

# Snímače tlaku

V přehledu trhu snímačů tlaku na stranách 24 až 30 tohoto vydání je celkem uvedeno 75 produktů dvaceti výrobců působících na českém trhu. Předkládaný článek shrnuje základní principy a typy snímačů tlaku. Podrobnější popis jednotlivých měřicích principů je uveden ve čtyřdílném seriálu článků Karla Kadlece *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití*, který vyšel v tomto časopise v roce 2007 (Automa, č. 2, 7, 10 a 11/2007).

## Měřicí principy používané u snímačů tlaku s elektrickým výstupním signálem

Nejrozšířenější jsou snímače tlaku s membránou, která může mít různé podoby. Zatímco u dříve používaných systémů byl průměr membrány v řádu desítek i stovek milimetrů a pracovní zdvih desetiny až jednotky milimetrů, moderní snímače (např. piezorezistivní) mají membránu z tvrdého křehkého materiálu o průměru sotva několik desetin milimetru a průhyb membrány je v podstatě nulový.

### Odporové snímače

Odporové snímače jsou založeny na změně odporu vodiče s jeho deformací, resp. s jeho mechanickým namáháním. Měřicí odpory jsou uspořádány do Wheatsonova můstku a snímají napětí deformačního členu, jímž je zpravidla membrána ve tvaru desky. Nevýhodou je závislost odporu na teplotě, která musí být kompenzována.

### Piezorezistivní odporový snímač

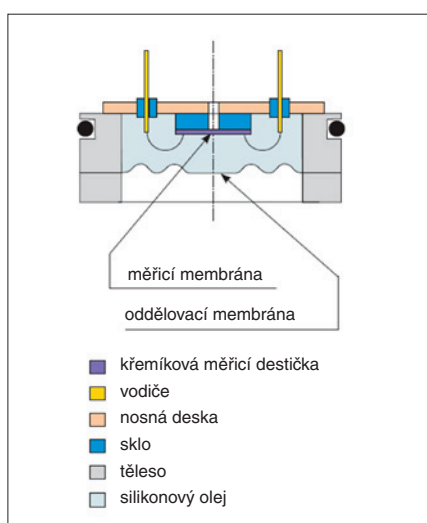
Piezorezistivita je jev, jenž se začal technicky využívat v 60. letech dvacátého století. Monokrystalický křemík je modifikován příměsí stopových prvků (akceptorů) tak, že jeho měrný odpor je výrazně závislý na mechanickém namáhání. Tato závislost je přibližně 30krát výraznější než u kovových fóliových tenzometrů; v závislosti na volbě akceptoru lze dosáhnout vodivosti typu P nebo N, které se mimo jiné odlišují též znaménkem součinitele závislosti odporu na mechanickém napětí (K-faktoru). Měřicím členem piezorezistivních snímačů je mechanicky namáhaná destička z křemíku s vysokým odporem, na níž jsou difuzí akceptorů vytvořeny vodivé cestičky, obvykle uspořádané do Wheatsonova můstku. Křemíková měřicí destička je zpravidla připájena na nosnou destičku ze skla, která je posléze nalepena na kovovou podložku ze speciální slitiny se shodnou teplo-tenzotností (např. kovar).

Velká citlivost piezorezistivního materiálu dává čidlům tyto vlastnosti:

- malý průměr činné části křemíkové membrány (obvykle jen několik desetin milimetru),
- velmi malá (téměř nulová) deformace (otázkou je, zda lze mluvit o deformačním členu v pravém slova smyslu, zvláště

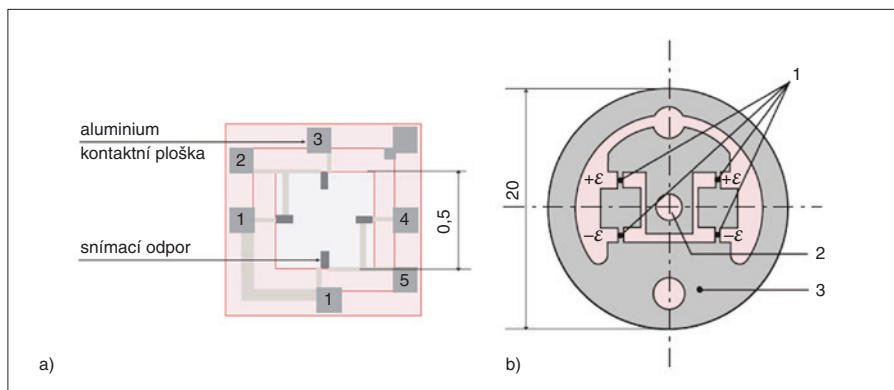
když u vodivosti typu N jde změna vodivosti proti smyslu změny tvaru),

