

VŠEOBECNÝ POPIS PRINCÍPU SNÍMAČOV VIBRÁCIÍ – PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE

GENERAL DESCRIPTION PRINCIPLES VIBRATION SENSOR - PIEZOELECTRIC SENSORS

Pavol ČEKAN – Katarína KORÁLOVÁ

ABSTRAKT

Tento príspevok popisuje všeobecný princíp činnosti vibračných snímačov (akcelerometrov), so zameraním hlavne na piezoelektrické snímače. Poukazuje na ich konštrukčné riešenie, použitie na jednotlivé typy meraní s ohľadom na požadovanú výstupnú veličinu (výchylka, rýchlosť, zrýchlenie).

Kľúčové slová: snímač, vibrácie, zrýchlenie.

ABSTRACT

This paper describes the general principle of operation of vibration sensors (accelerometers), focusing primarily on piezoelectric sensors. It refers to the design, the use of different types of measurements with respect to the desired output variable (displacement, velocity, acceleration).

Key words: sensor, vibration, acceleration

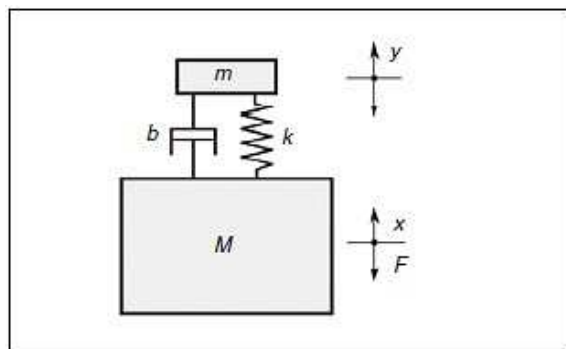
ÚVOD

Objektívne meranie vplyvu vibrácií na človeka si vyžaduje presnú a spoľahlivú technickú vybavenosť. Súčasný trh ponúka široký výber dostupných vibračných snímačov, vrátane rôznych druhov analyzátorov a bohatého príslušenstva pre vykonávanie čo najpresnejších a najspoľahlivejších meraní. Konštrukčné riešenie a jednoduchosť ovládania jednotlivých prvkov meracieho reťazca poskytuje pre užívateľa aj istú dávku komfortu. Vibromerná prístrojová technika rôznych výrobcov sa spravidla líši v detailoch konštrukcie a svojím prevedením. [1]

PRINCÍP ČINNOSTI SNÍMAČOV VIBRÁCIÍ

Akékoľvek merania vibrácií sa musia opierať o analýzu objektívne zistených hodnôt - vybraných určujúcich veličín, zvolených na sledovanom objekte. Tieto hodnoty je možné získať práve vhodným použitím zodpovedajúcej meracej techniky, ktorá je schopná zaznamenať potrebné údaje. Všetky signály sú následne spracované v analyzátore na konečnú požadovanú výstupnú hodnotu. Na základe analýzy nameraných údajov, objektivizácie a ich následného porovnania s prípustnými hodnotami je možné rozhodnúť, či dlhodobou expozíciou vibráciám v rámci sledovaného zdroja, môže dôjsť postupne až k poškodeniu zdravia človeka. [2]

Z fyzikálneho hľadiska je meranie vibrácií zamerané na sledovanie a vyhodnocovanie troch základných veličín, ktorými sú výchylka, rýchlosť, zrýchlenie, ktoré sú navzájom závislé. Vo všeobecnosti pre funkciu snímača vibrácií platí, že pohyb seizmickej hmoty s hmotnosťou m závisí od pohybu objektu o hmotnosti M , ktorého vibrácie sa merajú (Obr. 1). [3]



Obr. 1 - Všeobecný princíp snímača vibrácií. [3]

Všeobecne platí vzťah

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = F_b = M\ddot{x} \quad (1)$$

kde y je výchylka,
 $\dot{y}$ je rýchlosť,
 $\ddot{y}$ zrýchlenie (pohybu seizmickej hmoty snímača vzhľadom k sledovanému objektu),
 $\ddot{x}$ zrýchlenie objektu,
 m hmotnosť seizmickej hmoty snímača,
 M hmotnosť objektu,
 k tuhosť pružiny,
 b súčiniteľ tlmenia,
 F_b budiaca sila.

