

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření tlaku

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: PRESSURE MEASUREMENT

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Principy měření tlaku

Pro měření tlaku se využívají různé fyzikální principy, které se liší podle charakteru převodu tlaku na výstupní signál. Rozdělení snímačů tlaku do jednotlivých skupin spolu se stručnou charakteristikou principu měření a možnostmi použití je v tab. I. Podrobnější popis uvádí KADLEC (1). Tento článek se věnuje pouze nejčastěji používaným provozním snímačům.

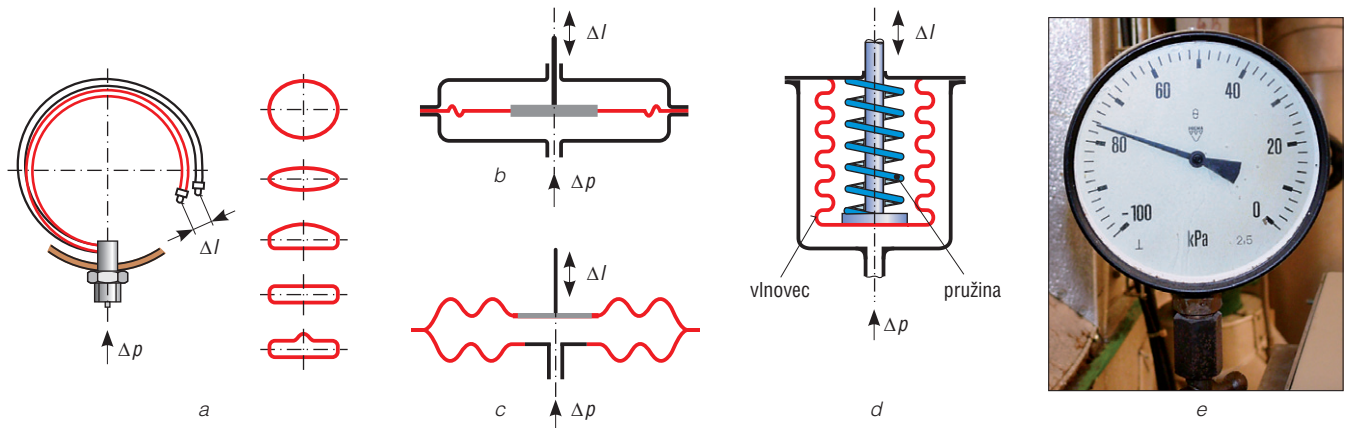
Deformační tlakoměry

Princip funkce deformačních tlakoměrů je založen na pružné deformaci a tím i na změně geometrického tvaru vhodného tlakoměrného prvku vlivem působení měřeného tlaku. Nejčastěji používanými deformačními prvky jsou Bourdonova trubice, membrána, krabice a vlnovec (obr. 1.). Změna polohy vyvolaná deformací měřicího prvku se přenáší na ukazatel. Deformační