- malá hystereze a malý *creep* (tečení materiálu ve studeném stavu vlivem mechanického namáhání).



Obr. 1. Řez piezorezistivním snímačem s oddělovací membránou

Piezorezistivní čidla jsou dlouhodobě stabilní, poskytují vysoký využitelný signál, mají malou hysterezi a velmi dobrou reprodukovatelnost měření. Nevýhodou je velká citlivost křemíkové destičky a subtilních přírodních vodičů na případné agresivní látky či vlhkost obsaženou v měřeném médiu. Proto se použití těchto úplně nejjednodušších čidel omezuje jen na měření neagresivních plynů.



Obr. 2. Příklad rozmístění měřicích rezistorů na piezorezistivním snímači (a) na membráně s tenkovrstvými tenzometry, (b) – kótován činný průměr membrány; 1 – snímací rezistory, 2 – pohyblivá část, 3 – pevná základna

Proti vzdušné vlhkosti se vlastní měřicí člen obvykle chrání silikonovým gelem.

Čidla určená do náročnějších podmínek jsou chráněna proti působení měřeného média zástavbou do pouzdra, které je opatřeno oddělovací membránou, přičemž tlak od membrány na čidlo se přenáší prostřednictvím nevodivé kapaliny – většinou pomocí silikonového oleje. Nejrozšířenější konstrukce těchto čidel ve verzi OEM v řezu je znázorněna na obr. 1.

Piezorezistivní senzory jsou dodávány v různých variantách, od nejlacinějších a jednoduchých až po vysoce přesné převodníky zpracovaných konstrukcí.

### Tlustovrstvé tenzometry

Tenzometr je vytvořen na jedné straně membrány, obvykle zhotovené z keramiky  $Al_2O_3$ , ale i z jiných materiálů, včetně plastů. Odporový materiál se ve formě pasty nanese síťotiskem a poté se vytvrdí. Tloušťka vrstvy je řádově 0,01 mm. Stejnou technologií mohou být na těžce destičce, avšak mimo oblast namáhanou tlakem, vytvořeny kompenzační rezistory, popř. jiné součásti elektronického obvodu, jejichž hodnota je posléze trimována laserem. V mimořádných případech jsou všechny elektronické obvody snímače vytvořeny na jediné keramické destičce. Druhá strana membrány je přístupná měřenému médiu.

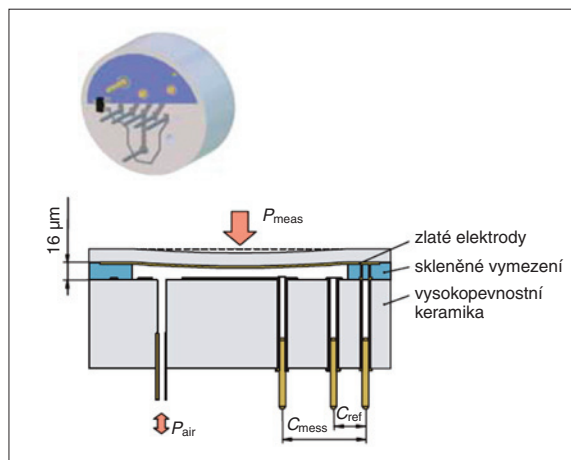
Toto jednoduché uspořádání napomáhá minimalizovat výrobní náklady a vyhoví ve většině aplikací v běžné technické praxi. Není však vyhovující pro taková měření média, která prosakují keramickou deskou. Tomu někteří výrobci čelí použitím hutnějšího (a dražšího) keramického materiálu. Dalším omezujícím faktorem je utěsnění keramické desky v tělese snímače. Velikost keramických měřicích membrán je zpravidla několik milimetrů (někdy i 15 až 20 mm)

a těsnění musí eliminovat rozdílnost teplotních roztažností keramického a kovového materiálu. K utěsnění se většinou používá pryž.

