

## MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

## Měření hustoty kapalných směsí (část 1.)

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: DENSITY MEASUREMENT OF LIQUID MIXTURES (PART 1)

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

## Snímače hustoty kapalin

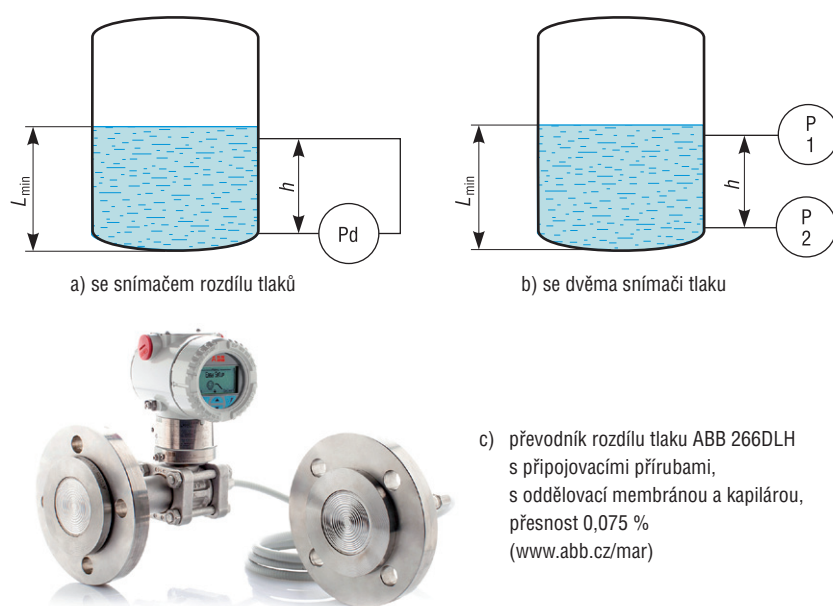
Hustota patří k základním fyzikálním vlastnostem látek a její znalost může poskytnout informaci využitelnou pro určení složení sledovaného média. Vzhledem k tomu, že hustota není vlastnost selektivní, lze z měření hustoty vyhodnocovat koncentraci pouze pro binární (dvousložkové) anebo pseudobinární směsi. Moderní snímače hustoty však využívají k měření různé funkční principy a specifické vlastnosti těchto snímačů pak umožňují i měření složení vícesložkových směsí. K provoznímu měření hustoty tekutin mohou být použity různé měřicí přístroje od nejstarších a velmi jednoduchých, jako je např. měření na základě vztahu nebo hydrostatického tlaku, až po moderní jako jsou ultrazvukové hustoměry, snímače vibračního typu nebo hustoměry radiační a mikrovlnné.

## Hydrostatické hustoměry

Hydrostatické hustoměry využívají závislost hydrostatického tlaku na hustotě a jsou velmi snadno sestavitelné z běžně dostupných součástí. Pro velikost hydrostatického tlaku  $p$  platí vztah:

$$p = b \cdot \rho \cdot g \quad (1)$$

Obr. 1. Hydrostatický hustoměr



při zachování konstantní výšky  $b$  bude hydrostatický tlak  $p$  přímo úměrný hustotě  $\rho$ .

Schéma uspořádání měřicího zařízení při měření hustoty na základě hydrostatického tlaku je patrné z obr. 1. Při uspořádání podle obr. 1.a je použit **snímač rozdílu tlaků**, v případě podle obr. 1.b jsou použity **dva snímače tlaku umístěné v různých výškách**. Pro splnění podmínky konstantní výšky  $b$ , nesmí hladina v nádobě klesnout pod vyznačenou úroveň  $L_{\min}$ . Údaj tlakoměru je potom úměrný hustotě  $\rho$  podle vztahu:

$$\Delta p = b \cdot \rho \cdot g = k \cdot \rho \quad (2)$$

kde  $k$  je konstanta hydrostatického hustoměru. K měření hydrostatického tlaku je možno použít různé typy snímačů; na obr. 1.c je jako příklad uveden snímač rozdílu tlaku **ABB 266DLH** (1).