Na základe vzťahu (1) možno vhodnou voľbou hodnôt parametrov m , b a k vytvoriť snímač ktorejkoľvek z charakteristických veličín kmitavého pohybu, teda výchylky, rýchlosti a zrýchlenia. [3]

PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE VIBRÁCIÍ

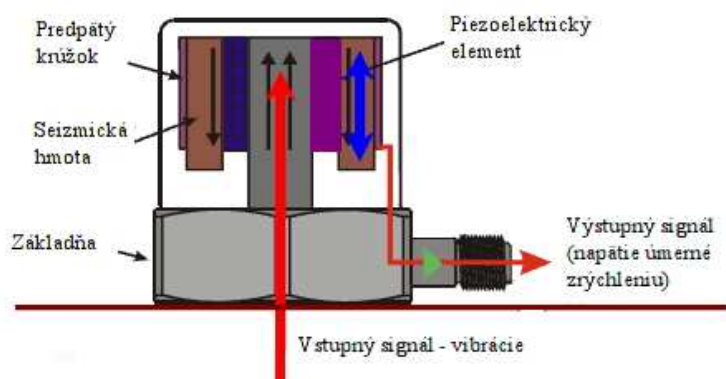
Piezoelektrické snímače sa najčastejšie používajú na meranie zrýchlenia vibrácií, ktorého základný prvok tvorí elektromechanický prevodník týchto vibrácií na elektrický signál, ktorý pracuje na princípe Newtonovho silového zákona a piezoelektrického javu. [4]

Podľa princípu piezoelektrického javu je napätie na výstupe priamo úmerné sile a zrýchleniu (akcelerácii) vibrácií, z čoho vyplýva aj názov tejto skupiny snímačov teda akcelerometre. [4]

Pri výrazne veľkej tuhosti k oproti zanedbateľnej hmotnosti m a tlmenia b môžeme rovnicu (1) previesť do nasledujúceho tvaru

$$ky = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx \ddot{x} \quad (5)$$

Tento snímač spĺňa podmienku $m \ll M$, pričom sa súčasne predpokladá dokonalé tuhé pripojenie akcelerometra k sledovanému objektu. Na Obr. 2 je schematicky zobrazené konštrukčné usporiadanie piezoelektrického akcelerometra. [3]



Obr. 2 - Konštrukčné riešenie piezoelektrického akcelerometra. [5]

Na meranie vibrácií sa najčastejšie používajú nasledujúce akcelerometre využívajúce piezoelektrický jav:

- piezoelektrické (PE),
- piezoelektrické s integrovanou elektronikou (IEPE),
- piezorezistívne (PR). [6]

Pri konštruovaní akcelerometrov sa využívajú piezoelektrické materiály. Piezoelektrické materiály patria do skupiny dielektrických materiálov so spontánnou elektrickou polarizáciou. Spontánná polarizácia existuje aj bez prítomnosti vonkajšieho elektrického poľa a možno ju pozorovať vďaka asymetrickému usporiadaniu

kryštalickej mriežky. Špecifická skupina týchto materiálov - polárne kryštály, vykazujú piezoelektricitu. Tieto materiály sú charakteristické svojimi elastickými vlastnosťami.

Piezoelektricitu je pritom vyvolaná mechanickou deformáciou materiálu. Pnutie vyvolá polarizáciu, spôsobenú posunom centier dipólov, tvorených aniónmi a kationmi. Tento efekt, spôsobený malými zmenami mechanického namáhania sa nazýva priamy piezoelektrický efekt. [7]

Medzi základné druhy materiálov vykazujúcich piezoelektricitu patria:

- prírodné piezoelektrické materiály – typickým príkladom je kremík (kryštalickej SiO_2), pre ktorý typická hodnota piezoelektrického koeficientu je $d = 0,35 \text{ } \mu\text{m/kV}$,
- keramické materiály (polykryštály) - napr. titanát bária (BaTiO_3) a mnoho ďalších materiálov s perovskitovou štruktúrou (pomenovanie je podľa prírodného minerálu perovskitu – CaTiO_3), ide o materiály s rovnakou symetriou kryštalickej štruktúry akú má CaTiO_3 , táto skupina materiálov sa označuje ako PZT keramika,
- polyméry napr. PVDF (alebo PVF_2).

