

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Metrologie vybraných kinematických veličin

Učební texty k semináři

Autoři:

Ing. Milan Prášil, CSc. (Český metrologický institut Praha)

Datum:

18. prosince 2012

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií CZ.1.07/2.3.00/09.0031

TENTO STUDIJNÍ MATERIÁL JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM
FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY

OBSAH

Obsah	1
1. Úvod	2
2. Měření mechanických vibrací	4
2.1. Význam měření vibrací	4
2.2. Zdroje a příčiny vibrací	5
2.3. Definice vibrací	5
2.4. 3.4 Kvantitativní hodnocení amplitud vibrací	7
2.5. Určující veličiny vibrací	8
2.6. Vibrometry	9
2.7. Snímače vibrací	10
2.8. Citlivost snímačů vibrací	13
2.9. Kmitočtový rozsah snímačů vibrací	14
2.10. Upevnění snímačů vibrací	15
2.11. Kalibrace snímačů vibrací	17
3. Měření mechanických rázů	22
3.1. Význam měření mechanických rázů	22
3.2. Snímače rázů a jejich kalibrace	23
4. Měření dynamických sil	27
4.1. Snímače dynamických sil a jejich kalibrace	27
Literatura:	29
Přílohy	30

1. ÚVOD

Kinematika je část mechaniky, která se zabývá klasifikací a popisem různých druhů pohybu, ale nezabývá se jeho příčinami. Naproti tomu **dynamika** zkoumá pohyb z hlediska působení sil. Kinematika se tedy zaměřuje na sledování polohy (výchyly nebo dráhy), rychlosti, zrychlení apod. Nesleduje však dynamické veličiny, jako např. hybnost a energii, kterými se zabývá dynamika.

Mechanickým pohybem se ve fyzice označuje takový pohyb, při kterém dochází ke změně polohy tělesa, popř. hmotného bodu, vzhledem k jinému tělesu, popř. hmotnému bodu, za určitý časový interval, nebo také ke změně velikosti nebo tvaru tělesa. Pokud k mechanickému pohybu nedochází, tzn. neprobíhá změna tvaru nebo velikosti ani se nemění poloha tělesa vzhledem k jinému tělesu, říkáme, že těleso je v klidu. Klid je tedy pouze zvláštním případem pohybu. Pohyb (nebo klid) vzhledem k jinému tělesu označujeme jako relativní pohyb (klid).

Metrologie kinematických veličin se zabývá měřením, což je soubor činností, jejichž cílem je stanovit hodnoty veličin mechanického pohybu, kterými jsou např. rychlost, zrychlení, dráha a kmitočet. Obecně **veličina** je vlastnost jevu, tělesa nebo látky, kterou lze kvalitativně rozlišit a kvantitativně určit.

Metrologie vybraných kinematických veličin se týká měření:

1. mechanických vibrací (chvění)
2. mechanických rázů
3. dynamické síly *
4. přímočaré rychlosti
5. otáčivé (úhlové) rychlosti

Poznámka* - I když podle výše uvedené definice kinematiky patří **síla do dynamiky, z praktických důvodů se může měření dynamických sil spojovat s oborem měření mechanických vibrací.

Měření uvedených veličin pohybu je významné jak v průmyslu např. ve vývoji nových výrobků a materiálů (modální analýzy, tlumení vibrací), ve zkušebnictví (odolnost proti působením vibrací, bezpečnost vozidel – crash testy), při bezdemontážní diagnostice strojů, hygieně práce (vliv vibrací na člověka), tak i

v praktickém životě, kde např. správné měření překročení maximální povolené rychlosti vozidel se týká všech řidičů silničních vozidel.

Kalibrace je soubor úkonů, kterými se stanoví za specifikovaných podmínek vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím přístrojem nebo měřicím systémem a odpovídajícími hodnotami, realizovanými etalony.

Etalon ztělesněná míra, měřicí přístroj, měřidlo nebo měřicí systém, které jsou určeny k definování, realizování, uchovávání nebo reprodukování jednotky.

Etalonáž v metrologické praxi zahrnuje činnosti spojené s etalony.