Výstupní údaj hydrostatického hustoměru je závislý na teplotě kapaliny a v tomto smyslu je zapotřebí provádět příslušnou korekci. Hydrostatická metoda je vhodná v případě, že je k dispozici dostatečné množství kapaliny a není požadována velká přesnost měření. Výhodou hydrostatického hustoměru je nízká cena a jednoduchá instalace. Omezení spočívá v nutnosti zajištění dostatečné výšky hladiny v provozní nádobě (při malé hodnotě  $b$  bude i malá citlivost měření). Problémy mohou nastat také v případě, když se v provozním médiu objeví několik vrstev o různé hustotě.

Příklad využití hydrostatického hustoměru při měření hustoty roztoku etanolu snímačem rozdílu tlaku **SITRANS P500** (www.siemens.com/cz) v zásobníku v lihovaru Dobrovice, Tereos TTD, a. s., je na obr. 2.

## Ultrazvukové hustoměry

Rychlost šíření ultrazvukových vln v kapalinách je závislá na složení kapaliny, na její hustotě, viskozitě a teplotě. Rychlost  $v$  šíření ultrazvuku v kapalině závisí na hustotě  $\rho$  kapaliny podle vztahu:

$$v = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad (3)$$

kde  $C$  je modul objemové pružnosti prostředí.

Závislost rychlosti ultrazvuku na složení a koncentraci kapalného média bývá složitější a nelze ji jednoznačně vyjádřit. Například pro vodné roztoky solí jsou závislosti přibližně lineární a pásmo linearit je poměrně široké

(obr. 3.a). U vodných roztoků některých kyselin jsou tyto závislosti složitější, jak je patrné z obr. 3.b, na kterém je i závislost na teplotě pro roztoky kyseliny sírové. Křivky vykazují jeden popř. i dva extrémy a použitelnost ultrazvukového snímače je pak omezena jen na určité koncentrační rozmezí, ve kterém je závislost rychlosti ultrazvuku na koncentraci jednoznačná a vykazuje dostatečnou strmost. Ve využitelné oblasti by měla charakteristika vykazovat gradient rychlosti  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  při změně hmotnostní koncentrace o 1 %.

Princip ultrazvukových snímačů hustoty je založen na určení rychlosti šíření ultrazvukových vln v měřeném médiu. Rychlost šíření ultrazvuku  $v$  se určuje z doby  $\tau$ , kterou ultrazvukový pulz potřebuje na překonání vzdálenosti  $L$  mezi vysílačem a přijímačem ultrazvukového vlnění podle vztahu:

$$v = \frac{L}{\tau} \quad (4).$$

Základními prvky ultrazvukového snímače hustoty jsou tedy vysílač a přijímač ultrazvuku, které jsou nejčastěji konstruovány na bázi piezoelektrických měničů. Integrovanou součástí ultrazvukového snímače hustoty bývá i čidlo teploty, jehož signál je využíván k automatické korekci výstupního signálu. Signál ze snímače je vyhodnocován v převodníku, jehož výstup poskytuje informaci buď o hustotě média, nebo přímo o koncentraci sledované složky kapalné směsi.

Provozní snímače bývají dvojího typu; jsou to jednak snímače ponorné, určené pro měření v zásobnících, jednak snímače průtočné, uzpůsobené k montáži do potrubí. Na obr. 4. je schéma a ukázky provedení **ponorného snímače**. Vysílač a přijímač ultrazvukových pulzů jsou umístěny v pevné vzdálenosti  $L$  v ramenech vidlice snímače. Na obr. 4.b je provozní ultrazvukový snímač od firmy Anton Paar; snímač se vyrábí ve variantě jak průtočné, tak i ponorné, a ty se od sebe liší délkou ultrazvukové sondy. Materiály použitými pro smáčenou část snímače mohou být korozivzdorná ocel, popř. potažená zlatem, nebo slitiny Hastelloy nebo Monel. Na obr. 4.c je analogický snímač *Sonatec* dodávaný společností Centec.