Snímače tlaku s tlustovrstvými tenzometry jsou velmi rozšířené a lze je ponejvíce najít v převodnicích nižší a střední cenové kategorie.

### Tenkovrstvé kovové tenzometry

Vznikají vakuovým napařením kovové vrstvy o tloušťce přibližně 0,000 1 mm na izolační vrstvu (obvykle keramickou), která je nanášena na kovovém deformačním členu. Deformační člen může tvořit jeden celek s tělesem nebo může být přivařen ke vstupnímu hrdlu. Tím je tento tenzometr vhodný k mě-



Obr. 3. Příklad keramického kapacitního snímače přetlaku

ření vysokých tlaků. Nevýhodou jsou vyšší výrobní náklady a nesourodost jednotlivých vrstev (kov-keramika-kov). Podobný okruh využití mají snímače s kovovým deformačním členem, na jehož izolační vrstvě jsou napeeny kovové fóliové tenzometry.

### Kapacitní snímače

Zatímco piezorezistivní snímače a tlustovrstvé tenzometry zaznamenaly v minulých dvou desetiletích bouřlivý rozvoj, kapacitní snímací systém je již evergreenem. Zásadní změny však přináší použití nových materiálů i nových technologií výroby, které vedly k miniaturizaci těchto snímačů. Deformační membrána z tenkého vodivého materiálu tvoří elektrodu, která se vychyluje mezi dvěma dalšími elektrodami vytvořenými na stěnách dutiny v tělese snímače. Prostor mezi membránou a stěnou dutiny je vyplněn dielektrikem, kterým je vzduch nebo jiný inertní plyn, popř. silikonový olej nebo jiná vhodná inertní kapalina. Tímto uspořádáním vzniká dvojice snímacích kondenzátorů, jejichž kapacita je závislá na tloušťce dielektrika (vzdálenosti elektrod), tj. na výchylce membrány. Oba kondenzátory jsou zapojeny do dvou větví polovičního můstku.

Kapacita kondenzátorů je však závislá na vlastnostech dielektrika, a proto jen

v omezeném okruhu použití lze měřenému mediu přivádět až do prostoru snímacích elektrod. V praxi je proto tento snímací systém obvykle doplňován oddělovacími membránami a měřený tlak je do prostoru mezi elektrodami přenášen pracovní kapalinou, většinou silikonovým olejem. Popsané uspořádání je náročné na výrobu a je možné se s ním setkat zejména v přesných a odolných převodnicích vyšší cenové kategorie.

Jednodušší konstrukce vycházející ze stejného měřicího principu je naznačena na obr. 3. Výchylka membrány je snímána jedinou dvojicí elektrod na zadní straně membrány, přední strana membrány je přístupná měřenému mediu. Snímací systém je tak redukován na jediný snímací kondenzátor. Po obvodu membrány, kde nenastává průhyb, může být umístěna kompenzační elektroda.

Toto uspořádání snímacího systému zaznamenalo v posledních několika letech velký rozvoj a lze říci, že tím kapacitní snímací systém pronikl i do snímačů střední a nižší cenové kategorie, a to zejména v oblasti nižších tlaků. Těleso senzoru bývá zhotoveno z keramiky  $Al_2O_3$ , elektrody jsou vakuově napařené kovové vrstvy. U čidel přetlaku se do prostoru při zadní straně membrány přivádí atmosférický tlak. Vlhkost obsažená ve vzduchu by mohla způsobit nestabilitu měření, a proto čidla bývají opatřena goretexovými filtry zabraňujícími průniku vlhkosti.