Účelem semináře je seznámit účastníky se základy metrologie veličin pohybu, přičemž velká pozornost je věnována snímačům a metodám jejich kalibrace

2. MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VIBRACÍ

2.1. Význam měření vibrací

Problémy, spojené s izolací, omezováním a snižováním mechanických vibrací (chvění), se již projevují od počátku zavádění strojů v průmyslu a zejména od doby, kdy se k pohonu těchto strojů začaly používat různé motory. Měření vibrací v těchto případech pomáhá odhalovat příčiny nežádoucích vibrací a sledovat účinnost antivibračních opatření. Obdobně měření vibrací v budovách umožňuje zjistit vliv provozu dopravních prostředků nebo trhacích prací v okolí budov na statiku staveb.

Velmi významné je měření vibrací při *bezdemontážní diagnostice* točivých strojů. Poruchy strojních zařízení mají jen zřídka náhlý a zcela neočekávaný průběh. Naopak, na většině strojních zařízení se již dlouho před vlastní poruchou, vedoucí k jejich vyřazení z provozu, zvětšuje úroveň vibrací a to lze použít jako ukazatel provozního stavu stroje a tím včas předejít poruše nebo havárii. Stále více strojů a zařízení je vybaveno snímači vibrací, např. turbogenerátory v elektrárnách, kompresory v chemickém průmyslu, motory vozidel, lodí, letadel a raket.

V mnoha případech, kdy se nějaký objekt pohybuje po zemi, ve vodě nebo ve vzduchu, měření veličin pohybu (zejména rychlosti a zrychlení) umožňuje tento pohybující se objekt řídit a odhalit nežádoucí změny trajektorie.

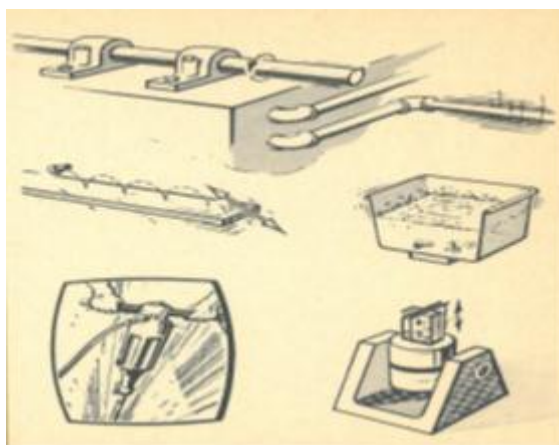
Zkoušky odolnosti výrobků na působení vibrací jsou nyní často nedílnou částí výrobního procesu. Zkoušený předmět se upevní na vibrátor, který předmět rozkmitá při čemž velikost vibrací je snímána snímači.

Pro ochranu zdraví se měří vibrace působící na člověka, které vznikají při jízdě v dopravních prostředcích nebo přenášených z ručního náradí (pneumatická kladiva, ruční brusky apod.).

Základním požadavkem při jakékoliv práci s vibracemi, ať již při návrhu a konstrukci zařízení, využívající jejich energie, nebo v procesu projektování a provozu strojů a zařízení s co nejmenšími vibracemi, je možnost přesného a reprodukovatelného měření vibrací a analýzy jejich určujících veličin.

2.2. Zdroje a příčiny vibrací

Vyhnout se mechanickým vibracím v praxi je téměř nemožné. Hlavními příčinami vibrací jsou dynamické síly, provázející výrobní nepřesnosti dílů a součástí, vůle pohyblivých součástí, styk dílů se třením a odvalováním a nevyváženost součástí a dílů s rotačním, kmitavým, kývavým a vratným pohybem. Slabé vibrace mohou často vyvolávat rezonance jiných součástí a dílů a tak se stát zdrojem silných vibrací a hluku (obr.1).



Obr.1

Ve zkušebnictví se používají vibrátory generující definované vibrace, které působí na různé výrobky, strojní části a umožňují tak jejich zkoušení, zjišťování fyzických a funkčních charakteristik a lze i určit jejich odolnost vůči vlivům vibrací.

