

# METÓDY KALIBRÁCIE SNÍMAČOV VIBRÁCIÍ PRENÁŠANÝCH NA ČLOVEKA

Pavol ČEKAN - Juraj MICHÁLEK

## METHODS CALIBRATION OF SENSOR VIBRATIONS TRANSMITTED TO HUMANS

INTEGRAL SAFETY OF ENVIRONS  
INTEGRAL SAFETY OF ENVIRONS '2017

### ABSTRAKT

Pre overenie charakteristík rôznych senzorov vibrácií je potrebné vykonať ich kalibráciu. Existuje mnoho dôvodov na vykonanie kalibrácie. V mnohých prípadoch to môžu byť právne, alebo zmluvné dôvody, ktoré vyžadujú dôkaz o presnosti senzora. Vhodnými kalibračnými metódami dokážeme overiť presnosť senzora jeho citlivosť, ale aj odchýlku pre upresnenie meraného výsledku. Vzhľadom na to, že použitý senzor je základným prvkom meracieho reťazca, preto je dôležitá pravidelná kontrola uvedených parametrov. Podobne sa musí vykonávať aj kalibrácia ostatných zariadení používaných pri meraní (predzosilňovače, analyzátory). Tieto kalibračné metódy sa však od kalibrácie senzorov líšia a nie sú predmetom tohto príspevku.

**KLÚČOVÉ SLOVÁ:** vibrácie, zrýchlenie, kalibrácia, senzor, vibračný budič.

### ABSTRACT

To verify the characteristics of different vibration sensors, calibrate them. There are many reasons for doing calibration. In many cases, this may be a legal or contractual reason that requires proof of the accuracy of the sensor. By appropriate calibration methods, we can verify the sensitivity of the sensor, its sensitivity, but also the deviation to specify the measured result. Due to the fact that the sensor used is the basic element of the measuring chain, it is important to regularly check these parameters. Similarly, calibration of other measuring devices (pre-amplifiers, analyzers) must be performed. These calibration methods from the calibration of the sensors vary and are not the subject of this paper.

**KEY WORDS:** vibration, acceleration, calibration, sensor, vibration exciter.

### ÚVOD

Pri kalibrácii senzora kmitania je hlavnou úlohou stanoviť jeho kalibračný faktor (citlivosť senzora) na amplitúdovom a frekvenčnom rozsahu pre stupeň voľnosti pre ktorý sa používa. V niektorých prípadoch sa vyžadujú aj iné charakteristiky senzora ako napr.: nelinearita, teplotná závislosť, prechodný jav teplotnej citlivosti (u PE senzorov), pomerná priečna citlivosť, citlivosť na rotačný pohyb, citlivosť na deformáciu [16063]. Výstupom kalibrácie je kalibračný certifikát v ktorom sú zaznamenané výsledky merania spolu s odchýlkami. Z výsledkov kalibrácie je zjavné či senzor spĺňa požiadavky a teda je vhodný pre použitie pri meraní [1].

Norma ISO 8041 definuje požiadavky pre kalibráciu senzorov, ktoré sledujú vibrácie prenášané na človeka. Hodnoty budiacej (kalibračnej) frekvencie a amplitúdy zrýchlenia pre konkrétne merania sú popísané v Tab. 1.

Tab. 1 Požiadavky pre kalibráciu senzorov - akcelerometrov [2]

Charakteristika	Meranie expozície			
	Sústava ruka - rameno		Celé telo	Celé telo – nízke frekvencie
Frekvencia [Hz]	79,577 (± 0,5 %)	159,155 (± 0,5%)	15,915 (± 0,5%)	0,3979 (± 0,5 %)
Stredná hodnota zrýchlenia [ $m.s^{-2}$ ]	10 (± 3%)	10 (± 3%)	1 (± 3%)	0,1 (± 3%)

Potrebu kalibrácie prístrojov v meracom reťazci treba realizovať vždy keď:

- sa zaradi do reťazca nový prístroj,
- uplynie špecifická doba kalibrácie,
- sa prístroj dlhšie nepoužíval,
- sa prístroj vystaví šoku alebo silným vibráciám,
- sa náhle zmenia podmienky okolitého prostredia,
- sa objavia diskutabilné údaje [3] .