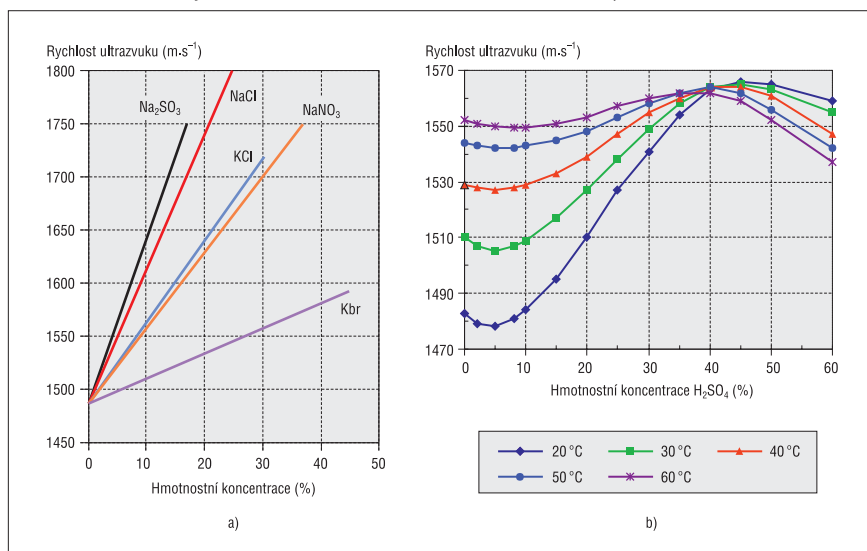
Na obr. 5. je nakresleno schéma **průtočného ultrazvukového snímače**. Ultrazvukový pulz z vysílače se odrazí od odrazné plochy na protější straně potrubí a vrátí se k přijímači. Překonává tudíž dráhu rovnou dvojnásobku průměru potrubí. Způsob zpracování signálu  $E_t$  v zařízení je naznačen blokovým schématem. Vzájemné vztahy mezi výstupním signálem a koncentrací sledované komponenty se určí při kalibračním měření a získané údaje se uloží v paměťových obvodech převodníku pro zpracování signálu.

Ultrazvukové snímače hustoty a koncentrace vybavené inteligentními převodníky signálu patří mezi moderní a perspektivní měřicí zařízení. Provozní snímače průtočného nebo ponorného typu umožňují měřit

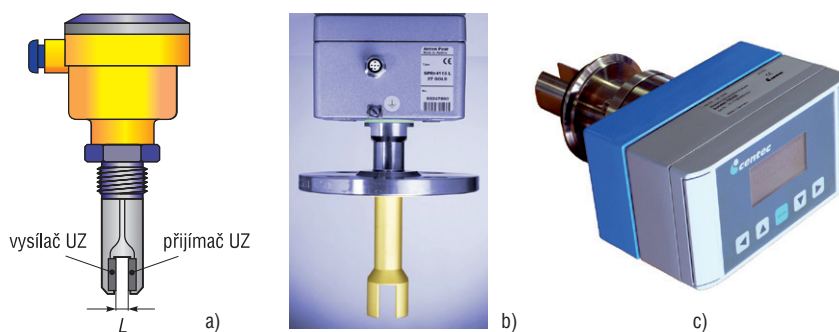
Obr. 2. Hydrostatické měření hustoty v zásobníku v lihovaru Dobrovice, Tereos TTD, a. s. (foto M. Kmínek)