Tab. I. Přehled snímačů tlaku

Tlakoměry (snímače tlaku)	Charakteristika principu měření	Poznámka	Typ tlakoměru (snímače)	Měřicí rozsah	Přesnost (% z rozsahu)	Možnosti použití
Hydrostatické tlakoměry	jsou založeny na definici hydrostatického tlaku, měřítkem tlaku je výška sloupce kapaliny	ovlivňující veličinou je hustota tlakoměrné kapaliny a její teplota	U-trubicový	závisí na hustotě	až 0,05	v laboratořích, v metrologii, přesné barometry
			nádobkový	do 200 kPa (náplň Hg)	až 0,05	
			mikromanometr se sklonným ramenem	do 5 kPa (náplň voda)	1 až 3	
Sílové tlakoměry	využívají definice tlaku jako síly na plochu		zvonový	do 1000 Pa	1	laboratorní měření
			pístový	0–500 MPa	0,0015 až 0,1	etalonové tlakoměry
Deformační tlakoměry	měřítkem tlaku je velikost deformace pružného prvku		trubicový (Bourdonův)	do 10 ⁹ Pa	běžně 1 až 2 přesné 0,1	nejrozšířenější přímo ukazující provozní tlakoměry
			membránový	do 10 ⁶ Pa	0,5 až 2	
			vlnovcový	do 10 ⁵ Pa	1 až 2	
			krabicový	do 10 ³ Pa	1 až 2	aneroid, jako barometr
Snímače tlaku s elektrickým výstupem	jako snímací prvek je použit vhodný deformační člen, (nejčastěji membrána) a vyhodnocuje se změna polohy	poloha jezdce potenciometru	potenciometrický		0,5 až 1	jako doplněk k deformačním manometrům
		poloha jádra indukční cívky	indukčnostní		0,5	
		změna osvětlení či světelného toku	optický		0,1	
		vzdálenost elektrod kondenzátoru	kapacitní	až 70 MPa	0,05 až 0,2	
	jako snímací prvek je použit deformační člen (membrána, nosník apod.) a vyhodnocuje se mechanické napětí	mechanické napětí se měří tenzometrem jako změna odporu	tenzometrický	až 60 MPa	0,025 až 0,5	nejčastěji používané v moderních převodních tlaku, přístroje provozní i laboratorní
		změna rezonanční frekvence mechanického	rezonanční	0 až 50 MPa	0,01 až 0,2	nejpřesnější tlakoměry, provozní i laboratorní přístroje
		vyvolání náboje při mechanickém namáhání	piezoelektrický	až 30 GPa	1	měření rychlých tlakových dějů a pulzací

Obr. 1. Základní deformační prvky: a) Bourdonova trubice, b) membrána, c) krabice, d) vlnovec, e) měření podtlaku vakuometrem Prema v zrnači cukrovaru Dobrovice (foto M. Kmínek)



prvky se zhotovují z uhlíkových a niklových ocelí, z mosazi, z fosforového a beryliového bronzu a dalších vhodných slitin. Deformační tlakoměry byly v mnoha oblastech nahrazeny modernějšími typy snímačů. Uchovávají si však důležité místo v oblasti měření tlaku, a to pro některé své přednosti: jednoduchost, spolehlivost, nezávislost na napájení, odolnost vůči elektromagnetickému rušení, nízkou cenu. Příklad provedení je na obr. 1.e.

Snímače tlaku s elektrickým výstupem

V moderní automatizační technice nacházejí uplatnění takové snímače, které poskytují výstupní signál vhodný k dálkovému přenosu a následnému zpracování v elektronických analogových a číslicových obvodech. Základem mnoha provedení takových snímačů (elektromechanických tlakoměrů) bývá některý z deformačních tlakoměřných prvků (membrána, trubice, vlnovec, krabice, nosník). Na deformační prvek (měřicí prvek, primární senzor) navazuje vhodný senzor s elektrickým výstupem (sekundární senzor), vyhodnocující deformaci způsobenou měřeným tlakem p (obr. 2.). Jde tedy o snímače tlaku s několikanásobným převodem. Výsledkem působení síly při deformaci měřicího prvku je změna polohy nebo změna mechanického napětí, a proto se k vyhodnocení deformace a k převodu na elektrický signál s výhodou využívají senzory: – polohy (potenciometrické, indukčnostní, kapacitní, optické), – mechanického napětí (tenzometrické, rezonanční, piezoelektrické).

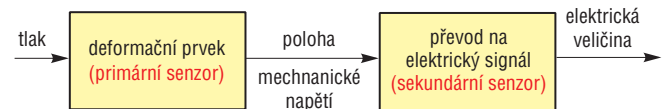
Elektrický výstup z deformačních tlakoměrů lze získat např. pomocí potenciometrického senzoru polohy. Jezdec potenciometru je mechanicky spojen s deformačním prvkem, jehož deformace vyvolává změnu polohy jezdce vyhodnocovanou jako změna odporu.