Pre vykonanie priamej kalibrácie je potrebné použiť budič, ktorý požíva merateľný a ovládateľný vstup do senzora, pričom sa musia zabezpečiť prostriedky pre zaznamenávanie a meranie výstupu senzora. Senzor musí byť pripevnený k budiču dostatočne tuho, aby bol pohyb budiča prenášaný na senzor v celom frekvenčnom rozsahu senzora. Budič môže mať takú konštrukciu, že umožňuje preklopenie senzora, môže byť ako centrifúga (pre senzory s frekvenčnou charakteristikou od 0 Hz), elektrodynamický budič (Obr. 1) alebo ako nárazové teleso (nákovka) balistického kyvadla [1].



Obr. 1. Elektrodynamický budič - model K394B30

Kalibračné metódy pre senzory vibrácií a otrasov sú popísané v normách rady ISO 16063 a môžeme ich rozdeliť do týchto dvoch odlišných metód:

- metódy primárnej kalibrácie,
- porovnávacie kalibračné metódy [1] .

Ďalšou alternatívou môže byť kalibrátor, ktorého budiaca frekvencia a amplitúda, napr. zrýchlenia je známa [4].

## ŠPECIFIKÁCIA METÓD PRIMÁRNEJ KALIBRÁCIE

Metódy primárnej kalibrácie predstavujú test, kde je senzor podrobený známym, presným a spoľahlivým štandardom prírody. Medzi tieto metódy patria:

- kalibrácia pomocou laserovej interferometrie,
- kalibrácia metódou reciprocity,
- kalibrácia centrifúgou,
- kalibrácia pomocou zemskej gravitácie,
- kalibrácia otrasom.

Tieto kalibračné metódy sa používajú pre kalibráciu etalónových senzorov, ktoré sa následne používajú pri porovnávacích kalibračných metódach [1, 5].

### Kalibrácia pomocou laserovej interferometrie

Podstatou tejto kalibračnej metódy je meranie amplitúdy výchylky a frekvencie. Namerané výchylky sa môžu použiť na výpočet rýchlosti alebo zrýchlenia. Keď je amplitúda výchylky známa, vypočíta sa citlivosť senzora ako pomer z nameraného výstupu senzora k amplitúde rýchlosti alebo zrýchlenia. Metóda je podrobne popísaná v norme ISO 16063-11. Táto metóda sa ďalej rozdeľuje na ďalšie tri metódy, a to na:

- metódu počítania krúžkov,
- metódu minimálneho bodu,
- metódu sínusovej aproximácie [6].

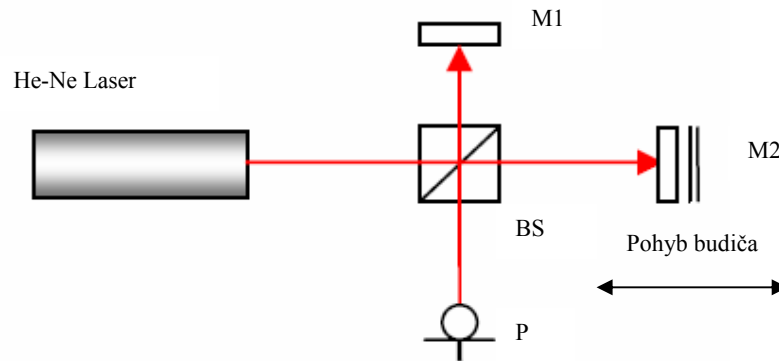
Tab. 212 popisuje frekvenčný a amplitúdový rozsah v ktorom prebieha kalibrácia etalónu pre vyššie uvedené metódy.

Tab. 21 Frekvenčný a amplitúdový rozsah metód pri kalibrácii pomocou laserovej interferometrie [6]

Metóda	Frekvenčný rozsah	Amplitúdový rozsah
1	1 až 800 Hz *)	0,1 až 1000 [ $m/s^2$ ]
2	800 Hz až 10 kHz	
3	1 Hz až 10 kHz	
*) Pri špeciálnych podmienkach môže byť pri vyšších frekvenciách		

