

Měření hladiny (část 2.)

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: LEVEL MEASUREMENT (PART 2)

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Hydrostatické hladinoměry

Hydrostatické hladinoměry patří mezi principiálně jednoduché snímače, které mohou spolehlivě pracovat za různých podmínek v celé řadě provozních aplikací. Hydrostatické hladinoměry využívají k měření polohy hladiny kapaliny v nádobě měření hydrostatického tlaku. Hydrostatický tlak p , který je vytvářen tíhovou silou sloupce kapaliny, je úměrný výšce sloupce kapaliny h , hustotě kapaliny ρ a tíhovému zrychlení g .

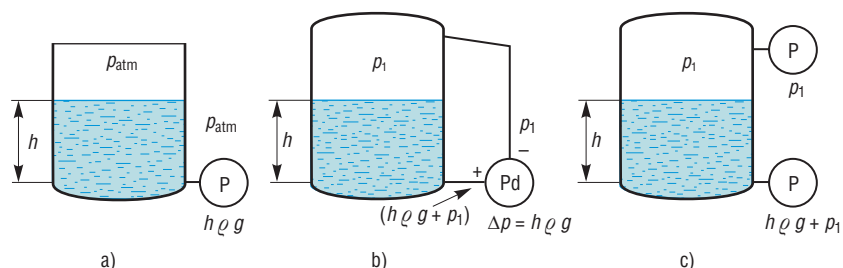
$$p = h \cdot \rho \cdot g \quad (1)$$

Vzhledem k tomu, že podle Pascalova zákona působí tlak v kapalině rovnoměrně do všech stran, je možno k měření tlaku použít libovolně orientovaný snímač. Jako nejvhodnější místo se nabízí zabudovat snímač do dna nádoby. Nevýhodou je však mnohdy nebezpečí zanesení snímače usazeninami z provozního média, a proto bývá snímač nejčastěji zabudován blízko u dna ve stěně nádoby. Vedle toho se používají i závěsné sondy, u nichž je snímač tlaku zavěšen na kabelu a spuštěn ke dnu nádoby. Hodnota tlaku měřeného snímačem v provozní nádobě je ovlivněna třemi faktory:

- výškou sloupce kapaliny,
- hustotou kapaliny,
- tlakem nad hladinou kapaliny.

Výška sloupce kapaliny je požadovaný výstupní údaj hladinoměru; případné změny hustoty a změny tlaku nad hladinou kapaliny představují veličiny, které ovlivňují přesnost výsledku měření. Změny hustoty mohou být způsobeny změnami teploty kapalného média nebo změnami jeho složení v průběhu technologického procesu. Důležitým faktem je, zda se jedná o nádobu otevřenou, kde nad hladinou kapaliny je atmosférický (barometrický) tlak p_{atm} , nebo o nádobu uzavřenou, kde hodnota tlaku p_1 nad hladinou se může měnit a může tam být jak přetlak, tak podtlak vůči atmosférickému tlaku (obr. 1.).

Obr. 1. Měření hydrostatického tlaku



Na obr. 1.a je znázorněno měření hydrostatického tlaku v otevřené nebo v odvětrávané nádobě, kde lze k měření tlaku použít jak snímač přetlaku vůči atmosféře, tak i snímač rozdílu tlaků (tzv. diferenční snímač), jehož druhý přívod je propojen do atmosféry. Měří-li se poloha hladiny v uzavřeném zásobníku s proměnným tlakem nad hladinou, užívá se uspořádání buď podle obr. 1.b se snímačem rozdílu tlaků nebo uspořádání podle obr. 1.c, kdy jsou použity dva snímače přetlaku, a pak vyhodnocovací elektronika vypočte rozdíl měřených signálů, který bude odpovídat hydrostatickému tlaku kapaliny. Příklad provozního uspořádání, které odpovídá schématu na obr. 1.b, je ukázán na obr. 10.