Okrem uvedených tvoria samostatnú skupinu niektoré keramické materiály ako napr. PZT keramika a polyméry, ktoré nie sú prirodzene piezoelektrické. Tieto materiály získavajú potrebné vlastnosti ohrevom na Curieho teplotu, pričom dochádza k vysokej pohyblivosti dipólov. Pri tzv. Curieovej teplote sa dostáva PZT do fázového prechodu a teda do paraelektrickej (nepiezoelektrickej) fázy. Teplota tohto prechodu je dôležitým parametrom pre použitie PZT keramiky. Porovnanie Curieových teplôt pre niektoré piezoelektrické materiály je uvedené v Tab. 1. Materiály vyrábané takýmto spôsobom sa využívajú najčastejšie. Nachádzajú široké uplatnenie okrem iného aj v oblasti výroby snímačov vibrácií. [7], [8]

Tab. 1 - Porovnanie Curieových teplôt pre vybrané piezoelektrické materiály. [8]

Materiál	Curieova teplota T_c [°C]
LiNbO_3	1195
LiTaO_3	610
PZT	150 až 360 podľa zloženia
PMN-PT	0 až 250 podľa zloženia
PZN-PT	150 až 250 podľa zloženia
PbZrO_3	230
PbTiO_3	490

Medzi hlavné zariadenia využívajúce PZT keramiku možno zaradiť:

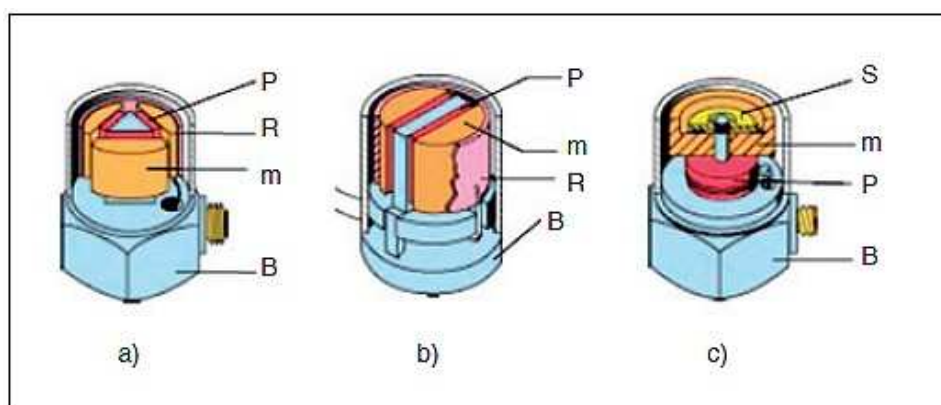
- rezonátory – ultrazvukové čistenie a zváranie, zdroje ultrazvuku pre lekárske diagnostické prístroje, rozprašovanie kvapalín, inhalátory liekov,
- prevodníky – meranie neelektrických veličín ako sila, zrýchlenie, tlak,
- zapalovače, piezoelektrické transformátory,
- frekvenčné keramické filtre,
- aktuátory – piezoelektrické ultrazvukové motorčeky, jemné posuvy v optike a mikroskopii,
- aplikácia pre tlmenie chvenia a hluku,
- senzor nárazu pre otvorenie airbagu v automobiloch, parkovacie senzory, ultrazvukové riadenie detských hračiek. [8]

PZT keramika je najvýznamnejšou vyrábanou feroelektrickou keramikou s vynikajúcimi materiálovými vlastnosťami. Je dôležitým elektrotechnickým materiálom pre oblasti automatizácie a regulácie. V súčasnosti sa naďalej vyrábajú rôzne druhy takýchto materiálov pre najrôznejšie použitie. [8]

PIEZOELEKTRICKÉ AKCELEROMETRE (PE - PIEZOELECTRIC)

Ako už bolo uvedené v predchádzajúcich kapitolách PE akcelerometre sú schopné zaznamenať zrýchlenie vibrácií na základe piezoelektrického javu.

Konštrukčne sú piezoelektrické akcelerometre riešené veľmi často so šmykovým namáhaním piezokryštálu, menej často tradičným tlakovým namáhaním (Obr. 3). V súčasnosti sa veľmi často používa konštrukcia typu Delta Shear s tromi dvojicami piezokryštálu a zotrvačných hmôt upevnených na trojbokom stredovom stĺpiku s použitím napínacieho prstenca (Obr. 3a), čo súčasne zaručuje veľmi dobrú linearitu. Snímače s týmto usporiadaním sa vyznačujú veľkou citlivosťou, malou hmotnosťou a vysokou vlastnou frekvenciou. Pozitívom je tak isto aj oddelenie základne snímača od vlastného snímacieho mechanizmu, čo umožňuje vyrábať snímače použiteľné i pri vyšších teplotách a s väčšou odolnosťou proti mechanickému namáhaniu. [3]



Obr. 1 - Konštrukčné riešenie najčastejšie používaných piezoelektrických akcelerometrov

♦a) Delta Shear®, ♦b) Planar Shear, ♦c) Centre – mounted Compression, s centrálnym tlakovým namáhaním (B – teleso snímača, m – seizmická hmota, P – piezoelektrický prvok, R – napínací prstenec, S – predpätá disková pružina).[3]

Konštrukcia označovaná ako Planar Shear je svojím princípom veľmi podobná predchádzajúcemu typu, nakoľko tu sú použité len dve dvojice kryštálu a zotrvačných hmôt na plochom stredovom stĺpiku (Obr. 3b). Všetky prednosti sú zhodné z predchádzajúcim typom, iba citlivosť je menšia a práve to sa môže v niektorých prípadoch negatívne odraziť aj na výslednej presnosti merania. [3]

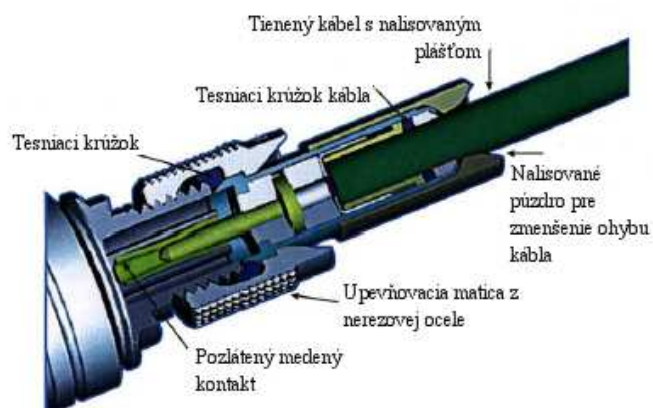
Jednoduchú klasickú konštrukciu predstavuje snímač s centrálnym tlakovým namáhaním (Obr. 3c), vyznačujúci sa menšou citlivosťou pri väčšej hmotnosti zotrvačnej hmoty snímača. Piezoelektrický kryštál a zotrvačná hmota sú pripevnené na valcovom stredovom nosníku s použitím predpätej diskovej pružiny. Nedostatkom tejto konštrukcie je ovplyvnenie signálu zo snímača zmenami tvaru a namáhania jeho základne, čo je možné kompenzovať špeciálnymi materiálmi, ale aj napriek tomu sa tieto snímače radia k typom s väčšími neistotami. K meraniu spravidla používajú väčšie amplitúdy chvenia a rázu, kedy vstupný signál má dostatočný odstup od šumu spôsobeného vonkajšími vplyvmi. Uplatnia sa aj ako referenčné snímače pri kalibrácií, kde sú vonkajšie podmienky riadené a stabilizované (základňa snímača sa často spevňuje vložení berýliovej doštičky). [3]