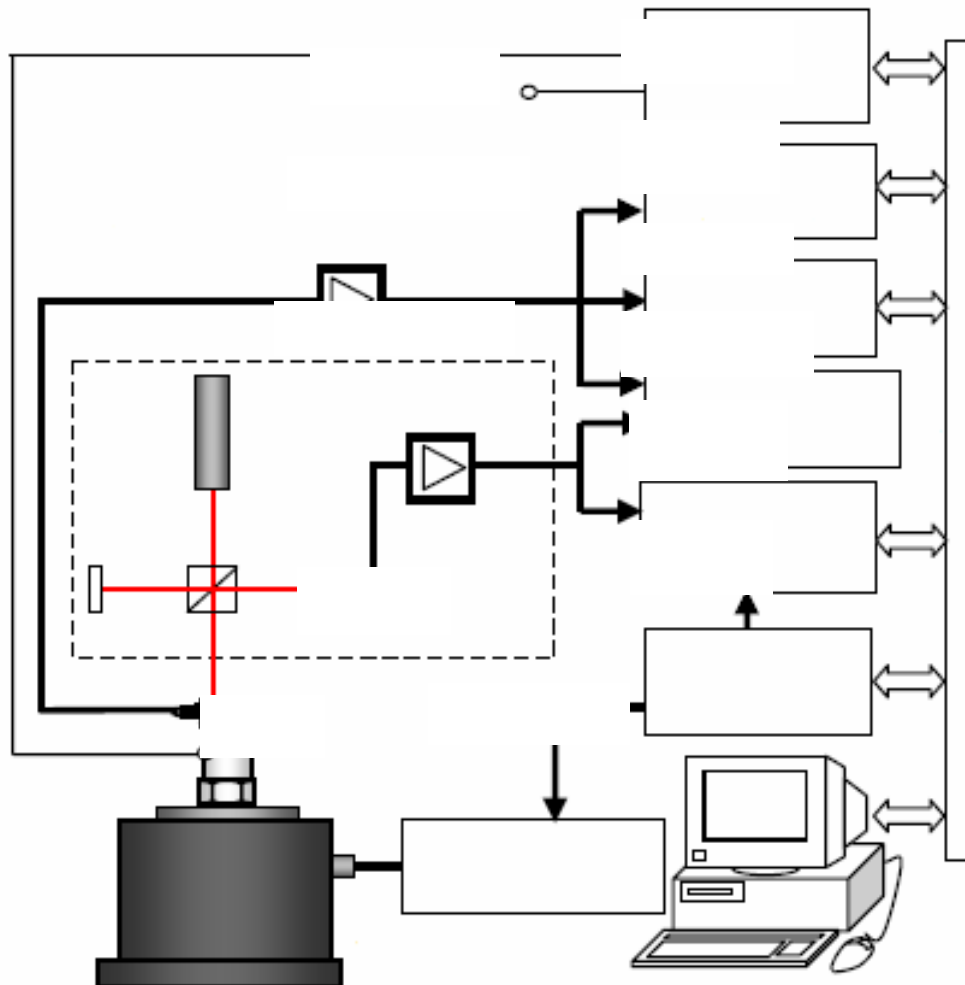
Najväčší frekvenčný rozsah dosahuje metóda sínusovej aproximácie. Vzhľadom na jednoduchosť porozumenia, je rámci tejto bakalárskej práce popísaná metóda počítania krúžkov.

Metóda 1 vyžaduje použitie Michelsonovho laserového interferometra, ako je znázornené na Obr. 2. Je zrejmé, že tento typ interferometra sa skladá z dvoch optických ramien, kde jeden sa nazýva referenčné rameno a druhé je známe ako meracie rameno. Za predpokladu použitia He-Ne laseru ako svetelného zdroja sa na rozdelenie dopadajúceho lúča na dva ortogonálne lúče použije nepolarizovaný rozdeľovač lúčov BS. Referenčný lúč je nasmerovaný na pevné zrkadlo M1 a merací lúč smeruje na vibrujúci povrch M2. Odrazy týchto dvoch lúčov sa vracajú do rozdeľovača lúčov a potom smerujú do snímacieho prvku fotodetektora P, ktorý konvertuje optický signál na elektrický výstup. Relatívny pohyb medzi referenčnými a meracími ramenami vytvára krúžky. V prípade kalibrácie akcelerometra sa meranie zvyčajne vykonáva na hornej referenčnej ploche akcelerometra alebo v blízkosti montážnej plochy referenčného senzora [7].



Obr. 2.1 Michelsonov interferometer [7]

Harmonický signál je vybudený v budiči kmitania pomocou generátora frekvencie, ktorý za pomoci výkonového zosilňovača koriguje amplitúdu kmitania na elektrodynamickom budiči. Výstup akcelerometra sa meria pomocou voltmetra. Frekvenčný pomer frekvencie interferenčných krúžkov a frekvencie signálu zaznamenáva pomerné počítadlo. Príklad meracieho systému pre metódu počítania krúžkov je zobrazený na Obr. 3. [7].