### Indukčností snímače

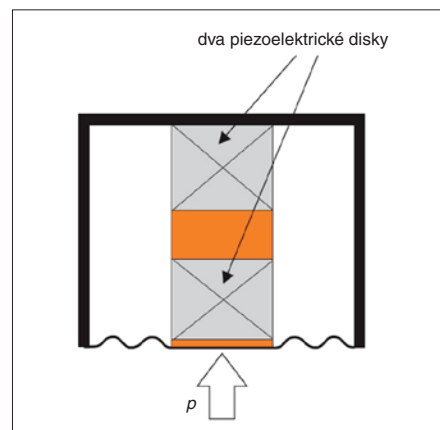
Indukčností snímač tlakové diference je uspořádán podobně jako kapacitní snímač. Místo pevných snímacích elektrod jsou v tělese převodníku zabudovány snímací cívky. Magnetický obvod se uzavírá přes jádro cívky a vzduchovou mezeru (indukčností snímač s otevřeným magnetickým obvodem). Měřicí membrána je zhotovena buď z feromagnetického materiálu a tvoří část magnetického obvodu, popř. je ve své aktivní části opatřena kouskem feromagnetického materiálu, anebo jádrem cívky pohybuje pomocí táhla. S výchylkou membrány se mění poměr indukčností obou cívek zapojených ve střídavém mostu, a tím dochází k jeho rozvážení. Používají se i konstrukce s jedinou snímací cívkou.

### Piezoelektrické snímače

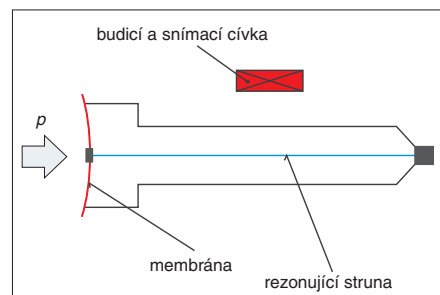
U některých druhů krystalů působením mechanické deformace vzniká elektrický náboj. K měřicím účelům se upravují např. krystaly křemene a titaničitanu barnatého: na plo-

chách specificky orientovaných k ose mechanického namáhání se dělají výbrusy a plochy se opatřují kovovými elektrodami. V praxi se často používají dva krystaly upravené do tvaru disku a uspořádané do tzv. piezoelektrického dvojčete (obr. 4). Disky jsou zapojeny elektricky paralelně (jejich náboje se sčítají) a mechanicky sériově. Jsou v předepnutém stavu, aby závislost mezi tlakem a změnou piezoelektrického náboje  $q$  na jejich elektrodách byla lineární. Tlak je přiváděn na tuhou střední část membrány, která současně zajišťuje počáteční mechanické předpětí. Uvedené materiály umožňují měřit při teplotách až přibližně 550 °C; při vyšších teplotách krystal ztrácí piezoelektrické vlastnosti. K výrobě snímačů se ovšem volí i jiné krystalické materiály, jakož i materiály keramické nebo polymerové.

K hlavním přednostem piezoelektrických snímačů tlaku patří jejich malé rozměry a hmotnost, které vedou k dobrým dynamickým vlastnostem. Miniaturní čidla velikosti pouhých několik milimetrů a s časovou konstantou v řádu mikrosekund jsou předurčena k měření dynamických tlakových průběhů:



Obr. 4. Piezoelektrické dvojčete



Obr. 5. Schéma snímače s rezonující strunou

např. pulzací ve spalovacích motorech a kompresorech. K jejich nevýhodám patří teplotní závislost a obtížnější zpracování signálů: jsou zapotřebí speciální kabely a impedančně přizpůsobené zesilovače se vstupy o velkém odporu. Další nevýhodou je nemožnost měřit ve statickém stavu, protože náboj, vzniklý vnesením deformace do krystalu, se rychle vybíjí a zaniká.

Zabudováním impedančního převodníku do pouzdra piezoelektrického snímače tlaku se odstraní nevýhoda potřeby speciálních kabelů s vysokým izolačním odporem (nákladné), snižší se šum kabelu, ale zároveň se obvykle sníží horní hranice pracovních teplot.