Rozdelenie podľa použitia a typu meraní:

- **Seizmické akcelerometre** – sú vhodné pre seizmické meranie a meranie vibrácií v budovách. Ich vysoká citlivosť sa dosahuje priamo vnútorným snímacím elementom a nie iba vnútornou elektronikou. Môžu zachytiť aj veľmi slabé chvenie a otrasy.
- **Akcelerometre vibrácií a otrasov** – sú vhodné pre meranie chvenia pohyblivých konštrukcií strojov. Majú veľkú teplotnú odolnosť a robustné prevedenie. Sú odolné voči prachu a vlhkosti.
- **Akcelerometre pre meranie pohybu** – merajú pohyb a zrýchlenie objektu ku ktorému sú pripevnené. [18]

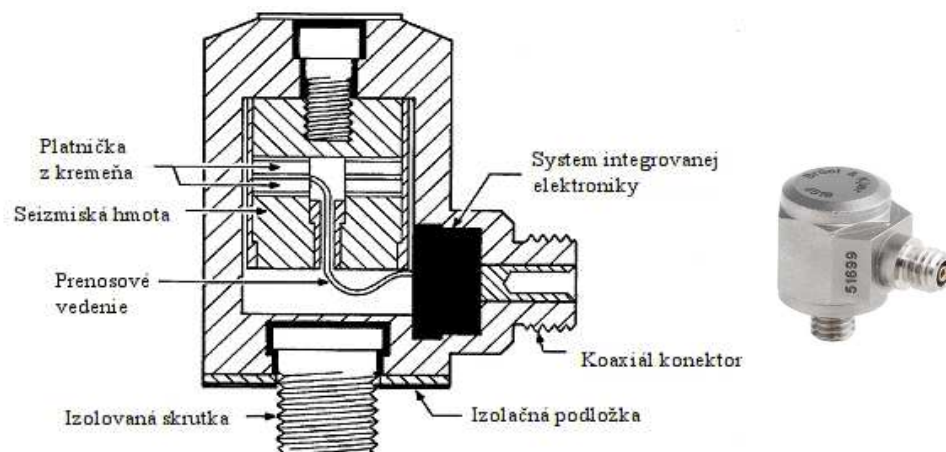
PIEZOELEKTRICKÉ AKCELEROMETRE S INTEGROVANOU ELEKTRONIKOU (IEPE – INTEGRAL ELECTRONICS PIEZOELECTRIC)

Už zo samotného názvu vyplýva, že ide o akcelerometre obsahujúce vnútornú elektroniku. Princíp je rovnaký ako u PE akcelerometrov. Majú väčšiu hmotnosť ako PE akcelerometre práve kvôli zabudovanej elektronike. Táto elektronika obsahuje rôzne filtre a ochranu proti preťaženiu. Výstupný signál so snímača je vo forme napäťovej modulácie prúdu, ktorým je napájaná zabudovaná elektronika. Takto upravený signál je možné merať bežnými metódami a meradlami. Prenos signálu je možný po koaxiálnom kábli (Obr. 4), alebo po klasickej dvojlinke.



Obr. 2 - Konštrukčné riešenie pripojenia koaxiálneho kábla na akcelerometer. [9]

Vnútorné výstupné elektrické obvody sa vyznačujú nízkym výstupným odporom, pričom je možné prenášať signál na väčšiu vzdialenosť (aj na niekoľko desiatok metrov), pri minimálnom rušení okolitého prostredia. Konštrukčné usporiadanie akcelerometra a celkový pohľad na snímač zobrazuje Obr. 5. [10], [6]



