

PRINCÍP ČINNOSTI REZONANČNÝCH SNÍMAČOV

Ing. Zdeněk Faltus

D-Ex Limited, s. r. o., Bratislava

podľa materiálov firmy Paroscientific, Inc. a DH Instruments, Inc.

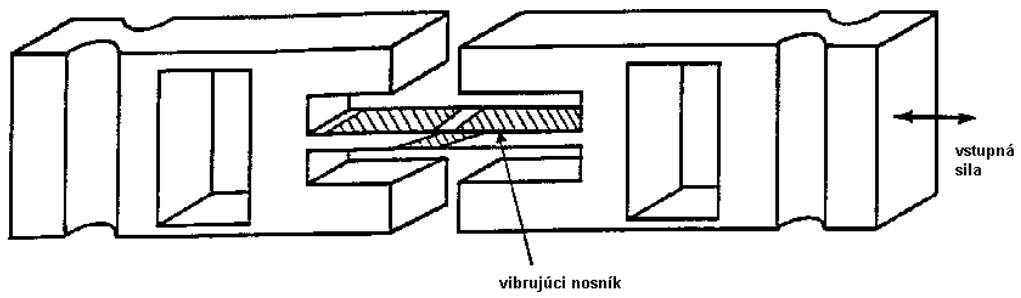
V mnohých oblastiach sa vyžaduje meranie tlaku s presnosťou na stotinu a dokonca na tisíciny percenta. Samozrejme, dosiahnutie takejto presnosti nemôžeme očakávať od deformačných tlakomerov, dokonca ani od rady technicky pokročilejších zariadení, ako sú napríklad piezorezistívne snímače tlaku. Ak musí snímač pracovať v nepriaznivých vonkajších podmienkach, ako je vysoká teplota, alebo silné vibrácie, zaistenie uvedenej presnosti je len ťažko riešiteľné. Malé rozmery, nízka hmotnosť a malá spotreba energie sú ďalšie z požiadaviek. A na záver, senzor musí mať rýchlu odozvu, aby bol schopný pracovať v rýchlom digitálnom móde, umožňoval zber dát a zaradenie do riadiacich systémov s automatickým odčítaním.

Riešením vyššie popísaného problému sú snímače tlaku Digiquartz od firmy Paroscientific, Inc. Tieto snímače využívajú rezonátory z kryštalického kremíka k detekcii pnutia (vyvolaného tlakom) prostredníctvom zmien frekvencie oscilácií. Tlak pôsobiaci na vlnovec, alebo Bourdonovu trubicu generuje silu, ktorá mení rezonančnú frekvenciu kryštálu. Tieto snímače pokrývajú rozsahy absolútneho tlaku od 100 kPa do 100 MPa, sú relatívne necitlivé na teplotu a zvyškový teplotný efekt medzi -54 °C a $+100\text{ °C}$ je kompenzovaný pomocou kremenného teplotného snímača. Elektronika snímača poskytuje dvojité frekvenčný výstup (jeden pre tlak a jeden pre teplotnú kompenzáciu), pripojením na počítač je možné sledovať proces v reálnom čase. V inteligentných prevodníkoch sú snímače spojené s digitálnym rozhraním a umožňujú priame digitálne odčítanie na adresovateľnej RS-232 zbernici.

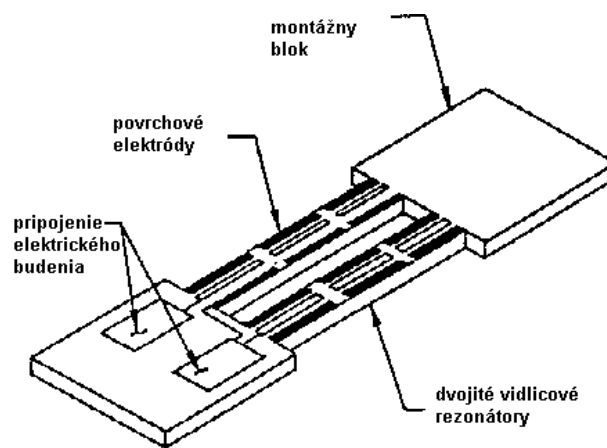
Rezonátory

Rezonátor z kryštalického kremíka v snímačoch Digiquartz je podstatnou časťou presného oscilátora podobného kryštálovým oscilátorom používaným v etalónoch frekvencie, alebo v hodinách, s dlhodobou teplotnou stabilitou v ráde 1.10^{-7} . Ako snímače sily sa používajú rezonátory s jednoduchým nosníkom (obr. 1), alebo ladiace vidlička s dvojitým ukončením – DETF (obr. 2). Oba typy kryštálových rezonátorov využívajú fenomén piezoelektrického pohonu k dosiahnutiu a udržaniu oscilácií nosníka (obr. 3). Elektródy sú zapojené v oscilačnom obvode na vybudenie a udržanie mechanických vibrácií. Rezonančná frekvencia kmitajúceho nosníka je daná jeho rozmermi, zložením a predpätím nosníka. Jeho frekvencia, podobne ako u husľovej struny, sa zvyšuje so vzrastajúcim napätím. Pri stlačení nosníka frekvencia klesá. Nosník je udržiavaný v osciláciách pomocou obvodu, ktorý volne sleduje rezonančnú frekvenciu nosníka, ktorá je určená aplikovanou axiálnou záťažou.

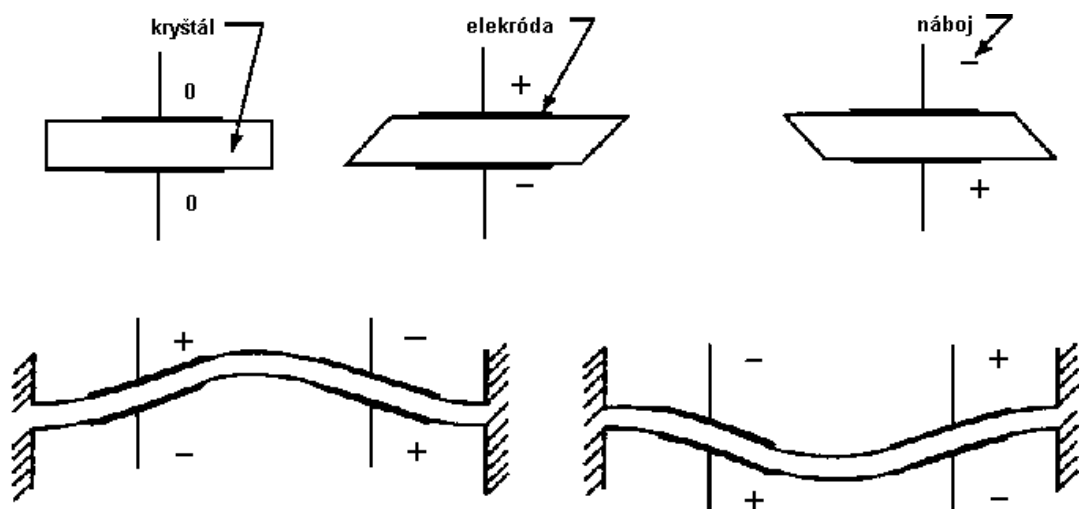
Rezonátor by pracoval aj pri tlaku okolitého prostredia, jeho činnosť sa však výrazne zlepší umiestnením vo vákuu. Elimináciou záťaže od okolitého vzduchu a tlmiacich efektov je možné dosiahnuť hodnotu činiteľa kvality Q viac ako 20 000. Ďalej umiestnenie vo vákuu zlepšuje stabilitu rezonátora zamedzením absorpcie alebo odplyňovaním molekúl z povrchu. U tak malých rezonátorov aj jednomolekulová vrstva znečistenia má rozoznateľný efekt.



Obr. 1 Rezonátor s jednoduchým nosníkom



Obr. 2 Ladiaca vidlička s dvojitým ukončením (DETF)



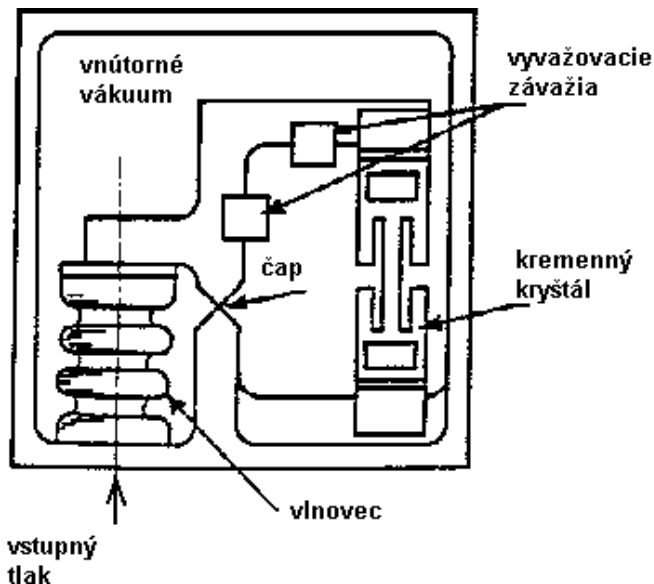
Obr. 3 Princíp piezoelektrického pohonu k dosiahnutiu a udržaniu mechanických vibrácií

Teplotné charakteristiky kremíka použitého v rezonátore citlivom na tlak sa menia podľa zmien Youngovho modulu, teplotnej rozťažnosti a piezoelektrických konštánt. To sa prejaví v zmenách rezonančnej frekvencie, alebo citlivosti na pôsobiacu záťaž. Zmeny činnosti následkom teploty sú charakteristické pre kryštalický kremík, sú nemenné, opakovateľné a merateľné.

Najlepší spôsob, ako kompenzovať vplyv teploty na kremenný rezonátor je použiť druhý rezonátor, ktorý je citlivý iba na teplotu. Na vybudenie teplotného rezonátora je použitý samostatný elektrický oscilátor. Potom dva frekvenčné výstupy zo snímača reprezentujú aplikovaný tlak (s malým tepelným efektom) a teplotu (bez vplyvu tlaku). Tieto dva signály obsahujú všetky informácie potrebné na elimináciu teplotných chýb pre ľubovoľnú kombináciu tlaku a teploty.

Tlakový mechanizmus

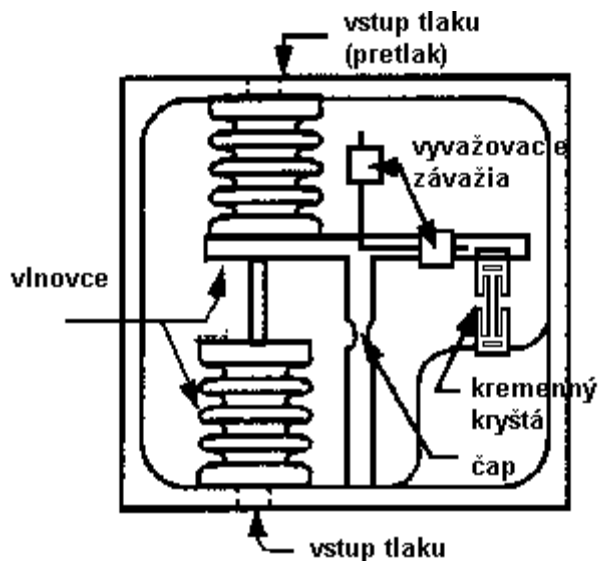
Na prevod vstupného tlaku na axiálnu silu pôsobiacu na kryštalový rezonátor sa používajú mechanizmy s vlnovcom, alebo Bourdonovou trubicou. Snímače môžu byť navrhnuté tak, aby pokrývali rozsah od 100 kPa až do rozsahu viac ako 100 MPa kombináciou rôznych veľkostí vlnovcov a Bourdonových trubíc s rezonátorom s jednoduchým nosníkom, alebo kryštálom DETF. Oba mechanizmy využívajú utesnenú vnútornú komoru (pre zaistenie vákuua požadovaného pre kryštal) a nulový referenčný tlak pre vlnovce i Bourdonove trubice (pre umožnenie merania absolútneho tlaku).



U snímačov absolútneho tlaku vlnovec vyvíja silu pôsobiacu smerom hore na páku. Táto sila je súčinom pôsobiaceho absolútneho tlaku a efektívnej plochy vlnovca. Sila vyvíja moment a cez otočný čap pôsobí proti pevnému kryštálu. Napätie pôsobiace v nosníku rezonátora znižuje rezonančnú frekvenciu oscilácií a umožňuje meranie tlaku. Zmena veľkosti a polohy vlnovca relatívne k otočnému čapu páky umožňuje nastaviť široký rozsah pomeru sily vlnovca na napätie v kryštály. Výsledkom je, že snímače rôznych rozsahov tlaku môžu byť vyrobené s minimálnymi

zmenami komponentov.

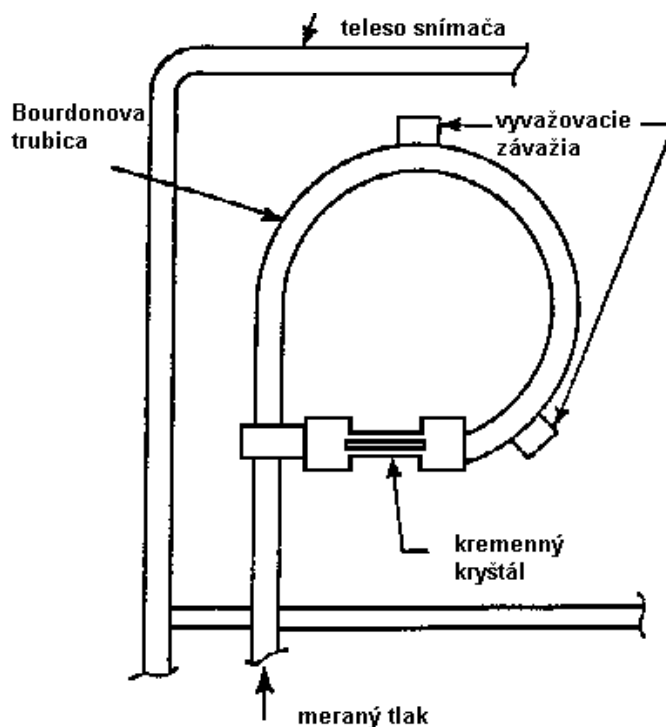
Obr. 4 Snímač absolútneho tlaku s vlnovcom



Snímače diferenčného tlaku môžu byť vyrobené umiestnením druhého vlnovca na opačnej strane páky. Vlnovce pôsobia jeden proti druhému a na kryštál rezonátora sa prenáša iba diferenca tlaku v oboch vlnovcoch.

Obr. 5 Snímač pretlaku, resp. diferenčného tlaku

Druhým typom tlakového mechanizmu je jednoduchá Bourdonova trubica napínajúca kryštálový rezonátor. Bourdonova trubica má pod vplyvom vstupného tlaku tendenciu sa rozvinúť a napína tak kryštálový rezonátor, čím zvyšuje jeho rezonančnú frekvenciu. Napriek tomu, že frekvencia klesá s tlakom v prípade vlnovcového mechanizmu a vzrastá s tlakom v prípade s Bourdonovou trubicou, relatívna zmena frekvencie sa riadi rovnakým fyzikálnym princípom v oboch prípadoch a je preto predmetom rovnakého algoritmu pri prevode frekvencie na hodnotu tlaku.



Obr. 6 Snímač absolútneho tlaku s Bourdonovou trubicou

Oba typy mechanizmov obsahujú teplotne citlivý kryštál pre teplotnú kompenzáciu. Oba snímače sú vyvážené proti vplyvu zrýchlenia pomocou malých pohyblivých závaží. Tieto sú nastavené tak, aby bol snímač necitlivý na lineárne zrýchlenie a vibrácie.

Výstupný signál

Každý snímač produkuje dva frekvenčné výstupy, jeden pre tlak a jeden pre teplotu. Tlakový rezonátor má menovitú frekvenciu asi 38 kHz, ktorá sa mení asi o 10 %, v prípade, že pôsobí plný vstupný tlak. Teplotný signál má menovitou frekvenciu 172 kHz a mení sa 50 ppm na °C.

Vzťah medzi tlakovým výstupným signálom a vstupným tlakom je možné odvodiť zo základných fyzikálnych zákonov pre upevnený kmitajúci nosník.

$$p = C \cdot (1 - T_0^2 / \tau^2) \cdot [1 - D \cdot (1 - T_0^2 / \tau^2)] \quad (1)$$

kde C a D sú kalibračné koeficienty, T_0 je perióda výstupného signálu pri nulovom tlaku a τ je perióda výstupného signálu pri tlaku p . Veličina $(1 - T_0^2 / \tau^2)$ a koeficient D sú bezrozmerné. Z toho vyplýva, že jednotka tlaku vyplývajúca z uvedenej rovnice je daná koeficientom C . Ak už boli raz stanovené príslušné koeficienty, jednotky tlaku je možné jednoducho zmeniť vynásobením koeficientu C vhodným prevodovým faktorom. Zmeny spôsobené teplotou v kremennom tlakovom rezonátore a v tlakovom mechanizme snímača môžu byť kompenzované korekciou koeficientov C , D a T_0 . Normálne by to vyžadovalo meniť koeficienty, ktoré sú funkciou teploty. Tento postup je často využívaný v snímačoch tlaku, v ktorých je teplota meraná termistorom alebo odporovým členom. V našom prípade je možné využiť výhodu existencie frekvenčného výstupu teplotného rezonátora. Nie len, že meranie teploty je oveľa tesnejšie spojené so snímačom tlaku, ale koeficienty tlakového rezonátora je možné parametrizovať v pojmoch frekvencie bez toho, že by sme museli riešiť teplotu v ďalšom kroku. Toto zjednodušuje algoritmus a eliminuje potrebu merania teploty v priebehu kalibrácie. Pre dosiahnutie kompenzácie je treba len merať frekvenciu teplotného rezonátora. Samozrejme, ak má byť teplotný výstupný signál použitý k stanoveniu aktuálnej teploty snímača, jeho koeficienty musia byť tiež určené pri kalibrácii.

Výstup teplotného kryštálového rezonátora popisujú rovnice

$$t = Y_1 \cdot U + Y_2 \cdot U^2 + Y_3 \cdot U^3 \quad (2)$$

$$U = U_t - U_0 \quad (3)$$

kde U_t je perióda výstupného signálu teplotného kryštálu pri teplote t v mikrosekundách, U_0 je perióda výstupného signálu teplotného kryštálu pri 0 °C. Parameter U má rozmer v mikrosekundách, koeficient Y_1 má rozmer °C/μs. Pre definovanie koeficientov C , D a T_0 je použitý iba parameter U . Teplotu je možné vypočítať použitím rovnice (2).