Kapacitní snímače tlaku

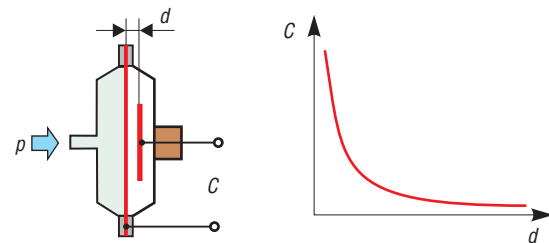
Kapacitní čidlo tlaku je principiálně jednoduché (obr. 3.). Jedna elektroda kondenzátoru je tvořena membránou, jejíž poloha se mění při působení tlaku, druhá je pevná. Změna vzdálenosti elektrod kondenzátoru se projeví změnou jeho kapacity.

Kapacitní princip se velmi často používá při měření rozdílu tlaků, když měřicí membrána tvoří střední pohyblivou elektrodu dvojitého kondenzátoru (obr. 4.a) zapojeného do měřicího můstku. Příklad provedení takového čidla se střední

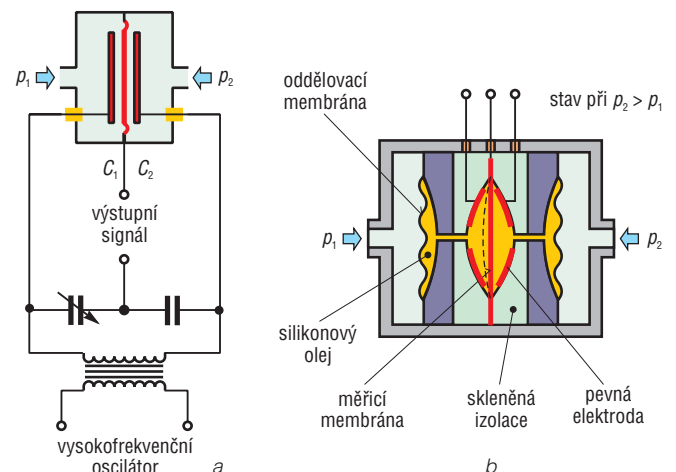
Obr. 2. Základní schéma snímače tlaku s elektrickým výstupem



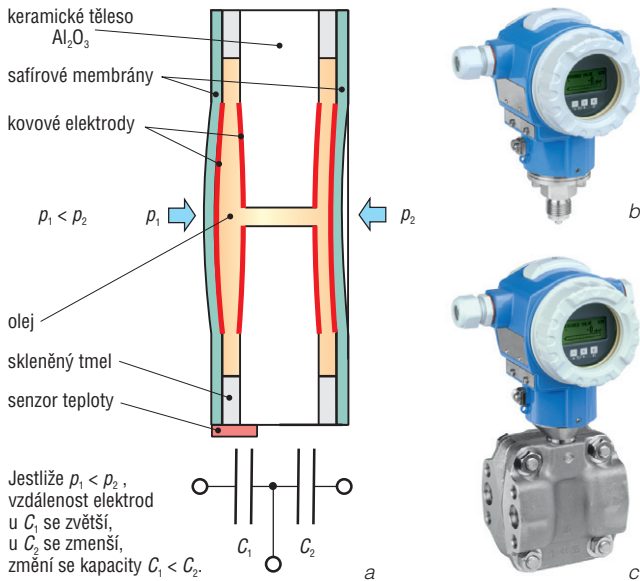
Obr. 3. Princip kapacitního čidla tlaku



Obr. 4. Kapacitní čidlo rozdílu tlaků: a) princip, b) příklad uspořádání



Obr. 5. Snímače tlaku s keramickou kapacitní membránou: a) schéma tlakoměrné cely s keramickou kapacitní membránou, b) snímač tlaku Cerabar PMC71, c) snímač rozdílu tlaků Deltabar PMD70 (www.cz.endress.com)



membránovou elektrodou a dvěma pevnými elektrodami je znázorněn na obr. 4.b. Vnitřní prostor čidla je vyplněn silikonovým olejem nebo jinou vhodnou inertní kapalinou a měřené médium nepůsobí na měřicí membránu přímo, ale prostřednictvím oddělovacích membrán. Pevné elektrody jsou vytvořeny na izolantu (keramika, sklo), tvarovaném tak, aby změna kapacity byla co největší a současně byl vytvořen mechanický doraz bránící plastické deformaci měřicí membrány při přetížení čidla. Průhyb membrány vyvolá opačné změny kapacit C_1 a C_2 , tj. např. $C_1 = C_0 + \Delta C$ a $C_2 = C_0 - \Delta C$. Výstupní napětí můstkového obvodu je úměrné rozdílu kapacit $C_1 - C_2 = 2 \cdot \Delta C$, takže citlivost oproti čidlu na obr. 3. je dvojnásobná.

Elektrické vyhodnocovací obvody převádějící změny kapacity na výstupní signál bývají doplněny obvody pro potlačení vlivů parazitních kapacit, které jsou způsobeny kapacitami kabelu, přívodů a stínícího krytu. Parazitní vliv kapacity přívodů je

eliminován použitím hybridní nebo integrované elektroniky vestavěné ve snímači. Pracovní rozsah kapacitních snímačů rozdílu tlaků se pohybuje v rozmezí 100 Pa až 40 MPa, statický tlak může dosáhnout až 40 MPa.

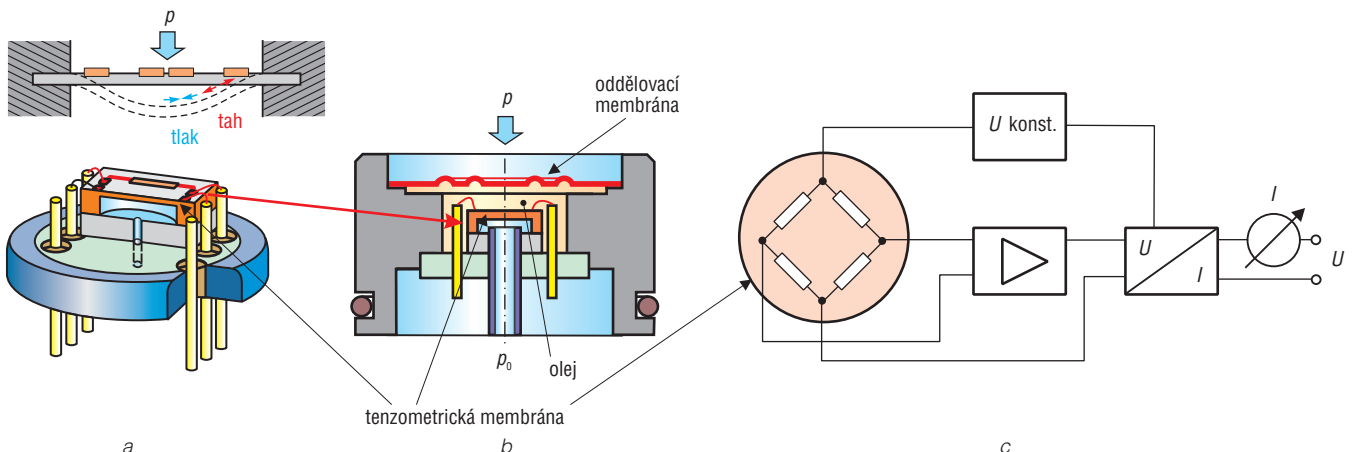
Čidlem moderních kapacitních snímačů tlaku je keramická membrána, nejčastěji jako součást keramické tlakoměrné cely. Například keramická měřicí cela od firmy Endress+Hauser značky Ceraphire® je vytvořena z velmi čisté keramiky a safírových membrán. Safír je materiál vyznačující se velkou mechanickou pevností, stabilitou a odolností proti korozi, který je vhodný pro použití i s velmi agresivními médii. Hladký povrch čisté keramiky senzoru minimalizuje usazování a zachycování měřeného média, což je důležité ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu. Keramická měřicí buňka využívá dva deskové kondenzátory, vždy s jednou pevnou a jednou pohyblivou elektrodou (obr. 5.a). Pevná elektroda je součástí základního keramického tělesa a pohyblivá elektroda je umístěna na vnitřní straně safírové membrány. Vnitřní prostor měřicí buňky je vyplněn olejem. V důsledku působení rozdílu tlaků p_1 a p_2 dojde k odpovídajícímu prohnutí membrán, a tudíž ke změně kapacity, kterou vyhodnocuje mikroprocesorem řízený elektronický obvod, vybavený i automatickou kompenzací vlivu teploty. Kapacitní snímače tlaku s keramickou měřicí celou se používají k měření přetlaku v rozsazích od 0–25 Pa do 0–70 MPa a k měření rozdílu tlaků až ± 14 MPa.

Snímače tlaku s odporovými tenzometry

Odporový tenzometr je senzor, u něhož se mění elektrický odpor při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací, zpravidla tlakem nebo tahem. Ve snímačích tlaku se používají polovodičové tenzometry (piezorezistory), které jsou v porovnání s kovovými tenzometry mnohem citlivější. Základním úkolem odporového tenzometru je reagovat změnou odporu na mechanickou deformaci vyvolanou působící silou. V moderních snímačích tlaku se používají tlakoměrné cely s piezorezistory zhotovenými difúzní technologií (obr. 6.).

Podstatnou součástí tlakoměrné cely je křemíková membrána, na jejímž povrchu jsou vytvořeny polovodičové tenzometry, přičemž membrána je současně pružným prvkem pro snímání tlaku. Jde o kruhovou tenkou membránu konstantní tloušťky s průměrem zpravidla menším než 6 mm, která je po obvodu

Obr. 6. Senzor tlaku s difundovanými polovodičovými tenzometry (piezorezistivní senzor): a) křemíková membrána s piezorezistory, b) tenzometrický senzor, c) měřicí můstek s piezorezistory a zesilovačem



vetknuta a je namáhána tlakem rovnoměrně rozloženým po celé její ploše. Na obr. 6.a je plně zakreslena membrána v nezatíženém stavu a čárkovaně ve stavu při zatížení tlakem p (pozn.: průhyb membrány je na obrázku velmi zvětšen). V zatíženém stavu lze na membráně identifikovat místa, kde jsou povrchová napětí v tlaku a v tahu. Napětí povrchových vláken se měří tenzometricky. Difuzní rezistory, orientované ve směru povrchových napětí, jsou vytvořeny jednak na obvodu membrány, tj. v místech, kde je podle obr. 6.a namáhána tahem, a jednak ve středu membrány, kde dochází k namáhání tlakem. Prostřednictvím kovových vodivých kontaktů, které jsou vyvedeny mimo oblast měřicí membrány, jsou difuzní rezistory propojeny do Wheatstoneova můstku (schéma zapojení je na obr. 6.c).

Samotným křemíkovým čidlem lze měřit čistý, suchý vzduch nebo jiné neagresivní plyny. Voda, vodní páry a další složky působí na složitou sestavu čidla (hliníkové a jiné pokovení, zlaté vodiče apod.), které v těchto případech není odolné proti působení měřeného média. V průmyslových podmínkách je třeba křemíkové čidlo chránit před stykem s měřeným médiem. K tomu se v tlakoměrných systémech používá kovová oddělovací membrána a olejová náplň (obr. 6.b). Oddělovací membrána musí být zkonstruována tak, aby neovlivňovala vlastnosti křemíkového čidla. Snímače s křemíkovými čidly mohou být uzpůsobeny pro měření jak absolutního tlaku, tak i přetlaku, podtlaku nebo rozdílu. V případě měření absolutního tlaku je prostor pod membránou evakuován a uzavřen, při měření přetlaku nebo podtlaku je prostor pod membránou propojen s okolní atmosférou (obr. 7.). Snímače tlaku s křemíkovou membránou se používají k měření přetlaku až do 60 MPa a podtlaku do -100 kPa.

Obr. 7. Měření absolutního a relativního tlaku

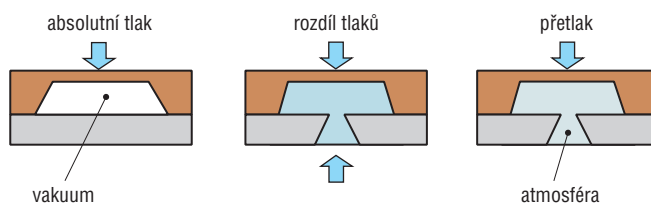


Schéma inteligentního převodníku tlaku je na obr. 8. Senzor tlaku reaguje na změnu tlaku v závislosti na principu např. změnou odporu nebo kapacity. Tato změna je transformována na změnu napětí, které je zesíleno v zesilovači na požadovanou úroveň. Vztah mezi měřeným tlakem a změnou napětí je obecně nelineární a velikost signálu je ovlivněna také změnami teploty. Napěťové signály úměrné tlaku a teplotě vstupují přes multiplexer do A/D převodníku, poskytujícího číselný signál úměrný vstupním napěťovým signálům a dále zpracovaný mikroprocesorem podle zadaného programu a nastavených konstant (v závislosti na požadovaném měřicím rozsahu a požadovaném výstupním signálu). Inteligentní převodníky mohou být vybaveny i bezdrátovým přenosem signálu, nebo integrovanou diagnostikou, která v pravidelných intervalech kontroluje funkčnost systému. V případě, že se inteligentní převodník využívá k měření polohy hladiny (hydrostatické hladinoměry) nebo k měření průtoku (měření rozdílu tlaků na škrticím prvku), je software přizpůsoben pro výpočet dané konkrétní veličiny v požadovaných inženýrských jednotkách.

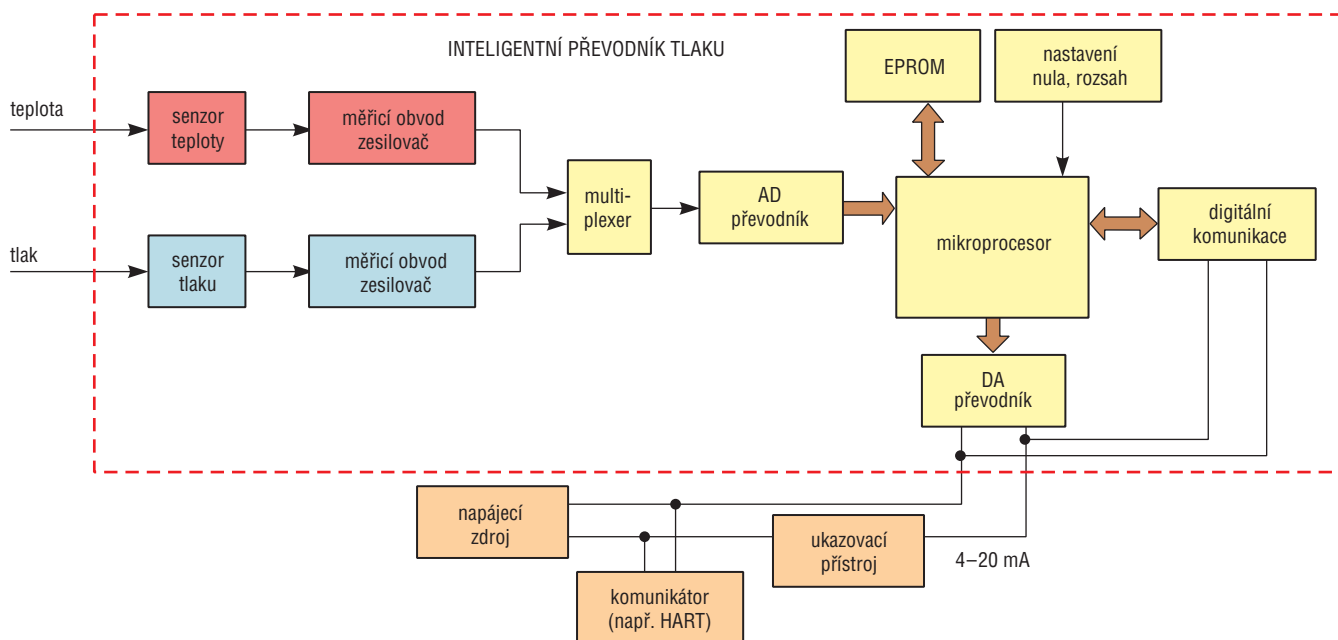
Inteligentní snímače tlaku

Senzory tlaku s elektrickým výstupem se využívají v inteligentních snímačích (převodnících). Obecně o inteligentních převodnících a způsobech zpracování signálu bylo pojednáno v úvodním článku tohoto seriálu o měření provozních veličin (4).