Obr. 3. Príklad meracieho systému pre metódu počítania krúžkov [7]

Pre frekvenčný pomer počas vibrácií platí rovnica:

$$R_f = \frac{4\hat{s}}{(\lambda/2)} = \hat{s} \times \frac{8}{\lambda}$$

kde:

$\hat{s}$  je výchylka [m],

$\lambda$  je vlnová dĺžka He-Ne lasera [m] [7].

Potom sa zrýchlenie vypočíta podľa vzťahu [7]:

$$\hat{a} = (2 \times \pi \times f)^2 \times \hat{s}$$

Citlivosť senzora je potom daná vzorcom [7]:

$$S_{\hat{a}} = \frac{\hat{u}}{\hat{a}}$$

Táto kalibračná metóda dosahuje najlepšie výsledky s najmenšou neistotou merania pri kalibrácii. Kalibráciou senzorov pomocou laserovej interferometrie sa zaoberá napríklad ČMI v Prahe.

### Kalibrácia metódou reciprocit

Teória reciprocit poukazuje na recipročný vzťah pre budiacu cievku budiča a vyrovnanosť pomerov sily/prúdu a napätia/rýchlosti. Predmetom tejto metódy je stanoviť citlivosť  $S_{uc}$  tak, že po nameraní napätia  $u_{13}$  sa zrýchlenie  $a_0$  vypočíta z rovnice:

$$S_{uc} = \frac{u_{13}}{a_0}$$

Citlivosť  $S_{uc}$  sa určí z nasledujúcej rovnice:

$$S_{uc} = S_0 + s_z Z_m$$

kde:

$Z_m$  je mechanická impedancia senzora [ $kg \cdot s^{-1}$ ]

veličiny  $S_0$  a  $s_z$  sa určujú dvomi experimentmi a výpočtovým postupom [1].

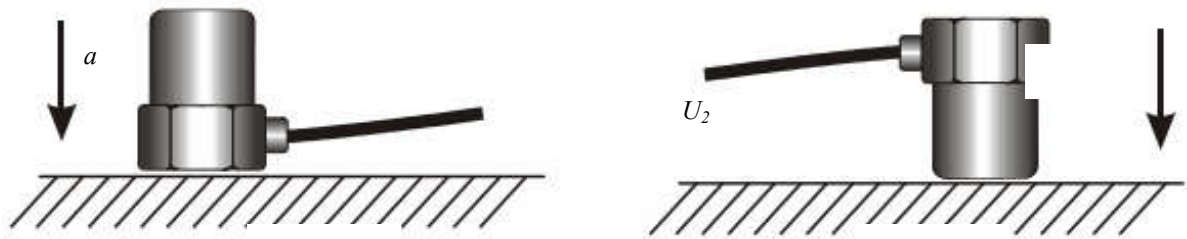
Metóda je veľmi zložitá a je zložitým získať dôveryhodné výsledky. Táto metóda je bližšie popísaná v norme ISO 16063-12 [4].

### Kalibrácia centrifúgou

Centrifúga sa skladá z vyváženého ramena alebo stola, ktoré sa otáčajú okolo vertikálnej osi rovnomernou uhlovou rýchlosťou. Na centrifúge sa kalibrujú len senzory na priamočiare zrýchlenie, ktoré majú frekvenčnú charakteristiku od 0 Hz (napr. PR a VC akcelerometre). Senzor je pripojený na stole alebo ramene tak, že jeho os citlivosti je súosová s polomerom kružnice rotácie. Použitím vhodnej centrifúgy sa citlivosť senzora môže stanoviť s presnosťou 1 %. Takáto kalibrácia nedáva žiadne informácie o použiteľnosti frekvenčného rozsahu [1].

### Kalibrácia pomocou zemskej gravitácie

Táto kalibračná metóda využíva zemské gravitačné pole na kalibráciu senzorov zrýchlenia s frekvenčnou charakteristikou od 0 Hz. Kalibrácia je v rozsahu od -g do +g, teda po nameraní výstupného signálu v základnej polohe sa meria výstupný signál po otočení senzora o 180° a teda zrýchlenie je 2 g (Obr. 4) [5].



Obr. 4 Príklad kalibrácie pomocou zemskej gravitácie: a) počiatočný stav -g, b) konečný stav +g [5]

Citlivosť senzora sa vypočíta podľa vzťahu:

$$S_a = \frac{\Delta U}{2}$$

Táto kalibrácia sa používa pre senzory s charakteristikou od 0 Hz napr. PR a VC senzory. Kalibračnú metódu bližšie popisuje norma ISO 16063-16 [5].

