

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření hladiny (část 3.)

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: LEVEL MEASUREMENT (PART 3)

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

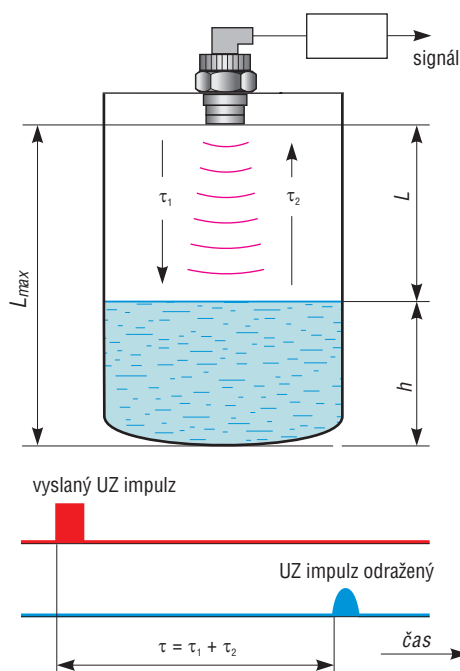
Ultrazvukové hladinoměry

Při spojitém měření polohy hladiny se měří doba průchodu ultrazvukové vlny od vysílače přes odraz od hladiny zpět k přijímači a z naměřené doby se při známé rychlosti šíření ultrazvuku v daném prostředí vypočítá vzdálenost. Ultrazvuk je zvuk s frekvencí > 20 kHz. Jedná se o mechanické vlnění a pro jeho šíření je nezbytné látkové prostředí. Ve vakuu se zvuk nešíří a ultrazvukové hladinoměry není možno využívat již při tlacích menších než 60 kPa. Rychlost zvuku závisí na prostředí, kterým se zvuk šíří; v suchém vzduchu při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je $331\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. S rostoucí teplotou nelineárně vzrůstá a při $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ bude o 17 % větší (1).

Na obr. 1. je zobrazeno zjednodušené schéma ultrazvukového hladinoměru, který využívá měření doby šíření ultrazvukového impulsu (metoda TOF – *Time of Flight*). Vysílač a přijímač ultrazvukových impulsů tvoří konstrukční celek, umístěný obvykle v horní části nádrže. Funkci celého zařízení řídí generátor pulzů. Na počátku měřicího cyklu je z vysílače vyslán ultrazvukový impuls, který se po odrazu od hladiny vrací k přijímači. Doba t , naměřená elektronickým obvodem, závisí na délce dráhy ultrazvukového impulsu, a tím i na poloze hladiny.

$$L = c \cdot \frac{\tau}{2} \quad (1)$$

Obr. 1. Princip ultrazvukového hladinoměru



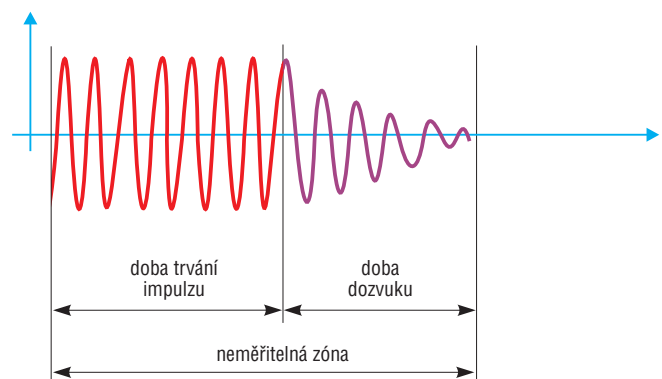
Poloha hladiny b se stanovuje odečtením poloviny naměřené dráhy impulsu od maximální vzdálenosti (vzdálenost ke dnu nádrže).

$$b = L_{\max} - c \cdot \frac{\tau}{2} \quad (2)$$

Měřené časové intervaly se pohybují od desetin až po stovky milisekund. Jako vysílače a přijímače ultrazvuku se nejčastěji používají piezoelektrické, méně často magnetostrikční měniče. Piezoelektrický měnič se využívá v první fázi jako vysílač ultrazvukových impulsů a v druhé fázi pak jako detektor přijímané odražené ultrazvukové vlny. Pracuje se s ultrazvukem s frekvencí od 20 do 60 kHz.