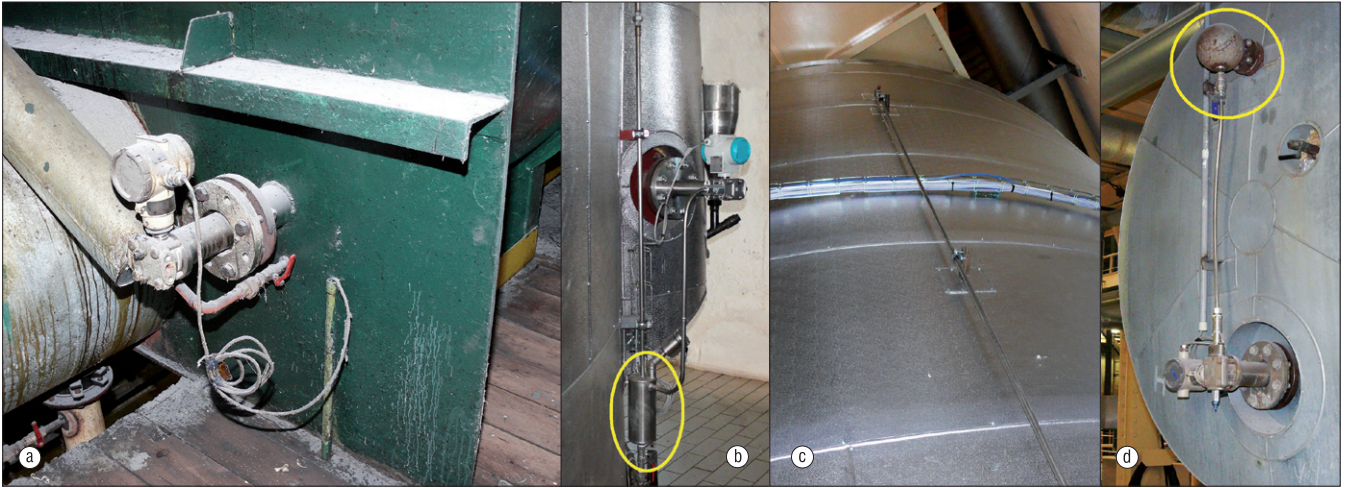
K měření hydrostatického tlaku je možno použít snímače různých typů s odpovídajícím měřicím rozsahem. V současné době se nejčastěji používají snímače s tenzometrickým nebo kapacitním senzorem tlaku, jejichž funkce byla popsána v dílu o měření tlaku (1). Součástí snímače tlaku, které přicházejí do styku s měřeným médiem, jsou vyrobeny z koroziuvzdorné oceli, případně z dalších speciálních slitin. Snímače se vyrábějí s variabilním procesním připojením, které umožňuje splnit konkrétní požadavky při instalaci. V případech, kdy není přípustné, aby měřené médium přišlo do kontaktu s měřicím ústrojím tlakoměru, zařadí se před vlastní snímač tlaku *membránový oddělovač*. K takovým případům dochází např. při měření značně viskózních kapalin, sedimentujících kalů, agresivních tekutin, horkých tekutin, které tuhnou nebo krystalizují při poklesu teploty apod. Membránové oddělovače byly popsány v (1); další podrobnosti jsou uvedeny v literatuře (2, 3).

Snímač hydrostatického tlaku může být připojen k nádobě různým způsobem v závislosti na konkrétních provozních podmínkách. Na obr. 2. jsou ukázky provozního připojení snímačů při hydrostatickém měření hladiny v technologických nádobách v cukrovaru Dobruška společnosti Tereos TTD, a. s. Na obr. 2.a je měření v refrizerantu, snímač měří rozdíl tlaků oproti vnějšímu atmosférickému tlaku. Obr. 2.b ukazuje připojení snímače k zrnici, dole pod snímačem je připojena odkalovací

nádoba, na obr. 2.c je vidět přivedení protitlaku z parního prostoru. Z obr. 2.d je patrné měření hladiny v zásobníku kondenzátu, nahoře je připojena kondenzační nádoba. Podrobný rozbor různých variant připojení snímačů při měření hladiny v otevřených či uzavřených nádobách, při různém charakteru média, včetně možnosti kompenzace vlivu změn hustoty média je uveden v literatuře (2).

Pro měření polohy hladiny hydrostatickou metodou se s výhodou využívá *ponorná sonda* zavěšená na lanu (obr. 3.). Její podstatnou

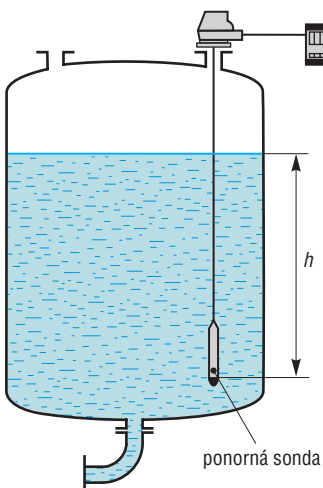
Obr. 2. Připojení snímačů při hydrostatickém měření hladiny v cukrovaru Dobrovice, Tereos TTD, a. s. (foto M. Kmínek)



součástí je membrána s tenzometrickým nebo kapacitním senzorem. Senzor je chráněn oddělovací membránou z korozi-vzdorného materiálu nebo plastu. Výstupní signál senzoru je elektronickými obvody zpracován a teplotně kompenzován a upraven na standardní proudový výstup 4–20 mA, případně je uzpůsoben pro digitální komunikaci. Senzor v sondě měří celkový tlak, který je součtem hydrostatického a atmosférického tlaku. Pro vyhodnocení polohy hladiny je nutno atmosférický tlak odečíst, a proto je přívodní kabel k sondě opatřen propojovací kapilárou, která funguje jako přívod referenčního tlaku. Připojení propojovací kapiláry bývá chráněno vhodným filtrem proti vniknutí nečistot a pronikání vlhkosti (zabránění kondenzace par uvnitř kapiláry). Ponorné sondy jsou vhodné pro měření polohy hladiny v zásobnících s výškou obvykle větší než 0,6 m, zejména pak jsou vhodné pro měření ve studních a vrtech hlubokých až 200 m.

Jinou variantou měření hydrostatického tlaku a z toho odvozeného údaje o poloze hladiny je *metoda probublávací (provzdušňovací, pneumatická, bubbler)*, která je znázorněna na obr. 4.a. Trubkou přivedenou ke dnu nádrže proudí malé množství vzduchu nebo jiného neutrálního plynu. Unikající vzduch musí překonat hydrostatický tlak kapaliny. Je-li průtok vzduchu tak malý, aby bylo možno zanedbat tlakovou ztrátu v trubce, pak přetlak v systému, měřený vhodným tlakoměrem, bude úměrný výšce hladiny. V potrubí přivádějícím vzduch je

Obr. 3. Měření hladiny ponornou sondou



zařazen regulátor, který udržuje konstantní průtok vzduchu bez ohledu na velikost hydrostatického tlaku. Stejný způsob lze použít i k měření v uzavřených nádobách (obr. 4.b), pokud je napájecí tlak vyšší než tlak v nádobě. K měření je zapotřebí vhodný snímač rozdílu tlaků. Na obr. 4.c je ukázka připojení snímače tlaku při měření hladiny s probubláváním v provozní nádobě v cukrovaru Dobrovice.

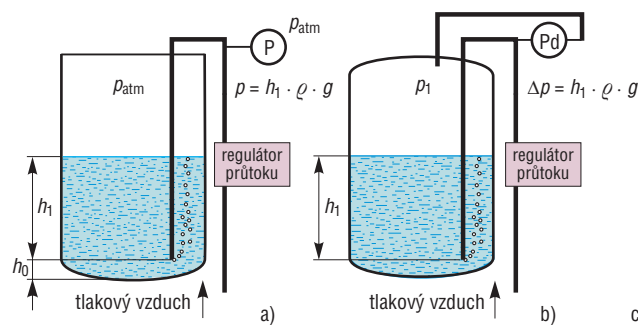
Měření s probubláváním lze s výhodou využít při práci s agresivními, silně znečištěnými a viskózními kapalinami (tab. I.). V těchto případech je tlakoměr umístěn do prostředí vzduchu, bez přítomnosti agresivní kapaliny. Přesnost měření hladiny s probubláváním je poněkud horší než při přímém měření hydrostatického tlaku.