Parametre koeficientov C , D a T_0 sú dané rovnicami

$$C = C_1 + C_2 \cdot U + C_3 \cdot U^2 \quad (4)$$

$$D = D_1 + D_2 \cdot U \quad (5)$$

$$T_0 = T_1 + T_2 \cdot U + T_3 \cdot U^2 + T_4 \cdot U^3 \quad (6)$$

Aby sme dostali hodnotu tlaku, sú merané periódy oboch rezonátorov a riešené rovnice (1), (3), (4), (5) a (6). Riešenie rovnice (2) je len pre určenie teploty a nesúvisí s kompenzačným algoritmom. Meranie výstupnej periódy a výpočet sa vykonáva mikroprocesorom rýchlosťou 70 krát za sekundu s rozlíšením $1 \cdot 10^{-4}$ alebo 0,01 %.

Inteligentný prevodník

Všetky snímače tlaku Digiquartz môžu byť spojené so špeciálnym rozhraním a tvoria tak inteligentní prevodník tlaku. Tento prevodník poskytuje teplotne kompenzovanú informáciu o hodnote meraného tlaku na obojsmerne adresovateľnej zbernici RS-232, ktorá môže byť pripojená na počítač alebo na samostatnú indikačnú jednotku. Digitálne rozhranie využíva dva frekvenčné výstupné signály zo snímača tlaku (odpovedajúce vstupnému tlaku a vnútornej teplote snímača) na výpočet korigovanej hodnoty tlaku a teploty. Rozhranie RS-232 umožňuje úplnú konfiguráciu a riadenie všetkých operácií prevodníka, vrátane rozlíšenia, rýchlosti vzorkovania, integračného času a rýchlosti prenosu. Rozlíšenie je programovateľné od 0,05 do 100 ppm. Rýchlosť prenosu môže byť zvolená od 300 do 19200. Údaj tlaku je možné vyjadriť v ôsmich rôznych jednotkách.

Inteligentné prevodníky sú dostupné v celom rozsahu absolútnych tlakov od rozsahu do 15 PSIA (0,10 MPa) do rozsahu 40 000 PSIA (276) MPa, v rozsahoch pretlaku 15 PSIG (0,10 MPa) do 200 PSIG (1,38 MPa) a diferenčné rozsahy do 3, 6 a 18 PSID, t.j. 0,02 MPa, 0,04 MPa a 0,12 MPa. Napájacie napätie je 5 až 25 V dc s prúdovým odberom od 10 do 24 mA v závislosti na rýchlosti vzorkovania.

Kremenný rezonátor v snímači tlaku predstavuje silné obmedzenie pre použitý vlnovec alebo Bourdonovu trubicu, a preto vstupný tlak spôsobí len veľmi malý mechanický pohyb ($2,5 \cdot 10^{-6}$ m alebo menej). To zvyšuje opakovateľnosť a redukuje hysterézu. Vysoká hodnota činiteľa kvality Q eliminuje šum výstupných signálov, čoho následkom je vysoké rozlíšenie. Využitie frekvenčného výstupu kremenného teplotného snímača na kompenzáciu teploty umožňuje dosiahnuť presnosť 0,01 % z meracieho rozsahu v širokom rozsahu pracovných teplôt.

Inteligentné prevodníky sú tak schopné dosiahnuť parametre na úrovni kvalitných etalónov a to aj v ťažkých okolitých podmienkach. Sú kompatibilné s väčšinou počítačových systémov a zameniteľné s iným prevodníkom bez nutnosti rekalibrácie alebo preprogramovania.

Použitie snímačov Digiquartz v tlakomeroch a kalibrátoroch tlaku firmy DHI

Vynikajúce vlastnosti vyššie popísaných rezonančných snímačov Digiquartz sú využívané aj v prístrojovej technike firmy DH Instruments, Inc. Jedná sa predovšetkým o tlakomery typ *RPM 1* a *RPM 3*, a ďalej o kalibrátory tlaku typ *PPC2* a *PPC2+*. Vynikajúce metrologické parametre (presnosť, dlhodobá stabilita, kompenzácia v širokom rozsahu teplôt), komfort obsluhy a možnosť plnej automatizácie procesu kalibrácie umožňujú ich užívateľovi dosiahnuť vysokú kvalitu a efektívnosť poskytovaných kalibračných služieb.