Kvalitu odrazu ultrazvukového signálu významně ovlivňují vlastnosti povrchu měřeného média. Pro funkci hladinoměru je důležité, aby odražená vlna měla dostatečnou energii. V případě, že měřeným médiem bude pěnicí kapalina nebo sypký materiál tvořený granulami, pak se bude od povrchu odrážet méně energie, a pro dosažení stejného měřicího rozsahu je nutno použít větší počáteční energii vysílaného signálu. Měřicí rozsah ultrazvukového hladinoměru je tedy závislý na útlumu (energetických ztrátách) ultrazvukového signálu na cestě od vysílače zpět k přijímači. *Minimální požadovaná energie* dopadající na přijímač bude určovat *maximální měřitelnou vzdálenost* v daném prostředí. *Minimální měřitelná vzdálenost* závisí na dozívání kmitů vysílaného ultrazvukového impulsu (obr. 2.). Po vypnutí napájení piezoelektrického krystalu jeho vibrace sice rychle poklesnou, ale po určitou dobu dozívají. Z toho důvodu není možno aktivovat přijímač, dokud krystal ještě zbytkově kmitá. Pro snímač hladiny to znamená, že existuje určitá doba, označovaná jako tzv. *mrtvá doba*, která vymezuje *neměřitelnou zónu*, a tedy i minimální požadovanou vzdálenost od snímače

Obr. 2. Dozívání kmitů vysílače



k povrchu hladiny (2). U většiny komerčních produktů je tato vzdálenost asi 0,3 m. Velikost neměřitelné zóny je ovlivněna vlastnostmi konkrétního snímače, délkou a dozvukem vysílaného ultrazvukového impulsu. Jestliže má být měřena poloha hladiny až k hornímu víku nádrže, tak snímač musí být instalován například pomocí nátrubku s dostatečným průřezem, jehož výška bude respektovat neměřitelnou zónu snímače (obr. 3.).

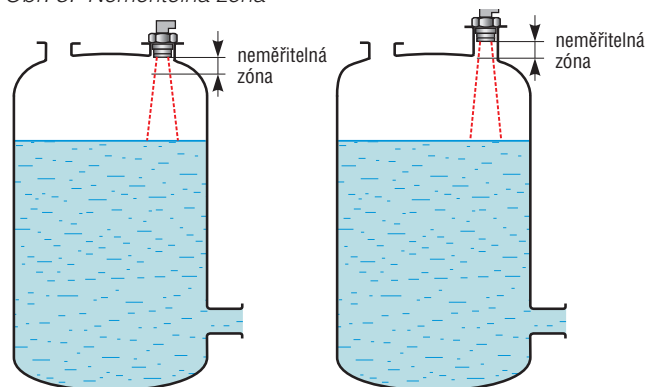
Údaj ultrazvukového hladinoměru je ovlivňován hustotou a teplotou prostředí, přítomností míchadla, tvarem a kvalitou povrchu fázového rozhraní, přítomností pěny, činností míchadla, přítomností vestavěných částí uvnitř nádrže apod. Poněvadž rychlost ultrazvuku závisí na hustotě a tedy i na teplotě prostředí, bývají přesné ultrazvukové hladinoměry vybaveny příslušným korekčním obvodem, který provádí korekci na základě měření teploty.

Ultrazvukové sondy se nejčastěji umísťují do víka nádrže; lze je také umístit dovnitř do prostoru nad měřenou náplní v horní části nádrže, nebo do dna nádoby. Při umístění snímače v prostoru nad hladinou se šíří ultrazvukové signály přes plynné prostředí směrem k povrchu měřeného média a pro vyhodnocení polohy hladiny musí být známa rychlost zvuku pro dané složení plynné fáze. Tento způsob lze použít k měření polohy hladiny jak kapalných, tak i sypkých látek. Umístění snímače v prostoru pod hladinou lze použít jen k měření hladiny kapalných médií. V tomto případě se ultrazvukový signál šíří kapalinou směrem k povrchu, a pro vyhodnocení musí být známa rychlost šíření zvuku v daném kapalném médiu. Toto uspořádání se však využívá méně často. Snímač však je možno instalovat na vnější stranu dna nádrže, a tak nedochází ke styku snímače s měřeným médiem a při instalaci není nutný mechanický zásah do stěny nádrže. To může být výhodné zejména při měření polohy hladiny agresivních látek, či u nádrží s vysokými požadavky na sanitaci a hygienu.