## Rezonanční snímače

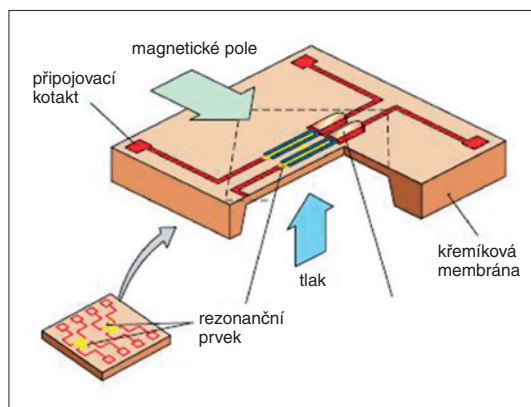
U rezonančních snímačů tlaku se využívá závislosti vlastní frekvence mechanického kmitání rezonančního prvku na jeho mechanickém napětí. První rezonanční snímače pracovaly s kmitající strunou (obr. 5) [9]. Kmitání struny je buzeno elektromagneticky. Z obrázku je zřejmé, že rezonanční kmitočet závisí na mechanickém napětí struny, a tudíž i na velikosti tlaku, resp. tlakové síly, která působí na membránu. Kmitajícím prvkem místo struny může být membrána, válec, nosník, avšak u moderních snímačů je to miniaturní mikromechanický prvek zcela specifického tvaru (obr. 6).

K základním obecným přednostem tohoto snímacího principu patří binární výstupní signál (frekvenční, tedy bez převodníku A/D), a tím i nízký šum, vysoká rozlišovací schopnost a časová stabilita signálu, jakož i odolnost proti rušení, a tudíž i vysoká přesnost a spolehlivost měření. Nevýhodou je závislost na teplotě, která ovlivňuje jak modul pružnosti, tak i rozměry rezonátoru; vliv teploty musí být kompenzován. Dále je třeba počítat s horšími dynamickými vlastnostmi (delší doba potřebná k měření) [4], náročnější výrobou a u některých konstrukcí i s nelineární závislostí rezonančního kmitočtu na tlaku a citlivostí na vibrace.

Pravděpodobně nejlepších parametrů rezonančních snímačů tlaku dosáhla společnost Yokogawa se senzorem DPharp („harfa“), který používá ve snímačích řady EJA a EJX. Základním prvkem této konstrukce je rezonátor tvaru písmene H, vytvořený uvnitř evakuované dutiny mikroelektronickým obráběním monokrystalu křemíku (technika MEMS). Rezonátor je umístěn ve stejnosměrném magnetickém poli, jež je vytvořeno permanentním magnetem, a je elektromagneticky buzen působením střídavého proudu tak, aby amplituda kmitů rezonátoru byla konstantní. Nosníky rezonátoru mají tloušťku 5  $\mu\text{m}$  a délku 500  $\mu\text{m}$  a v evakuované komůrce jsou chráněny před vlivem okolní teploty a před vlhkostí. Vlivem působení měřeného tlaku na kmitající prvky jsou nosníky deformovány (ve středu se stlačují, na okrajích protahují), a v důsledku toho se mění kmitočet ( $f_c$  střed,  $f_o$  okraj). Díky zvolenému uspořádání rezonátory poskytují frekvenční výstupy téže velikosti, ale s opačnými znaménky, což přináší zdvojnásobení citlivosti. Základ-

ní vlastní frekvence rezonátoru je asi 80 kHz a její změna odpovídající měřicímu rozsahu senzoru je přibližně 20 kHz. Z toho v konečném důsledku vyplývají výhodné vlastnosti: vynikající úroveň šumu, linearita, stabilita, necitlivost na statický tlak, odolnost proti parazitním vibracím atd., kterých se u jiných řešení dosahuje obtížněji.

Tlak měřeného média se na rezonátor (pružný prvek) přenáší buď prostřednictvím

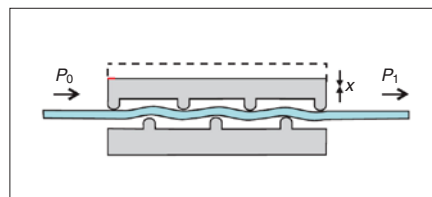


Obr. 6. Mikromechanický rezonanční snímač tlaku

oddělovací membrány pomocí silikonového oleje obdobně jako u piezorezistivních senzorů a diferenčních kapacitních snímačů, nebo přímo. Rezonanční snímače tlaku se používají k měření absolutního, relativního tlaku a rozdílu tlaků, a to jak pro průmyslové aplikace, tak i pro účely kalibrace a v leteckém průmyslu (výškoměry).

