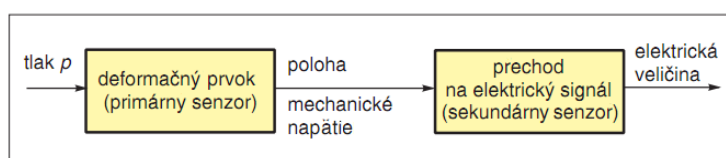


5. Snímače tlaku s elektrickým výstupom

5.1. Prevod signálu deformačného prvku na elektrický signál

V modernej automatizačnej technike nachádzajú uplatnenie také snímače, ktoré poskytujú výstupný signál vhodný pre diaľkový prenos a následné spracovanie v elektronických analógových a číslicových obvodoch. Základom mnohých vyhotovení takých snímačov (elektromechanických tlakomerov) býva niektorý z deformačných tlakomerných prvkov (membrána, trubica, vlnovec, škatuľa, nosník). Na deformačný prvok (merací prvok, citlivá časť, primárny senzor) nadväzuje vhodný senzor s elektrickým výstupom (sekundárny senzor), vyhodnocujúci deformáciu spôsobenú meraným tlakom p (Obr. 13). Ide teda o snímače tlaku s niekoľkonásobným prevodom.



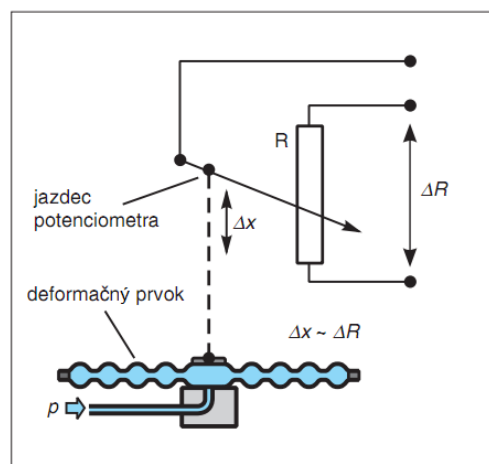
Obr. 13 Základná schéma snímača tlaku s elektrickým výstupom

Výsledkom pôsobenia sily pri deformácii meracieho prvku je zmena polohy alebo zmena mechanického napätia, a preto sa pre vyhodnotenie deformácie a pre prevod na elektrický signál s výhodou využívajú senzory:

• polohy (potenciometrické, indukčnosťné, kapacitné, optické),
 • mechanického napätia (tenzometrické, rezonančné, piezoelektrické).

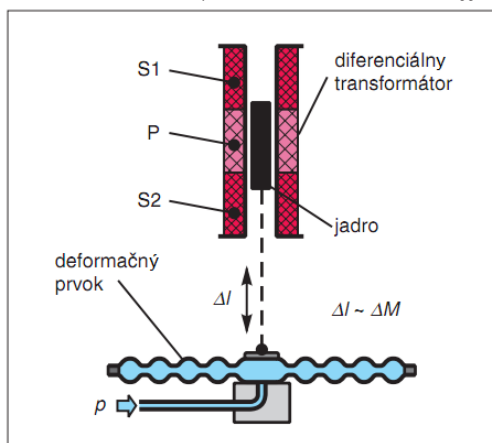
5.2. Tlakomery s potenciometrickým a indukčnosťným senzorom polohy

Jednoducho možno elektrický výstup z deformačných tlakomerov získať použitím *potenciometrického* senzora polohy. Jazdec potenciometra je mechanicky spojený s deformačným prvkom, ktorého deformácia Δx vyvoláva zmenu polohy jazdca vyhodnocovanú ako zmena odporu ΔR (Obr. 14). Výhodou tohto spôsobu prevodu na elektrický signál je nízka cena (jednoduchá konštrukcia, nie je potrebné používať zosilňovač), nevýhodami sú citlivosť na vibrácie veľká hysterézia a nebezpečenstvo rýchleho mechanického opotrebenia jednotlivých dielov a ich spojov (zhoršenie presnosti).



Obr. 14 Potenciometrické snímanie deformácie meracieho prvku

Indukčnosťný senzor polohy sa najčastejšie používa v usporiadaní ako lineárny diferenciálny transformátor (*Linear Variable Differential Transformer – LVDT*) podľa Obr. 15. Zmena tlaku vyvolá prostredníctvom vhodného pružného člena zmenu polohy Δl feromagnetického jadra diferenciálneho transformátora, čo spôsobí zmenu vzájomnej indukčnosti ΔM medzi primárnym a sekundárnym vinutím transformátora. Pri napájaní primárnej cievky P striedavým napätím je zmena napätia na sekundárných vinutiach S1 a S2 priamo úmerná Δl .



