Beerův zákon absorpce, 5
- měrná refrakce, 41
- měření barvy látek, 36
 - barvy kapalin, 38, 39
 - inline měření objektů, 36
 - kolorimetr, 36
 - spektrometr, 36
- měření elektrolytické vodivosti, 25, 48
 - indukční, 28
 - kontaktní, 26
 - čtyřelektrodové, 28
 - dvouelektrodové, 26
- měření optických vlastností kapalin, 39, 48
 - nefelometrie, 45
 - polarimetrický senzor, 44
 - refraktometrický senzor, 41
 - diferenční, 42
 - s měřením mezného úhlu, 41
 - snímač zákalu, 45
 - čtyřkanálový dvoufázový, 47
 - dvoukanálový, 47
 - turbidimetrie, 45
- měření pH, 22
 - elektrochemické, 23, 47
 - polovodičové, 25
- měření vlhkosti, 1, 48
 - elektrické, 3
 - kapacitní vlhkoměr, 4
 - odporový vlhkoměr, 3
 - gravimetrické, 2
 - s vážením vzorku, 2
 - sušící váhy, 2, 3
 - chemické, 2

- coulometrie, 1, 2
- volumetrie, 1, 2
- spektrometrické, 4
 - IR analyzátor, 4, 5
 - mikrovlňné, 6
- mezný úhel, 40, 41, 42
- Ohmův zákon, 27
- pelistor, 30, 31, 32
- pelistorový odpor. *viz* pelistor
- polarimetr. *viz* polarimetrický senzor
- průtočná měřicí cela, 45
- refraktometr. *viz* refraktometrický senzor
- rychlost ultrazvuku, 8
- senzor hustoty
 - hydrostatický, 6, 7
 - mikrovlňný, 15, 16
 - radiační, 14
 - ultrazvukový, 7
 - ponorný, 8, 9
 - průtočný, 9, 10
 - vibrační, 9, 13
 - na bázi Coriolisova průtokoměru, 12
 - s kmitající trubicí, 9
 - s přímou trubicí, 11
 - s U trubicí, 11
 - s kmitající vidlicí, 12
- skleněná elektroda, 24
- Snellův zákon, 40
- ultrazvukové vlnění, 7
- viskozimetr, 17
 - kapilární, 17
 - rotační, 18, 19
 - Couettova typu, 18
 - Searlova typu typu, 18
 - typu Stabinger, 18, 20
 - s oscilujícím pístem, 22
 - tělískový, 20
 - Höpplerův, 20, 21
 - Stokesův, 20, 21
 - vibrační, 21
- viskozimetr s padající kuličkou. *viz* viskozimetr tělískový
- vlhkoměr. *viz* měření vlhkosti
- Wheatstoneův můstek, 29

Vytvořeno v rámci projektu **Studijní program Automatizace (SPAUT)**
na **Univerzitě Pardubice**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-16591/2022.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy

MS
MIT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY