

Příprava na laboratorní práci:

MĚŘENÍ A REGULACE TLAKU, KALIBRACE TLAKOMĚŘŮ

Tento učební text slouží k přípravě na laboratorní práci Měření a regulace tlaku, kalibrace tlakoměrů. V části I.-Vybrané snímače tlaku, jsou popsány principy, vlastnosti a použití deformačních tlakoměrů (kap. 2), kapacitních snímačů tlaku (kap. 3.3) a snímačů s odporovými tenzometry (kap. 3.4). Kapacitní a tenzometrické snímače nacházejí uplatnění v inteligentních převodnicích tlaku, kterým je věnována kap. 4. Kalibrační provozních snímačů tlaku se zabývá kap. 5. Protože jedním z úkolů laboratorní práce je i nespojitá, dvoupolohová regulace tlaku v zásobníku, je na závěr tohoto učebního textu zařazena část II.-Dvoupolohová regulace.

I. - Vybrané snímače tlaku

1. Úvod

Tlak je veličina odvozená a při jeho měření je možno vyjít ze dvou základních definic:

1) tlak p definovaný jako síla F působící kolmo na plochu S

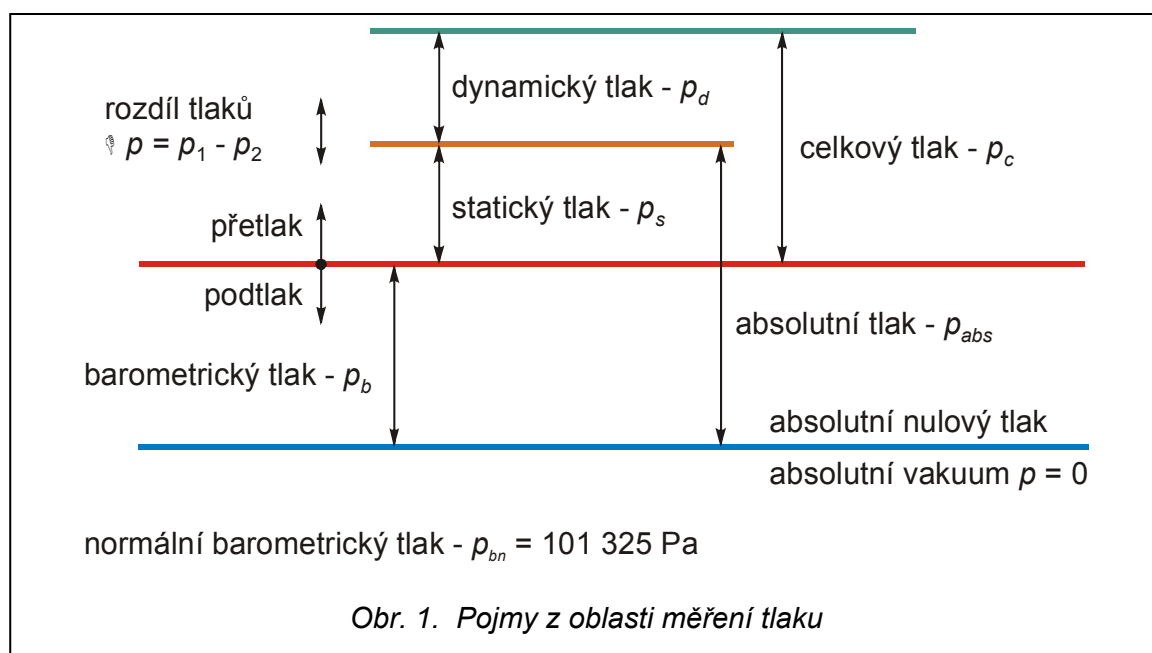
$$p = \frac{F}{S} \quad (1)$$

2) tlak p definovaný pomocí hydrostatického sloupce kapaliny o hustotě ρ a výšce h (g je gravitační zrychlení)

$$p = h\rho g \quad (2)$$

Hlavní jednotkou tlaku v soustavě SI je pascal (Pa). Je to tlak, který vyvolá síla jednoho newtonu rovnoměrně rozložená na ploše 1 m^2 , kolmé ke směru síly. Vzhledem k tomu, že pascal je velmi malou jednotkou, používá se v praxi násobků kPa a MPa. Vedle jednotky Pa je povoleno používat i jednotku bar ($1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$, přesně).

Hodnotu tlaku udáváme obvykle vůči dvěma základním vztažným hodnotám, a to k absolutnímu nulovému tlaku nebo k barometrickému tlaku (tlak vzduchu v daném místě za podmínek měření), anebo měříme rozdíl (diferenci) tlaků, z nichž žádný se neshoduje s barometrickým tlakem (*obr. 1*). *Absolutní tlak* je tlak měřený od absolutní tlakové nuly. *Přetlak* a *podtlak* se měří od okamžitého barometrického tlaku p_b .



V technické praxi se setkáváme s termíny snímač tlaku a převodník tlaku. Pojmem *snímač tlaku* se obvykle označuje tlakoměr, který slouží jako automatizační prvek, např. měřicí člen v regulačním obvodu. Citlivou částí snímače, která je v bezprostředním styku s měřeným objektem je *čidlo (senzor)*. Snímač tedy tvoří určitý konstrukční celek a čidlo je jeho součástí. Čidlem (senzorem) tlaku je např. membrána, Bourdonova trubice apod. V odborné literatuře se můžeme setkat s tím, že pojem senzor se používá jak pro označení čidla, tak i celého snímače, což může někdy vést k nepřesnostem ve vyjadřování.

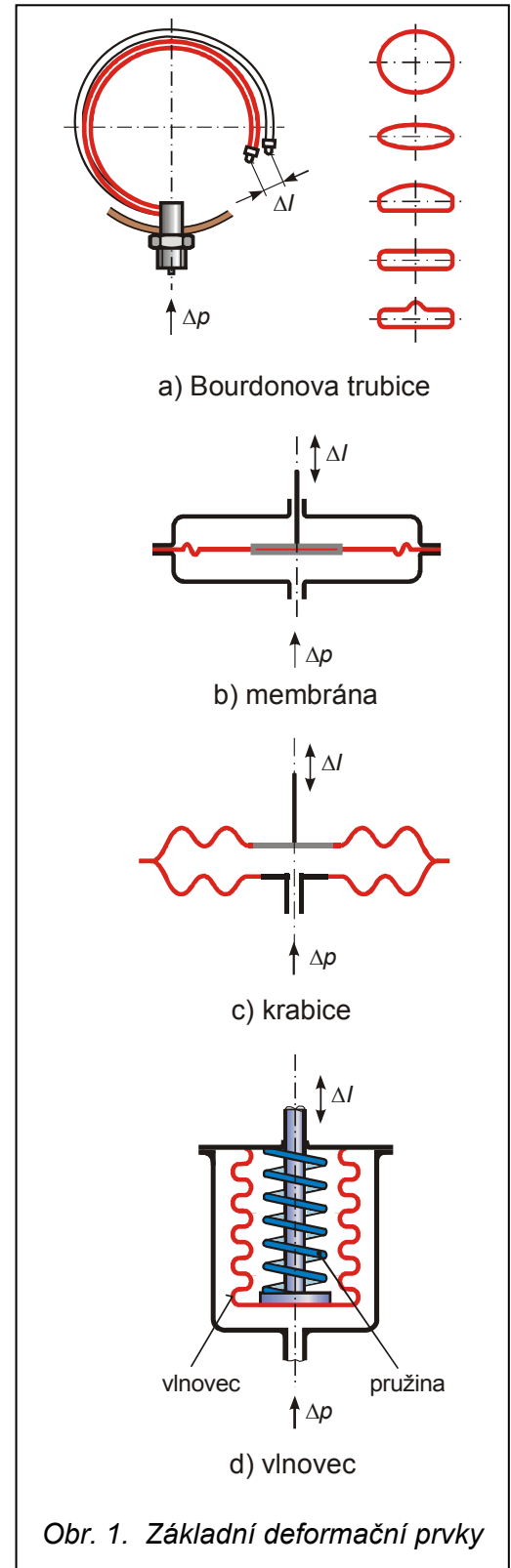
Označení *převodník tlaku* má velmi podobný význam jako snímač tlaku; jedná se o elektronické zařízení sloužící k měření tlaku, které je schopno přenést informaci o měřeném tlaku pomocí elektrických signálů k dalším zařízením. Jedná se tedy opět o konstrukční celek vybavený vhodným čidlem (senzorem) tlaku. Jestliže je činnost převodníku nebo snímače tlaku řízena mikroprocesorem hovoříme o *inteligentním převodníku* nebo *inteligentním snímači tlaku*.

Pro měření tlaku se využívají různé fyzikální principy, které se liší podle charakteru převodu tlaku na výstupní signál. V dalším textu se budeme věnovat jen těm principům, které se využívají u přístrojů používaných v laboratoři měřicí techniky na VŠCHT Praha. Kompletní přehled snímačů tlaku najde čtenář v [1].

2. 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*) Deformační prvky se zhotovují z uhlíkových a niklových ocelí, z mosazi, z fosforového a beryliového bronzu a dalších vhodných slitin.

Trubicové tlakoměry jsou nejpoužívanějším typem deformačních tlakoměrů. Tlakoměrným prvkem je *Bourdonova trubice* (patent francouzského vynálezce E. Bourdona z roku 1849), což je trubice oválného nebo eliptického průřezu stočená nejčastěji do kruhového oblouku ve tvaru písmene C nebo U, spirály nebo šroubovice. Existují i další složitější tvary průřezu různým způsobem zvlněné. Jedním koncem je trubice pevně spojena s tělesem opatřeným závitem pro připojení tlaku (*obr. 1 a*). Volný konec trubice je uzavřen a spojen přes převodové ústrojí s ukazovatelem na stupnici. Při působení tlaku se snaží eliptický průřez změnit v kruhový a zakřivení oblouku, do kterého je trubice stočená, se přitom mění. Vedle nejčastěji používaného mechanického ozubeného převodu se k přenosu na ukazovatel používá i jiný způsob např. magnetický převod.



Obr. 1. Základní deformační prvky

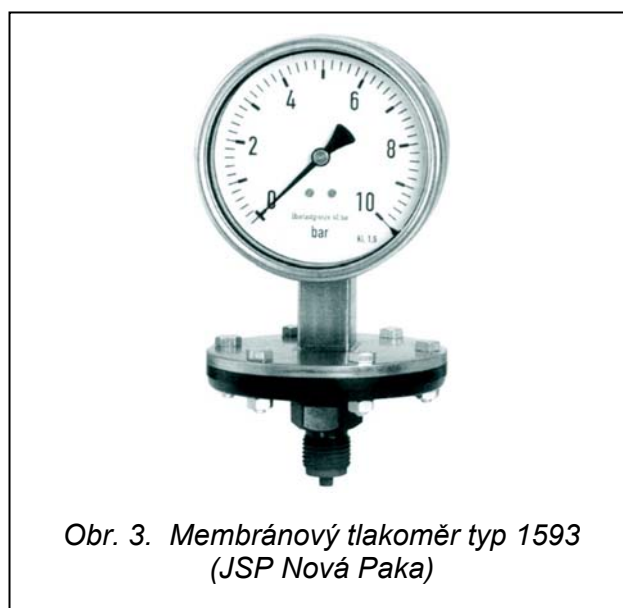
Pro nízké tlaky je trubice mosazná a má plošší profil, pro vysoké tlaky je ocelová a blíží se kruhovému profilu. Měřicí rozsahy trubcových tlakoměrů bývají od 0 do 0,5 MPa až 2 GPa. Trubicovými tlakoměry lze měřit i podtlaky. Tlakoměry s vysokou třídou přesnosti (0,1 až 1) mohou sloužit i jako sekundární etalon tlaku. Provozní přístroje mívají nejčastěji třídu přesnosti 1,6; měřidla s horší přesností se používají jako informativní. Pouzdra provozních tlakoměrů pro těžké a chemické provozy mohou být naplněna glycerinem, který chrání měřicí trubici a mechanismus proti korozi a plní i funkci tlumení při chvění.

Membránové tlakoměry používají jako tlakoměrný element kovovou membránu kruhového tvaru zvlněnou soustředěnými kruhy (*obr. 1 b*). Membrána je sevřena mezi dvěma přírubami a z jedné strany je přiváděn měřený tlak. Ten vyvolá průhyb membrány, který se přenáší na ukazatel. Závislost zdvihu na tlaku je přibližně lineární. Jejich výhodou je vyšší citlivost než tlakoměrů trubcových. Je-li tlak přiveden na obě strany membrány, lze využít membránových tlakoměrů i pro měření rozdílu tlaků. Proti korozi je možno membránu snadno chránit povlakem či fólií z vhodného materiálu.

Membránové tlakoměry jsou vhodné především pro malé a střední tlaky do 4 MPa. Hodí se i k měření kašovitých látek, protože měřicí prostor lze poměrně snadno vyčistit. Výhodou membránových tlakoměrů jsou malé setrvačné hmoty systému. Takové snímače jsou vhodné pro měření velmi rychle pulsujících tlaků. Membrána snímače je velmi tenká, má malý průměr a její deformace je možno snímat elektricky (např. kapacitně, indukčně či piezoelektricky).



Obr. 2. Manovakuometr s Bourdonovou trubicí typ MU63S (JSP Nová Paka)



Obr. 3. Membránový tlakoměr typ 1593 (JSP Nová Paka)

Krabicové tlakoměry se používají pro měření malých přetlaků, podtlaků či rozdílu tlaků. Měřicím prvkem je krabice tvořená dvěma zvlněnými membránami o průměru 50 až 100 mm (*obr. 1 c*). Deformace se přenáší pákovým převodem na ukazovatel. Měřicí rozsah bývá 10 Pa až 1 000 Pa. Pro zvýšení citlivosti se spojuje několik krabic v jeden konstrukční celek.

Tlakoměrná krabice se používá i v přístroji pro měření barometrického tlaku, v tzv. *aneroidu*. V tomto případě je prostor krabice neprodyšně uzavřen, evakuován a měřený barometrický tlak působí na krabici zvnějšku.

Vlnovcové tlakoměry se používají pro měření malých tlaků a rozdílu tlaků do 0,4 MPa. Schéma měřicího prvku je na *obr. 1d*. Tlakoměrným prvkem je tenkostěnný kovový měch - *vlnovec*, který je umístěn v pouzdře, do něhož je přiváděn měřený tlak. Deformace vlnovce Δl se přenáší táhlem na ukazovatel. Odolnost proti deformaci (tuhost vlnovce) lze snadno zvětšit vložením pružiny; dojde tak k úpravě charakteristiky a měřicího rozsahu tlakoměru. Oproti předchozím typům deformačních tlakoměrů má vlnovec lepší linearitu. V případě měření rozdílu tlaků se větší tlak přivádí do

pouzdra, menší do vlnovce. Někdy se místo kovového měchu používá měchu z umělé hmoty (např. teflonu); funkci deformačního prvku pak zcela přebírá pružina. Kovové vlnovce s pružinou se často používaly v pneumatické regulační technice (pneumatické vysílače, převodníky, regulátory apod.).

Deformační tlakoměry byly v mnoha aplikacích nahrazeny modernějšími typy snímačů. Uchovávají si však důležité místo v oblasti měření tlaku pro některé jejich přednosti: jednoduchost, spolehlivost, nezávislost na napájení, odolnost vůči elektromagnetickému rušení, nízká cena. Příklady provedení ukazovacích deformačních tlakoměrů jsou na *obr. 2 a 3*.

Hodnotíme-li celkově deformační tlakoměry, pak jednou z jejich hlavních předností je velká představující síla. Měřicí systémy mohou být robustní a umožňují připojení dalších přídatných zařízení jako zapisovacího ústrojí a převodníků pro dálkový přenos. Pro převod na elektrický signál je možno využít metody odporové, indukční, tenzometrické a kapacitní. Dalšími výhodami jsou malé rozměry, malá hmotnost, velký měřicí rozsah, dostatečná přesnost, jednoduchost a spolehlivost i v těžkých provozech. Deformační manometry patří k nejčastěji používaným typům tlakoměrů v průmyslu. Deformačních tlakoměrných prvků se používá rovněž při konstrukci *manostatů*. Jsou to přístroje vybavené jedním nebo více elektrickými kontakty a používají se k dvoupolohové regulaci tlaku (*obr. 4*). Na manostatu lze nastavit velikost tlaku a spínací hysterezi.

Nevýhodou deformačních tlakoměrů je elastické dopružování, popřípadě trvalé deformace měřícího prvku během provozu. Nevýhodou je i ovlivňování údaje okolní teplotou. Teplota ovlivňuje modul pružnosti materiálu deformačního prvku a teplotní roztažností převodového ústrojí pozměňuje mechanický převod. Deformační tlakoměry vyžadují pravidelnou kalibrační kontrolu, zvláště při měření pulsujících tlaků. Měřicí rozsah deformačního tlakoměru se volí tak, aby pomalu kolísající měřený tlak dosáhl maximálně dvou třetin rozsahu přístroje a rychle se měnící tlak, aby dosahoval maximálně poloviny měřícího rozsahu.

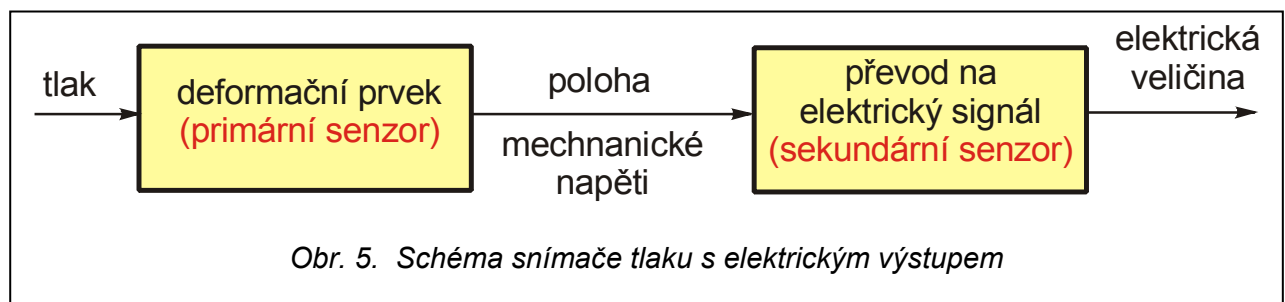


Obr. 4. Tlakový spínač - manostat typ SCH-DNM (KOBOLD)

3. Snímače tlaku s elektrickým výstupem

3.1 Převod signálu deformačního prvku na elektrický signál

V moderní automatizační technice nacházejí uplatnění takové snímače, které poskytují výstupní signál vhodný pro dálkový přenos a pro následné zpracování v elektronických analogových a číslicových obvodech. Základem celé řady takových snímačů (elektromechanických tlakoměrů) bývá některý z deformačních tlakoměrných prvků (membrána, trubice, vlnovec, krabice, nosník). Na deformační prvek (primární senzor) navazuje vhodný senzor s elektrickým výstupem (sekundární senzor), který vyhodnocuje deformaci způsobenou změnou měřeného tlaku (*obr. 5*).



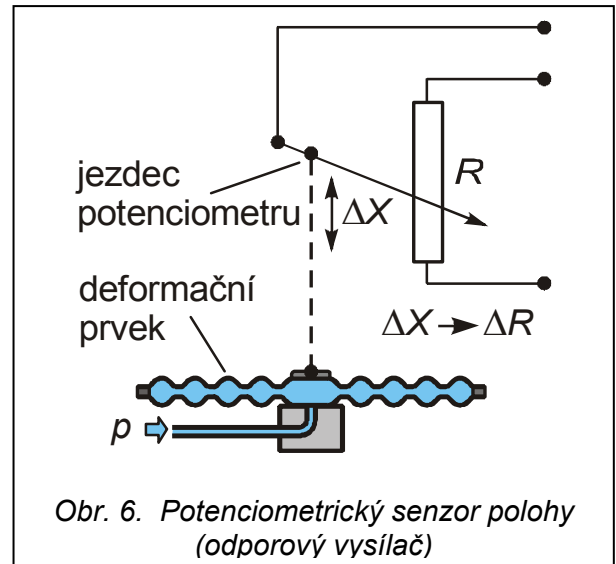
Obr. 5. Schéma snímače tlaku s elektrickým výstupem

Jedná se tedy o snímač tlaku s vícenásobným převodem. Výsledkem působení síly při deformaci měřicího prvku je buď 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),
- senzory mechanického napětí (tenzometrické, rezonanční, piezoelektrické).

3.2 Tlakoměry s potenciometrickým senzorem polohy

Využití potenciometrického senzoru polohy (tzv. odporový vysílač) nabízí jednoduchý způsob získání elektrického výstupu z deformačních tlakoměrů. Jezdec potenciometru (odporový vysílač) je mechanicky spojen s deformačním prvkem, jehož deformace vyvolává změnu polohy jezdece (Δl), která se vyhodnocuje jako změna odporu (ΔR) (obr. 6). Výhodou tohoto způsobu převodu na elektrický signál je nízká cena (jednoduchá konstrukce, není nutno používat zesilovač), nevýhodou je citlivost na vibrace a velká hystereze, nebezpečí mechanického opotřebení jednotlivých dílů a jejich spojů (zhoršení přesnosti).



3.3 Kapacitní snímače tlaku

3.3.1 Princip kapacitního čidla

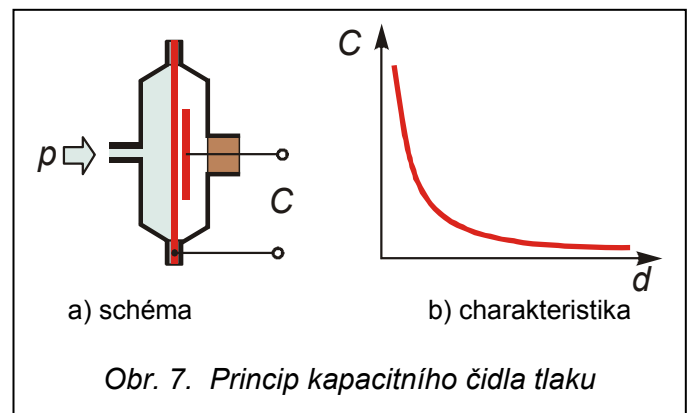
Kapacitní čidlo tlaku je principiálně velmi jednoduché (obr. 7). Jedna elektroda kondenzátoru je tvořena membránou, jejíž poloha se mění při působení tlaku. Změna vzdálenosti elektrod kondenzátoru se projeví změnou jeho kapacity. Uvažujeme-li jednoduchý deskový kondenzátor, bude pro jeho kapacitu C platit

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (3)$$

kde je S plochá elektrod, d vzdálenost elektrod, ε_0 permitivita vakua, ε_r poměrná permitivita. Uvažujeme-li, že ve vztahu (3) se mění jen d , pak ostatní veličiny zahrneme do konstanty k a dostaneme

$$C = \frac{k}{d} \quad (4)$$

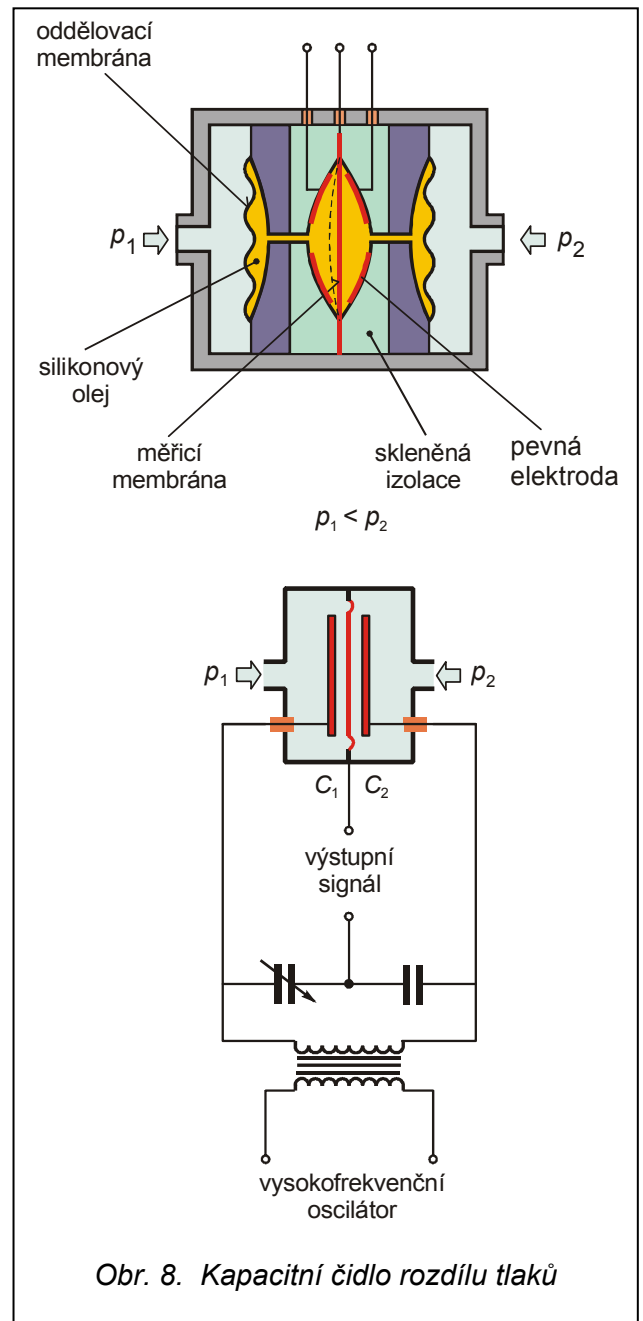
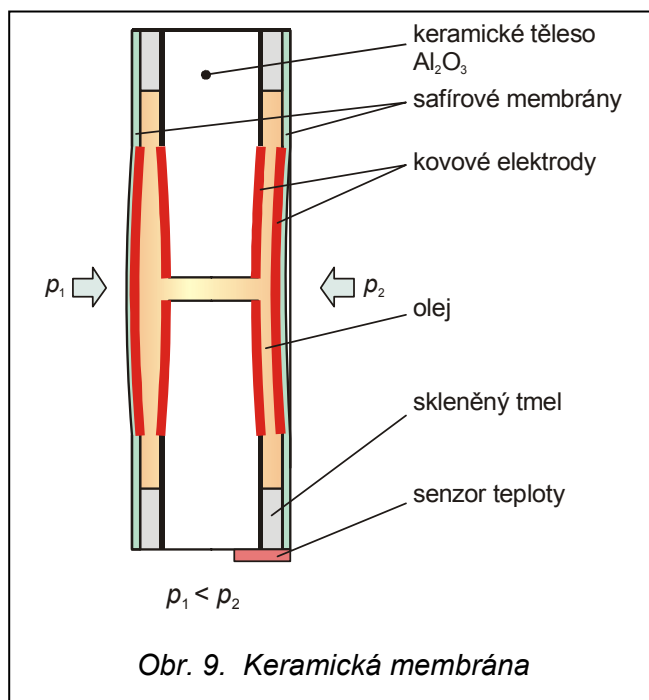
Jak je patrné z grafu na obr. 7 b, je průběh charakteristiky nelineární. Protože se jedná o hyperbolickou závislost, budou změny kapacity, a tím i citlivost, největší při malých vzdálenostech d . Vzhledem k nelineární statické charakteristice čidla, musí být vyhodnocovací obvody vybaveny linearizačním členem.



Kapacitní princip je velmi často využíván při měření rozdílu tlaků. Měřicí membrána tvoří střední pohyblivou elektrodu dvojitého kondenzátoru. Příklad provedení takového čidla se střední membránovou elektrodou a dvěma pevnými elektrodami je znázorněn na *obr. 8*. 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 proti přetížení.

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 $C_1 - C_2 = 2\Delta C$, takže citlivost je dvojnásobná.

Elektrické vyhodnocovací obvody, které převádí 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 řešen pomocí hybridní nebo integrované elektroniky vestavěné ve snímači. Pracovní rozsah kapacitních snímačů se pohybuje v rozmezí 100 Pa až 40 MPa, statický tlak může dosáhnout až 40 MPa.



3.3.2 Keramická membrána

Čidlem moderních kapacitních snímačů tlaku je keramická membrána. Např. keramická membrána od firmy Endress+Hauser CERAPHIRE (CERAmic+saPHIRE) je vytvořena na bázi velmi čisté keramiky (Al_2O_3 o čistotě 99,9%). Podstatnou součástí je sařirová membrána (*obr. 9*). Safír (modrá odrůda korundu) je materiál o vysoké mechanické pevnosti, je vysoce stabilní a korozi odolný, vhodný pro použití ve vysoce korozivních médiích. Díky svým vlastnostem je vhodný i pro

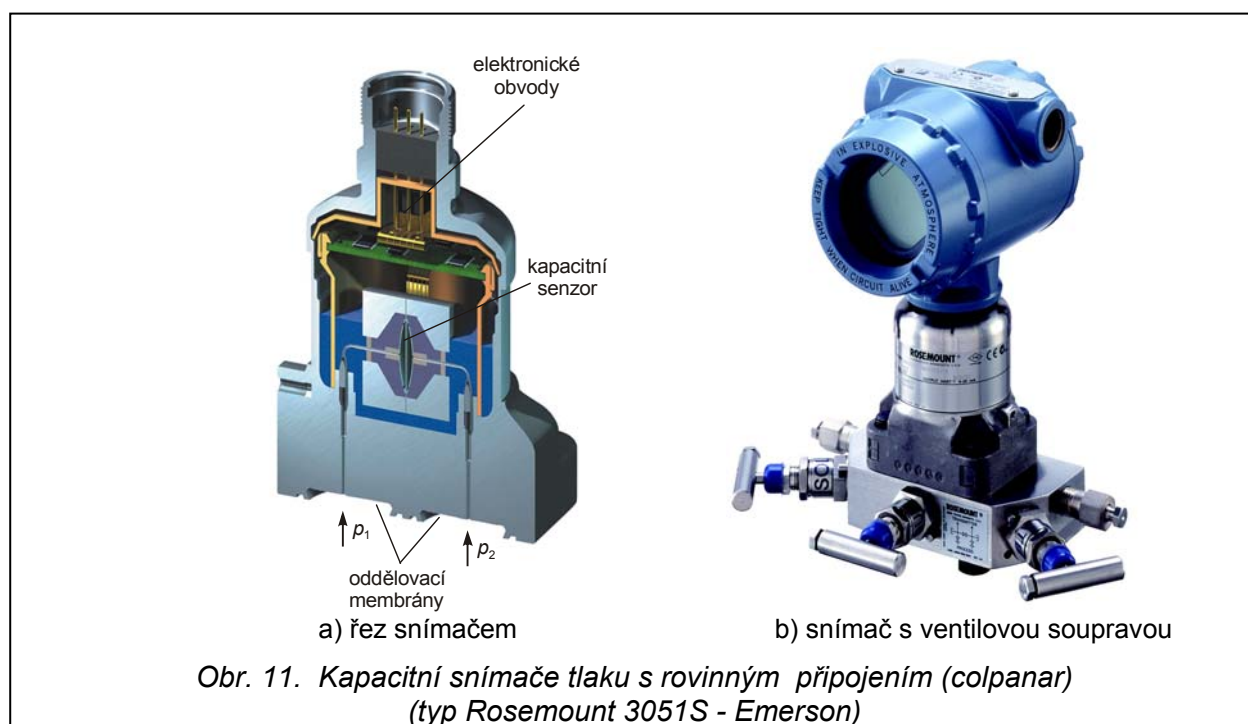
měření velmi nízkých absolutních tlaků (vakuum). Hladký povrch čisté keramiky senzoru minimalizuje usazování a zachycování měřeného média, což je důležité pro farmaceutické a potravinářské aplikace. Keramická měřicí cela využívá dvou deskových kondenzátorů, vždy s jednou pevnou a další pohyblivou elektrodou. Pevná elektroda je součástí základního keramického tělesa a pohyblivá elektroda je umístěna na vnitřní straně safírové membrány. Vnitřní prostor měřicí cely je vyplněn silikonovým nebo minerálním olejem. V důsledku působení rozdílů tlaků p_1 a p_2 dojde k odpovídajícímu prohnutí membrán, a to se projeví změnou kapacity, kterou vyhodnocuje mikroprocesorem řízený elektronický obvod, vybavený i automatickou kompenzací vlivu teploty.

3.3.3 Provozní snímače s kapacitním čidlem

Kapacitní snímače tlaku mohou být konstruovány pro měření tlaku absolutního, relativního nebo rozdílu tlaků. Snímače pro měření rozdílu tlaků se s výhodou využívají při měření průtoku tekutin sondami a škrticími orgány.

Jako ukázky provozních snímačů vybavené keramickou membránou jsou na obr. 10 přístroje firmy Endress+Hauser. Přístroj Cerabar S PMC71 slouží k měření absolutního tlaku v rozsazích od 10 Pa až 10 kPa do 100 Pa až 4 MPa s nejistotou 0,075 % z rozsahu. Přístroj Deltabar S PMD70 je určen pro měření rozdílu tlaků v rozsazích od (-2,5 až +2,5) kPa až do (-300 až +300) kPa.

Současné kapacitní senzory tlaku jsou vyráběné mikroelektromechanickými postupy a jsou charakterizovány miniaturizací a vysokou kvalitou čidel. Díky malým rozměrům je možno čidlo přesunout až do pouzdra s elektronikou, kde je lépe chráněno před změnami teploty a mechanickým namáháním. Příkladem moderního průmyslového snímače tlaku s rovinným (koplanárním) připojením je snímač Rosemount 3051S na



obr. 11. Koplanární připojení umožňuje přímou montáž ventilových souprav a oddělovacích membrán. Měřicí rozsahy jsou od 0,025 až do 27 600 kPa; nejistota snímače dosahuje až 0,025 % z rozsahu, vliv změny teploty až 0,0012 %/K, vliv statického tlaku až 0,015 %/MPa.

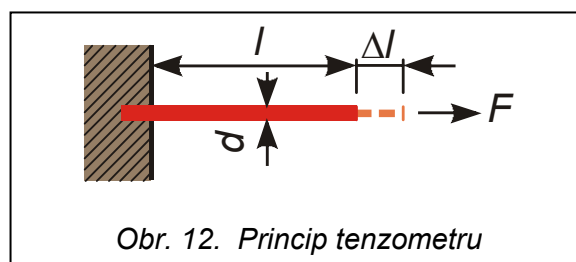
Snímače tlaku na kapacitním principu ve srovnání se snímači s odporovými tenzometry mají jednodušší kompaktní konstrukci, jsou odolnější, vykazují rychlou odezvu, mají podstatně menší drift (posuv nuly) a změnu citlivosti s teplotou. Jejich nevýhodou je citlivost na parazitní kapacity přívodů a jsou citlivé na rušivé vibrace zařízení. Kapacitní snímače tlaku s keramickou membránou jsou využívány k měření přetlaku v rozsazích od 0 až 25 Pa do 0 až 70 MPa k měření rozdílu tlaků až ± 14 MPa.

3.4 Snímače tlaku s odporovými tenzometry

3.4.1 Princip odporového tenzometru

Odporový tenzometr je senzor, u něhož dochází ke změně elektrického odporu při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací. Pružnými deformacemi rozumíme takové síly, které působí v mezích platnosti Hookova zákona a jsou zpravidla vyvolány tlakem nebo tahem. Odporové tenzometry mohou být kovové nebo polovodičové.

Při deformaci kovových vodičů dochází ke změnám geometrických rozměrů, které vedou ke změně elektrického odporu. Princip *kovového odporového tenzometru* lze ukázat na deformaci odporového drátu o délce l , průřezu S (průměru d) a měrném odporu ρ , který je podroben účinku síly F tak, že se prodlouží o délku Δl (obr. 19). Původní odpor vodiče $R = \rho l/S$ se v důsledku působící síly změní o ΔR , a to proto, že se změní jeho délka o Δl , průřez o ΔS a vlivem strukturálních změn i měrný odpor o $\Delta \rho$.



Obr. 12. Princip tenzometru

Pro malé změny bude platit

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (5)$$

Například při namáhání tahem se zvětšuje délka a při zachování objemu se zmenšuje průřez; odpor vodiče tedy roste. Uvažujeme-li relativní deformaci $\varepsilon = \Delta l/l$, pak pro relativní změnu odporu v oblasti pružných deformací je možno odvodit vztah

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k \varepsilon \quad (6)$$

kde je k koeficient deformační citlivosti, jehož velikost závisí na materiálu vodiče. Z hlediska měřicí techniky by měl být koeficient deformační citlivosti stálý, nezávislý na deformaci, teplotě a na technologické přípravě deformačního materiálu. Hodnota k v praxi se téměř vždy určuje experimentálně. Pro konstantan a některé druhy chromniklových slitin, jejichž teplotní závislost odporu je zanedbatelná, je hodnota $k = 2$. Protože při vyhodnocování odporu tenzometru neměříme poměrnou změnu odporu, ale přímo diferenci ΔR , která závisí na změně Δl , je výhodné, aby délka l vodiče byla co největší.

Kovové odporové tenzometry se zhotovují z odporového drátku průměru 0,02 až 0,05 mm, který je nalepen ve tvaru mnohonásobné vlásenky na tenký podklad z papíru nebo z plastické hmoty. Konce drátku jsou připájeny na tlustší vývody. Odporový tenzometr se na měřenou součást přilepí speciálním lepidlem. Tenzometry složitých tvarů (radiální, spirálové aj.) se vyrábějí

odleptáváním tenké odporové fólie, tj. shodným postupem s výrobou plošných spojů. Takto zhotovené fóliové tenzometry mají lepší vlastnosti než tenzometry drátkové.

V moderních snímačích tlaku se používají *tenzometry polovodičové (piezorezistory)*, které se vyrábějí buď z monokrystalu křemíku (řezáním, broušením či leptáním), nebo planární technologií na křemíkovém nebo jiném substrátu. Působením mechanického namáhání v určité krystalografické ose monokrystalu polovodiče nebo v difúzní vrstvě polovodiče dochází ke změně pohyblivosti nosičů nábojů, a tím se mění i elektrická vodivost a odpor senzoru (piezorezistivní jev). Změna odporu závisí na typu polovodiče i na koncentraci příměsí. Polovodičové tenzometry vykazují nelineární závislosti odporu na deformaci i na teplotě. Závislost relativní změny odporu na relativní deformaci se vyjadřuje obvykle vztahem:

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \varepsilon + C_2 \varepsilon^2 \quad (7)$$

Koeficient deformační citlivosti k' polovodičových tenzometrů je s ohledem na rovnici (7) vyjádřen vztahem:

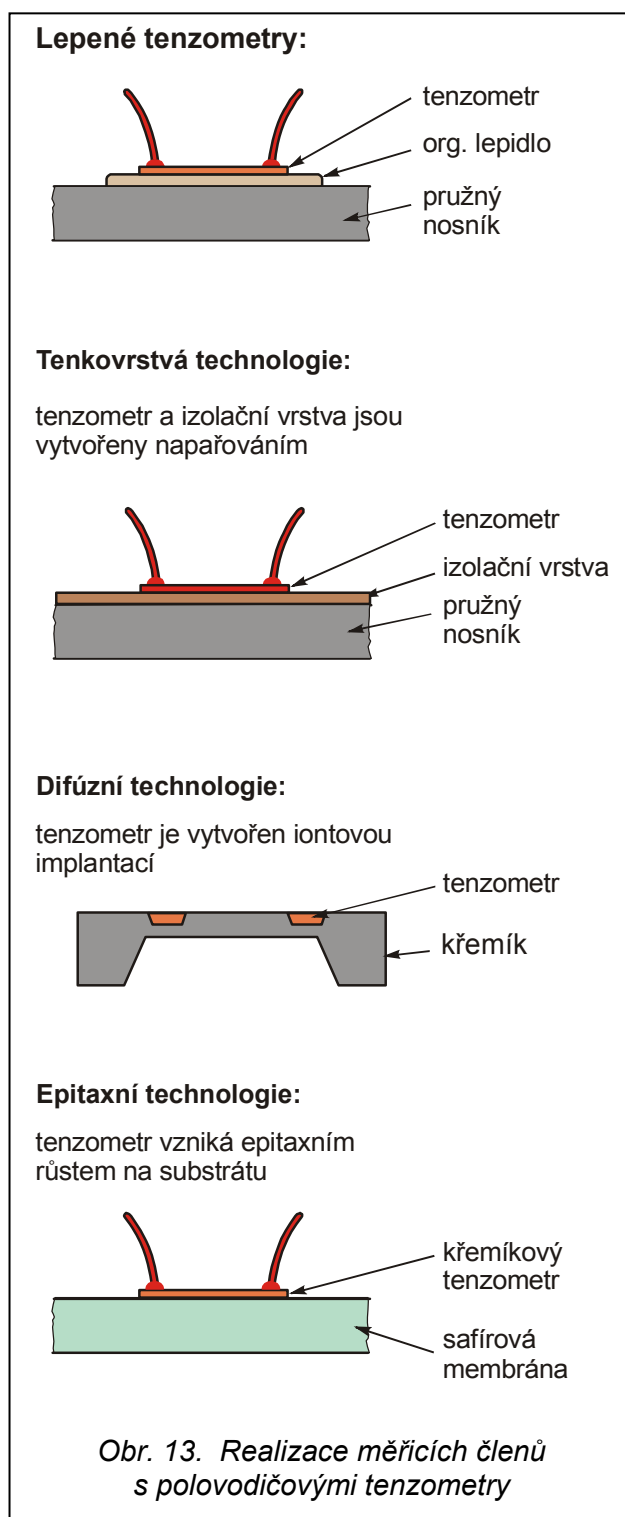
$$k' = C_1 + C_2 \varepsilon \quad (8)$$

U polovodičů typu p nabývá konstanta C_1 kladných hodnot a odpor tenzometru při namáhání tahem roste, u polovodičů typu n je C_1 záporná a odpor při namáhání tahem klesá. Kombinací různých typů tenzometrů se mohou vytvářet můstky se zvýšenou citlivostí.

V porovnání s kovovými tenzometry jsou polovodičové mnohem citlivější. Koeficient deformační citlivosti dosahuje hodnot $k' = 50$ až 175 . Nevýhodou je však odchylka od lineární charakteristiky a značná teplotní závislost. Při aplikaci polovodičových tenzometrů je tedy nutno vždy teplotní závislost kompenzovat vhodným zapojením měřicího můstku nebo pomocným obvodem.

3.4.2 Měřicí členy s polovodičovými tenzometry

Měřicí členy s polovodičovými tenzometry je možno realizovat několika způsoby, jak je znázorněno na *obr. 13*. Polovodičové tenzometry mohou být vyrobeny např. ve formě pásků, získaných rozřezáním výbrusu monokrystalu křemíku, které se pak lepí vhodným lepidlem na plochu podléhající deformaci. Příklady jsou kovové. Měřicí členy s polovodičovými tenzometry lze realizovat i dalšími různými technologiemi (tenkovrstvá, difúzní, epitaxní), používanými při výrobě polovodičových elektronických obvodů. Piezorezistory v křemíkové membráně se vytvářejí např. difúzí při vysoké teplotě nebo iontovou implantací, kdy se na povrchu membrány vzniknou rezistory citlivé na deformaci.



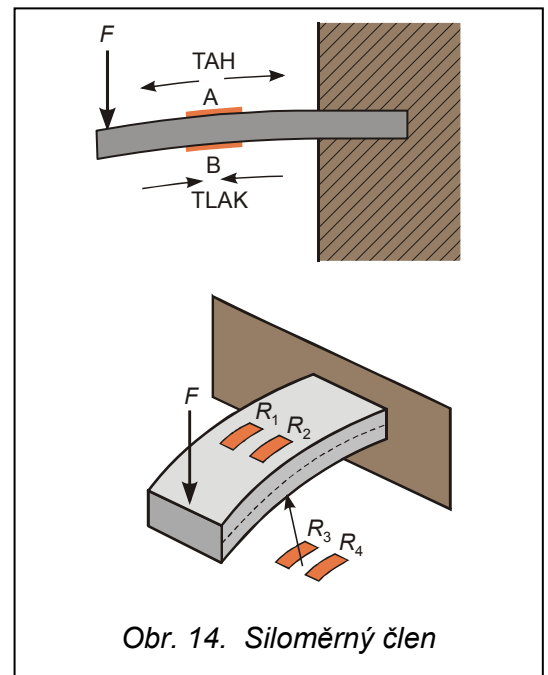
Základním úkolem odporového tenzometru je, aby reagoval příslušnou změnou odporu na mechanickou deformaci vyvolanou působící silou. Často využívaným zařízením je tzv. *siloměrný člen*, tvořený vetknutým nosníkem, na němž jsou nalepeny tenzometry, přičemž síla působí na volný konec nosníku (*obr. 14*). Působící silou je nosník namáhán v oblasti pružných deformací. Vlivem pružné deformace jsou povrchová vlákna nosníku namáhána na straně působící síly F tahem a na straně odvrácené tlakem. Tenzometr A se tedy natahuje a tenzometr B se smršťuje. Zapojením těchto tenzometrů do různých větví můstku dochází ke zvýšení citlivosti měření a současně ke kompenzaci teplotní závislosti odporu.

Odporové tenzometry patří mezi senzory s vynikající přesností a velmi dobrými dynamickými vlastnostmi. Na údaj tenzometru působí však řada vedlejších rušivých vlivů (např. teplota, velikost procházejícího proudu), které mohou ovlivnit přesnost měření.

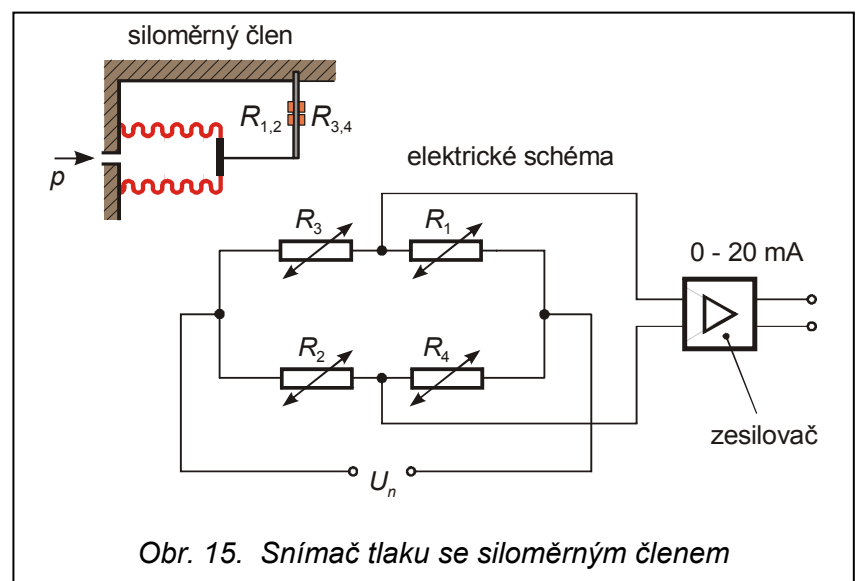
Odporových tenzometrů se používá k měření malých i velkých deformací, mechanických napětí, sil, momentů, namáhání a ostatních veličin, které můžeme převést na výše uvedené veličiny. Tenzometry je tedy možno využít i pro měření tlaku ve spojení s deformačními manometry. Odporový tenzometr slouží k převodu mechanického signálu na signál elektrický. Starší typy tenzometrických snímačů tlaku využívaly propojení siloměrného členu s deformačním prvkem (vlnovcem či membránou). Schéma takového snímače tlaku je nakresleno na *obr. 15*. Na každé straně nosníku siloměrného členu jsou nalepeny dva polovodičové tenzometry zapojené do měřicího můstku. Při působení síly, vyvolané účinkem tlaku, jsou tenzometry R_1 a R_2 namáhány na tah, tenzometry R_3 a R_4 jsou namáhány na tlak. V měřicím můstku jsou tenzometry zapojeny tak, že tenzometry namáhané stejným směrem jsou umístěny v protilehlých větvích můstku. Výsledná citlivost je potom čtyřnásobná ve srovnání s použitím jednoho tenzometru. Signál z diagonály můstku je zpracován zesilovačem např. na unifikovaný proudový výstup 0 až 20 mA.

Novější snímače tlaku využívají čidel s polovodičovými tenzometry, které se zhotovují difúzní technologií (*obr. 13*). Základem snímače tlaku s *difundovanými polovodičovými tenzometry* je čidlo, které transformuje tlak na elektrický signál. Podstatnou součástí je křemíková membrána (průměr zpravidla menší než 6 mm). Membrána, na jejímž povrchu jsou vytvořeny polovodičové tenzometry, je současně pružným elementem pro snímání tlaku. Osový řez membránou je schematicky znázorněn na

obr. 16 a. Jedná se o kruhovou tenkou membránu konstantní tloušťky vetknutou po obvodu a namáhanou tlakem rovnoměrně rozloženým po celé ploše. Na obrázku je plně zakreslena membrána



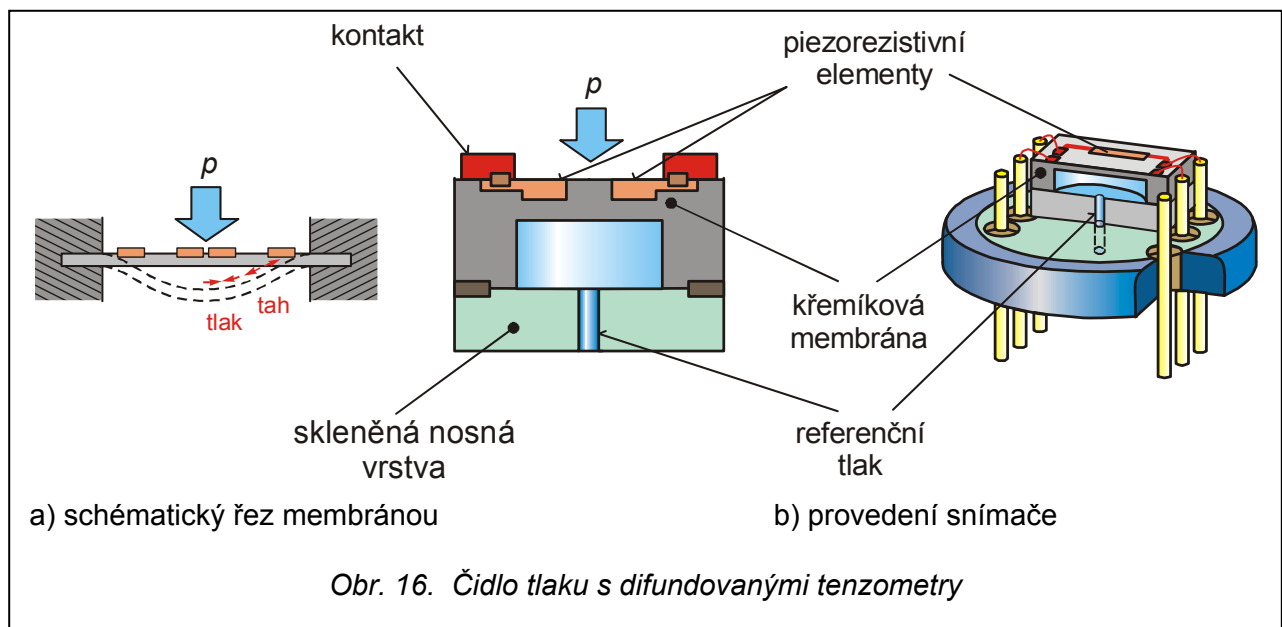
Obr. 14. Siloměrný člen



Obr. 15. Snímač tlaku se siloměrným členem

v nezátženém stavu a čárkovaně ve stavu zatíženém tlakem p (pozn.: prohnutí membrány je na obrázku velmi zvětšeno). V zatíženém stavu je možno na membráně identifikovat místa, kde jsou povrchová napětí v tlaku a v tahu. Napětí povrchových vláken se měří tenzometricky.

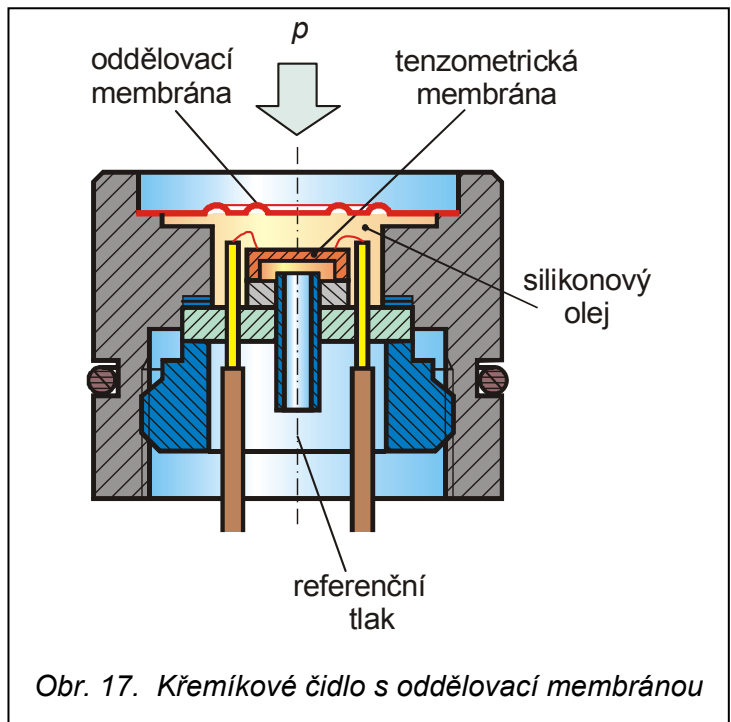
Křemíkové čidlo pro měření tlaku je vytvořené jako křemíkový čip (*obr. 16 b*) o tloušťce membrány 2 až 5 mikrometrů pro malé tlaky a 20 až 50 mikrometrů pro velké tlaky. Technologie výroby křemíkové tenzometrické membrány je obdobná technologii integrovaných obvodů. Část, která funguje jako membrána (průměr činí 0,8 až 6 mm) je vytvořena ve střední části substrátu odleptáním z druhé strany, než jsou vytvořeny piezorezistory. Požadovaná tloušťka membrány se snadno získá při řízení procesu leptání tak, že stejným postupem lze vytvářet různé senzory pro rozličné rozsahy tlaku. Piezorezistivní elementy jsou odpory vytvořené planárně difúzní technologií; pomocí difúze je vpraveno na vymezená místa v křemíkové membráně určité množství dotační přísady a dojde tak ke vzniku difúzních odporů. Uspořádání difúzních odporů a povrchové koncentrace difúzní vrstvy jsou voleny optimálně z hlediska citlivosti, teplotní závislosti a linearity. Difúzní odpory, orientované ve směru povrchových napětí, jsou vytvořeny jednak na obvodu, tj. v místech, kde dochází podle *obr. 16 a* k namáhání tahem a jednak ve středu membrány, kde dochází k namáhání tlakem. Křemíkový substrát je připevněn na základové desce ze speciálního skla. Lineární vztah mezi tlakem na membránu a mechanickým napětím je platný pouze pro deformace, které jsou malé ve srovnání s tloušťkou membrány. Prostřednictvím kovových vodivých kontaktů, které jsou vyvedeny mimo oblast měřicí membrány jsou difúzní odpory propojeny do Wheatstoneova můstku (schéma zapojení je analogické jako na *obr. 15*). Vhodným uspořádáním měřicího můstku, je možno zvýšit citlivost měření, potlačit nelinearitu a potlačit vliv ovlivňujících veličin, zejména teploty. Křemíkové polovodičové tenzometry mají teplotní koeficient přibližně $2,2 \cdot 10^{-3}$, takže je nutné použít určitý způsob kompenzace teploty. Nejjednodušší je doplnění měřicího můstku teplotně závislými rezistory. Křemíková čidla lze teplotně kompenzovat při číslicovém zpracování signálu na základě proměření teplotní závislosti při použití softwarové kompenzace. Současně se může korigovat i nelineární charakteristika čidla.



Mezi hlavní přednosti křemíkové membrány jako deformačního prvku patří platnost Hookova zákona v širokém rozsahu deformací, zanedbatelná hystereze, dobře snáší vysoké teploty je chemicky odolný. Je možno realizovat čidla velmi malých rozměrů, rozsahy měřených tlaků jsou jednotky kPa až desítky MPa, teplotní rozsah -55 až 125 °C. U snímačů tlaku s křemíkovou membránou je možno vytvořit vyhodnocovací obvody moderní polovodičovou technologií přímo na křemíkovém substrátu s možností současného snímání teploty a kompenzace jejího vlivu. Výhodou je i hromadná výroba (cenová výhoda), výroba snímačů s vestavěnou elektronikou včetně

procesoru a paměti. Lze realizovat snímače s dostatečnou citlivostí, stabilitou, širokým měřicím rozsahem i v miniaturním provedení.

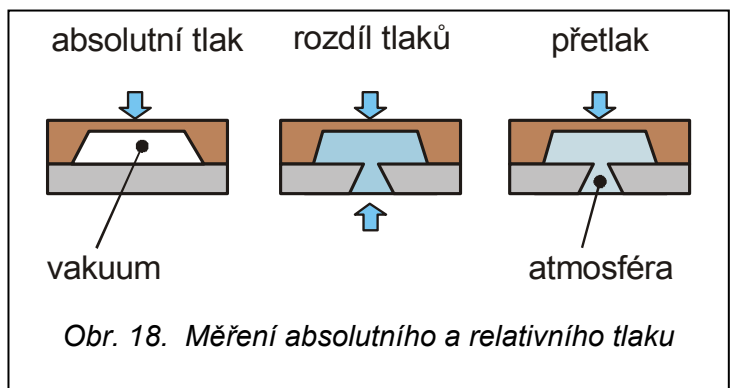
Krystalický křemík se jeví jako ideální pro senzor tlaku, protože je v dostatečném rozsahu deformace dokonale pružný (nemůže být plasticky deformován, prakticky nevykazuje prokluzování a hysterezi), poměr možného zatížení k hmotnosti křemíkového prvku je 5 krát větší než u oceli. S vlastnostmi membrány souvisí pak její opakovatelné chování při změnách tlaku a teploty okolního prostředí. Je-li křemíková membrána vystavena přetížení tlakem, bude až do jejího mechanického poškození údaj tlaku odpovídat deklarované nejistotě snímače. Jakmile dojde k mechanickému poškození membrány, která se roztrhne podobně jako sklo, přeruší se minimálně jedna větev měřicího můstku, což se projeví na výstupu snímače (hodnota signálu bude mimo rozsah).



Obr. 17. Křemíkové čidlo s oddělovací membránou

3.4.3 Provozní snímače s křemíkovým čidlem

Samotné křemíkové čidlo je možno použít pouze pro měření čistého, suchého vzduchu nebo jiných neagresivních plynů. Voda, vodní páry a další složky působí na složitou sestavu čidla (hliníkové a jiné pokovení, zlaté vodiče apod.) a čidlo pak není odolné proti působení měřeného média. Pro použití v průmyslu je třeba křemíkové čidlo chránit před stykem s měřeným médiem. K tomu se v tlakoměrných systémech používá kovová oddělovací membrána a olejová náplň (obr. 17). Oddělovací membrána musí být konstruována tak, aby neovlivňovala vlastnosti křemíkového čidla. Např. u snímače s křemíkovou membránou o činné ploše asi 2 mm^2 je průměr oddělovací membrány přibližně 10 mm. Robustní konstrukce snímačů s křemíkovými čidly velmi dobře odolává vibracím a rázům.



Obr. 18. Měření absolutního a relativního tlaku

Snímače s polovodičovými tenzometry lze využít pro měření jak absolutního tlaku, tak i přetlaku, podtlaku či rozdílu tlaků. V případě měření absolutního tlaku je prostor pod membránou evakuován a uzavřen, při měření přetlaku je prostor pod membránou propojen do atmosféry (obr. 18). Snímače tlaku s křemíkovou membránou se používají k měření přetlaku v rozsazích až do 60 MPa a podtlaku do -100 kPa .

Příkladem měřidla s velkou přesností je přenosný přístroj JOFRA IPI 015G (TECTRA), který pracuje s nejistotou 0,05 % z rozsahu 200 kPa.(obr. 22).

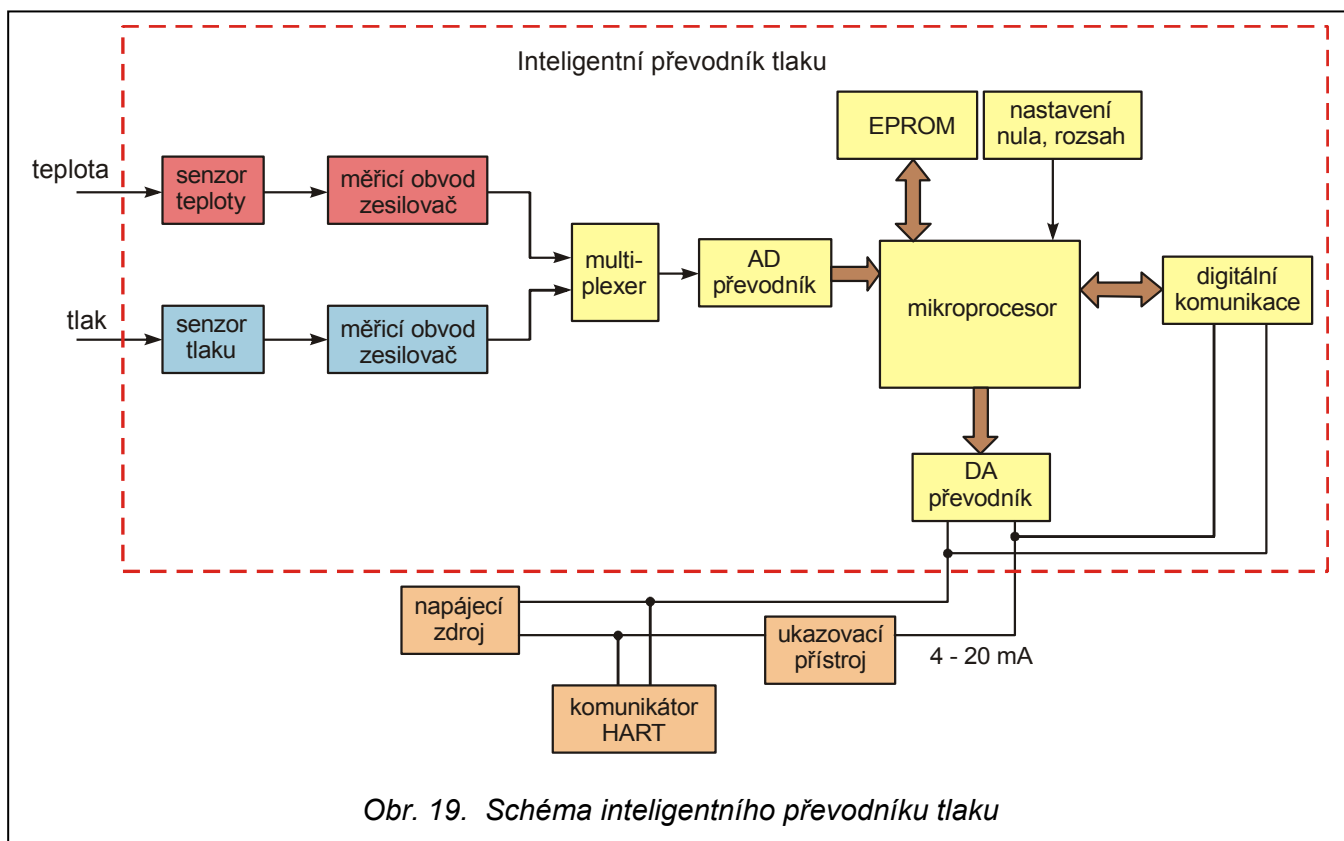
Na obr. 18 jsou ukázky provedení provozních snímačů tlaku od různých výrobců, které využívají čidla s křemíkovou membránou s polovodičovými tenzometry. Snímače DMP 331 (BHV SENZORY) jsou určeny pro univerzální využití ve všech oblastech průmyslu, jsou k dispozici

s rozsahy od 0 až 100 kPa do 0 až 2,5 MPa. Snímače série Z (CRESSTO) umožňují měřit přetlak až do 6 MPa a rozdíly tlaků až $\pm 2,5$ kPa.