### Kalibračná metóda otrasom

Špeciálnym budičom zrýchlenia otrasu, ktorý má kladivko a nákovku voľne zavesené v priestore sa preukázal malá neistota merania zrýchlenie výkmitu alebo citlivosti otrasu. Sensor je pripevnený na zavesenú nákovku v pokojovej polohe. Udrením kladivkom po nákovke sa vybudí prechodový pohyb. Sila úderu musí byť taká aby sa vybudili dôležité frekvenčné zložky.

Výstupný signál z akcelerometra sa zaznamenáva v závislosti od času počas rázu. Väčšina kalibrácií otrasom sa zakladá na princípe zmeny rýchlosti, pretože rýchlosť je veličina, ktorá sa dá prakticky merať za pomoci nastavenia nákovky v známej vzdialenosti. Spustenie elektronického časového spínača sa môže realizovať magnetickými alebo fotoelektrickými senzormi [1].

Prírastok rýchlosti sa vypočíta ako:

$$\Delta v = \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt$$

kde:

$a(t)$  je zrýchlenie meniace v čase [ $m \cdot s^{-2}$ ].

Citlivosť senzora sa vypočíta podľa vzorca:

$$S_r = \frac{\left[ \int_{t_1}^{t_2} u_r(t) dt \right]}{\Delta v}$$

kde:

$u_r(t)$  je výstup akcelerometra [1].

### ŠPECIFIKÁCIA POROVNÁVACÍCH KALIBRAČNÝCH METÓD

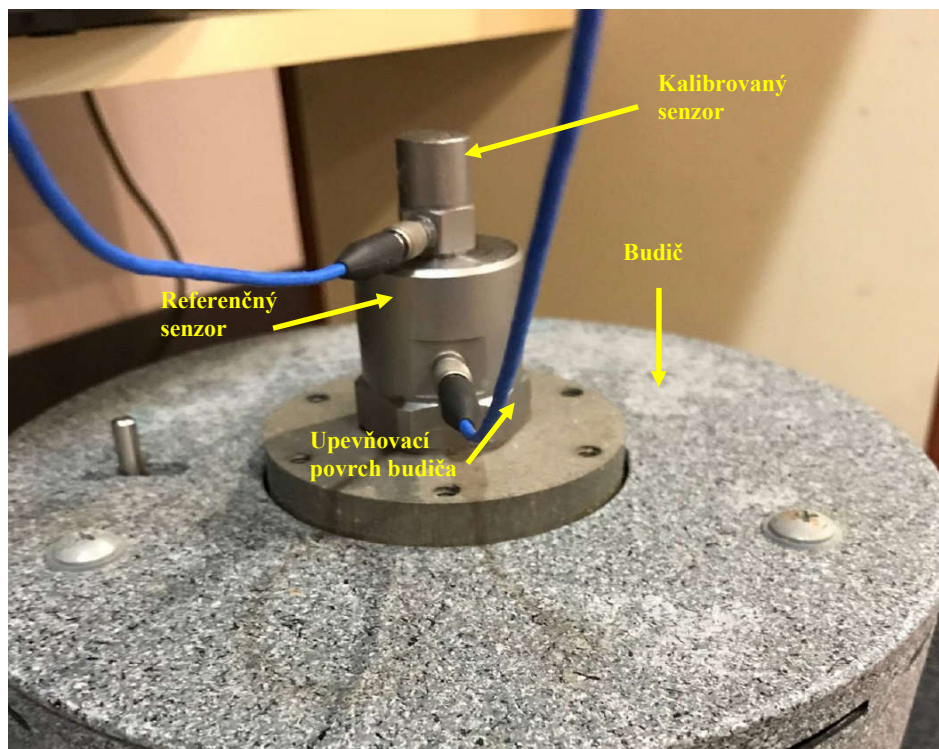
Porovnávacie kalibračné metódy predstavujú test, kde senzor a kalibrovaný referenčný senzor podliehajú tomu istému vstupnému kmitaniu z budiča. Pomer ich výstupov poskytuje kalibračný faktor pre senzor, ktorý sa kalibruje [5]. Normy ktoré popisujú porovnávacie kalibračné metódy sú ISO 16063-21 (pre kalibráciu vibráciami) a ISO 16063-22 (pre kalibráciu otrasom).