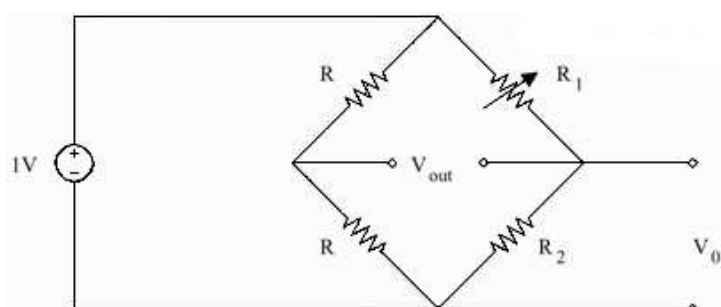
Obr. 3 - Konštrukčné usporiadanie IEPE akcelerometra [11]

V súčasnosti väčšina bežných PE akcelerometrov už obsahuje určité prevedenie s vnútornou elektronikou. Výnimkou sú špeciálne prevedenia akcelerometrov, kedy sa vyžaduje laboratórna presnosť a elektronika môže spôsobiť skreslenie signálu akcelerometra. V takýchto prípadoch nie je možné pre vnútornú elektroniku zabezpečiť požadované napájanie, nakoľko okolité podmienky kde by mal byť snímač umiestnený môžu elektroniku poškodiť (napríklad teploty nad 150 °C, veľké elektromagnetické rušenie a pod.). Obvykle ide o senzory pre presné meranie seizmickej aktivity, alebo pre oblasť kozmonautiky, vojenského priemyslu, automobilovej, či leteckej techniky. Na výstupe zo snímača je vyvedené priamo napätie, alebo náboj

z piezokryštálu. Meranie sa musí vykonávať použitím špeciálnych prípravkov s vysokou vstupnou impedanciou a signál sa musí privádzať tienenými vodičmi s príslušnými parametrami. [10]

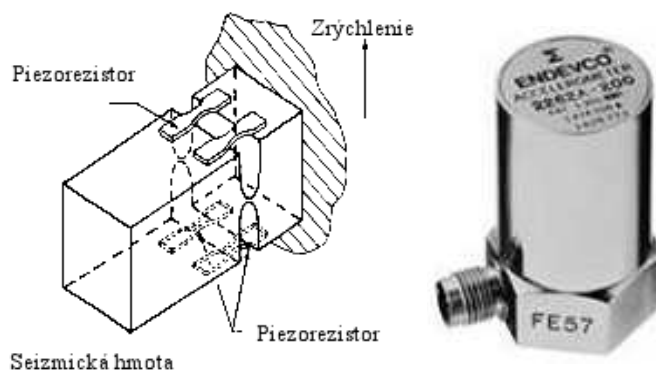
PIEZOREZISTÍVNE AKCELEROMETRE (PR - PIEZORESISTIVE)

Tieto akcelerometre využívajú piezorezistívny materiál namiesto piezoelektrického kryštálu. Ide o materiál, ktorý v závislosti na pôsobiacom zaťažení mení svoj elektrický odpor. Základom tohto materiálu je spravidla silikónová guma alebo kaučuk s výdatnou prímесou vodivých častíc. Prostredníctvom piezorezistívneho materiálu sa mení elektrický odpor v závislosti od mechanického napätia konštrukcie vyvolaného vonkajšou silou. Konštrukčné riešenie integrovaných PR akcelerometrov je tvorené sieťou vyleptaných meracích piezorezistívnych snímačov, tzv. mostíkov zapojených do Wheatstonovho mostíka (Obr. 6). Zapojenie snímacieho piezorezistora R_1 do Wheatstonovho mostíka kde napätie na výstupe V_0 je priamo úmerné meranému zrýchleniu. [6], [12]



Obr. 4 - Schéma zapojenia Wheatstonovho mostíka. [12]

Výhodou PR akcelerometrov oproti PE je to, že môžu merať aj stálu nemennú akceleráciu, teda zmenu frekvencie od 0 Hz. V súčasnosti sa používajú PR snímače založené na použití pohybu/ohybu jedného konzolového nosníka z piezorezistívneho kremíkového materiálu vplyvom pôsobiaceho zrýchlenia. Meraný odpor je teda závislý od ohybu nosníka. Na Obr. 7 je zobrazený princíp piezorezistívneho akcelerometra s konzolovým nosníkom. [12]