Při instalaci snímače se doporučuje, aby vlnění dopadalo na hladinu kolmo. Na to je třeba brát zřetel při umístění snímače v silech, kde se skladují sypké látky. Snímač by se měl umístit dostatečně daleko od potenciálních zdrojů falešných odrazů (potrubí uvnitř nádrže, lopatky míchadla, stěna s nánosem produktu). Neměl by být v blízkosti přítoku nebo násypky do zásobníku (nebezpečí, že po dobu plnění bude poskytovat falešný signál, případně by mohl být zcela vyřazen z činnosti). Některé příklady umístění snímačů jsou uvedeny na obr. 4. Ve ztížených podmínkách (značná prašnost, těžké páry) je lépe volit snímač s vyšším výkonem. Při neklidné hladině (turbulentní charakter) se impulzy nevracejí směrem k přijímači, je proto vhodné použít svislou trubku, která zajistí místní klidnou hladinu.

Přesnost měření ultrazvukovými snímači se zhoršuje u nádrží se zabudovanými přírubami, potrubím, míchadly, různými přepážkami apod. U inteligentních snímačů se proto při prázdné nádobě provede tzv. *mapování nádoby*, kdy se zaznamenají všechny odrazy, které přijme přijímač, a zaznamená se doba průchodu i amplituda odraženého signálu. Výsledek se statisticky vyhodnotí a tzv. zvukový obraz prázdné nádoby se v digitální formě uloží do paměti. Za použití vhodného softwaru při vyhodnocování měření je pak brán v úvahu pouze signál odražený od hladiny a nežádoucí signály (falešné odrazy) se eliminují.

Obr. 3. Neměřitelná zóna



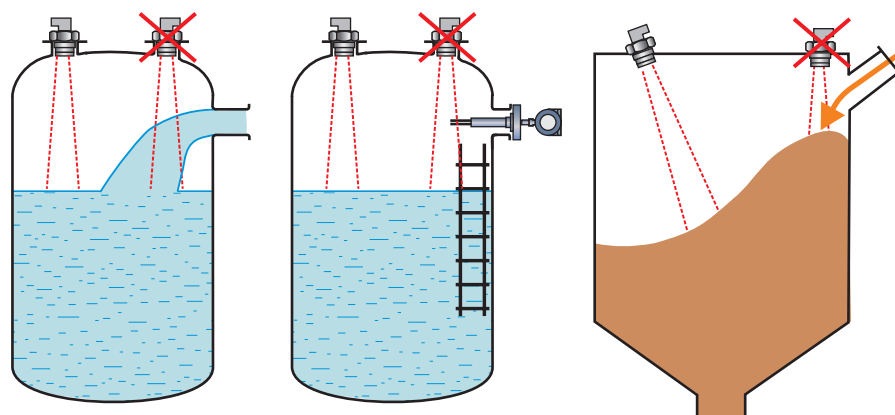
Ultrazvukové hladinoměry jsou vhodné pro spojitě bezdotykové měření polohy hladiny v otevřených i uzavřených nádržích s kapalnými či sypkými látkami. Mohou být použity v řadě případů, od měření hladiny kapalin s výškou několika desítek centimetrů v malých nádobách, přes měření polohy hladiny v provozních nádržích nebo v otevřených kanálech, až po zjišťování množství sypkých a kusovitých látek (vápenec, uhlí) v silech o výšce několika desítek metrů. Lze je použít i pro znečištěné a kašovitě hmoty a za určitých okolností i k detekci úrovně pěny. Je zřejmé, že u tak rozdílných aplikací je třeba použít různé typy senzorů s odpovídající vyhodnocovací elektronikou. Měřicí rozsah komerčních hladinoměru se pohybuje od desetin po desítky metrů, chyba měření dosahuje 0,1 % měřicího rozsahu.