4. Inteligentní převodníky tlaku

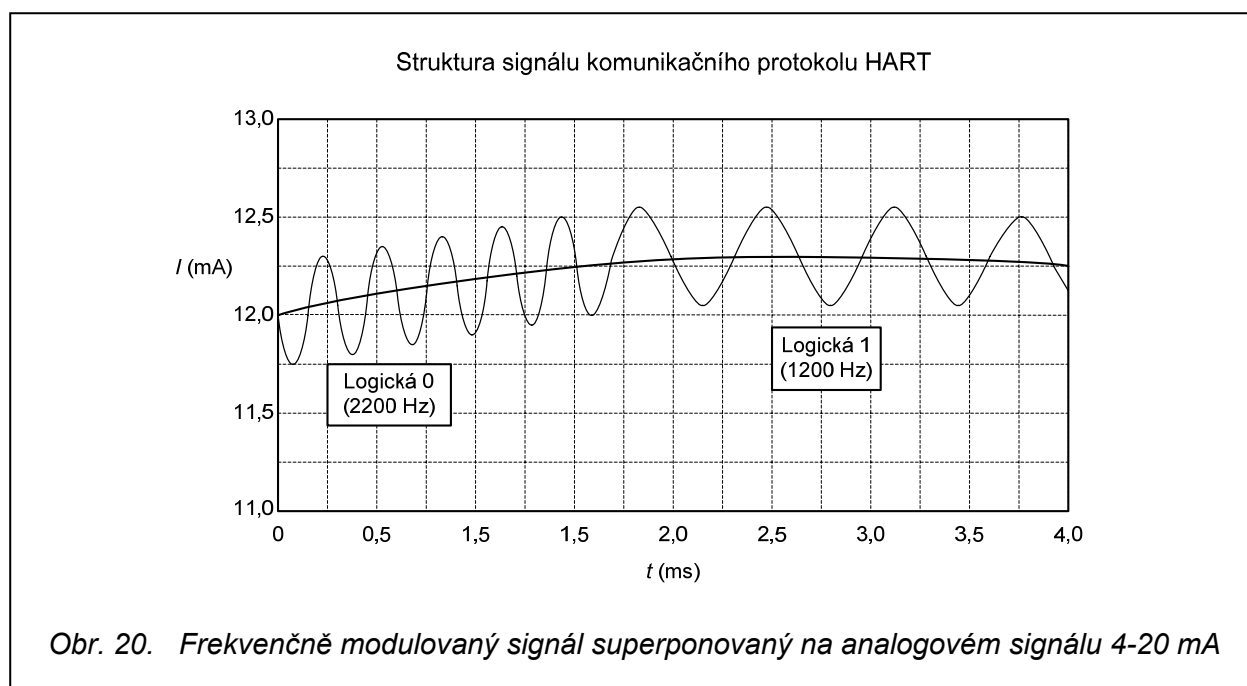
Inteligentní převodníky, často označované jako „smart-převodníky“ se používají nejen u snímačů tlaku, ale i u snímačů dalších provozních veličin. Ačkoliv se inteligentní převodníky pro jednotlivé měřené veličiny v detailech liší, mají celou řadu vlastností společných. U inteligentních převodníků tlaku se využívají senzory s elektrickým principem a zpracování signálu je charakterizováno aplikací mikroprocesorů a miniaturních elektronických obvodů, které slouží pro



ukládání důležitých údajů do paměti. Jedná se o údaje o měřicím rozsahu, kalibraci, nastavení signalizačních mezí apod. Začleněním mikroprocesoru do vyhodnocovacího obvodu se dosáhne nejen zvýšení přesnosti, ale i přizpůsobivosti (flexibility) a univerzálnosti. Software, využívaný pro řízení procesu měření, umožňuje i automatickou diagnostiku funkce zařízení, ukládat naměřené údaje do paměti, vyhodnocovat extrémní i průměrné hodnoty atd. Důležitou vlastností inteligentních převodníků je jejich konfigurovatelnost podle požadavků uživatele. K dálkovému přenosu lze využít podle přání unifikovaný, analogový či digitální signál.

Schéma inteligentního převodníku tlaku je na *obr. 19*. 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 také ovlivněna změnami teploty. Napěťové signály úměrné tlaku a teplotě vstupují přes multiplexer do AD-převodníku, poskytujícího číslicový signál úměrný vstupním napěťovým signálům. Tyto signály jsou zpracovány mikroprocesorem podle zadaného programu a nastavených konstant v závislosti na požadovaném měřicím rozsahu a požadovaném výstupním signálu. V případě, že se inteligentní převodník využívá pro měření polohy hladiny (hydrostatické hladinoměry) nebo pro měření průtoku (měření rozdílu tlaků na škrticím elementu), je program přizpůsoben pro výpočet dané konkrétní veličiny v požadovaných inženýrských jednotkách. Výstup z mikropočítače je veden do DA-převodníku, který spolu s napájecím zdrojem poskytuje unifikovaný analogový výstup 4 až 20 mA. Indikační přístroj zapojený v proudové smyčce slouží k ukazování aktuální hodnoty analogového výstupního signálu. Měřená hodnota je také transformována prostřednictvím obvodu digitální komunikace na sériový číslicový výstup.

Pro digitální komunikaci se často v průmyslu využívá komunikační protokol HART (Highway Addressable Remote Transducer). Digitální komunikace se uskutečňuje pomocí metody FSK (Frequency Shift Keying), kdy na analogový proudový signál je superponován signál frekvenčně závislý. Jedná se o sinusový signál dvou odlišných frekvencí a podle standardu Bell 202 logické proměnné 1 (H) odpovídá frekvence 1,2 kHz a logické proměnné 0 (L) odpovídá frekvence 2,2 kHz. Tento frekvenčně modulovaný signál o amplitudě obvykle 0,5 mA je superponován na analogový proudový signál 4-20 mA. Při nulovém fázovém posunu je střední hodnota amplitudy superponovaného signálu rovna nule. Princip komunikace podle protokolu HART je znázorněn na *obr. 20*.



Obr. 20. Frekvenčně modulovaný signál superponovaný na analogovém signálu 4-20 mA

Komunikace mezi převodníkem a operátorem se uskutečňuje prostřednictvím komunikátoru nebo počítače a využívá se systému „*master – slave*“. Komunikační modul může být připojen v libovolném místě proudové smyčky, ve které musí být vložen odpor R o hodnotě 230 až 1 100 Ω . Při paralelním připojení HART modemu k odporu R je možná digitální komunikace oběma směry, tj. komunikátor může např. vyslat požadavek na změnu měřicího rozsahu a přijmout informaci potvrzující, že změna rozsahu se uskutečnila. Používání HART protokolu pro komunikaci inteligentních převodníků se v praxi velmi rozšířilo, a proto se HART protokol stal ve skutečnosti standardem pro provozní přístroje. Tento způsob komunikace umožňuje připojení až 15 různých převodníků v jedné proudové smyčce.

Elektronika a softwarové vybavení inteligentního převodníku může zajišťovat základní diagnostiku čidla a měřicích obvodů, digitalizaci signálu, řízení měřicího algoritmu, úpravu převodní charakteristiky čidla, automatickou kalibraci, automatickou korekci systematických chyb a korekci vlivu ovlivňujících veličin, úpravu signálu pro číslicovou komunikaci.

Typické pro inteligentní převodníky je umístění senzoru a elektronických obvodů v těsné blízkosti do společného pouzdra. Zkrácení spoje mezi senzorem a měřicími obvody spolu s číslicovou komunikací přispívá k potlačení celé řady rušivých vlivů. Inteligentní převodníky vykazují zlepšené metrologické parametry. Tak např. nejistota u inteligentních převodníků dosahuje hodnot menších než $\pm 0,1$ %, zatímco u konvenčních převodníků to je asi $\pm 0,25$ %. Tyto převodníky umožňují identifikaci přístroje adresami, možnost dálkové diagnostiky a nastavování parametrů. Toho bylo možno dosáhnout díky moderním technologiím a miniaturizaci elektronických obvodů. Na druhé straně však zvyšují nároky na kvalifikaci údržby a její přístrojové vybavení. Moderní provozní snímače tlaku vybavené různými senzory představují příklady inteligentních převodníků tlaku a setkali jsme se s nimi již na *obr. 10 a 11*.

Pro některé aplikace jsou k dispozici bezdrátové převodníky, které nepoužívají kabelové propojení, ale mají zabudovanou rádiovou stanicí, která vysílá a přijímá radiofrekvenční signál. Oblasti, kde je vhodné použít tyto převodníky jsou tam, kde náklady na novou kabeláž přesahují rozumné hranice. Uplatnění mohou najít i u rotačních strojů a zařízení, kde nelze použít kabelové vedení. Příklad takového inteligentního převodníku tlaku s bezdrátovým komunikačním rozhraním je na *obr. 21*.



Obr. 21. Převodník tlaku DMP 331/333 IB s bezdrátovým komunikačním rozhraním (BD SENSORS)

Inteligentní převodníky jsou prakticky prosté driftu nulové linie, perioda pro nutnou kalibrační kontrolu je výrazně delší než u klasických přístrojů. Zatím jsou cenově dražší, ale představují moderní technické prostředky řízení technologického procesu.

5. Kalibrace provozních snímačů tlaku

Provozní tlakoměry je nutno pravidelně kontrolovat a kalibrovat. Kalibrace se provádí buď absolutní nebo srovnávací metodou. *Absolutní metoda* se využívá především v metrologických laboratořích a ke kalibraci se obvykle používá pístový tlakoměr s vysokou přesností. Při *srovnávací metodě* se používají velmi přesné etalonové tlakoměry. V minulosti to bývaly přesné deformační tlakoměry, které se nahrazují v současné době velmi přesnými digitálními tlakoměry

s piezorezistivními, kapacitními nebo rezonančními senzory tlaku. Moderní digitální referenční tlakoměr se vyznačuje těmito vlastnostmi:

- vysoká přesnost (nejistota obvykle lepší než $\pm 0,01\%$),
- snadná čitelnost a větší rozlišení zobrazené hodnoty,
- možnost kompenzace vlivu teploty,
- odolnost proti mechanickým vibracím i přetížení tlakem,
- možnost komunikace s počítačem a možnost automatického záznamu měřených hodnot, průměrů, odchylek apod.

