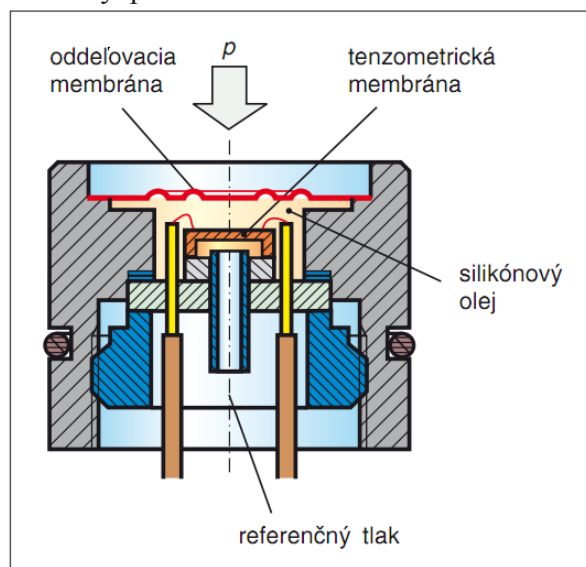


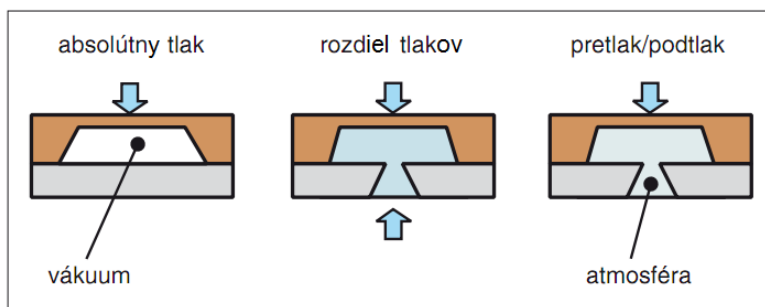
5.4.3. Prevádzkové snímače s kremíkovým sensorom

Samotným kremíkovým sensorom je možné merať iba čistý, suchý vzduch alebo iné neagresívne plyny. Voda, vodné pary a ďalšie zložky pôsobia na zložitú zostavu senzora (hliníkové a iné pokovovanie, zlaté vodiče a pod.), ktorý v týchto prípadoch nie je odolný proti pôsobeniu meraného média. V priemyselných podmienkach je teda spravidla potrebné kremíkový sensor chrániť pred stykom s meraným médiom. K tomu sa v tlakomerných systémoch používa kovová oddeľovacia membrána a olejová náplň (obr. 27). Oddeľovacia membrána musí byť skonštruovaná tak, aby neovplyvňovala vlastnosti kremíkoveho senzora. Napríklad v snímači s kremíkovou membránou s činnou plochou asi 2 mm^2 je priemer oddeľovacej membrány približne 10 mm. Robustná konštrukcia snímačov s kremíkovými senzormi veľmi dobre odoláva vibráciám a rázom.



Obr. 27 Kremíkový sensor relatívneho tlaku v kombinácii s oddeľovacou membránou

Snímače s kremíkovými senzormi môžu byť prispôbené na meranie ako absolútneho tlaku, tak aj pretlaku, podtlaku alebo rozdielu tlakov. V prípade merania absolútneho tlaku je



Obr. 28 Meranie absolútneho a relatívneho tlaku

priestor pod membránou evakuovaný a uzatvorený, pri meraní pretlaku alebo podtlaku je priestor pod membránou prepojený s okolitou atmosférou (Obr. 28). Snímače tlaku s kremíkovou membránou sa používajú na meranie pretlaku až do 60 MPa a podtlaku do -100 kPa .

Na Obr. 29 je digitálny manometer typu PS 111 (BHV Sensory), ktorého základným stavebným prvkom je polovodičový sensor s oddeľovacou membránou z antikorozynej ocele. Výstupný signál senzora je digitalizovaný a spracovaný mikroprocesorom. Prístroj umožňuje merať v rozsahoch od 0 až 6 kPa do 0 až 60 MPa. Príkladom veľmi presného meradla je prenosný prístroj Jofra APC (Tectra), ktorý pracuje s neistotou 0,01 % z rozsahu v ôsmich rozsahoch od -85 kPa do $+70 \text{ MPa}$ (Obr. 30).