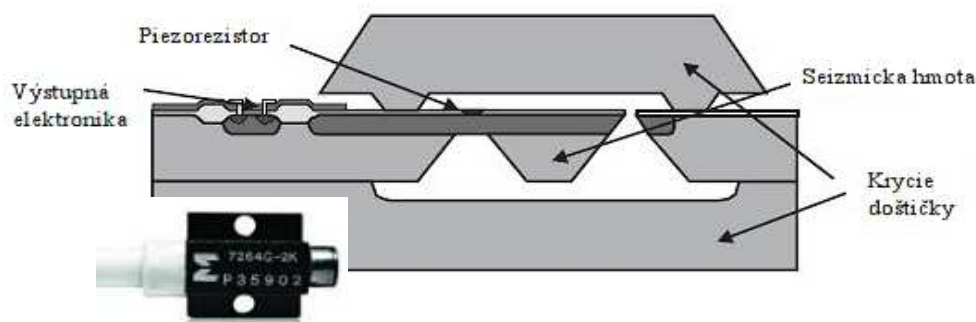
Obr. 5 - Princíp činnosti piezorezistívneho akcelerometra. [6]

Na piezorezistívne akcelerometre vyrábané v súčasnosti sú kladené nasledujúce požiadavky:

- malá veľkosť,
- citlivosť na zrýchlenie nižšia ako jedna stotina gravitačného zrýchlenia,
- veľká šírka frekvenčného pásma,
- stabilný výstup pre celý rozsah prevádzkových teplôt,
- odolné púzdro,
- veľká presnosť,
- lineárny výstup,

- senzor by mal byť citlivý na požadovanú zložku zrýchlenia,
- vysoká spoľahlivosť,
- nízka cena,
- ľahká integrácie senzora a elektroniky na spoločnom základe. [12]

Súčasné integrované akcelerometre sú schopné v sebe spojiť všetky tieto požiadavky. Vyrábajú sa v rôznom prevedení, ako napr. s viac nosníkovou samo testujúcou štruktúrou v spojení s integrovanými riadiacimi obvodmi. Tieto akcelerometre sa označujú aj ako MEMS systémy a používajú sa hlavne v automobilovom priemysle. Na Obr. 8 je zobrazený piezorezistívny MEMS akcelerometer najčastejšie využívaný v súčasnosti. [12], [13]



Obr. 6 - Konštrukčné riešenie MEMS akcelerometra [14], [13]

Tieto snímače sú pre priemyselné účely prispôsobené na veľkú citlivosť na vibrácie a nárazy. Merajú malé zrýchlenie (<100g) pri nízkych frekvenciách (0 až 1kHz). Používajú sa napríklad na snímanie zrýchlenia pri náraze v airbagoch. V prípade ak by hodnota zrýchlenia bola prekročená, voči prednastavenej hodnote, airbag sa musí otvoriť a ochrániť posádku auta. Ich ďalšie využitie je pre tzv. cras testy a jazdné skúšky automobilov, hodnotenie konštrukcie dopravných prostriedkov, skúšky brzd a odpruženia, pre biodynamické merania a podobné aplikácie. [6], [12]

ZÁVER

Z uvedeného je zjavné, že pri výbere snímača je nutné zohľadniť aj ďalšie podmienky, ktoré môžu mať výrazný vplyv na presnosť výslednej, nameranej hodnoty, ako sú citlivosť snímača, alebo frekvenčný rozsah. Výber snímača je zároveň nutné prispôbiť podmienkam merania okolitého prostredia. Zároveň je však nutné zdôrazniť, že výber závisí od požiadaviek, ktoré sú uvedené v príslušných normách ako napr. STN EN ISO 5349, STN EN ISO 2631, STN EN ISO 8041.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] ŽIARAN, Stanislav: Ochrana človeka pred kmitaním a hlukom. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2008. 264 s. ISBN 978-80-227-2799-0.
- [2] ZUTH, Daniel – VDOLEČEK, František: Možnosti a problémy moderní (vibro) diagnostiky. In: Automa. roč. 15, 2009, č. 10, s. 10 – 13. ISSN 1210-9592.
- [3] ZUTH, Daniel – VDOLEČEK, František: Měření vibrací ve vibrodiagnostice. In: Automa. roč. 16, 2010, č. 1, s. 32 – 36. ISSN 1210-9592.