Jako příklad referenčního digitálního tlakoměru je na *obr. 22* přístroj JOFRA IPC (TECTRA).

Zařízení pro kalibraci snímačů tlaku by mělo zajišťovat následující funkce:

- jednoduché mechanické připojení kalibrovaného tlakoměru,
- generování kalibračního tlaku s možností jemného a stabilního nastavení požadované úrovně,
- měření nastaveného tlaku s přesností odpovídající metrologickým požadavkům (nejistota etalonového měřidla musí být v každém měřeném bodě lepší než nejistota kalibrovaného přístroje; požadovaný poměr je obvykle rovný nebo větší než 2),
- při kalibraci snímačů s elektrickým výstupem musí zařízení umožňovat připojení vhodného napájecího napětí a měření elektrických výstupních signálů kalibrovaného snímače s potřebnou přesností.

Důležitou součástí kalibračního zařízení je soustava, která umožňuje generovat kalibrační tlak. K hrubému nastavení tlaku slouží obvykle ruční pumpa, jemné nastavení se provádí šroubem, který ovládá píst. Příklad laboratorního kalibrátoru vybaveného ruční pumpou je na *obr. 23*.

Moderní typy kalibrátorů jsou schopny plnit ještě další funkce, jako je ukládání naměřených dat do paměti, komunikace s počítačem apod. Kalibrátor vybavený mikropočítačem může programově realizovat řadu užitečných funkcí, jako je automatické nastavování hodnot kalibračního tlaku, zobrazování časové závislosti, analýza chyb, výtisk protokolu atd.

Pro kalibraci přímo v provozu je možno použít přenosné kalibrátory. Nejistota takových kalibrátorů bývá obvykle lepší než $\pm 0,1\%$ z rozsahu. Existují přístroje obsahující různé systémy pro ruční nastavení kalibračního tlaku, případně vypouštěcí ventil pro rychlé nastavení nulového tlaku. Hydraulická soustava může být plněna vodou nebo minerálním olejem a je schopna dosáhnout tlak až 40 MPa. Přenosný kalibrátor AMETEK (TECTRA) včetně digitálního tlakoměru je na *obr. 24*, na *obr. 25* je ruční zdroj podtlaku a přetlaku ComboPump Crystal Engineering (D-Ex Limited). Na pumpě, která pracuje se vzduchem, jsou dvě přípojky tlaku, jedna pro tlakoměr etalonový a druhá pro zkoušený přístroj. Rozsah tlaku je (-85 až 2 000) kPa.



Obr. 22. Referenční digitální tlakoměr JOFRA IPC (TECTRA)



Obr. 23. Laboratorní kalibrátor AMETEK (TECTRA)



Obr. 24. Přenosný kalibrátor AMETEK (TECTRA)



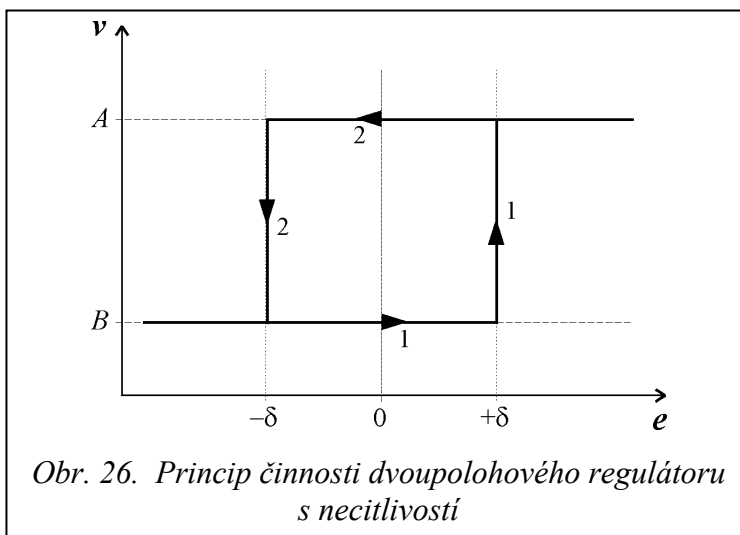
Obr. 25. Ruční zdroj tlaku ComboPump (D-Ex Limited)

Kalibrace tlakoměrů se provádí podle příslušných předpisů a souvisejících norem, které určují rozsah a způsob jednotlivých zkoušek a zjištění metrologických parametrů. Kalibrace tlakoměrů spočívá v porovnání indikace etalonu tlaku a kalibrovaného snímače tlaku. Při kalibrační kontrole se kontrolovaný přístroj postupně zatěžuje zvyšováním tlaku až na maximální hodnotu a potom se tlak postupně snižuje na hodnotu odpovídající nulové značce. Zkušební body musí být rozděleny rovnoměrně po celé stupnici a počet bodů proměřované charakteristiky je závislý na udávané přesnosti. U přístrojů o třídě přesnosti 0,1 až 0,6 se měří minimálně 10 bodů, u méně přesných přístrojů 5 bodů. Jedním z kontrolovaných bodů musí být koncový bod stupnice.

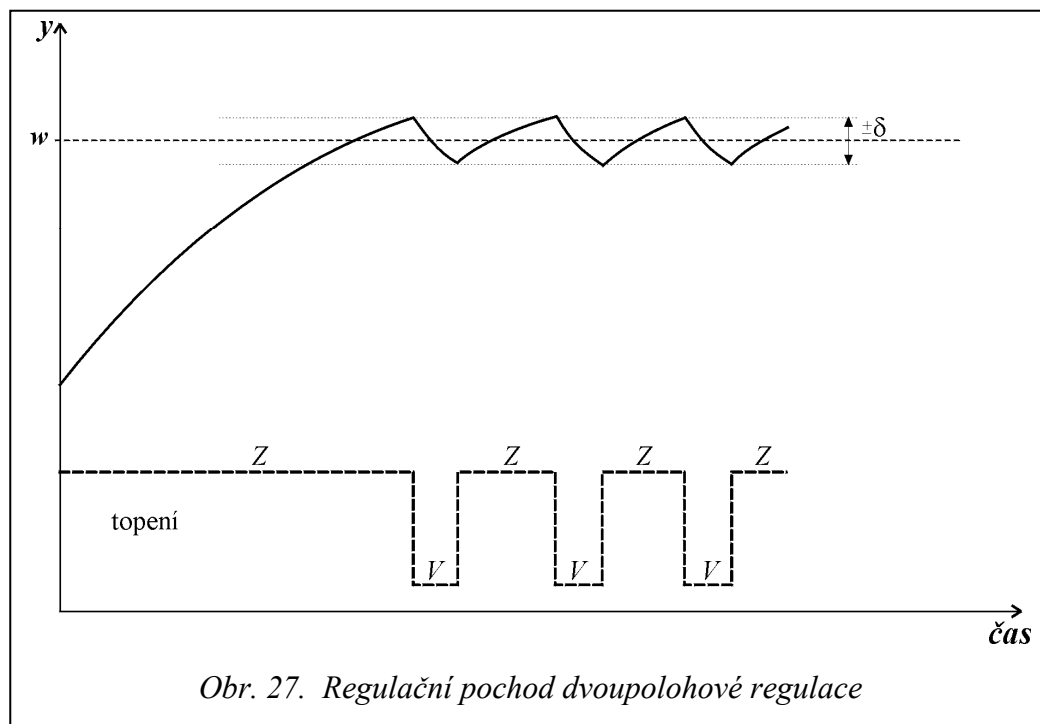
II. - Dvoupolohová regulace

Dvoupolohový regulátor se od spojitěho regulátoru liší tím, že neovládá akční člen spojitě, ale pouze jej přestavuje do jedné ze dvou mezních poloh (obecně poloha A nebo B , např. otevřeno - zavřeno, zapnuto - vypnuto). Tohoto způsobu regulace se používá se všude tam, kde nejsou kladeny vysoké nároky na přesnost, často se s ním setkáme např. při regulaci tlaku v zásobnících u kompresorů, při regulaci teploty u jednoduchých termostatů apod.. Jeho předností je, že je jednoduchý a levný [2].

Dvoupolohový regulátor musí být vybaven definovanou necitlivostí na změnu regulované veličiny v rozmezí $\pm\delta$ kolem žádané hodnoty. Je to nutné proto, aby konkrétní akční člen (např. stykač) nekmital příliš rychle a nezničil se, a také aby se časté rázy nepřenášely do celého regulovaného systému a nezatěžovaly jej. Schématicky je princip práce s necitlivostí naznačen na obr. 26, pracovní polohy akčního členu jsou označeny A a B . Při růstu regulační odchylky e se akční veličina v mění podle čáry 1, při jejím poklesu podle čáry 2. Je vidět, že v rozmezí $\pm\delta$ kolem bodu $e = 0$ regulátor nereaguje a zachovává předchozí hodnotu akční veličiny.



Na obr. 27. je ukázka regulačního pochodu s dvoupolohovým regulátorem. Regulovanou veličinou y může být např. teplota v elektrickém ohříváči vody. V horní části obrázku je zakreslen



její průběh s časem a v dolní části je pro představu uveden odpovídající průběh akční veličiny (Z ... topení zapnuto, V ... topení vypnuto). Regulační odchylka se u tohoto způsobu regulace pohybuje v rozmezí daném necitlivostí regulátoru δ .

Podobný průběh regulačního pochodu bude mít i regulační obvod pro regulaci tlaku v zásobníku, když akčním členem bude např. dvoupolohový solenoidový ventil, který ovládá přívod tlakového vzduchu do zásobníku. Časový průběh tlaku v zásobníku závisí na tvaru přechodových charakteristik, které byly naměřeny při napouštění a vypouštění zásobníku (tj. při otevřeném a zavřeném přívodu tlakového vzduchu), a dále pak na nastavené požadované hodnotě tlaku a nastavené necitlivosti regulátoru.

Literatura

- [1] Kadlec K.: *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 1, 2, 3, 4)*. AUTOMA č. 2, č. 7, č. 10, č. 11 (2007) – <http://automa.cz>
- [2] Kadlec K., Kmínek M.: *Měřicí a řídicí technika*. Elektronický učební text, VŠCHT Praha 2001
<http://uprt.vscht.cz/ucebnice/MRT>

Internetové odkazy:

<http://www.bdsensors.cz>

<http://www.bhvsenzory.cz>

<http://www.cressto.cz>

<http://www.datacon.cz>, <http://www.datacon.cz/druck.html>

<http://www.dex.cz>

<http://www.emersonprocess.cz>, <http://www.emersonprocess.com>

<http://www.endress.cz>, <http://www.endress.com>

<http://www.jsp.cz>

<http://www.jumo.cz>

<http://www.kobold.com>

<http://www.tectra.cz>

<http://www.yokogawa.cz>, <http://www.yokogawa.com>