### Kalibrácia porovnávaním s referenčným senzorom (back-to-back)

Podstatou tejto kalibrácie je, že referenčný senzor a senzor, ktorý sa kalibruje, sú vystavené tomu istému kmitaniu, pričom citlivosť referenčného senzora  $S_1$  je známa. Merajú sa ich výstupy  $U_1$  a  $U_2$  alebo pomer týchto výstupov. Keďže vstupný signál je rovnaký, pomer ich výstupov je tiež pomer ich citlivostí. Najlepšie výsledky sa dosahujú, keď sa oba senzory pevne pripoja do obojstrannej konfigurácie (back-to-back), pričom os citlivosti je rovnobežná so smerom pohybu budiča (Obr. 5).

Ak senzory merajú tú istú veličinu (napr. zrýchlenie), tak sa citlivosť senzora, ktorý sa kalibruje vypočíta ako [1]:

$$S_2 = \frac{U_2}{U_1} \times S_1$$

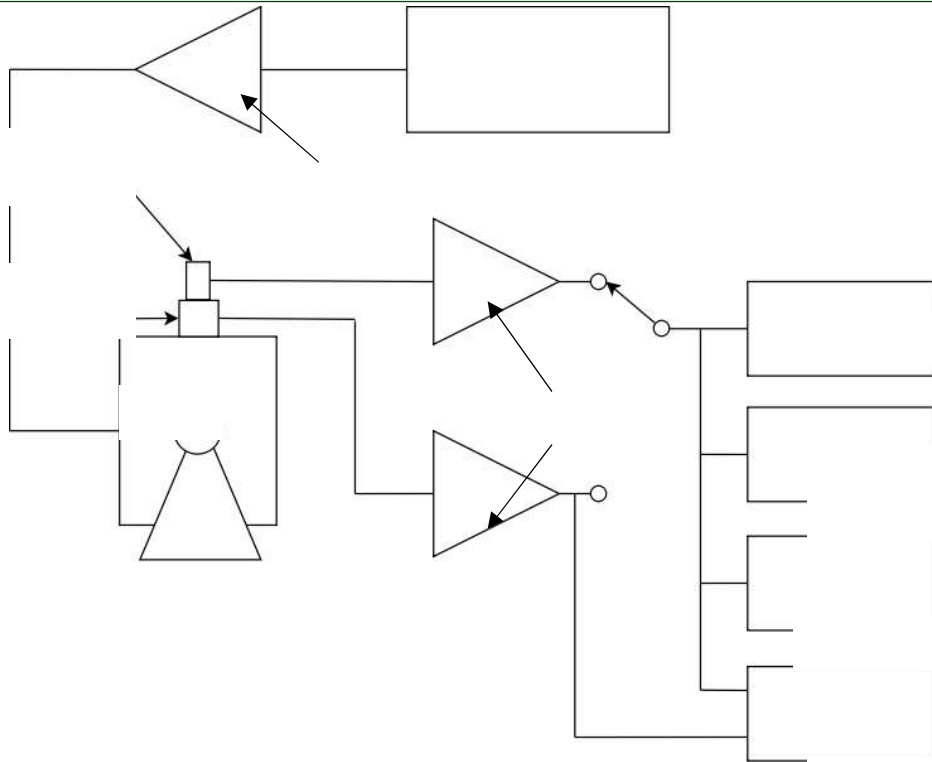


Obr. 5 Kalibrácia back-to-back (autor: Kevin Radzik)

Obr. 6 zobrazuje príklad meracieho systému pre back-to-back kalibráciu. Generátor frekvencie vybudí harmonickú (kalibračnú) frekvenciu (napr. 16 Hz) a výkonovým zosilňovačom sa nastaví amplitúda zrýchlenia na budiči kmitania podľa požiadaviek pre daný senzor (napr.  $1 m.s^{-2}$ ).