Obr. 15 Indukčnosťné snímanie deformácie meracieho prvku (LVDT)

Príklad deformačného tlakomeru s indukčnosťným senzorom polohy a s analógovým elektrickým výstupom je na Obr. 16.

5.3. Kapacitné snímače tlaku

5.3.1. Princíp kapacitného senzora tlaku

Kapacitný senzor tlaku je principiálne veľmi jednoduchý (Obr. 17). Jedna elektróda kondenzátora je tvorená membránou, ktorej poloha sa mení vplyvom tlaku. Zmena vzdialenosti elektród kondenzátora sa prejaví zmenou jeho kapacity. Ak berieme do úvahy jednoduchý doskový kondenzátor, platí pre jeho kapacitu C vzťah

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (5)$$

kde

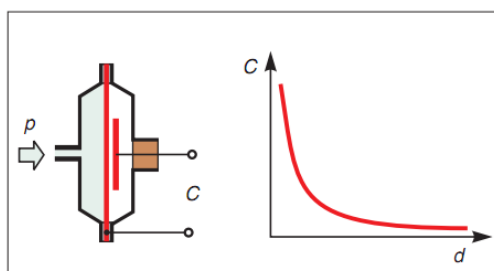
S je plocha elektród,
 d vzdialenosť elektród,
 ε_0 permitivita vákua,
 ε_r pomerná permitivita,



Obr. 16 Deformačný tlakomer s analógovým výstupom

Ak uvažujeme, že vo vzťahu (5) sa mení len d , môžeme ostatné veličiny zahrnúť do konštanty k a platí

$$C = \frac{k}{d} \quad (6)$$



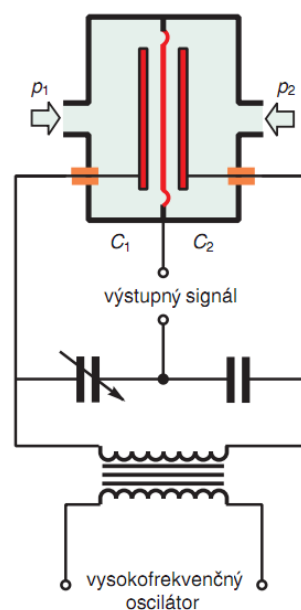
Obr. 17 Princíp kapacitného senzora tlaku

Z grafu na Obr. 17 je zrejmé, že priebeh charakteristiky kapacitného senzora je nelineárny. Pretože ide o hyperbolickú závislosť, budú zmeny kapacity a tým aj citlivosť, najväčšie pri malých vzdialenostiach d . Z dôvodu nelineárnej statickej charakteristiky senzora musí byť vyhodnocovací

obvod snímača vybavený linearizačným členom.

Kapacitný princíp sa veľmi často používa pri meraní rozdielu tlakov, keď meracia membrána tvorí strednú pohyblivú elektródu dvojitého kondenzátora. Príklad vyhotovenia takého senzora so strednou membránovou elektródou a dvomi pevnými elektródami je znázornený na Obr. 18 (a, b). Vnútorý priestor senzora je vyplnený silikónovým olejom alebo inou vhodnou inertnou kvapalinou a merané médium nepôsobí na meraciu membránu priamo, ale prostredníctvom oddeľovacích membrán. Pevné elektródy sú vytvorené na izolante (keramika, sklo), tvarovanom tak, aby zmena kapacity bola čo najväčšia a súčasne bol vytvorený mechanický doraz brániaci plastickej deformácii meracej membrány pri preťažení senzora.

Priehyb membrány senzora na Obr. 18 vyvolá opačné zmeny kapacít C_1 a C_2 . tzn. napr. $C_1 = C_0 + \Delta C$ a $C_2 = C_0 - \Delta C$. Výstupné napätie mostíkového obvodu je úmerné rozdielu kapacít $C_1 - C_2 = 2\Delta C$, takže citlivosť je oproti senzoru podľa Obr. 17 dvojnásobná.