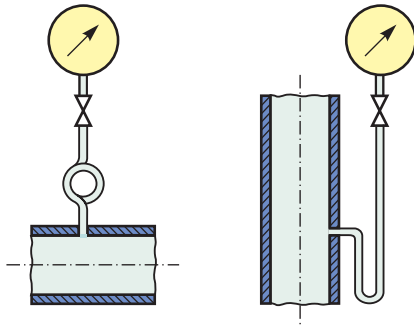
Zabudování provozních tlakoměrů

Při měření statického tlaku je nutné volit místo jeho odběru tak, aby měřený tlak nebyl zkreslován dynamickou složkou tlaku proudícího prostředí. Odběrové místo na potrubí musí být dostatečně vzdáleno od rušivého vlivu armatur (ventily, kolena

Obr. 8. Schéma inteligentního převodníku tlaku



Obr. 9. Kondenzační smyčky



apod.); obvykle postačí vzdálenost rovná desetinásobku průměru potrubí. Stěna potrubí v místě odběru musí být hladká a odběrová trubka nesmí zasahovat dovnitř potrubí. U potrubí uloženého vodorovně a šikmo se tlak plynu odebírá v horní části potrubí, tlak kapalin z boku potrubí. Předchází se tím zanášení odběrů nečistotami nebo kondenzátem. Při teplotě měřeného média nepřesahující maximální povolenou hodnotu instalovaného snímače tlaku se přístroj umísťuje co nejbližší k provoznímu potrubí. Při měření tlaku vodní páry při vysokých teplotách je třeba zajistit, aby se pára nedostala do tlakoměru, který by se tím poškodil. Před tlakoměr se proto zařazuje kondenzační smyčka (obr. 9.)

Při měření na dálku se propojuje tlakoměr s místem odběru signálním potrubím (často nevhodně označovaným jako impulzní potrubí). Doporučuje se potrubí o světlosti 6 až 10 mm. Signální potrubí nemá mít ostré ohyby a má být položeno tak, aby se zabránilo usazování kondenzátu při měření tlaku plynů a par nebo vytváření parních nebo plynových bublin při měření tlaku kapalin. Proto musí mít signální potrubí vždy určitý spád, přičemž na jeho nejnižší, popř. nejvýše položeném místě musí být instalovány odkalovací, popř. odvzdušňovací ventily. Délka signálního potrubí by neměla být větší než asi 50 m.

Při měření tlaku agresivních látek se používají oddělovací nádoby naplněné oddělovací kapalinou anebo se oba prostory oddělují vhodnou oddělovací membránou (obr. 10.). Jako kapalinová náplň se používá silikonový nebo minerální olej, jedlý olej (v potravinářství), glycerin nebo směs glycerinu a vody. Membrána přicházející do styku s agresivní látkou bývá vyrobena z ušlechtilého materiálu (tantal, zirkon, titan), korozivzdorných slitin (Hastelloy, Monel) nebo je chráněna teflonem apod. Tuhost

membrány nesmí v určeném pracovním rozsahu zkreslovat měřený tlak. Pro případy, kdy není přípustné, aby měřené médium přišlo do kontaktu s měřicím ústrojím tlakoměru, se používají speciální *membránové oddělovače*. K takovým případům dochází např. když se jedná o značně viskózní kapaliny, sedimentující kaly, agresivní tekutiny, horké tekutiny, které tuhnou nebo krystalizují při poklesu teploty apod. Měřený tlak působí přes membránu na pracovní kapalinu, která vyplňuje prostor za membránou a přenáší tlak do prostoru snímače. Rozměry membrány se volí tak, aby její tuhost nezkrusovala měřený tlak nad rámec přípustných chyb. Membránové oddělovače se často uplatňují ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu při požadavcích na dokonalé pročištění technologických aparatur. Membránové oddělovače ovšem mohou být i zdrojem chyb souvisejících s nevhodnou velikostí a tuhostí membrány a také s tepelnou roztažností kapalinové náplně.