Na Obr. 31 sú zobrazené vyhotovenia prevádzkových snímačov tlaku od rôznych výrobcov, ktoré využívajú senzory s kremíkovou membránou s polovodičovými



Obr. 29 Digitálny manometer (BHV Sensory)

Meranie procesných veličín

Obr. 30 Presný prenosný tlakomer (Tecra)

tenzometrami. Robustný snímač DMP 333 (BD Sensors) je špeciálne skonštruovaný pre použitie v najťažších prevádzkových podmienkach (rozsah od 0 až 6 MPa do 0 až 60 MPa). Snímače DMP 331 (BHV Sensory), určené pre univerzálne použitie vo všetkých oblastiach priemyslu, sú k dispozícii s rozsahmi od 0 až 100 kPa do 0 až 2,5 MPa. Snímače série Z (Cressto) umožňujú merať pretlak až do 6 MPa a rozdiely tlakov až $\pm 2,5$ kPa.

Rovnaký kremíkový senzor sa používa aj v ponorných sondách pre meranie hydrostatického tlaku (napr. pri meraní polohy hladiny); ide o ponorný snímač zavesený na lane alebo na tyči. Napríklad snímače radu Deltapilot S (Endress+Hauser) môžu mať merací rozsah od 1 000 Pa do 1 MPa (Obr. 32). Kábel, ktorým je pripojená sonda, je vybavený prepojovacou trubičkou (kapilárkou) z plastu, určenou pre prepojenie

s prostredím s barometrickým tlakom. Výstupný signál zo snímača je tak pri zmenách barometrického tlaku automaticky kompenzovaný.

5.5. Piezoelektrické snímače tlaku**5.5.1. Piezoelektrický jav**

Pri pôsobení mechanických deformácií dochádza v niektorých druhoch kryštálov k vyvolaniu elektrického náboja. Tento dej je recipročný, takže priložením striedavého elektrického poľa sa kryštál naopak mechanicky rozkmitá. Uvedené vlastnosti majú napr. kremeň, titaničitán bárnatý, titaničitán olovnatý, Seignettova soľ, niektoré makromolekulárne látky atď. V praxi sa najčastejšie využívajú vlastnosti SiO_2 a BaTiO_3 . Piezoelektrický prvok sa získa z kryštálu napr. kremeňa vyrezaním doštičky s hranami rovnobežnými s jednotlivými osami kryštálu (elektrickou – x , mechanickou – y , optickou – z), ako zobrazuje Obr. 33. Ak pôsobí sila kolmo na *optickú os*, kryštál sa zelektrizuje a na plochách kolmých na elektrickú os sa objaví elektrický náboj.

Ak pôsobí na kremennú doštičku rovnomerne rozložená sila F_x pozdĺž *elektrickej osi* x , hovorí sa o tzv. *pozdĺžnom piezoelektrickom jave*, pri ktorom sa záporné body kryštalickej mriežky posunú vzhľadom ku kladným bodom, čo vyvolá náboj na plochách s kovovými elektródami.

Náboj Q vyvolaný na každej stene kolmej k elektrickej osi kryštálu bude

$$Q = K_p F_x \quad (11)$$

kde

K_p je piezoelektrická konštanta (piezoelektrický modul).



Obr. 31 Príklady vyhotovenia prevádzkových snímačov tlaku s kremíkovou membránou (BHV Sensory, Cressto)

Meranie procesných veličín

Z rovnice (11) je zrejmé, že veľkosť nábojov vyvolaných pri pôsobení sily pozdĺž elektrickej osi x nezávisí na rozmeroch výbrusu. Ak pôsobí na kryštál sila F_y v smere mechanickej osi y , objavia sa náboje opäť na plochách kolmých na elektrickú os, avšak smer polarizačného vektora je záporný a veľkosť náboja závisí na geometrických rozmeroch kryštálu. Hovorí sa o tzv. *priečnom piezoelektrickom jave*. Veľkosť náboja Q je v tomto prípade daná vzťahom