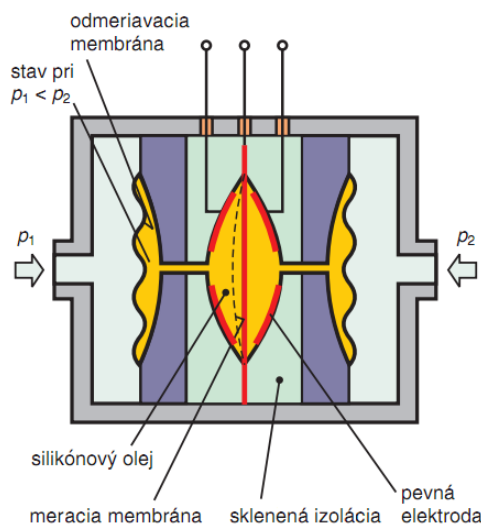


Obr. 18a Kapacitný senzor rozdielu tlakov

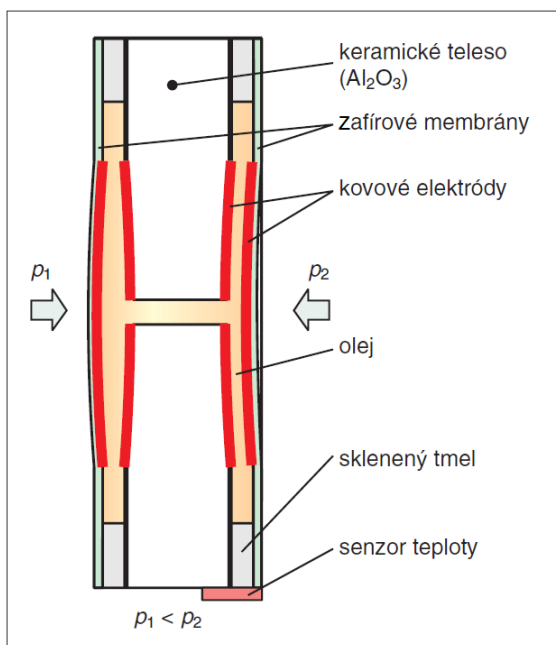
Elektrické vyhodnocovacie obvody prevádzajúce zmeny kapacity na výstupný signál bývajú doplnené obvodmi pre potlačenie vplyvu parazitných kapacít, ktoré sú spôsobené kapacitami kábla, prívodov a tieniacich krytov. Parazitný vplyv kapacity prívodov je eliminovaný použitím hybridnej alebo integrovanej elektroniky vstavanej v snímači. Pracovný rozsah vstavovaných snímačov rozdielu tlakov sa pohybuje v rozmedzí 100 Pa až 40 MPa, statický tlak môže dosiahnuť až 40 MPa.

5.3.2. Keramická membrána

Senzorom moderných kapacitných snímačov tlaku je keramická membrána, najčastejšie ako súčasť keramickej tlakomernej bunky. Napríklad keramická meracia bunka od firmy Endress+Hauser značky Ceraphire® je vytvorená na báze telesa bunky z veľmi čistej keramiky (Al_2O_3 s čistotou 99,9 %) a zařirových membrán. Zařir (modrá odroda korundu) je materiál vyznačujúci sa veľkou mechanickou



Obr. 18b Príklad usporiadania kapacitného senzora rozdielu tlakov



Obr. 19 Keramická kapacitná tlakomerná bunka

membrány a teda ku zmene kapacity, ktorú vyhodnocuje mikroprocesorom riadený elektronický obvod, vybavený aj automatickou kompenzáciou vplyvu teploty.

5.3.3. Prevádzkové snímače s kapacitným senzom

Kapacitné snímače môžu byť konštruované na meranie absolútneho, relatívneho tlaku, alebo rozdielu tlakov. Snímače na meranie rozdielu tlakov sa výhodne používajú na meranie prietoku tekutín sondami a škrtiacimi orgánmi.

Ako príklad prevádzkových snímačov s keramicou tlakomernou bunkou sú na Obr. 20 zobrazené výrobky firmy Endress+Hauser. Snímač Cerebar S PMC71 (Obr. 20a) sa používa na meranie absolútneho tlaku v rozsahoch od 10 Pa až 10kPa do 100 Pa až 4 MPa s neistotou 0,075 % z rozsahu, zatiaľ čo prístroj Deltabar S PMD70 (Obr. 20b) je určený na meranie rozdielov tlakov v rozsahoch od -2,5 až +2,5 kPa do -300 až +300 kPa.