## Optické snímače

Oproti ostatním snímačům tlaku využívají optické snímače jiný nosič informace – fotony. Právě z této zásadní odlišnosti vyplývají jejich charakteristické vlastnosti, ke kterým



Obr. 7. Snímač tlaku s optickými vlákny

zejména patří velká citlivost, linearita a odolnost proti rušení, jiskrová bezpečnost (pro optický výkon menší než 7 mW), malá hmotnost atd. K nevýhodám patří doposud náročnější konstrukce a vyšší cena. Optické snímače využívají jak volný světelný svazek (paprsky), tak v poslední době stále častěji optická vlákna (světlovody). Dělí se na optické vláknové snímače vlastní (vlákno je součástí snímače) a nevlastní (vlákno funguje pouze jako transportní prostředí) [7].

Optický vláknový snímač (OVS) na obr. 7 využívá mikroohyby v optickém vlákne, kte-

ré vznikají mezi hroty působením měřeného tlaku p změnou polohy horní pohyblivé desky (čelisti) o hodnotu  $x$ . Jejich následkem dochází ke konverzi vyšších vidů v mnohavidovém optickém vlákne, které jádro vlákna opouští. Následkem toho se vstupní optický výkon (intenzita)  $P_0$  zmenší na hodnotu  $P_1$  za snímačem.

Na obr. 8 je principiální uspořádání reflexního OVS. V tomto případě se působením tlaku na membránu mění vzdálenost mezi koncem optického vlákna a vnitřní stranou membrány s reflexní vrstvou. Tím se mění intenzita výstupního optického toku  $\Phi_2$ . Na obr. 7 je ukázán vláknový snímač tlaku se společným vlákem (a) a se dvěma vlákny (b). Jiný druh OVS využívá optický Fabryho-Perotův rezonátor, jehož rozměry se působením měřeného tlaku mění, a dochází tak k jeho přeladování, tedy změně rezonanční frekvence.

Optické vláknové snímače tlaku se používají jak v průmyslové praxi (zejména s amplitudovou modulací), tak i v jiných oborech, např. ve vojenství (s fázovou modulací). K nejznámějším patří optický vláknový hydrofon, který svými parametry nemá srovnatelného konkurenta u jiných principů. Využívá dvojranný jednovidový Machův-Zehnderův interferometr a dosahuje i pro kmitočty menší než 100 Hz citlivosti 100 mPa. Minimální prahová úroveň měřeného tlaku je 3 až 40 dB/1 mPa, strmost (citlivost) 4,5 rad/Pa.

## Ostatní snímače s deformačním členem

Do této kategorie lze zahrnout snímače využívající další principy, které kombinují deformační člen (membránu či membránovou krabici, vlnovec, Bourdonovo pero, píst či membránu se zanedbatelnou tuhostí ve spojení s pružinou anebo s ohybovým nosníkem) s různými čidly polohy: s mechanickými kontakty (mikrospínač), s jazýčkovým relé, s Hallovou sondou nebo s jiným snímačem polohy či síly. Jedním z dříve často využívaných principů je deformační člen ve spojení s elektromechanickou zpětnou vazbou v kompenzačním zapojení.

## Snímače vakua

Všechny již zmíněné měřicí principy využívají silové účinky, kterými tlak měřeného média působí; většinu z nich je možné s omezenou přesností použít i v oblasti podtlaků až do absolutního tlaku v řádu jednotek kilopascalů.

Při měření tlaků blízkých absolutní nule (tedy hlubokého vakua) jsou však silové účinky tak malé, že by byly jen velmi těžko měřitelné, a proto se používají úplně jiné měřicí principy: tepelné (Piraniho měřka, bolometr, termočlávkové měřky), ionizační (Pennin-gova měřka) a další (Bayardova, Albertova měřka, vakuometry se zdrojem radioaktivního záření).