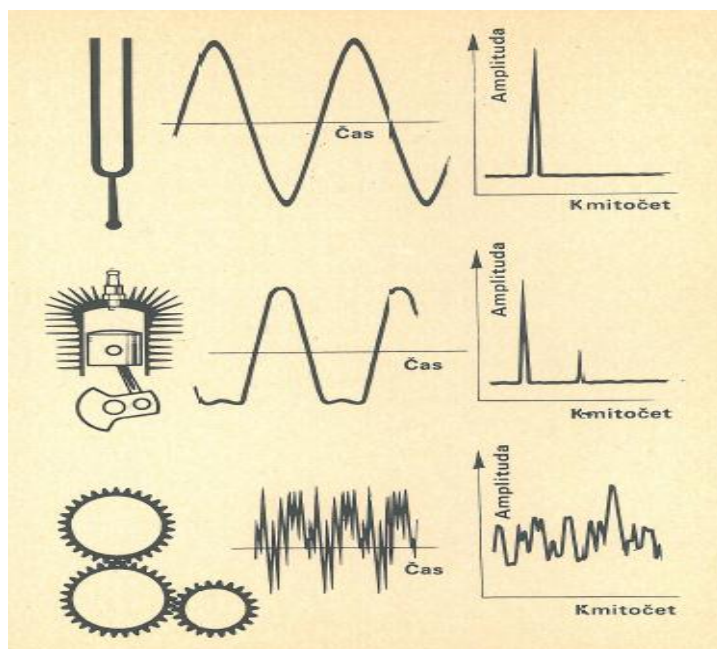
2.3. Definice vibrací

Vibrace jsou kmitavý pohyb hmotného bodu nebo pevných těles kolem určité, zpravidla rovnovážné polohy.

Vibrace se rozdělují na periodické a nepravidelné (náhodné, stochastické). Periodický kmitavý pohyb může být jednoduchý (tzv. harmonický) a obsahovat jen jednu složku s určitým kmitočtem (např. kmitání ladičky), nebo složený (neharmonický) s obsahem většího či menšího počtu složek s různými kmitočty (např. pohyb pístu spalovacího motoru (Obr. 2)). Počet celých cyklů periodických vibrací za jednotku času (sekundu) se nazývá kmitočet, jehož jednotkou je hertz [Hz] a rozměr s^{-1} .

Nepravidelný průběh vibrací není periodický, nýbrž má v čase náhodný průběh. Tak například kmitají křídlo letadla a turbínová lopatka vlivem aerodynamických turbulent, části silničních a kolejových vozidel následkem náhodně se opakujících nárazů působících na ně při jízdě apod. – viz spodní část obr. 2.

Vibrace zpravidla obsahují velký počet složek, vyskytujících se současně na mnoha kmitočtech, takže na základě pouhého pozorování časového průběhu jeho amplitud nelze určit počet ani kmitočty jednotlivých složek. Jednotlivé složky vibrací mohou být zjištěny pouze ze závislostí jeho amplitud na kmitočtu. Rozklad složených vibrací na kmitočtové složky se nazývá *kmitočtová analýza* a je jednou ze základních metod v oboru metrologie vibrací a bezdemontážní diagnostiky. Výsledkem kmitočtové analýzy jsou *kmitočtová spektra*, grafickou formou závislostí amplitud vibrací na kmitočtu jsou spektrogramy. Kmitočtová analýza vibrací mechanismů, strojů atd. obvykle odhaluje řadu výrazných kmitočtů periodických (harmonických) složek, majících přímý vztah k základním pohybům různých dílů a částí zkoumaného či zkoušeného zařízení. Z toho plyne, že kmitočtová analýza umožňuje nebo alespoň ulehčuje odhalování a zjišťování zdrojů a příčin nežádoucích vibrací.