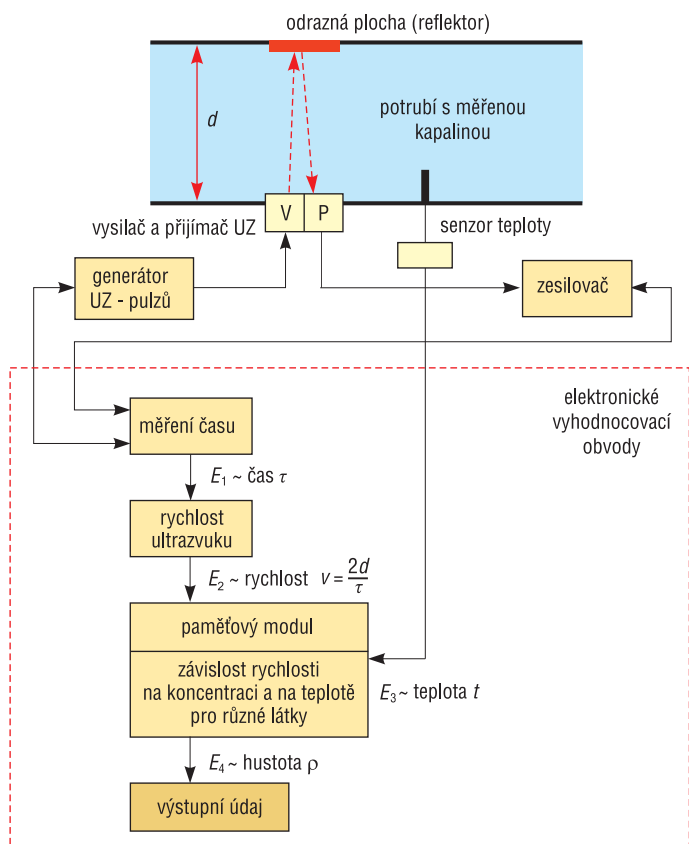
Obr. 3. Závislost rychlosti ultrazvuku na koncentraci a na teplotě



Obr. 4. Ponorný ultrazvukový snímač hustoty: a) schéma, b) snímač SPRn 4115 2T Anton Paar ([www.anton-paar.com](http://www.anton-paar.com)), c) snímač Sonatec ([www.centec.cz](http://www.centec.cz))



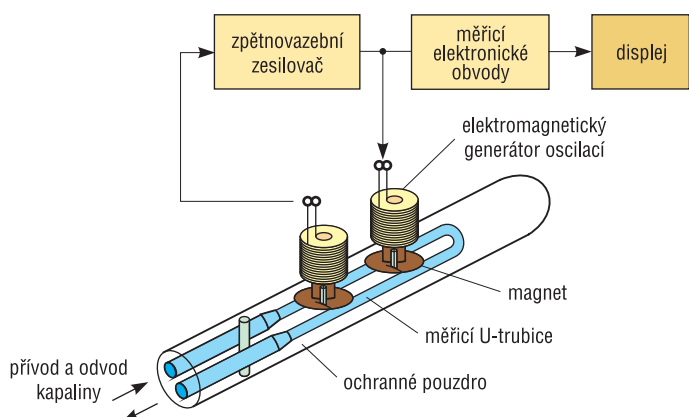
Obr. 5. Schéma zpracování signálu průtočného ultrazvukového snímače hustoty:  $E_1$  – signál úměrný časovému intervalu,  $E_2$  – signál úměrný rychlosti  $v$ ,  $E_3$  – signál úměrný teplotě  $t$ ,  $E_4$  – signál úměrný hustotě



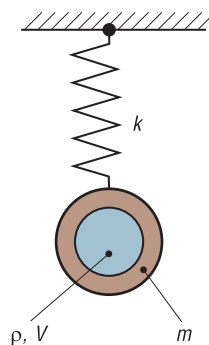
rychlost šíření ultrazvuku s přesností 0,1 až 0,01 m.s<sup>-1</sup>, což odpovídá přesnosti při měření hustoty 0,001 g.cm<sup>-3</sup>.

Rychlost šíření ultrazvuku v kapalném médiu je funkcí jak chemického složení, tak i teploty a u vícesložkových směsí dále závisí na vzájemných interakcích mezi jednotlivými složkami směsi. Další komplikace nastávají v několikafázových systémech, když jsou v kapalném médiu přítomny suspendované částice anebo bubliny plynu. U běžných snímačů je proto požadováno, aby kapalina byla čirá, protože emulze, disperze a kaly rozptylují zvukové vlny a způsobují chyby měření. Skutečnosti, že v plynech

Obr. 7. Vibrační snímač s U-trubicí



Obr. 6. Princip vibračního snímače hustoty



Obr. 8. Hustoměry s vibrující trubicí: a) měřicí trubice, b) provozní hustoměr DPRn 427S, c) přenosný hustoměr DMA 35 ([www.anton-paar.com](http://www.anton-paar.com))





je útlum ultrazvuku výrazně větší než v kapalinách, lze využít pro informaci o množství nerozpuštěného plynu. U proudících kapalin může být vyhodnocení komplikováno změnou frekvence ultrazvuku v důsledku Dopplerova jevu.