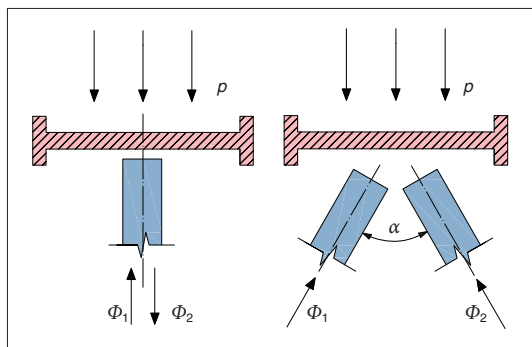


## Ochrana snímačů proti přetížení

Nejjednodušší ochrana snímače proti přetížení spočívá v předimenzování deformačního členu tak, aby jeho namáhání v měřicím rozsahu byla podstatně menší než maximální namáhání, při kterém ještě nejsou narušeny metrologické vlastnosti. Takto lze ovšem chránit snímače před přetížením jen do několika násobku měřicího rozsahu. Snímače ur-

jich napájení, zesílení signálu ani kalibrace nejsou vyřešeny. Dodávají se jako kompenzované či nekompensované. Přípojné a zástavbové rozměry se většinou neřídí žádnými standardy. Výrobce zaručuje jen základní metrologické parametry senzoru, často pouze v podobě statistických hodnot. U jednoúčelových zákaznických provedení mohou být do senzoru integrovány další elektronické obvody.

Další kategorií jsou jednoduché snímače tlaku určené pro použití v průmyslových systémech měření a regulace. Ty mívají krytí alespoň IP54, obsahují stabilizátor napájecího napětí a výstup v podobě unifikovaného signálu, zpravidla analogového. Způsob montáže a připojení měřeného tlaku odpovídají obvyklým normám či standardům přiměřeně účelu, k němuž mají být použity. Někdy bývají opatřeny seřizovacími prvky, které umožňují snímače dodatečně kalibrovat.



Obr. 8. Funkce optického vláknového snímače tlaku

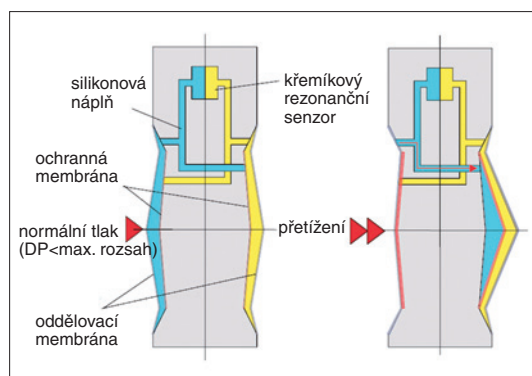
čené k měření nižších tlaků se obvykle konstruují s větší přetížitelností než snímače pro vysoké tlaky.

Snímače s většími membránami o relativně velkém průhybu jsou chráněny tím, že membrána při přetížení dosedne na vhodně tvarovaný doraz. Takto koncipovanou ochranu však vůbec nelze použít u snímačů s malou křemíkovou nebo keramickou membránou. Ochrana snímače proti přetížení nabývá zvláštní důležitosti u snímačů rozdílů tlaků, kde se v provozu vyskytne přetížení jednostranným tlakem ve výši až sto- či tisícinásobku měřicího rozsahu.

Co se týče opracovaných snímačů určených pro těžší provozní podmínky, je k ochraně proti přetížení využíván přenos tlaku prostřednictvím pracovní kapaliny (silikonového oleje). Systém přenosu je uzpůsoben tak, že při dosažení mezního tlaku začne působit pojistka, která zabrání dalšímu zvyšování tlaku v okruhu silikonového oleje. Jedno z možných řešení je znázorněno na příkladu snímače Yokogawa (obr. 9).

## Kategorie snímačů tlaku

Snímače tlaku se vyrábějí v bezpočtu variant, které odpovídají různým požadavkům. Nejnižší kategorií jsou jednoduché senzory tlaku – tzv. provedení OEM, které jsou zpravidla určeny pro zástavbu do vyšších funkčních jednotek, jako jsou laboratorní přístroje, menší strojní celky, složitější spotřební výrobky, jednoúčelové regulátory apod., popř. se používají jako stěžejní díl při výrobě průmyslových snímačů tlaku. Senzory většinou mají jen velmi nízký stupeň krytí a je-



Obr. 9. Ochrana snímače rozdílu tlaků proti přetížení jednostranným tlakem

Jejich elektronické obvody jsou řešeny jako čistě analogové, avšak u moderních přístrojů se i v této kategorii stále více prosazuje využití mikroprocesorové techniky. Cena těchto snímačů je obvykle přibližně o řád vyšší než cena snímačů v provedení OEM.