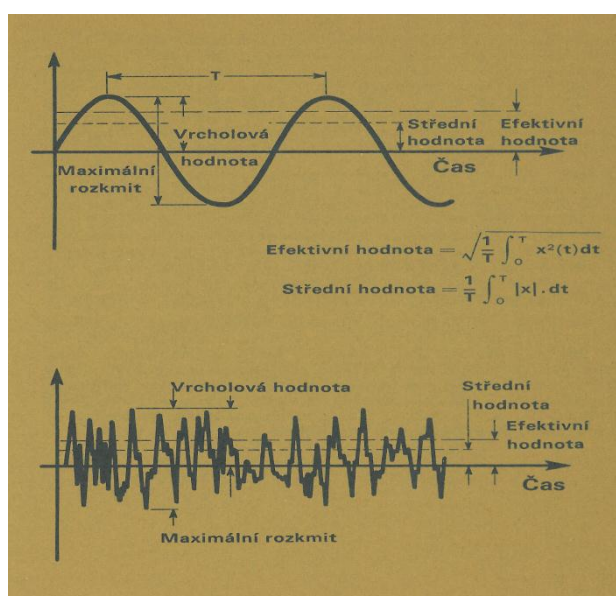
Obr. 2

2.4. Kvantitativní hodnocení amplitud vibrací

Amplitudy vibrací, určující přímo jeho nebezpečnost a škodlivost, je možno kvantitativně hodnotit několika způsoby. Obr. 3 v horní polovině zobrazuje vztah mezi maximálním rozkmitem, amplitudou, střední hodnotou a efektivní hodnotou vibrací harmonického (sinusového) průběhu.

Maximální rozkmit, označovaný v technické praxi též jako dvojitá amplituda nebo hodnota špička – špička, je důležitou hodnotou, neboť udává největší rozkmit hodnoceného kmitu a její použití je výhodné zejména tam, kde je z hlediska maximálně přípustného mechanického namáhání a konstrukčních vůlí důležitá výchylka vibrací. Pro kmitání harmonického průběhu je maximální rozkmit roven dvojnásobku hodnoty amplitudy.

Amplituda též i **vrcholová** nebo **maximální hodnota** je důležitá zejména tím, že popisuje největší hodnotu krátkodobých jevů např. mechanického rázů apod.



Obr. 3

Střední hodnota (absolutní střední hodnota) sinusového kmitu obráží časový průběh hodnocených vibrací, avšak její praktický význam při měření a vyhodnocování vibrací je značně omezen.

Efektivní hodnota je z hlediska kvantitativního hodnocení amplitud vibrací nejdůležitější hodnotou, protože má přímý vztah k jeho energetickému obsahu a je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti vibrací. Pro harmonické

kmitání platí vztah mezi amplitudou x_o a efektivní hodnotou x_{ef} určující veličiny vztah

$$x_{ef} = x_o / \sqrt{2} \quad (1)$$

Pro porovnání je v dolní části obr. 3 znázorněn časový průběh náhodných vibrací.

2.5. Určující veličiny vibrací

Při vibracích harmonického průběhu o kmitočtu

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

kde T je perioda vibrací, se v čase neustále mění hodnoty **určujících veličin**, kterými jsou **výchylka** s , **rychlost** v , **zrychlení** a a které jsou definovány následujícími vztahy

a) Okamžitá **výchylka** s

$$s(t) = s_o \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = s_o \sin(2\pi ft) = s_o \sin(\omega t) \quad (3)$$

kde $\omega = 2\pi f$ je kruhový kmitočet, s_o je amplituda výchylky a t je čas. Jednotkou výchylky je metr [m].

b) Okamžitá **rychlost** v

$$v(t) = \frac{ds}{dt} = \omega s_o \cos(\omega t) = v_o \cos(\omega t) = v_o \sin(\omega t + \pi/2) \quad (4)$$

kde v_o je amplituda rychlosti. Jednotkou rychlosti je metr za sekundu [m.s⁻¹].

c) Okamžité **zrychlení** a

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -\omega^2 s_o \sin(\omega t) = -a_o \sin(\omega t) = a_o \sin(\omega t + \pi) \quad (5)$$

kde a_o je amplituda zrychlení. Jednotkou zrychlení je metr za sekundu na druhou [m.s⁻²], v technické praxi se stále používá jednotka **g** (gravitační konstanta; tíhové zrychlení 1 g = 9,81 m.s⁻²).

Rychlost a zrychlení mají s výchylkou stejné kmitočty, nejsou s ní však ve fázi. Rychlost předbíhá výchylku o 90° ($\pi/2$) a zrychlení o 180° (π), tj. je s ní v protifázi.