Obr. 20 a) Snímač tlaku s keramickou meracou bunkou

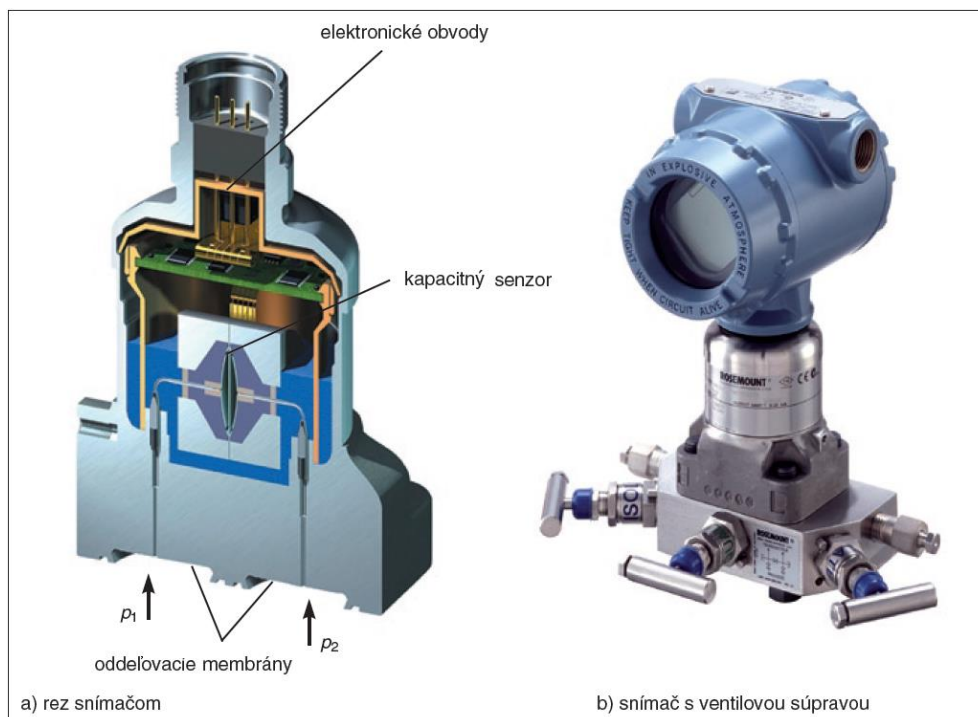


b) Snímač rozdielov tlakov s keramickou meracou bunkou

Pre súčasné kapacitné senzory tlaku vyrábané mikroelektromechanickými postupmi, sú charakteristické miniatúrne rozmery a vysoká kvalita sensorov. Vďaka malým rozmerom je možné sensor presunúť až do puzdra s elektronikou, kde je lepšie chránený pred zmenami teploty a mechanickým namáhaním. Príkladom moderného priemyselného snímača tlaku s rovinným (koplanárnym) tlakovým pripojením je prístroj Rosemount 3051S na Obr. 21. Koplanárne pripojenie umožňuje priamu montáž ventilových súprav a oddeľovacích membrán. Meracie rozsahy sú v tomto prípade od 0,025 do 27 600 kPa; neistota snímača neprekračuje 0,025 % z rozsahu, vplyv zmeny teploty nie je väčší ako 0,001 2 %/K a vplyv statického tlaku 0,015 %/MPa.

Snímače tlaku využívajúce kapacitný princíp majú v porovnaní so snímačmi s odporovými tenzometrami jednoduchšiu kompaktnú konštrukciu. Sú odolnejšie, s rýchlou odozvou a podstatne menším driftom (posunutím nuly) a zmenou citlivosti s teplotou. Ich nevýhodou je citlivosť na parazitné kapacity prívodov a na rušivé vibrácie prenášané zo

zariadenia. Kapacitné snímače s keramickou meracou bunkou sa používajú na meranie pretlaku v rozsahoch od 0 až 25 Pa do 0 až 70 MPa a na meranie rozdielov tlakov až ± 14 MPa.



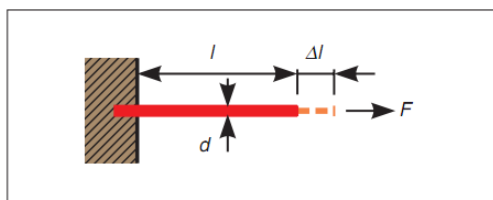
Obr. 21 Kapacitný snímač tlakov s rovinným pripojením

5.4. Snímače tlaku s odporovými tenzometrami

5.4.1. Princíp odporového tenzometra

Odporový tenzometer je senzor, v ktorom sa mení elektrický odpor pri mechanickom namáhaní v oblasti pružných deformácií, tzn. silami pôsobiacimi v medziach platnosti Hookovho zákona (spravidla tlakom alebo ťahom). Odporové tenzometre môžu byť kovové alebo polovodičové.

Pri deformácii kovových vodičov sa menia ich geometrické rozmery, čo vedie k



Obr. 22 Princíp tenzometra

zmene ich elektrického odporu. Princíp kovového odporového tenzometra je možné ukázať na deformácii odporového drôtu o dĺžke l , priereze S (priemere d) a mernom odpore ρ , ktorý je vystavený účinku sily F tak, že sa predĺži o dĺžku Δl (Obr. 22). Pôvodný odpor vodiča $R = \rho l/S$ sa v dôsledku pôsobiacej sily zmení o ΔR a to preto, lebo sa zmení jeho dĺžka o Δl , prierez o ΔS a vplyvom

štrukturálnych zmien aj merný odpor o $\Delta\rho$. Pre malé zmeny platí

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (7)$$

Napríklad pri namáhaní tlakom sa zväčšuje dĺžka a pri zachovaní objemu sa znižuje prierez; odpor vodiča teda rastie. Pri uvažovaní relatívnej deformácie $\varepsilon = \Delta l/l$ môžeme pre relatívnu zmenu odporu v oblasti pružných deformácií odvodiť