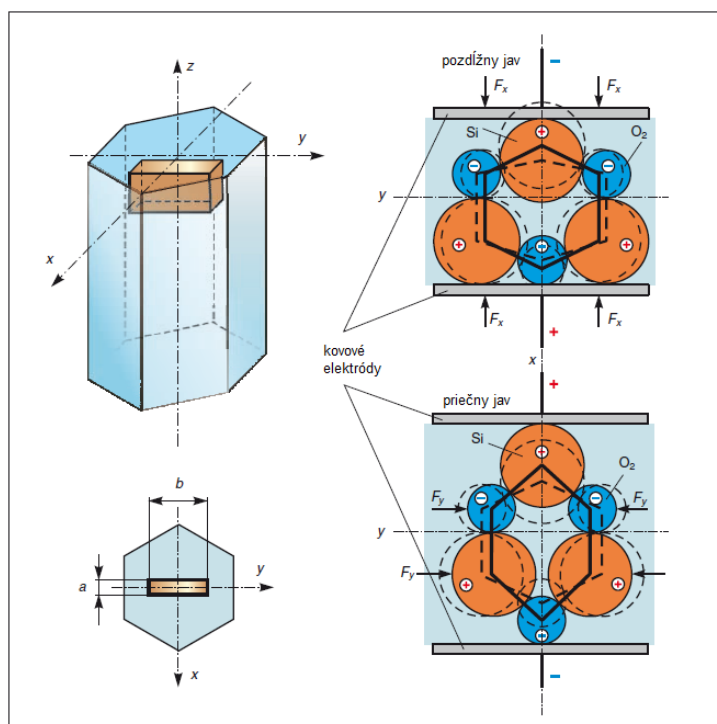
$$Q = -K_p F_y \frac{b}{a} \quad (12)$$

kde b , a sú rozmery výbrusu.

Piezoelektrická konštanta kremeňa má pomerne malú hodnotu, avšak prednosťou kremeňa je lineárna statická charakteristika, nepatrná závislosť piezoelektrickej konštanty na teplote, veľký merací rozsah daný mechanicou pevnosťou kryštálu a široké rozmedzie pracovnej teploty (až do 550 °C). Piezoelektrické senzory na báze piezoelektrickej keramiky ($BaTiO_3$) sú v porovnaní s kremennými asi desaťkrát citlivejšie, avšak pri výrazne nižšej maximálnej pracovnej teplote (asi 200 °C).



Obr. 32 Ponorné sondy pre meranie hydrostatického tlaku v tyčovom a lanovom vyhotovení



Obr. 33 Piezoelektrický jav v kryštáli kremeňa

Piezoelektrický senzor je vytvorený z kryštálového výbrusu v tvare doštičky alebo disku, ktoré sú vybavené vodivými elektródami. Rozmery výbrusu sú určené z maximálneho prípustného mechanického napätia, ktoré závisí na použitom piezoelektrickom materiáli. Senzor sa pri pôsobení neelektrickej veličiny chová ako generátor elektrického signálu. Predstavuje zdroj napätia s veľkým vnútorným odporom, pretože dielektrikum má značný izolačný odpor. Medzi elektródami piezoelektrického senzora vzniká Q pri pôsobení meranej veličiny, ktorý sa prevádza na napätie podľa vzťahu

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{K_p F_x}{C} \quad (13)$$

kde U je napätie na výstupe zo senzora a C kapacita senzora vrátane prívodov.

Výstupné napätie piezoelektrického senzora je relatívne veľké, pre meranie však nie je možné použiť priamo ukazujúci merací prístroj. Medzi merací prístroj a senzor musí byť zaradený zosilňovač s veľkým vstupným odporom, ktorého hlavnou úlohou je zaistiť

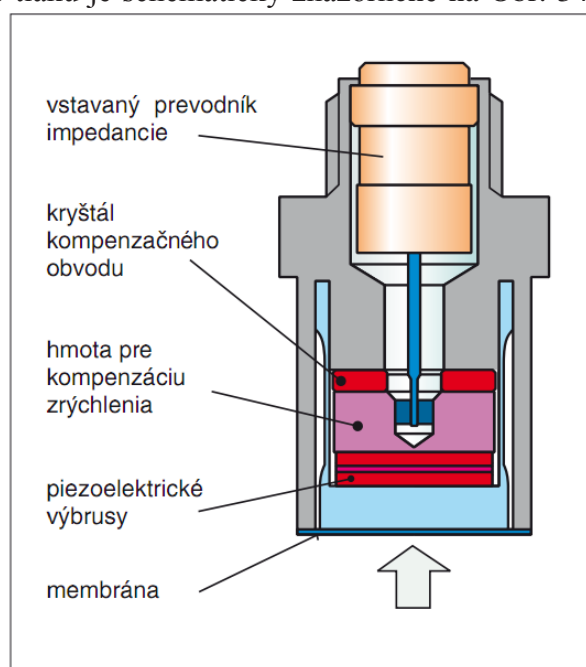
impedančné prispôsobenie, menej už vlastné zosilnenie signálu. Bežne sa využívajú obvody realizované s tranzistormi riadenými elektrickým poľom.