Vodivostní hladinoměry a spínače

Vodivostní hladinoměry jsou tvořeny elektrodami umístěnými v nádrži s elektricky vodivou kapalinou. U spojitých hladinoměru se měří změna elektrického odporu (resp. vodivosti) se změnou polohy hladiny. Přesnost je silně závislá na změnách složení, vodivosti i teplotě média. U spínačů se vyhodnocuje odpor mezi dvěma elektrodami nebo mezi hrotem sondy a kovovou stěnou nádoby. Spínače bývají vybaveny až pěti elektrodami. Na obr. 5. jsou ukázány tři druhy uspořádání elektrod:

- dvouelektrokový systém pro nevodivé nádoby,
- tříelektrokový spínač s tyčovými elektrodami,
- dvouelektrokový spínač s lanovými elektrodami.

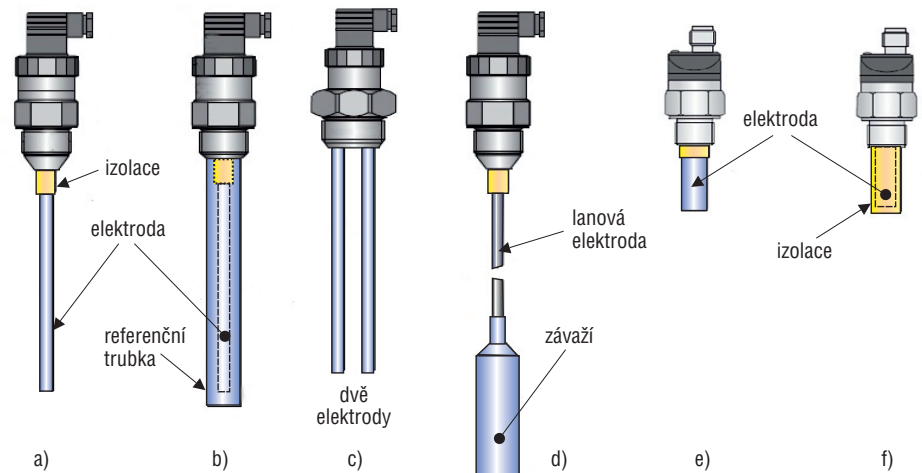
Obr. 4. Měření s probubláváním; a, b) schéma, c) foto M. Kmínek



Obr. 5. Vodivostní spínače hladiny (4)



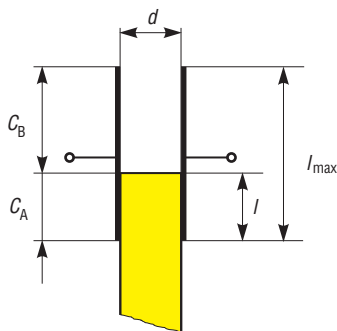
Obr. 8. Kapacitní snímače hladiny; a, b, c, d) pro spojitě snímače hladiny, e, f) pro spínače hladiny (upraveno podle materiálů firmy Dinel (5))



Vodivostní spínače se využívají zejména k signalizaci mezních stavů a k dvupolohové regulaci. Používají se např. při naplňování a vyprazdňování nádob mezi dvěma polohami hladiny (čerpadla či ventily jsou řízeny klopným obvodem s logickou funkcí) a k řízení čerpadel v provozech zpracovávajících odpadní vody. Hlavní předností těchto snímačů je jednoduchý princip a instalace, lze je však využít pouze v případě elektricky vodivých kapalin.