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k\varepsilon \quad (8)$$

kde k je koeficient deformačnej citlivosti, ktorého veľkosť závisí od materiálu vodiča. Z hľadiska meracej techniky by mal byť koeficient deformačnej citlivosti stály, nezávislý na deformácii, teplote a na technologickej príprave deformačného materiálu. Hodnota k sa v praxi takmer vždy určuje experimentálne. Pre konštantán (zliatina kovov Ni 40% + Cu 58% + Mn 2%) a niektoré druhy chrómniklových zliatin, ktorých závislosť odporu na teplote je zanedbateľná, je $k = 2$. Pretože pri vyhodnocovaní odporu tenzometra sa nemeria pomerná zmena odporu, ale priamo ΔR , ktoré závisí na prírastku (úbytku) dĺžky Δl , je vhodné, aby dĺžka l bola čo najväčšia.

Kovové odporové tenzometre sa zhotovujú z odporového drôtika o priemere 0,02 až 0,05 mm, ktorý je nalepený v tvare meandra na tenký podklad z papiera alebo plastu. Konce drôtika sú prispájkované na vývody väčšej hrúbky. Odporový tenzometer sa na meraný objekt prilepí špeciálnym lepidlom. Tenzometre zložitých tvarov (radiálne, špirálové a iné) sa vyrábajú odleptávaním tenkej odporovej fólie, tzn. obdobne ako dosky plošných spojov. Takto zhotovené tzv. fóliové tenzometre majú lepšie vlastnosti ako drôtikové tenzometre.

V moderných snímačoch tlaku sa používajú *polovodičové tenzometre (piezorezistory)*, ktoré sa vyrábajú z monokryštálu kremíka (rezaním, brúsením alebo leptaním) alebo planárnou technológiou na kremíkovom alebo inom substráte. Tenzometre z monokryštálu sa lepia na mechanický merací člen. Pôsobením mechanického namáhania v určitej kryštalografickej osi monokryštálu polovodiča alebo v difúznej vrstve polovodiča dochádza ku zmene pohyblivosti nosičov nábojov, a tým sa mení aj elektrická vodivosť a odpor senzora (piezorezistívny jav). Zmena odporu závisí na type polovodiča a na koncentracii prímiesí. Polovodičové tenzometre majú nelineárnu závislosť odporu na deformácii aj na teplote. Závislosť relatívnej zmeny odporu na relatívnej deformácii sa obvykle vyjadruje vzťahom

$$\frac{\Delta R}{R} = k_1 \varepsilon + k_2 \varepsilon^2 \quad (9)$$

Koeficient deformačnej citlivosti k' polovodičových tenzometrov je vzhľadom na rovnicu (9) vyjadrený vzťahom

$$k' = k_1 + k_2 \varepsilon \quad (10)$$

V polovodičoch typu P nadobúda konštanta k_1 kladné hodnoty a odpor tenzometra pri namáhaní ťahom rastie, pri polovodičoch typu N je k_1 záporné a odpor pri namáhaní ťahom klesá. Kombináciou rôznych typov tenzometrov je možné vytvárať mostíky so zvýšenou citlivosťou.

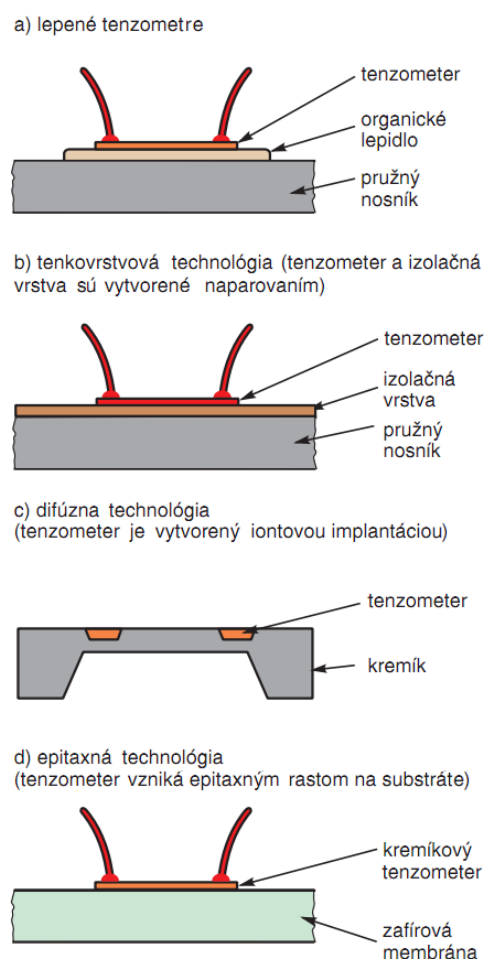
V porovnaní s kovovými sú polovodičové tenzometre omnoho citlivejšie. Koeficient deformačnej citlivosti dosahuje hodnoty $k' = 50$ až 175. Ich nevýhodou je však nelineárna statická charakteristika a značná závislosť na teplote. Pri použití polovodičových tenzometrov je teda vždy nutné závislosť na teplote kompenzovať vhodným zapojením meracieho mostíka alebo pomocným obvodom.