Ultrazvukové snímače lze využít k měření koncentrace při výrobě nápojů (obsah extraktu, alkoholu, cukru apod.), k měření koncentrace alkálií (KOH, NaOH), kyseliny sírové, kyseliny octové aj.

### *Vibrační hustoměry*

Ve vibračních hustoměrech se využívá několik různých typů vibrujících prvků a současně existuje mnoho provedení těchto přístrojů. V průmyslových provozech se lze setkat zejména s hustoměry s kmitající trubicí, kterou protéká měřené médium, a s hustoměry s vibrující vidlicí ponořenou do měřeného média.

Ve **vibračních hustoměrech s kmitající trubicí** se měří oscilace, které vznikají v soustavě tvořené pružným silovým systémem, který tvoří kmitající trubice se známým objemem kapaliny umístěné v dutině rezonátoru. Principiální schéma vibračního snímače hustoty je znázorněno na obr. 6. Dutina rezonátoru o objemu  $V$  je naplněna kapalinou o hustotě  $\varrho$ . Rezonátor o hmotnosti  $m$  je zavěšen na pružině se součinitelem

tuhosti materiálu  $k$ . Rezonanční frekvence je funkcí hmotnosti celého systému. Pro rezonanční frekvenci  $f$  platí:

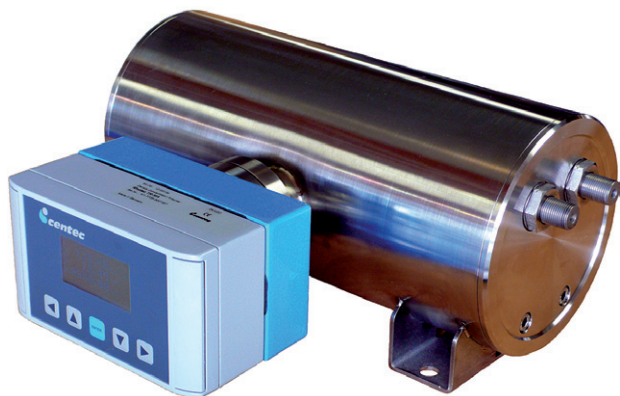
$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k}{m + \varrho \cdot V}} \quad (5).$$

Protože dutina rezonátoru má konstantní objem, je rezonanční frekvence funkcí hustoty kapaliny. Komerčně vyráběné přístroje využívají nejčastěji čidlo tvořené pružně připojenou trubicou tvaru U, která je naplněna měřenou látkou. U kontinuálně pracujících snímačů látka trubicou protéká.

Uspořádání vibračního snímače hustoty s kmitající trubicí ve tvaru U je schematicky znázorněno na obr. 7. Trubka s měřenou látkou, která je nejčastěji rozkmitávána elektromagneticky, tvoří rezonanční soustavu elektromechanického oscilátoru, jehož rezonanční frekvence je ovlivněna hustotou měřené látky. Měřicí trubka bývá vyrobena z borosilikátového skla, nerezavějící oceli, tantalu, niklu nebo Hastelloy. Pro eliminaci vlivu teploty musí být buď měřicí systém termostatován nebo musí být vybaven čidlem teploty a obvodem automatické teplotní kompenzace.