Jako *přednosti ultrazvukových hladinoměru* lze uvést absenci pohyblivých součástí, bezkontaktní spojitě měření, možnost instalace z vnější strany nádrže bez porušení těsnosti, nezávislost na elektrické vodivosti a dielektrických vlastnostech materiálu a kompaktní provedení snímačů. Rozlišovací schopnost je až 1 mm, přesnost měření řádu desetin procenta měřicího rozsahu. *Nedostatkem* může být ovlivnění signálu v přítomnosti těžkých par a prachu, rušivé působení turbulentního povrchu hladiny a přítomnosti pěny a nemožnost použití při nízkém tlaku média.

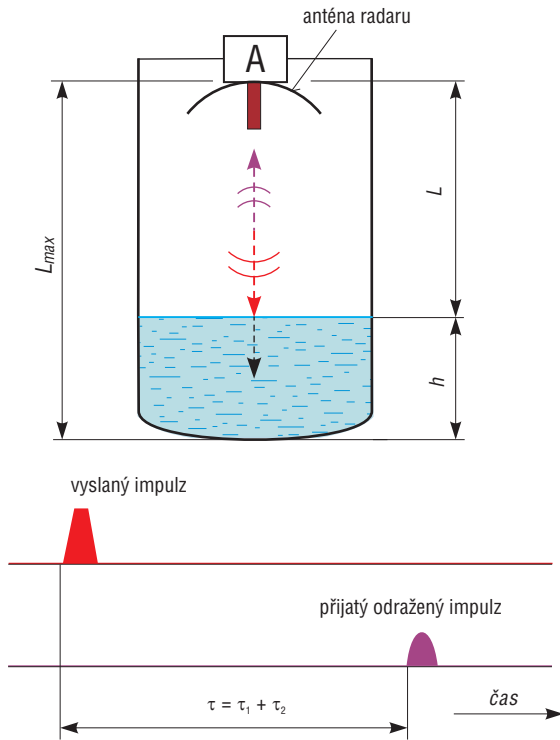
Radarové hladinoměry

Radarové hladinoměry pracují analogicky jako ultrazvukové hladinoměry, využívají však mikrovlnné záření. Mikrovlnné záření je elektromagnetické vlnění o frekvencích 1–300 GHz.

Obr. 4. Příklady vhodného a nevhodného umístění ultrazvukových snímačů



Obr. 5. Pulzní metoda měření polohy hladiny

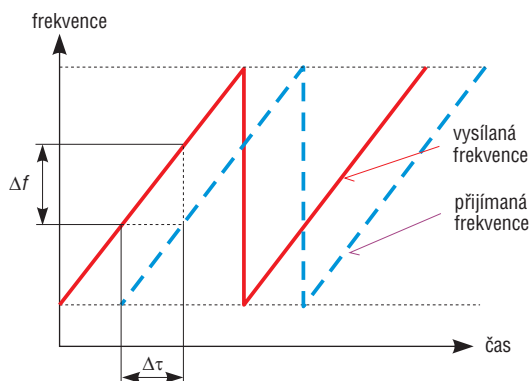


U radarových hladinoměrů se běžně využívají frekvence v rozmezí 5,8–26 GHz, speciálně i vyšší. Rychlost šíření mikrovln odpovídá rychlosti světla. Ve vakuu je to $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, v jiných médiích je rychlost závislá na permitivitě materiálu. Kvalita odrazu mikrovln závisí na permitivitě povrchu. Téměř dokonale se vlnění odrazí od povrchu hladiny dobře vodivé kapaliny. Při dopadu mikrovlnného záření na elektricky vodivý povrch dojde ke zkratu elektrického pole a vlnění je účinně odraženo. U elektricky nevodivých kapalin (organické látky) záleží účinnost odrazu významně na hodnotě relativní permitivity média (1).