5.5.2. Konštrukcia piezoelektrického snímača tlaku

Piezoelektrický senzor tlaku je vytvorený spojením niekoľkých diskov z piezokeramiky. Podmienkou dosiahnutia lineárnej charakteristiky senzora je mechanické predpätie. Priamo do telesa piezoelektrického snímača tlaku býva obvykle zabudovaný impedančný prevodník. Piezoelektrický snímač sa vyznačuje malými rozmermi, môže pracovať pri vysokých teplotách. Má veľmi priaznivé dynamické vlastnosti, jeho odozva je rádovo niekoľko mikrosekúnd. Piezoelektrické snímače tlaku sú vhodné pre meranie časovo premenných tlakov a rýchlych dejov. Merať statický tlak v podstate nemôžu, pretože náboj vzniknutý po pôsobení tlaku sa vplyvom nedokonalosti izolácie vybíja a napätie na elektródach stále klesá. Snímače obvykle majú vstavanú kompenzáciu parazitného pôsobenia vibrácií. Sú vhodné pre meranie pri vysokých teplotách (až do 500 °C). Maximálna horná medza meracieho rozsahu je pri snímačoch tohto typu 100 MPa.

Usporiadanie piezoelektrického snímača tlaku je schematicky znázornené na Obr. 34.

Snímač obsahuje dva piezoelektrické výbrusy v tvare disku, ktoré sú zapojené elektricky paralelne a ich náboje sa tak sčítajú. Prenos tlakovej sily na kryštál je sprostredkovaný membránou. Aby sa vylúčilo šmykové namáhanie, musia byť elektródy a rovina kryštálu paralelné s presnosťou 10 μm pri nerovnosti povrchu menšej ako 1 μm. Také vlastnosti možno zaistiť iba veľmi dokonalými procedúrami leštenia povrchu. Prípadné nerovnosti by mohli vyvolať miestne napätie vedúce až k prasknutiu krehkého výbrusu. Snímač je vybavený obvodom pre kompenzáciu vplyvu zrýchlenia, k čomu sa využíva pridaná hmota a piezoelektrický kryštál s opačnou polarizáciou. Kryt, v ktorom je zabudovaný zosilňovač s veľkým vstupným odporom, celý snímač tiež elektricky a magneticky tieni.



Obr. 34 Schéma usporiadania piezoelektrického snímača tlaku

Prednosťou piezoelektrických snímačov tlaku sú hlavne ich dynamické vlastnosti, ktoré ich predurčujú pre meranie dynamických tlakových dejov, napr. tlakových pulzácií v motoroch a kompresoroch. Piezoelektrické snímače tlaku môžu byť ľahko miniaturizované až na rozmery niekoľkých milimetrov. Nie sú použiteľné pre meranie statických tlakov a ich nevýhodou je aj ťažšie spracovanie meracieho signálu.

5.6. Rezonančné snímače tlaku

5.6.1. Princíp rezonančných snímačov

V rezonančných snímačoch tlaku sa využíva závislosť vlastnej frekvencie mechanického kmitania rezonančného prvku na jeho mechanickom napätí. Prvé rezonančné snímače tlaku pracovali s kmitajúcou strunou (Obr. 35). Jeden koniec struny je prichytený k membráne, druhý k telesu snímača. Kmitanie struny je budené elektromagneticky. Struna s dĺžkou l a hmotnosťou m napínaná silou F má rezonančnú frekvenciu f_0 pre ktorú platí

$$f_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}} \quad (14)$$

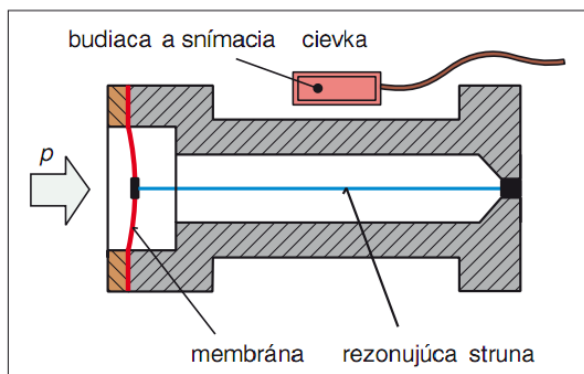
Ak sa vyjadrí hustota ρ , mechanické napätie σ a Youngov modul pružnosti E nasledovne

$$\sigma = \frac{m}{V} = \frac{m}{lS} \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \varepsilon E = \frac{\Delta l}{l} E \quad (16)$$