- [4] ZAJAC, Jozef – TOMAŠOVIČ, Peter – STÁŠ, Anton: Znižovanie hluku a vibrácií v strojárskych prevádzkach. Bratislava: Alfa, 1990. 224 s. ISBN 80-05-00674-8.
- [5] BRAUCH, Rob: Vibration Analysis and Standards [online]. AIHA Florida Spring 2009 Conference, 2009. [cit. 28.03.2011]. Dostupné na internete: <http://www.flsectionaiha.org/LinkedPDFs+/2009/AIHA%20FL%20Spring%202009/Friday%20General%20Session/4%20Rob%20Brauch%20Vibration/AIHA%20FL%200509%20Vibration_b.pdf>.
- [6] HÁJEK, Vladimír: Nové, neštandardné metódy merania a analýzy vibrácií. Seminár: Ochrana pred vibráciami, ÚMMS SAV Bratislava, 14.12.2006 [online]. Bratislava: Slovenská akadémia vied, ústav materiálov a mechaniky strojov, 2006. [cit. 30.06.2011]. Dostupné na internete: <<http://www.matdesign.sav.sk/data/files/362.pdf>>.
- [7] LUPTÁK, R: Piezoelektrické materiály [online]. Bratislava: Elektrotechnický ústav, SAV, 2006. [cit. 28.03.2011]. Dostupné na internete: <<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=347>>.
- [8] ERHART, Jiří: Piezoelektrické „chytré“ materiály pro elektrotechniku. In: Elektro. roč. 11, 2002, č. 11, s. 4 – 7.
- [9] KUBLER, John: Selecting Accelerometers for Modal Analysis [online]. Orlando: Kistler Instrument Corporation, 2008. [cit. 20.03.2011]. Dostupné na internete: <http://www.sem.org/PDF/selecting_accelerometers_for_modal.pdf>.
- [10] VOJÁČEK, Antonín: Principy akcelerometrů – 1. díl – Piezoelektrické [online]. automatizace.hw.cz, 2007. [cit. 25.08.2011]. Dostupné na internete: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>>.
- [11] Snímače pre použitie v robotike [online]. [cit. 05.10.2011]. Dostupné na internete: <<http://www.avir.sk/download/rob07.pdf>>.
- [12] VOJÁČEK, Antonín: Principy akcelerometrů – 2. díl – Piezorezistivní [online]. automatizace.hw.cz, 2007. [cit. 25.08.2011]. Dostupné na internete: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>>.
- [13] BEEBY, Stephen et al.: MEMS Mechanical Sensors. Boston - London: Artech House, INC, 2004. 271 s. ISBN 1-58053-536-4.
- [14] MEGGITT, smart engineering for extreme environments [online]. 2010. [cit. 25.07.2011]. Dostupné na internete: <http://www.endevco.com/resources/docs/Endevco_catalog.pdf>.

ADRESY AUTOROV

Pavol ČEKAN, Ing., PhD., Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky, Park Komenského č. 5, 042 00 Košice, e-mail: <pavol.cekan@tuke.sk>.

Katarína KORÁLOVÁ, Ing., PhD., Technická univerzita v Košiciach, Hutnícka fakulta, Katedra neželezných kovov a spracovania odpadov, Letná 9, 042 00 Košice, e-mail: <katarina.koralova@tuke.sk>.

RECENZENT

Milan PIATRIK, prof. Ing. PhD., Univerzita Mateja Bela, Fakulta prírodných vied, Katedra environmentálneho manažérstva, Tajovského 40, 974 01, Banská Bystrica, Slovenská republika