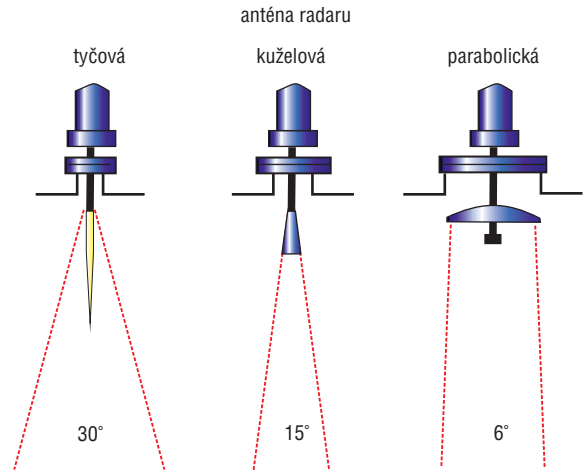
Radarové hladinoměry lze rozdělit na dvě skupiny, a sice na *bezkontaktní* a *kontaktní*. U bezkontaktních radarových hladinoměrů se mikrovlny šíří plynným prostředím nad hladinou měřeného média, u kontaktních radarů se mikrovlny šíří vlnovodem, který je ve styku s měřeným médiem.

Pulzní radarový hladinoměr pracuje s krátkými mikrovlnnými impulzy s frekvencí např. 6 GHz a s dobou trvání asi 1 ns,

Obr. 6. Průběh vyslaného a přijímaného signálu u frekvenční metody



Obr. 7. Základní typy radarových antén



kteří jsou pomocí antény vysílány směrem k hladině měřeného média (obr. 5.). Na hladině se vlna částečně odrazí zpět k vysílači a částečně prochází do druhého prostředí. Měří se čas potřebný k průchodu elektromagnetických vln z vysílače k hladině (τ_1) a zpět k přijímači (τ_2). Podle této doby je metoda označována jako TOF (*Time Of Flight*). Z doby, která uplyne mezi vysláním a přijetím elektromagnetické vlny ($\tau = \tau_1 + \tau_2$) se stanoví poloha hladiny b podle vzorce:

$$b = L_{\max} - c \cdot \frac{\tau}{2} \tag{3}$$

kde c je rychlost šíření mikrovln, L_{\max} vzdálenost antény hladinoměru ode dna nádrže.

Další vyslaný impulz následuje po přestávce, která je potřebná pro příjem odražené vlny (tzv. echa). Po dobu přestávky je vysílač přepnut do funkce přijímače. Jedna perioda měření trvá řádově 10^{-6} s. Při technické realizaci tohoto principu se naráží na problémy měření velmi krátkých úseků času. Při požadavku měřit polohu hladiny s chybou menší než 1 mm, je nutné měřit čas s rozlišením $6 \cdot 10^{-12}$ s.

Vzhledem k vysokým nárokům na přesnost měření času u pulzního radaru, je vhodnější *radar s rozmlataným spojitým signálem*. Tento radar využívá *frekvenční metodu*, která je založena na vysílání spojitého signálu s proměnnou frekvencí (*Frequency Modulated Continuous Wave*, FMCW). Vyslaný signál je modulován obvykle pilovitě tak, že mění plynule svoji frekvenci v určitém pásmu, např. od 24 do 26 GHz (obr. 6.). Ze známé rychlosti přeladování a změřených hodnot frekvencí vyslaného a přijatého signálu je možné vypočítat vzdálenost odpovídající poloze hladiny. Odražené vlny se vrací k přijímači se zpožděním v závislosti na poloze hladiny. S ohledem na proměnnou frekvenci vysílače je frekvence přijímaného signálu odlišná od právě vyslané frekvence. Ze zjištěného rozdílu Δf se stanoví odpovídající časový interval $\Delta \tau$ a vypočítá se vzdálenost hladiny. Hlavní předností frekvenční metody je, že rozdíl frekvencí (řádově v kHz) lze stanovit velmi přesně, a to umožňuje stanovit polohu hladiny s přesností až ± 1 mm.