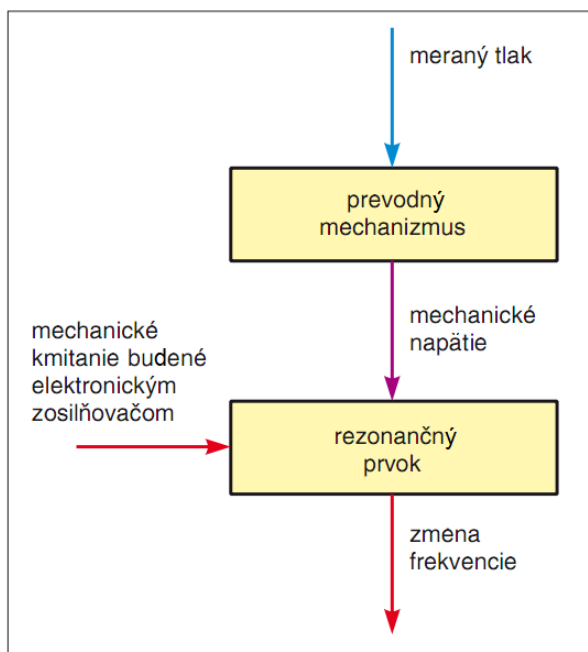
po dosadení z (15) a (16) do (14) sa získa

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\varepsilon E}{\rho}} \quad (17)$$



Obr. 35 Principiálne usporiadanie snímača tlaku s rezonujúcou strunou

Zo vzťahu (17) je zjavné, že vlastnú frekvenciu rezonátora ovplyvňujú rozmer a tvar kmitajúceho prvku, jeho merná hmotnosť, modul pružnosti materiálu, z ktorého je vyrobený, a mechanické napätie. Pri danom usporiadaní zmena tlaku pôsobiaceho na membránu vyvolá zmenu mechanického napätia struny, a tým zmenu jej vlastnej frekvencie. Detekovaná zmena frekvencie je nositeľom informácie o zmene tlaku.



Obr. 36 Bloková schéma rezonančného snímača tlaku

Bloková schéma rezonančného snímača tlaku je na Obr. 36. Meraný tlak pôsobí prostredníctvom vhodného prevodového mechanizmu (najčastejšie membrána) na rezonančný prvok, čo môže byť struna, valec, membrána alebo miniatúrny mikromechanický prvok (v najmodernejších snímačoch). Mechanický rezonátor je zapojený do spätnoväzbovej slučky oscilátora s elektronickým zosilňovačom. Pôsobením tlaku na rezonančný prvok v ňom vznikajú ťahové alebo tlakové sily určujúce frekvenciu oscilátora.

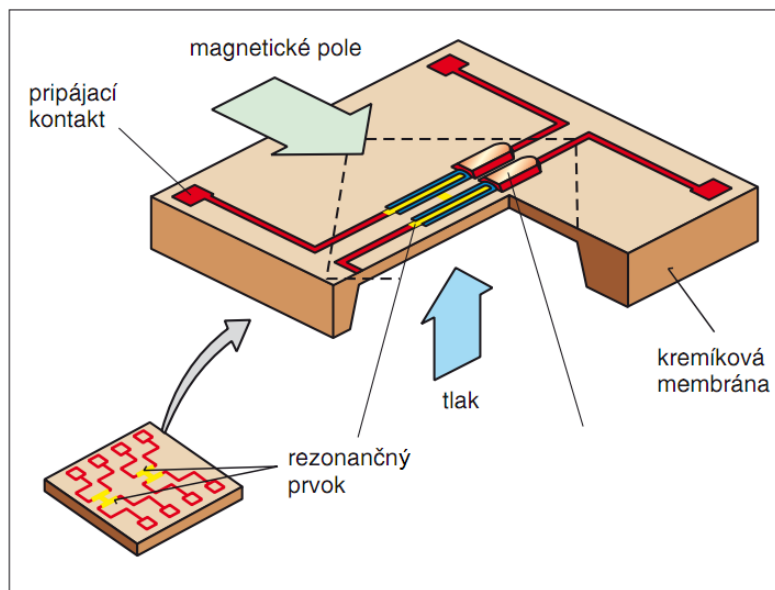
Pretože zmena teploty ovplyvňuje modul pružnosti a rozmery aj hustotu meracieho prvku, je tu v každom prípade potrebné korigovať vplyv teploty na výstupný signál. Vplyv sa koriguje v elektronickej časti prístroja.