Skutečné provedení měřicí trubice vibračního senzoru firmy Anton Paar je na obr. 8.a; na obr. 8.b je provozní hustoměr využívající tento rezonanční prvek. Vzorek kontinuálně protéká vibrující U-trubicí, vyhodnocovací jednotka obstarává měření rezonanční frekvence a přepočítává tento signál na hodnotu

Obr. 9. Hustoměr s kmitající trubicí Rhotec (v ČR dodává Centec, [www.centec.cz](http://www.centec.cz))



hustoty nebo koncentrace. Teplotní kompenzace je zajišťována integrovaným teplotním senzorem Pt 1000. Snímače analogického typu *DPRn 427 (I)* se používají např. pro monitorování hustoty a obsahu alkoholu v koncentračním rozmezí od 0 do 100 % ([www.anton-paar.com](http://www.anton-paar.com)).

Vysoce přesné přístroje *Rhotec* (obr. 9.) s kmitající U-trubicí dodává firma Centec pro kontinuální měření hustoty, stanovení koncentrace v % hmot., % obj., °Brix, či % extraktu. Přístroje jsou v hygienickém provedení a konstrukce je vhodná pro sanitaci CIP.

Obr. 10. Měření hustoty Coriolisovým průtokoměrem



Vedle přístrojů pro kontinuální měření a řízení technologických procesů jsou k dispozici přístroje pro příležitostná kontrolní měření. Provedení přenosného vibračního hustoměru *DMA 35* ([www.anton-paar.com](http://www.anton-paar.com)) je na obr. 8c. Přístroj lze díky jeho robustní konstrukci použít i v obtížných podmínkách průmyslových aplikací a při terénních měřeních. Měřicí rozsah je 0 až 3 g·cm<sup>-3</sup>, přesnost 0,001 g·cm<sup>-3</sup>, rozlišení 0,0001 g·cm<sup>-3</sup>. Vibrační snímače hustoty s měřicími trubicemi z borosilikátového skla o malé světlosti lze používat jen pro čisté kapaliny s malou viskozitou. Jejich přednostmi jsou ovšem velmi malá množství média postačující ke změření hustoty (u přenosných přístrojů 0,1 až 1 ml), snadná temperace a velmi příznivé dynamické vlastnosti.

K měření hustoty lze využít **signál odvozený z Coriolisova hmotnostního průtokoměru**, u něhož je senzorem vibrující trubice. Coriolisův průtokoměr je založen na měření deformace kmitající měřicí trubice působením Coriolisovy síly, která vzniká v kmitající trubici protékající tekutinou. K dosažení minimální možné spotřeby budící energie kmitá trubice na své rezonanční frekvenci, když budící oscilátor se přeladuje tak dlouho, až dosáhne rezonance (2). Podle rovnice (5) je rezonanční frekvence úměrná celkové hmotnosti měřicí trubice (celková hmotnost trubice je dána součtem hmotnosti prázdné trubice a jejího obsahu, když objem měřicí trubice je konstantní). Pro výpočet hustoty z naměřené rezonanční frekvence tedy platí:

$$\varrho = \frac{k}{4 \cdot \pi^2 \cdot V \cdot f^2} - \frac{m}{V} \quad (6),$$

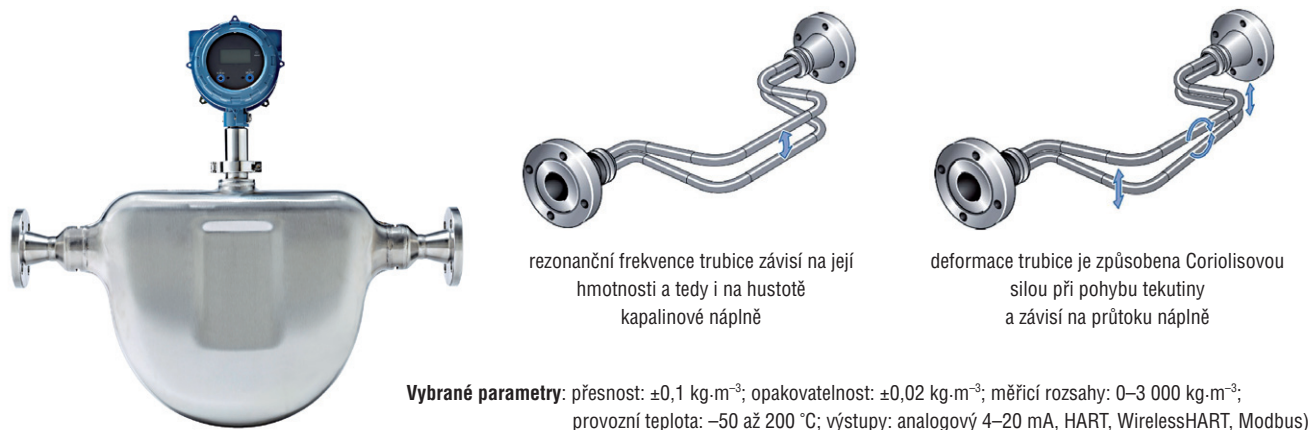
význam jednotlivých symbolů je uveden u rovnice (5).