Nejvyšší kategorií jsou inteligentní (smart) snímače tlaku s větší přesností, která dovoluje přestavit měřicí rozsah v rozmezí obvykle minimálně 1:7. S přestavením měřicího rozsahu roste chyba, resp. nejistota měření, protože ta má nepominutelnou složku, která je definována jako zlomek jmenovitého (tj. největšího) rozsahu. Výstupní signál je zpravidla analogový s možností komunikovat prostřednictvím některého z běžných sériových protokolů (HART, Foundation Fieldbus, průmyslový Ethernet, AS-i). Mikroprocesor umožňuje vybavit snímač diagnostickými funkcemi. Vzhledem k požadavkům na spolehlivost bývají snímače chráněny proti přetížení. Tato ochrana je významná zvláště u snímačů rozdílů tlaků.

Vyšší stupeň přestavitelnosti měřicího rozsahu je užitečný, protože při projektování zařízení někdy bývá obtížné správně určit rozsah provozního tlaku. Významnou předností je i zaměnitelnost náhradních dílů. Cena těchto snímačů je až o řád vyšší než cena snímačů předchozí kategorie.

## Přesnost snímačů tlaku

Z hlediska použití snímačů tlaku v praxi v systémech průmyslového řízení a měření je vhodné jejich přesnost hodnotit v souvislosti s dlouhodobou stálostí jejich převodní charakteristiky. Přesnější a dlouhodobě stabilní snímače umožňují stanovit delší období mezi kalibracemi, což vede ke snížení provozních výdajů, byť za cenu vyšších pořizovacích nákladů na tyto přístroje.

Přesnost snímačů nabývá zvláštního významu v případě inteligentních (smart) převodníků, a to s ohledem na přestavitelnost měřicího rozsahu; u některých převodníků se nabízí přestavitelnost až 1:100.

## Závěr

Popsané principy snímačů, které patří k těm nejpoužívanějším, se v blízké budoucnosti patrně nebudou výrazně měnit. Se zvyšující se úrovní technologií výroby snímačů i souvisejících elektronických obvodů poroste kvalita i kvantita jak standardních, tak zejména mikromechanických snímačů.

## Literatura:

- [1] ZEHNULA, K.: *Snímače neelektrických veličin*. SNTL, Praha, 1983.
- [2] ĎAĎO, S. – KREIDL, M.: *Senzory a měřicí obvody*. ČVUT, Praha, 1996, ISBN 80-01-01500-9.
- [3] MIGEON, A. – LENEL, A. E.: *Pressure sensors – Modular Courses on Modern sensors. Leonardo pilot projekt, M2A*. Technologies France, 2002.
- [4] BEJČEK, L. – PREČAN, J.: *Poznatky z dynamických měření snímačů tlaku*. Automa, 2002, roč. 8, č. 11, s. 26–30, ISSN 1210-9592.
- [5] SZENDIUCH, I. a kol.: *Technologie elektronických obvodů a systémů*. VUTIU, VUT Brno, 2002, ISBN 80-214-2072-3.
- [6] ZETEK, T.: *Rezonanční snímače tlaku DPharp EJA*. Automatizace, 1997, 40, č. 6, s. 350–352, ISSN 0005-125X.
- [7] BEJČEK, L. – ZEHNULA, K.: *Měřič teploty a tlaku se světlovodným snímačem*. VUT Brno, FE KAMT, 1987.
- [8] MIKAN, J.: *Měření plynu*. GAS, s. r. o., Říčany u Prahy, 2003, ISBN 80-7328-053-1.
- [9] KADLEC, K.: *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 3)*. Automa, 2007, roč. 13, č. 10, s. 23–26.

Ludvík Bejček, FEKT VUT Brno,  
Jan Vaculík, BHV senzory