Kapacitní hladinoměry a spínače hladiny

Obr. 6. Princip funkce kapacitního snímače

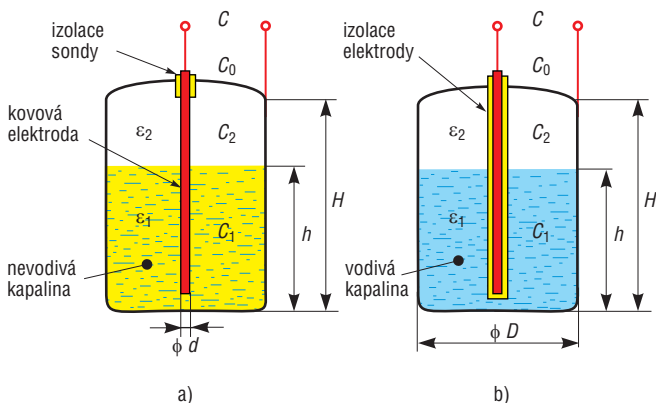


Kapacitní snímače hladiny pracují na principu měření kapacity kondenzátoru, jehož elektrody přicházejí do styku s měřenou látkou, kterou může být kapalina, sypký či kusový materiál. Podstatnou část kapacitního hladinoměru tvoří elektrický kondenzátor s proměnlivou kapacitou. Většinou se neměří jen kapacita, ale i impedance a někteří výrobci tudíž označují tyto snímače jako *impedanční* nebo *admitanční*. Kapacitní snímače se používají jak ke spojitému snímání polohy hladiny, tak i k signalizaci mezních stavů hladiny kapalin i sypkých hmot. Konstrukce snímače závisí do značné míry na vodivosti měřeného média.

Princip funkce kapacitního snímače pro měření polohy hladiny nevodivé kapaliny je vysvětlen na obr. 6., kde je nakreslen deskový kondenzátor s „posuvným“ dielektrikem. Toto dielektrikum představuje nevodivou kapalinu, která zaplňuje kondenzátor. Okamžitou celkovou kapacitu C lze vyjádřit součtem dvou dílčích kapacit C_A a C_B :

$$C = C_A + C_B = \epsilon_0 \cdot \epsilon_B \cdot \frac{a \cdot l}{d} + \epsilon_0 \cdot \epsilon_B \cdot \frac{a \cdot (l_{max} - l)}{d} \tag{2}$$

Obr. 7. Kapacitní snímač hladiny; a) pro nevodivé kapaliny, b) pro vodivé kapaliny



$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot a}{d} [(\epsilon_A - \epsilon_B) \cdot l + \epsilon_B \cdot l_{max}] = k_1 \cdot l + k_2 \tag{3}$$

kde je ϵ_A permitivita posuvného dielektrika, ϵ_B permitivita vzduchu, a šířka desky. Význam ostatních symbolů je zřejmý z obr. 6. Se změnou polohy hladiny l se lineárně mění kapacita C .

Sonda kapacitního snímače hladiny má obvykle válcový tvar a je tvořena dvěma koncentrickými stojatými válci. Vnitřní elektrodou je např. svislá tyč nebo lano, vnější elektrodou může být stěna kovové nádoby. Je třeba rozlišit dva případy – měření elektricky vodivých a nevodivých médií (obr. 7.). Celková kapacita válcového kondenzátoru je tvořena kapacitami C_0 (kapacita upevnění a přívodů), C_1 (proměnná kapacita ponořené části), C_2 (proměnná kapacita vynořené části).

Tab. 1. Přednosti a nevýhody hydrostatických hladinoměrů

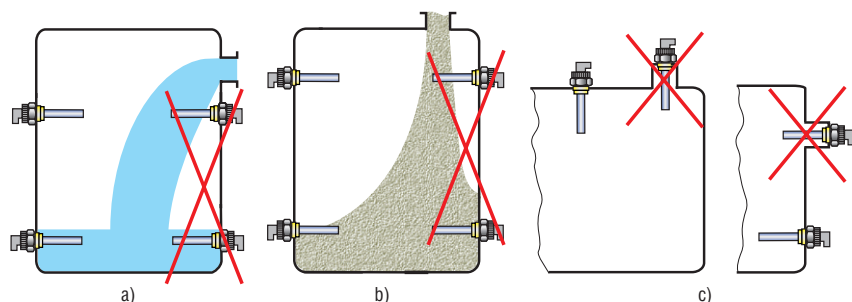
Přednosti	Omezení a nevýhody
Jednoduchý princip funkce	Údaj je závislý na hustotě a teplotě média.
Neobsahují pohyblivé mechanické součásti	Při použití impulzního potrubí s kapalinovou náplní je údaj ovlivněn změnami teploty okolí
Nevadí pěna nad hladinou, zakalení média	
Nevadí turbulence média ani vestavby v nádobě	Nebezpečí vniknutí kapaliny do přívodu ke snímači při přeplnění nádoby u „suchého“ připojení snímače
Údaj nezávisí na elektrických vlastnostech média (vodivost, permitivita)	
Vhodné i pro měření médií agresivních, viskózních i značně znečištěných	Je-li požadována přesnost měření hladiny s nejistotou menší než 0,5 % z rozsahu, je vhodné uvažovat o jiném typu snímače
Značný rozsah měření (ponorné sondy až 200 m)	Nelze použít pro měření sypkých látek