Coriolisův průtokoměr *Sitrans* ([www.siemens.cz](http://www.siemens.cz)) využíváný pro měření hustoty při výrobě etanolu v lihovaru Dobruška, Tereos TTD, a. s., je na obr. 10. Tento způsob měření hustoty je vhodný i k měření kalů a kašovitých hmot.

Senzor hustoměru *Micro Motion Compact Density Meter* (3) od společnosti Emerson využívá dvojici kmitajících zakřivených trubic, kterými protéká měřená kapalina (obr. 11.).

Rezananční frekvence kmitající trubice je závislá na hmotnosti trubice, a tedy i na hustotě kapaliny v trubici. Z deformace trubice se odvozuje informace o velikosti průtoku média. Elektronika senzoru vyhodnocuje periodu vlastních kmitů trubice, která na základě kalibrace lineárně závisí na hustotě měřené kapaliny. Hustoměr je možno využít pro měření různých medií, jako jsou alkoholické roztoky, vodné roztoky včetně agresivních kapalin, měření hustoty a koncentrace v potravinářském a nápojovém průmyslu apod. Přístroje vybavené diagnostickými funkcemi jsou k dispozici i v hygienickém provedení a v provedení do prostředí s nebezpečím výbuchu.

**Vibrační hustoměry s kmitající vidlicí** používají jako senzor jednoduchou **vidlicovou ladičku**, která je ponořena do měřené kapaliny (obr. 12.a). Vibrace ramen vidlice jsou buzeny elektromagneticky a jsou elektronickými obvody udržovány v rezonanci při snímání např. piezoelektrickým snímačem. Rezananční frekvence je závislá na hustotě média obklopujícího vidlici. Vedle měření frekvence jako měřenosné veličiny pro měření hustoty lze vyhodnocovat i tlumení vibrací, které je úměrné viskozitě měřeného média. Jako příklad vibračních hustoměrů s vidlicí jsou ukázány na obr. 12.b, c přístroje *Micro Motion* typ 7826 hustoměr a typ 7829 hustoměr a viskozimetr. Jde o robustní snímače s minimálními požadavky na údržbu vhodné k použití i za velmi náročných provozních podmínek. Lze je instalovat do potrubí, do otevřených či uzavřených zásobních tanků nebo jiných technologických aparatur (jsou k dispozici v délce až 4 m).

Obr. 11. Hustoměr Micro Motion Compact Density Meter ([www.emerson.com](http://www.emerson.com)), upraveno podle (3)

Hlavní zásady pro instalaci vibračních snímačů hustoty jsou patrné ze schématu na obr. 13. U nádrží s míchadly se doporučuje umístit snímač hustoty do obtoku s cirkulací měřené kapaliny. V uzavřených nádržích se dává přednost udržování přetlaku, při němž se z kapalného média méně uvolňují plyny. Nedoporučuje se instalovat snímače v nádržích, v nichž vznikají vrstvy s různou hustotou apod.

Významnou předností vibračních snímačů hustoty s vidlicí je, že provozní tlak, průtok vzorku a změny viskozity nijak zřetelně neovlivňují výsledek měření. Moderní přístroje vyráběné v současné době jsou vybaveny elektronickými obvody s mikroprocesorem pro zpracování signálu.