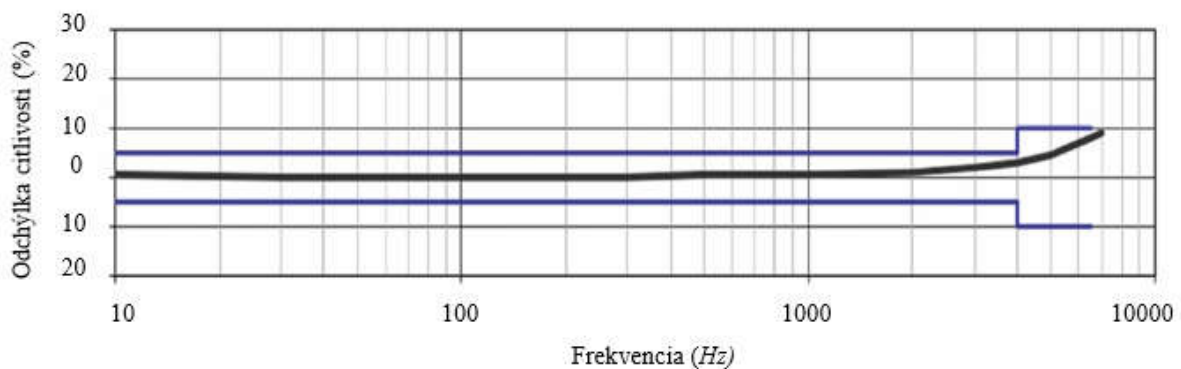
Po nameraní citlivosti pri kalibračnej frekvencii sa meria frekvenčná odozva v požadovanom frekvenčnom rozsahu.

Kalibrácia sa vykonáva podľa typu budiča vo frekvenčnom rozsahu od 0,4 Hz do 10 kHz a v dynamickom rozsahu od 0,1  $m.s^{-2}$  do 1000  $m.s^{-2}$ . Výstup senzorov je nameraný pomocou voltmetra. Pre overovanie správneho chodu kalibrácie sa môžu používať aj zariadenia ako napr.: merač skreslenia, kolísania alebo fázomer [8].



Obr. 6 Schematické znázornenie meracieho reťazca systému kalibrácie back-to-back používaného v praxi [8]

Výstupom kalibrácie je kalibračný certifikát v ktorom sa okrem stanovenia kalibračného faktora uvádzajú aj informácie o type senzora, podmienok pri kalibrácii, neistoty merania pri kalibrácii, ale aj iné merané charakteristiky ako je citlivosť senzora. Obr. 7 zobrazuje typickú frekvenčnú odozvu akcelerometra, ktorého kalibračná frekvencia bola 100 Hz. Krivka predstavuje odchýlky citlivosti pri rôznych frekvenciách voči citlivosti, ktorá bola nameraná pri kalibračnej frekvencii.



Obr. 72 Typická frekvenčná odozva akcelerometra. Odchýlky citlivosti voči nameranej citlivosti pri kalibračnej frekvencii 100 Hz [9]

Kalibračná metóda back-to-back dostatočne pokrýva požiadavky pre kalibráciu senzorov a preto sa v súčasnosti využíva v mnohých certifikovaných inštitúciách. Túto metódu používa napr. aj TSÚ Piešťany, š.p.



## Kalibrácia otarasom - porovnávanie s referenčným senzorom

Kalibrácia šokov využíva metódy prechodného budenia. Zaznamená sa nárazový impulz s trvaním od 0,05 m.s do 8,0 m.s pri špičkovej hodnote zrýchlenia otarasu od 100 m.s<sup>-2</sup> do 100 km.s<sup>-2</sup>. Budiaci impulz môže vybudíť nákovka (kyvadlo, pneumatický budič otarasu) alebo tzv. Hopkinsonova tyč. Počas rázu sa zaznamenávajú výstupy z oboch senzorov. Potom sa zo všetkých meraní určia najvyššie (špičkové) hodnoty výstupov a použijú sa pre výpočet citlivosti senzora. Citlivosť neznámeho senzora je daná:

$$S_{sh} = S_S \times \frac{U_{x,peak}}{U_{S,peak}}$$

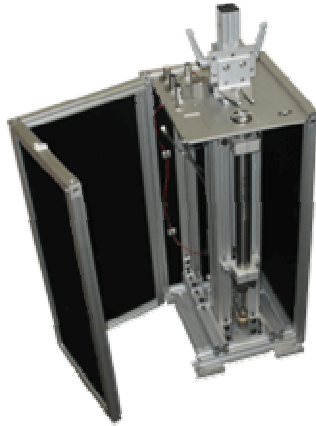
kde:

$S_S$  je citlivosť referenčného senzora,

$U_{x,peak}$  je špičková hodnota výstupného signálu neznámeho senzora,

$U_{S,peak}$  je špičková hodnota výstupného signálu referenčného senzora [10].

Pri pneumatickom budiči otarasu sú senzory v konfigurácii back-to-back pripojené k nákovke. Obr. 8 zobrazuje budič 9525C od firmy The Modal Shop, ktorý sa pri takejto kalibrácii používa [9].