Radarový snímač hladiny sdružuje obvykle anténu vysílače i přijímače a potřebné elektronické obvody řízené mikroprocesorem. Inteligentní radarový hladinoměr poskytuje analogový i číslicový výstup a může i počítat objem média v nádrži.

Existuje mnoho typů antén, lišících se tvarem i průřezem. Na obr. 7. jsou uvedeny tři základní typy antén. *Tyčová anténa*

má jednoduchý způsob montáže, lze ji upevnit do úzkého hrdla nebo nátrubku, nevýhodou je velký vyzařovací úhel (asi 30°) a nízká citlivost; lze ji použít pro měření kratších vzdáleností, maximálně do 10 m. *Kuželové antény* mají vyzařovací úhel 15–30° a měřicí rozsah asi 20 m v závislosti na velikosti trychtýře. Kuželová anténa je vhodná pro měření kapalných médií i sypkých látek, je robustní a značně odolná proti vlivu kondenzace a usazenin měřené látky nebo výparů. Nejmenší vyzařovací úhel mají *parabolické antény* (asi 6°) a vykazují vysokou citlivost a výbornou směrovost; jsou tedy vhodné pro měření i velkých vzdáleností, např. 40 m i více. Vyžadují však příslušně velký otvor pro montáž, např. otvor s poklopem. Příklady konkrétního provedení radarových antén a jejich umístění do nádrží uvádí KADLEC (1).

Zvláštní skupinu mezi radarovými hladinoměry tvoří *kontaktní radarové hladinoměry s vedenou vlnou*, označované také jako *reflektometrické* (reflexní) hladinoměry. Využívají šíření mikrovlňného impulzu po vlnovodu instalovaném v nádrži; může jít o koaxiální kabel, dvojlinku, jednu nebo dvě tyče, lano, popř. opatřené teflonovým povlakem. Funkce reflektometrického hladinoměru vychází ze skutečnosti, že pokud není vedení zakončeno charakteristickou impedancí, odráží se přenášený signál v rovině hladiny, přičemž intenzita odraženého signálu závisí na permitivitě média (obr. 8.a). U látek s vyšší permitivitou ($\epsilon_r > 1,8$) je možno měřit přímo časový rozdíl mezi vysláním impulzu (τ_0) a přijetím impulzu odraženého v místě polohy hladiny (τ_1). Tento princip se označuje jako TDR (*Time Domain Reflectometry*). Metodu je možno použít i pro měření rozhraní dvou kapalin (obr. 8.b). Permitivita horní kapaliny (ϵ_1) musí být známa a její hodnota menší než u dolní kapaliny (ϵ_2). Na obr. 8.c je ukázka provedení reflektometrických radarů.

Radarové snímače pracují bez pohyblivých mechanických součástí a vykazují vysokou přesnost (± 1 mm) a spolehlivost i ve velmi náročných provozních podmínkách (vysoká teplota, tlak, agresivní prostředí). Bezdotykové hladinoměry pracují bez kontaktu s měřenou látkou a jsou vhodné i pro měření viskózních a lepivých médií, pro pasty a kaly, pro zkapalněné plyny i těžké a agresivní kapaliny. Nevýhodou je poměrně vysoká cena zařízení a nevhodnost aplikace pro kapaliny s nízkou permitivitou. Signál reflektometrického radaru není ovlivňován přítomností prachu, par nebo pěny a při správné instalaci ani falešnými odrazy. Nevýhodou je kontakt antény s měřeným médiem.

Radioizotopové hladinoměry

Radioizotopové hladinoměry využívají skutečnost, že intenzita radioaktivního záření úměrně klesá s tloušťkou vrstvy materiálu mezi zářičem a detektorem. Vyhodnocuje se tedy zeslabení svazku ionizujícího záření při jeho průchodu monitorovaným hmotným prostorem. Měřicí zařízení tvoří radioaktivní zářič a detektor záření s elektronickými obvody. Intenzita záření dopadající na detektor závisí na tloušťce vrstvy měřeného materiálu.