Při měření *nevodivých médií* (např. olej, nafta, benzin) je kondenzátor tvořen střední vodivou elektrodou (obr. 7.a) a druhou elektrodou, kterou je obvykle kovová stěna nádoby. Dielektrikem je nevodivá kapalina, která při změně polohy hladiny zaplavuje střední elektrodu. S polohou hladiny se mění kapacita snímače, protože permitivita náplně je několikanásobně větší než permitivita vzduchu. U *vodivých médií* (např. voda a vodné roztoky) musí být snímací elektroda zcela pokryta izolační vrstvou (obr. 7.b). Dielektrikem kondenzátoru v tom případě tvoří izolace elektrody (např. teflon). Kapacita elektrody vzhledem ke stěnám nádoby je zanedbatelná ve srovnání s kapacitou mezi elektrodou a vodivou kapalinou. Vodivá

kapalina tvoří proměnnou plochu vnější elektrody, která se mění se změnou polohy hladiny v nádobě. Permitivita a elektrická vodivost jsou důležitými parametry, které charakterizují médium, jehož hladina v nádrži se má měřit. Podrobněji jsou tyto parametry diskutovány ve (2).

Při konstrukci sond kapacitních snímačů se využívají elektrody tyčové, lanové či speciálně tvarované. Některá uspořádání elektrod ukazuje obr. 8. Délka tyčových elektrod kapacitních hladinoměrů je od 0,2 do 5 m, lanových elektrod od 1 do 20 m. Délka elektrod používaných u spínačů hladiny k indikaci mezních stavů je však výrazně kratší, obvykle v rozmezí 30 až 1 000 mm.

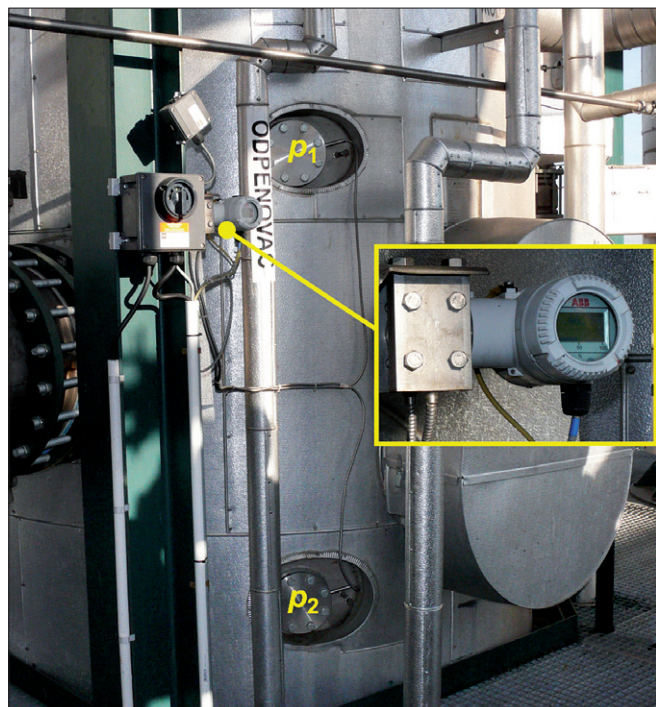
Obr. 9. Umístění kapacitních spínačů v provozních nádržích (5)