5.4.2. Meracie členy s polovodičovými tenzometrami

Meracie členy s polovodičovými tenzometrami je možné realizovať niekoľkými spôsobmi (Obr. 23). Polovodičové tenzometre môžu byť vyrobené napr. v podobe pásov, získaných rozrezaním výbrusu monokryštálu kremíka, ktoré sa vhodným lepidlom lepia na plochu podliehajúcu deformácii. Prívody sú kovové. Merací člen s polovodičovými tenzometrami je možné realizovať aj ďalšími metódami používanými pri výrobe polovodičových elektronických obvodov (tenkovrstvová, difúzna, epitaxná). Piezorezistory v kremíkovej membráne sa vytvárajú napr. difúziou pri vysokej teplote alebo iontovou implantáciou, kedy na povrchu membrány vzniknú rezistory citlivé na deformáciu.

Základnou úlohou odporového tenzometra je reagovať príslušnou zmenou odporu na mechanickú deformáciu vyvolanú pôsobiacou silou. Často využívaným zariadením je tzv. *silomerný člen*, tvorený votknutým nosníkom s nalepenými tenzometrami, pričom sila pôsobí na voľný koniec nosníka (Obr. 24). Pôsobiacou silou F je nosník namáhaný v oblasti pružných deformácií, a to na strane pôsobiacej sily ťahom a na strane odvrátenej tlakom: tenzometre A (s odpormi R_1 a R_2) sa teda naťahujú a tenzometre B (R_3 , R_4) zmŕšťujú. Zapojením tenzometrov A a B do rôznych vetiev mostíka rastie citlivosť silomerného člena a súčasne dochádza ku kompenzácií závislosti odporu tenzometrov na teplote.

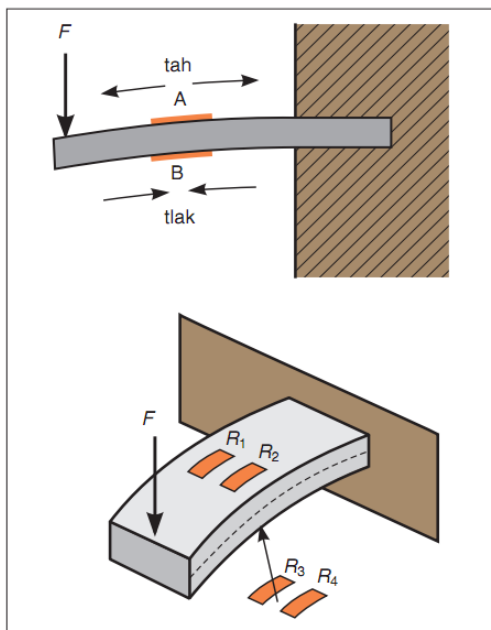
Odporové tenzometre patria medzi senzory s vynikajúcou presnosťou a veľmi dobrými dynamickými vlastnosťami. Na údaj tenzometra však pôsobí mnoho vedľajších rušivých



Obr. 23 Realizácia meracích členov s polovodičovými senzormi

Meranie procesných veličín

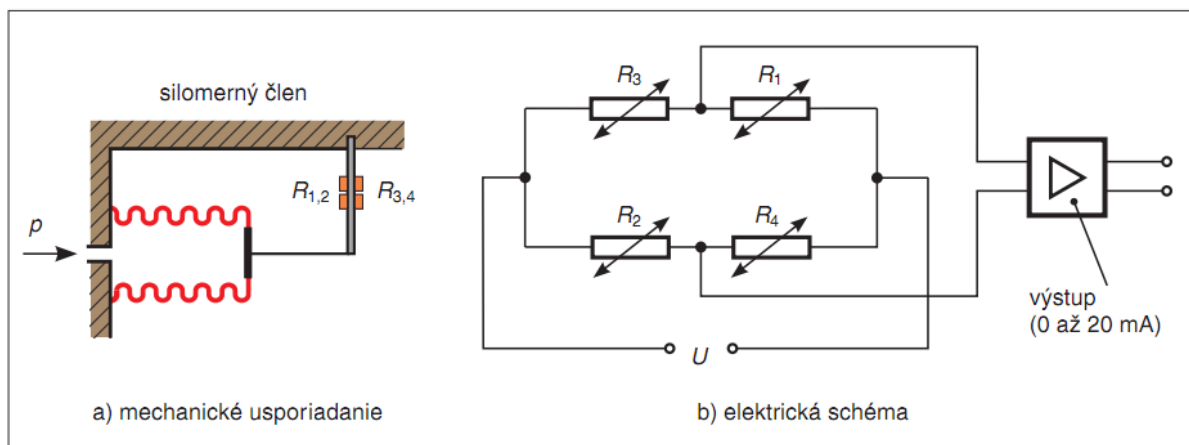
vplyvov (napr. teplota, veľkosť prechádzajúceho prúdu), ktoré môžu ovplyvniť presnosť merania.