Na obr. 9.a je znázorněno limitní měření polohy hladiny v nádrži. Při limitním měření dochází ke skokové změně absorpce

Tab. 1. Kritéria pro výběr vhodného snímače hladiny

Kritérium	Možnosti
Požadavky na měření	<ul style="list-style-type: none"> – spojitě měření, – indikace mezních stavů, – měření rozhraní.
Vlastnosti měřeného média	<ul style="list-style-type: none"> – kapalina nebo sypká látka, – chemické složení, – hustota, viskozita, – vodivost, permitivita.
Provozní podmínky	<ul style="list-style-type: none"> – teplota a tlak, – promíchávání náplně, – vibrace zařízení, – složení atmosféry nad hladinou (páry, mlha, prach), – vytváření nánosů, ulpívání materiálu, – statický náboj.
Okolní prostředí snímače	<ul style="list-style-type: none"> – teplota, – prašnost, vlhkost, nebezpečí výbuchu.
Vlastnosti snímače	<ul style="list-style-type: none"> – přesnost, – opakovatelnost, – stabilita, – životnost.
Ekonomické náklady	<ul style="list-style-type: none"> – pořizovací cena, – náklady na instalaci, – zaškolení obsluhy, – náklady na provoz a údržbu.

radioaktivního záření, při spojitě měření (obr. 9.b) se s polohou hladiny mění tloušťka vrstvy materiálu.

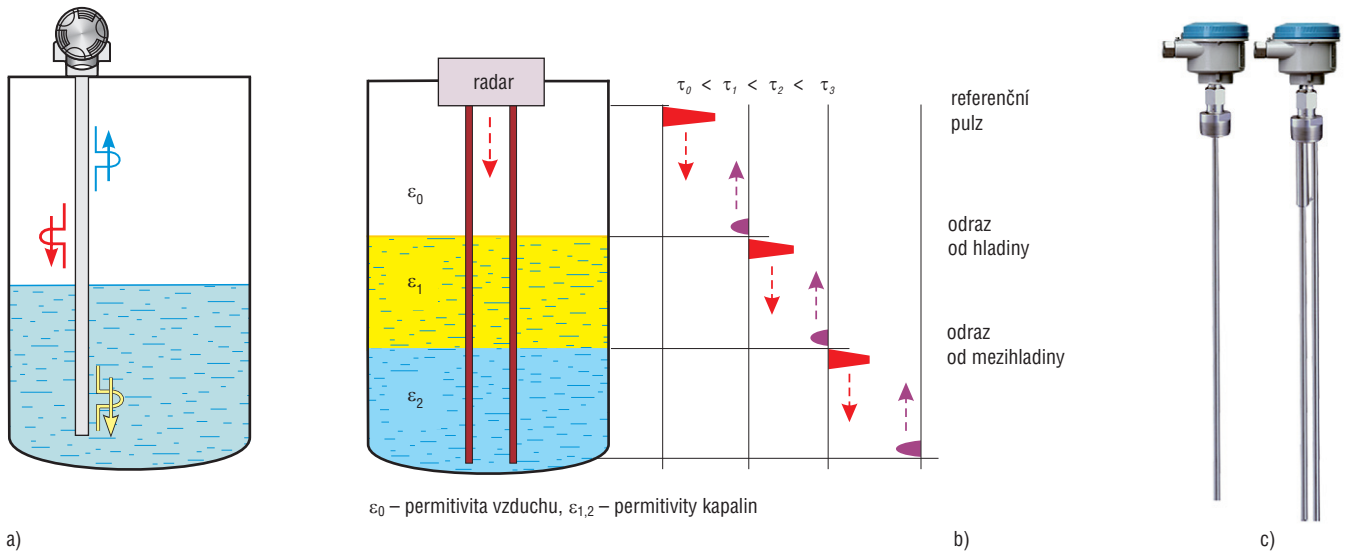
Jako radioaktivní zářiče se používají zdroje gama záření, které velmi dobře proniká materiálem, ale nemá schopnost jej aktivovat (vyvolávat jeho radioaktivitu). Lze je proto používat i pro měření v potravinářském průmyslu. Aby nebyly nutné časté kalibrace, používají se izotopy s delším poločasem rozpadu, např. Co 60 (poločas 5,5 roku) nebo Cs 137 (poločas 30,5 roku). Zářič musí být opatřen olověným ochranným krytem tloušťky několik desítek centimetrů.