Při instalaci kapacitního hladinoměru do provozních nádrží a zásobníků je třeba dodržovat určité doporučené vzdálenosti elektrod od stěny, dna či od pomocné elektrody. Hlavní zásady pro montáž hladinoměru se spojitou funkcí i mezních spínačů jsou popsány v publikaci (2), konkrétní údaje jsou uvedeny vždy v dokumentaci od výrobce. Kapacitní spínače pro indikaci mezních stavů bývají často zabudovány i ve svislé stěně zásobníku, jak je patrné z obr. 9., na němž jsou vyznačeny i příklady nevhodného umístění elektrod. Při instalaci elektrod do boční stěny je třeba vybrat umístění mimo přímý tok kapalné či sypké látky (obr. 9.a, b). Nevhodná je i instalace v úzkém hrdle (obr. 9.c), kde mohou např. kondenzovat páry nebo být zadržován materiál, což může vést k nesprávné funkci spínače.

K přednostem kapacitních snímačů lze počítat jejich jednoduchou a robustní konstrukci bez pohyblivých částí, možnost dobře odolávat korozi, snadné čištění a použitelnost v prostředí s nebezpečím výbuchu. K nedostatkům patří nebezpečí pokrývání povrchu sondy vodivým materiálem (nánosy, kaly) a závislost na relativní permitivitě materiálu, měnící se zejména vlivem teploty a vlhkosti. Kapacitní snímače vyráběné v různých modifikacích

Obr. 10. Měření hladiny snímačem hydrostatického tlaku v aparatuře lihovaru Dobruška Tereos TTD, a. s. (foto: M. Kmínek)



jsou vhodné pro spojitě i limitní měření vodivých i nevodivých kapalin a sypkých látek v nádržích, trubkách, zásobnících, sílech, jímkách apod. Vhodné jsou i pro snímání mezihladiny dvou nemísitelných kapalin (např. rozhraní vody a oleje). Nejsou vhodné pro měření pěnících medií a měření může rušit i kondenzace par na elektrodě a vztlínavost vodivé kapaliny.

Souhrn

V článku je popsána funkce hydrostatických hladinoměru včetně měření hydrostatického tlaku s probubláváním média. Jsou diskutovány různé možnosti připojení snímačů hydrostatického tlaku k provozním nádržím. Dále jsou popsány vodivostní a kapacitní snímače a spínače hladiny, jsou uvedeny příklady provedení měřících elektrod a jejich instalace do technologických aparatur. Jsou diskutovány přednosti a nedostatky uvedených typů snímačů a pro jednotlivé typy snímačů jsou uvedeny příklady aplikací.

Klíčová slova: hydrostatické hladinoměry; vodivostní a kapacitní snímače hladiny; spínače hladiny.

Literatura

- KADLEC, K.: Měření tlaku. *Listy cukrov. řepař.*, 132, 2016 (11), s. 360–365.
- KADLEC, K.: Měření hladiny. In KADLEC, K., KMÍNEK, M., KADLEC, P. (EDIT.) ET AL.: *Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích*. Ostrava: Key Publishing, 2015, s. 172–227.
- VACULIK, J.: Membránové oddělovače pro měření tlaku. *Automa*, 9, 2003 (4), s. 8–10.
- Měření výšky hladiny*. Endress+Hauser, [online] <http://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-hladiny>, cit. 27. 2. 2016.
- Kontinuální a limitní hladinoměry*. Dinel, [online] <http://www.dinel.cz/vyrobyky>, cit. 27. 2. 2016.

Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Level Measurement (Part 2)

The paper describes the function of hydrostatic level meters, including measuring of hydrostatic pressure with a bubbler. Various connectivity options of the hydrostatic pressure sensors to the process vessels are discussed. The article further describes conductivity and capacitance sensors and level switches; examples of measuring electrodes and their installation into technological apparatuses are given. Advantages and disadvantages of these types of sensors are discussed and examples of applications for the individual types are listed.

Key words: hydrostatic level sensors; conductivity and capacitance level sensors; level switches.

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