Obr. 24 Silomerný člen v tvare nosníka

Odporové tenzometre sa používajú na meranie malých aj veľkých deformácií, mechanických, napätí, síl, momentov, namáhání a ostatných veličín, ktoré je možné na tieto veličiny previesť. Tenzometre môžeme teda využiť aj na meraní tlaku v spojení s deformačnými manometrami, kde odporový tenzometer slúži na prevod mechanického signálu na elektrický signál. Staršie typy tenzometrických snímačov tlaku využívali prepojenie silomerného člena s deformačným prvkom (vlnovecom alebo membránou), ako zobrazuje Obr. 25. Na každej strane nosníka silomerného člena sú nalepené dva polovodičové tenzometre zapojené do meracieho mostíka. Pri pôsobení sily vyvolanej účinkom tlaku sú tenzometre R1 a R2 namáhané na ťah, tenzometre R3 a R4 na tlak. V meracom mostíku sú tenzometre zapojené tak, že tie, ktoré sú namáhané rovnakým smerom, sú umiestnené v protiľahlých vetvách mostíka.

Výsledná citlivosť je potom štvornásobná v porovnaní s použitím jedného tenzometra. Signál z diagonály mostíka sa spracováva v zosilňovači napr. na unifikovaný prúdový výstup 0 až 20 mA.

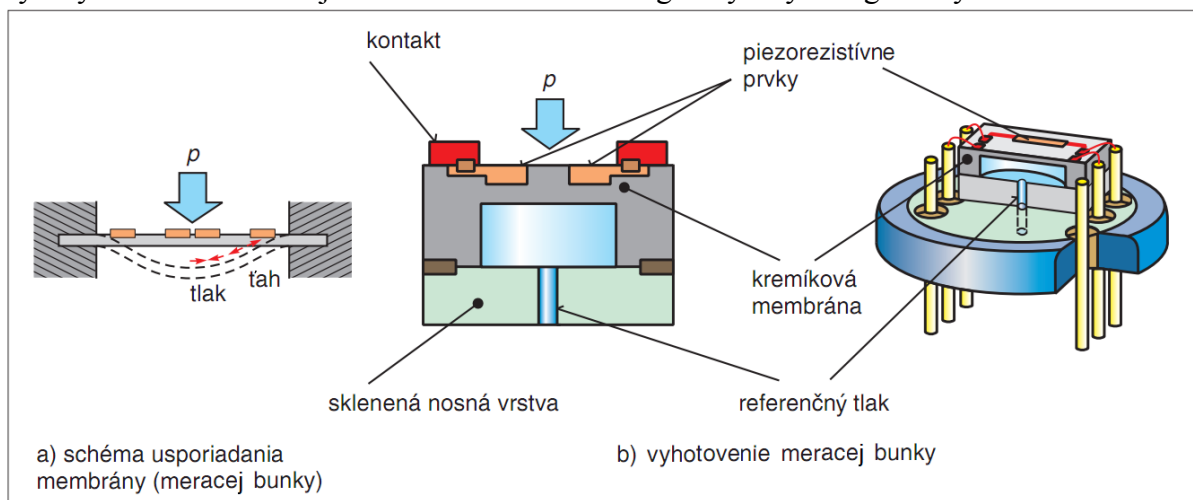


Obr. 25 Snímač tlaku so silomerným členom

V novších snímačoch tlaku sa používajú tlakomerné bunky s polovodičovými tenzometrami zhotovovanými difúznou technológiou (Obr. 23). Základom snímača tlaku s difundovanými polovodičovými tenzometrami je meracia bunka transformujúca tlak na elektrický signál (zmena odporu). Jej podstatnou časťou je kremíková membrána, na ktorej povrchu sú vytvorené polovodičové tenzometre a ktorá je súčasne pružným prvkom pre snímanie tlaku. Ide o kruhovú tenkú membránu konštantnej hrúbky s priemerom spravidla menším ako 6 mm, ktorá je po obvode votknutá a je namáhaná tlakom rovnomerne rozložený po celej jej ploche. Na Obr. 26a je plne zakreslená membrána v nezaťaženom stave a čiarkovane v stave pri zaťažení tlakom p (pozn.: priehyb membrány je na obrázku veľmi zväčšený). V zaťaženom stave je možné na membráne identifikovať miesta, kde sú povrchové napätia v tlaku a v ťahu. Napätie povrchových vlákien sa meria tenzometricky.