Obr. 83 Pneumatiký budič otarasu – model 9525C od firmy The Modal Shop

Nastavením požadovanej hodnoty zrýchlenia otarasu, súčasť zariadenia vybudí otaras na nákovke, na ktorej sú dostatočne pevne pripevnené senzory v konfigurácii back-to-back. Po zaznamenaní výstupov sa môže určiť citlivosť sledovaného senzora [9].

## ZÁVER

Primárne kalibračné metódy sa považujú za metódy s najmenšou neistotou merania pri kalibrácii a preto sa nimi kalibrujú referenčné etalóny, ktoré sa následne používajú pri porovnávacích metódach. Kalibrácia pomocou laserovej interferometrie poskytuje spoľahlivý obraz citlivosti senzora v požadovanom frekvenčnom rozsahu. Kalibrácia metódou reciprocity je zložitá a pre dosiahnutie relevantných výsledkov je potrebný zložitý výpočtový postup. Kalibrácia centrifúgou a kalibrácia pomocou zemskej gravitácie neposkytuje žiadnu informáciu o citlivosti vo frekvenčnom rozsahu a tieto metódy nie sú aplikovateľné pre PE (senzory) akcelerometre, ale iba pre akcelerometre s frekvenčnou charakteristikou od 0 Hz (PR, VC, servo akcelerometre). Kalibrácia otarasom sa môže použiť v tomto prípade ako doplnková metóda pre overenie citlivosti senzora.

Porovnávacie kalibračné metódy sa v súčasnosti najčastejšie používajú v mnohých certifikovaných laboratóriách a dostatočne pokrývajú požiadavky pre kalibráciu senzorov. Kalibrácia vibráciami - back-to-back sleduje citlivosť senzora v požadovanom frekvenčnom rozsahu. Kalibrácia otarasom zase poskytuje overenie senzora pri vysokých hodnotách zrýchlenia otarasu (vrcholová hodnota kmitu).

Overenie presnosti pri meraní senzora je potrebné pre splnenie požiadaviek, ktoré definujú legislatívne predpisy. V každodennom živote a teda aj praxi je človek, ale aj široké spektrum technického

vybavenia vystavené práve vibráciám a otrasom. Túto skutočnosť možno považovať za potrebu vykonávať overovanie senzorov a zariadení pre monitorovanie negatívnych vibrácií čo najčastejšie. To je cieľom pre získanie relevantných výsledkov aj v rámci ďalšieho posúdenia BOZP.

## ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] STN ISO 16063-1: 2000, Metódy kalibrácie senzorov kmitania a otrasov. Časť 1: Základné pojmy.
- [2] STN EN ISO 8041: 2005, Ozva človeka na kmitanie. Meracie prístroje.
- [3] Metrológia kalibrácie. [cit. 12.04.2017]. Dostupné na internete: <<http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/228>>.
- [4] Serridge, M., TORBEN R. Licht. 1987. *Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifier handbook*. Glostrup: K Larsen & Sen A/S.
- [5] The basics of accelerometer calibration. [cit. 15.04.2017]. Dostupné na internete: <<http://modalshop.com/filelibrary/Basics%20of%20Calibration.pdf>>.
- [6] ISO 16063-11: 1999, Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry.
- [7] RIPPER, G., DIAS, R., GARCIA G. Primary calibration vibration of standards in Brazil. [cit. 16.04.2017]: Dostupné na internete: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.456.2512&rep=rep1&type=pdf>>.
- [8] ISO 16063-21: 2003, Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer.
- [9] PERES, M., SILL R. D. A new solution for shock and vibration calibration of accelerometers. [cit. 22.04.2017]. Dostupné na internete: <<http://www.modalshop.com/techlibrary/New%20Solution%20for%20Shock%20and%20Vibration%20Calibration%20of%20Accelerometers.pdf>>.
- [10] ISO 16063-21: 2005, Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 22: Shock calibration by comparison to a reference transducer.

## ADRESY AUTOROV

### **Ing. Pavol ČEKAN, PhD.**

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Katedra bezpečnostného inžinierstva, Botanická 25, 917 08 Trnava, Slovenská Republika

Tel: +421 906 068507,

email: pavol.cekan@stuba.sk.

### **Juraj MICHÁLEK, Bc.**

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Trnava, Slovenská Republika

email: xmichalekj@stuba.sk.

### **RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU**

*Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.*

### **REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS**

*Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.*