K detekci záření se používá buď *Geiger-Müllerův detektor* (při vyšších teplotách než 60 °C je elektronická část oddělena od detektoru) nebo citlivý *scintilační detektor* s fotonásobičem (2). Scintilační detektory jsou citlivé na teplotu, která by neměla překročit limitní hodnotu okolo 55 °C.

Radioizotopové hladinoměry se uplatní zejména v náročných provozních podmínkách, při kterých jiné metody nevyhovují, tj. při měření látek silně agresivních, viskózních, při extrémně vysokých teplotách a tlacích i ve vakuu, při vysoké prašnosti i při vibracích nádoby. Důležitou předností radioizotopových hladinoměru je možnost montáže zářiče i přijímače na vnější stranu stěn zásobníku. Příklad takového bezkontaktního měření s využitím scintilačního detektoru je na obr. 9.c.

K přednostem radioizotopových hladinoměru patří bezkontaktní měření (montáž vně nádrže), nezávislost na teplotě, na tlaku, nezávislost na změnách chemického složení média a minimální poruchovost i ve ztížených podmínkách. Nevýhodou je nutnost ochrany obsluhy před účinky radioaktivního ozáření a povinnost zajištění pravidelné kontroly ve smyslu příslušných zákonných předpisů.

Obr. 8. Radarový hladinoměr s vedenou vlnou: a) princip, b) měření rozhraní dvou kapalin, c) radary Sitrans LG200 (3)



Výběr snímače hladiny

Výběr správného způsobu měření hladiny spočívá nejen ve volbě vhodného měřicího principu snímače, ale souvisí s požadavky na instalaci a zajištění provozu při konkrétních pracovních podmínkách. Neexistuje bohužel žádné univerzální zařízení, které by splňovalo všechny požadavky. Proto uživatelé spolu se specialisty v oblasti přístrojové techniky musí vzít do úvahy vedle funkčního principu i schopnosti snímače odolávat působení vnějšího prostředí a zvážit náklady na pořízení přístroje, na jeho provoz a údržbu po celou dobu životnosti zařízení. V tab. I. jsou uvedena některá kritéria, která je třeba uvážit při výběru vhodného hladinoměru. Pro usnadnění výběru vhodného snímače hladiny je možno využít firemní literaturu, např. (4), nebo aplikační programy na www stránkách výrobců přístrojové techniky, např. www.cz.endress.com, www.emersonprocess.com.

Souhrn

V příspěvku jsou popsány ultrazvukové, radarové a radioizotopové snímače hladin. U každého snímače je vysvětlen princip funkce a je popsáno uspořádání měřicího zařízení. Jsou uvedeny zásady pro montáž do technologické aparatury a jsou ukázány přednosti

a nedostatky uvedených typů snímačů. V závěru jsou shrnuty zásady pro výběr vhodného snímače hladiny.

Klíčová slova: ultrazvukové hladinoměry; radarové hladinoměry; radioizotopové hladinoměry.

Literatura

1. 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.
2. SMITH, C. J.: *Basic Process Measurement*. New Jersey: John Wiley, 2009, 346 s.
3. *Radarový hladinoměr Sitrans LG200*. Siemens, [online] <http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?ctxnh=cf2126650b&ctxp=home>, cit. 28. 2. 2016.
4. *Application Handbook*. Nivelco, [online] http://www.nivelco.hu/download/Application_Handbook.pdf, cit. 28. 2. 2016.

Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Level Measurement (Part 3)

The paper describes ultrasonic and radar level sensors and radioisotope level gauges; it explains the operating principle of each sensor and details the arrangement of the measuring device. It also deals with the principles of installation of the sensors on the technological apparatus are outlines the advantages and disadvantages of the listed types of sensors. The conclusion summarizes the criteria for selection of an appropriate level gauge.

Key words: ultrasonic level sensor; radar level transmitters; radioisotope level gauges.

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

Obr. 9. Radioizotopové hladinoměry: a) limitní měření, b) spojitě měření, c) měření se scintilačním detektorem