Meranie procesných veličín

Kremíkový senzor tlaku je vytvorený ako kremíkový čip (Obr. 26b) s vlastnou membránou s hrúbkou 2 až 5 μm pre malé a 20 až 50 μm pre veľké tlaky. Technológia výroby takého senzora je obdobná ako technológia výroby integrovaných obvodov. Časť



Obr. 26 Senzor tlaku s difúznymi polovodičovými tenzometrami (piezorezistívny)

senzora, ktorá funguje ako membrána (jej priemer je 0,8 až 6 mm), je vytvorená v strednej časti substrátu odleptaním z opačnej strany ako tej ktorá nesie piezorezistory. Riadením procesu leptania možno ľahko vytvoriť membránu požadovanej hrúbky. Rovnakým výrobným postupom je teda možné vytvárať senzory tlaku s rôznymi meracími rozsahmi. Piezorezistívne prvky sú rezistory vytvorené planárne difúznou technológiou, pri ktorej je difúziou vpravené na vymedzené miesta v kremíkovej membráne určité množstvo dotačnej prísady. Tým vzniknú difúzne rezistory. Usporiadanie difúzných odporov a povrchovej koncentrácie difúznej vrstvy sú volené optimálne z hľadiska citlivosti, teplotnej závislosti a linearity. Difúzne rezistory, orientované v smere povrchových napätí, sú vytvorené jednak na obvode membrány, tzn. v miestach, kde je podľa Obr. 23a namáhaná ťahom, a jednak v strede membrány, kde dochádza k namáhaniu tlakom. Kremíkový substrát je pripevnený na základovej doske zo špeciálneho skla. Lineárny vzťah medzi tlakom na membránu a mechanickým napätím je platný len pre deformácie, ktoré sú malé v porovnaní s dĺžkou membrány. Prostredníctvom kovových vodivých kontaktov, ktoré sú vyvedené mimo oblasť meracej membrány, sú difúzne rezistory prepojené do Wheatstonovho mostíka (schéma zapojenia je analogická ako na Obr. 25). Vhodným usporiadaním meracieho mostíka je možné zväčšiť citlivosť snímača a potlačiť nelinearitu aj účinok ovplyvňujúcich veličín, hlavne teploty. Kremíkové polovodičové tenzometry majú teplotný koeficient približne $2,2 \cdot 10^{-3}/\text{K}$, takže je nutné použiť určitý spôsob kompenzácie zmeny teploty. Najjednoduchšie je doplniť merací mostík teplotne závislými rezistormi. Pri číslicovom spracovaní meracieho signálu je možné kremíkové senzory teplotne kompenzovať softvérovou, a to na základe ich známej závislosti na teplote. Súčasne možno korigovať aj nelineárnu charakteristiku senzora.

Medzi hlavné prednosti kremíkovej membrány, ako deformačného prvku, patrí platnosť Hookovho zákona v širokom rozsahu deformácií, zanedbateľná hysterezia, použiteľnosť aj pri vyššej teplote a chemická odolnosť. Je možné realizovať senzory veľmi malých rozmerov umožňujúce merať tlaky na úrovni od jednotiek kilopascalov až po desiatky megapascalov pri teplote média v rozsahu -55 až $+125$ $^{\circ}\text{C}$. V snímačoch tlaku s kremíkovou membránou je možné tiež vytvoriť vyhodnocovací obvod modernou polovodičovou technológiou priamo na kremíkovom substráte s možnosťou súčasného snímania teploty membrány a kompenzácie jej vplyvu. Výhodou je tiež ľahká hromadná výroba senzorov (cenová výhoda) a snímačov s vstavanou elektronikou, vrátane procesorov a pamätí. Je možné

vyrobiť snímače dostatočne citlivé, so stabilnými vlastnosťami, a širokými meracími rozsahmi a s veľmi malými rozmermi.

Kryštalický kremík predstavuje takmer ideálny materiál pre senzor tlaku. Je v dostatočnom rozsahu deformácie dokonale pružný (nemôže byť plasticky deformovaný, v praxi nevykazuje preklzávanie ani hysteréziu) a pomer možného zaťaženia k hmotnosti kremíkoveho meracieho prvku je päť krát väčší ako pri oceli. S vlastnosťami membrány súvisí jej opakovateľné chovanie pri zmenách meraného tlaku a teploty okolitého prostredia. Ak je kremíková membrána vystavená preťaženiu tlakom, bude až do jej mechanického poškodenia údaj tlaku zodpovedať deklarovanej neistote snímača. Ako náhle dôjde k mechanickému poškodeniu membrány, ktorá sa roztriešti podobne ako sklo, preruší sa minimálne jedna vetva meracieho mostíka, čo sa prejaví na výstupe snímača (hodnota signálu bude mimo rozsah).