5.6.2. Mikromechanický rezonančný senzor

Na Obr. 37 je schematický náčrt mikromechanického rezonančného senzora tlaku, ktorý pod označením DPharp používa vo svojich snímačoch tlaku a rozdielu tlakov firma Yokogawa. Základným prvkom tejto konštrukcie je rezonátor v tvare písmena H, vytvorený vo vnútri evakuovanej dutiny mikroelektronickým obrábaním monokryštálu kremíka (technika MEMS). Rezonátor je umiestnený v jednosmernom magnetickom poli, ktoré je vytvorené permanentným magnetom, a je budený elektromagnetickou indukciou pôsobením striedavého prúdu s použitím zosilňovača s premenlivým zosilnením, ktorý udržiava konštantnú amplitúdu kmitov rezonátora. Nosníky rezonátora majú hrúbku 5 μm a dĺžku 500 μm . Umiestnenie v evakuovanej komôrke chráni rezonátor pred vplyvom teploty okolia a vlhkosťou.

Meranie procesných veličín

Senzor typu DPharp je tvorený kremíkovou membránou, na ktorú prostredníctvom kovovej oddeľovacej membrány a stabilnej kvapaliny (napr. silikónového oleja) zdola pôsobí meraný tlak. Na membráne sú dva rezonátory umiestnené tak, že pri priehybe membrány je jeden namáhaný tlakom a druhý (v absolútnej hodnote rovnako veľkým) ťahom. Pružná deformácia kremíkovej membrány účinkom tlaku teda vyvoláva zmenu mechanického napätia



Obr. 37 Mikromechanický rezonančný senzor tlaku

v rezonátoroch, a teda zmenu ich vlastnej frekvencie priamo úmernú pôsobiacemu tlaku. Základná vlastná frekvencia rezonátora je asi 80 kHz a jej zdvih zodpovedajúci meraciemu rozsahu senzora asi 20 kHz. Celý senzor je magneticky tienený na ochranu pred účinkami vonkajších magnetických polí.



Obr. 38 Rezonančný snímač tlaku a rozdielu tlakov (Yokogawa)

Rezonátory vďaka zvolenému usporiadaniu senzora poskytujú frekvenčné výstupy rovnakej veľkosti, ale s opačnými znamienkami (zdvojnásobenie citlivosti). Frekvenčné signály sú spracovávané mikroprocesorom, ktorý pomerne zložitým výpočtom stanovuje z nameraných frekvencií súčasne rozdiel tlakov aj statický tlak.

Na Obr. 38 je prevádzkový snímač tlaku radu DPharp EJX od firmy Yokogawa s kremíkovým mikrorezonátorom. Meracie rozsahy snímačov tohto radu sú od 0 až 150 kPa do 0 až 50 MPa, neistota v štandardnom vyhotovení 0,04 %. Neistota dosiahnuteľná po skorigovaní vplyvu teploty je až 0,01 %.

Rezonančné snímače tlaku patria medzi najpresnejšie tlakomery. Vlastný senzor pracuje bez hysterézie a vyznačuje sa vynikajúcou stabilitou aj opakovateľnosťou údajov. Výstupným signálom je frekvencia, čo je výhodné z hľadiska prevodu na číslicový signál. V porovnaní s inými senzormi

poskytuje na výstupe podstatne väčší odstup signálu od šumu (oproti napr. piezorezistívnym senzorom má kremíkový rezonančný senzor štyrikrát väčší výstupný signál). Chyby výstupného údajov spôsobené kolísaním teploty a statického tlaku sú vďaka zavedeným teplotným korekciám zanedbateľné.