Kalibrace provozních snímačů tlaku

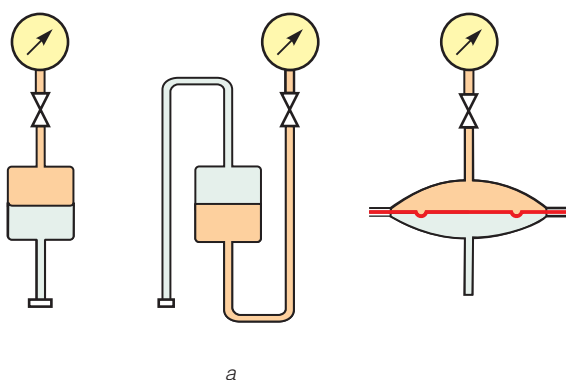
Funkci provozních tlakoměrů je třeba pravidelně kontrolovat. Pro kalibrační kontrolu statických charakteristik se volí absolutní nebo srovnávací metoda. Při *absolutní metodě* se používají velmi přesné pístové tlakoměry zjišťující tlaky již od stovek pascalů.

Při *srovnávací metodě* se používají etalonové tlakoměry. Ve většině případů to jsou přesné digitální tlakoměry s křemíkovou membránou s piezorezistivními senzory anebo tlakoměry s kapacitním nebo rezonančním senzorem. Tlakoměry se kalibrují podle příslušných předpisů a souvisejících norem, které určují rozsah a způsob vykonání jednotlivých zkoušek a zjišťování metrologických parametrů. Kalibrace tlakoměrů spočívá v porovnání indikace etalonu tlaku a kalibrovaného snímače tlaku. Kontrolovaný přístroj se postupně zatěžuje tlakem rostoucím až na maximální hodnotu a následně se tlak postupně zmenšuje na hodnotu odpovídající nulové značce. Zkušební body musí být rovnoměrně rozděleny po celé stupnici a počet bodů proměřované charakteristiky je závislý na udávané přesnosti přístroje. Další podrobnosti ke kalibraci snímačů tlaku lze nalézt v literatuře (1).

Souhrn

Článek uvádí přehled funkčních principů využívaných při provozním měření tlaku. Největší pozornost je věnována snímačům tlaku

Obr. 10. Oddělovací nádoby a membránové oddělovače: a) schéma, b) manometr s oddělovací membránou pro potravinářství, c) potravinářský oddělovač, (www.bhvsenzory.cz)



s elektrickým výstupem. Podrobně jsou popsány kapacitní snímače tlaku a snímače tlaku s odporovými tenzometry. Uvedeny jsou i způsoby zabudování provozních tlakoměrů do technologických aparatur a způsoby kalibrace provozních snímačů tlaku.

Klíčová slova: snímače tlaku, kapacitní snímače tlaku, tenzometrické snímače tlaku, zabudování snímačů tlaku.

Literatura

1. KADLEC, K.: Měření tlaku. In KADLEC, K., KMÍNEK, M., KADLEC, P. (EDIT.) ET AL.: *Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích*. Ostrava: Key Publishing, 2015, s. 138–169.
2. *Měření tlaku. Výkonné přístroje pro měření provozního tlaku, diferenciálního tlaku, hladiny a průtoku*. Endress+Hauser, [online] <http://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/pressure/>, cit. 20. 2. 2016.
3. *Membránové oddělovače*. BHV Senzory, [online] <http://www.bhvsenzory.cz/products-cz-8-membranove-oddelovace.html>, cit. 20. 2. 2016.
4. KADLEC, K.: Měření provozních veličin v cukrovarnictví: Měření provozních veličin. *Listy cukrov. řepář.*, 132, 2016 (5), s. 186–189.

Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Pressure Measurement

The article presents an overview of the operating principles used in process pressure measurements. The greatest attention is paid to pressure sensors with electrical output. Capacitive pressure sensors and pressure sensors with resistance strain gauges are described in detail. Ways of installation of process pressure gauges in technological apparatus are included and also methods of calibration of pressure transducers are listed.

Key words: pressure sensors, capacitive pressure sensors, strain gauge pressure sensors, installation of pressure sensors.

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