### Souhrn

Článek uvádí přehled funkčních principů využívaných při provozním měření hustoty kapalných směsí. V první části jsou probírány hustoměry hydrostatické, ultrazvukové a vibrační. Jsou popsány principy funkce, způsoby zabudování provozních hustoměrů do technologických aparatur; jsou diskutovány přednosti a nedostatky těchto typů snímačů.

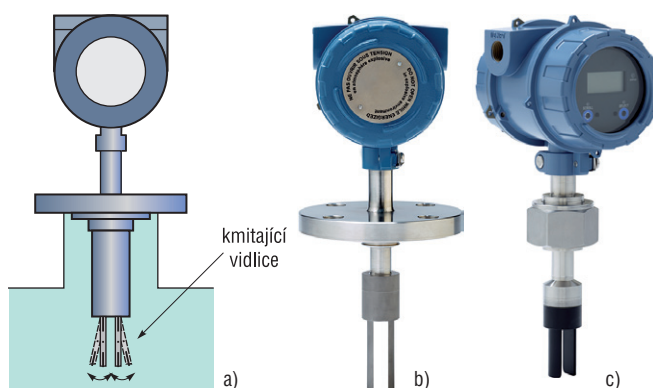
**Klíčová slova:** měření hustoty, hydrostatické hustoměry, ultrazvukové hustoměry, vibrační hustoměry.

### Literatura

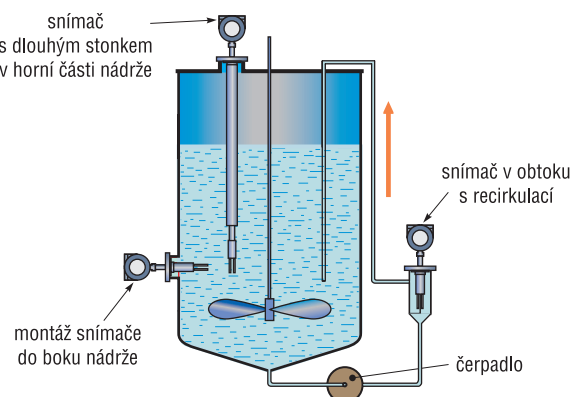
1. *Differential pressure transmitter for interface level measurements 266DLH*. ABB, [online] [new.abb.com/products/measurement-products/pressure/differential-pressure-transmitters/266dlh-differential-pressure-transmitter-for-interface-level-measurements](http://new.abb.com/products/measurement-products/pressure/differential-pressure-transmitters/266dlh-differential-pressure-transmitter-for-interface-level-measurements).
2. LIPTÁK, B. G.: *Instrument Engineers' Handbook, Vol. 1: Process Measurement and Analysis*. 4<sup>th</sup> ed. CRC Press Boca Raton, 2003.
3. *Micro Motion Compact Density Meters*. EMERSON, Product Data Sheet PS-001482, Rev F August 2016. Emerson Automation Solutions.

### Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Density Measurement of Liquid Mixtures (Part 1)

The paper provides an overview of the functional principles used for density measurement of liquid mixtures. The first part describes hydrostatic, ultrasonic and vibration density meters. It also describes the principles of function and methods of installation of density meters into the technological apparatus; advantages and weaknesses of these types of sensors are discussed as well.

Obr. 12. Vibrační snímač s kmitající vidlicí: a) princip, b) hustoměr Micro Motion 7826, c) hustoměr a viskozimetr Micro Motion 7829 ([www.emersonprocess.cz](http://www.emersonprocess.cz))

Obr. 13. Instalace vibračních hustoměrů na technolog. zařízení



**Key words:** density measurement, hydrostatic density meters, ultrasonic density meters, vibration density meters.

### Kontaktní adresa – Contact address:

doc. Ing. Karel Kadlec, CSc., Vysoká škola chemicko-technologická, Fakulta chemicko-inženýrská, Ústav fyziky a měřicí techniky, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice, Česká republika, e-mail: [karel.kadlec@vscht.cz](mailto:karel.kadlec@vscht.cz)