Z výše uvedeného vyplývají pro amplitudy výchylky s_o , rychlosti v_o a zrychlení a_o v praxi důležité níže uvedené vztahy, které umožňují vzájemný přepočet určujících veličin. Toho se využívá při měření vibrací a též i při kalibraci snímačů vibrací, kdy např. laserinterferenčním vibrometrem se změří amplituda výchylky s_o , ale je nutno znát při kalibraci snímače zrychlení amplitudu zrychlení a_o nebo při kalibraci snímače rychlosti amplitudu rychlosti v_o .

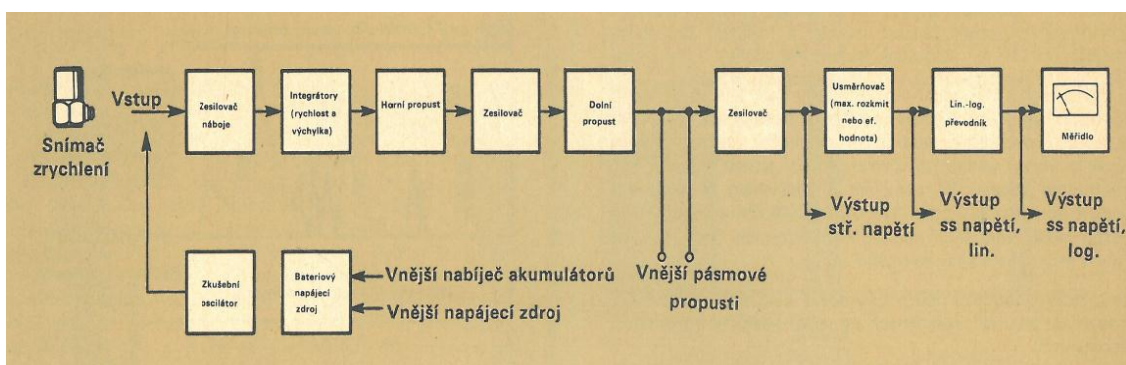
$$a_o = \omega^2 s_o = \omega v_o \quad (6)$$

$$v_o = \omega s_o = \frac{a_o}{\omega} \quad (7)$$

$$s_o = \frac{v_o}{\omega} = \frac{a_o}{\omega^2} \quad (8)$$

2.6. Vibrometry

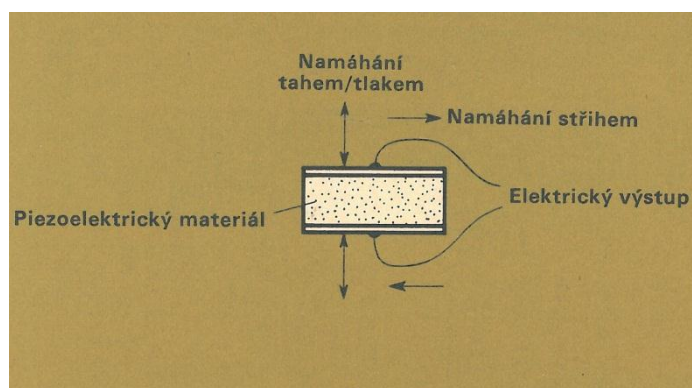
Měření vibrací se provádí vibrometry, jejichž blokové schéma je na obr. 4. Na objekt, jehož vibrace se mají měřit, se upevní snímač (obvykle akcelerometr), který převádí působící určující veličinu vibrací (zrychlení) na analogový elektrický signál, který je dále zesílen v zesilovači. Zesílený analogový elektrický signál se dále upravuje (filtruje, derivuje, integruje...) a poté se může přímo měřit analogovým měřidlem (voltmetrem) nebo se digitalizuje v AD převodníku a digitálně zpracovává ve spektrálním analyzátoru a pod.



Obr. 4

2.7. Snímače vibrací

Jako snímače vibrací se v současnosti běžně používají piezoelektrické akcelerometry. Jejich předností je široký pracovní kmitočtový i amplitudový (dynamický) rozsah, pevná a robustní konstrukce, vysoká spolehlivost a dlouhodobá stabilita. Velkou výhodou piezoelektrických snímačů zrychlení je také to, že patří k aktivním měničům, generujícím elektrický signál a tudíž nepotřebují vnější napájecí zdroj. Tyto snímače nemají pohyblivé části, citlivé k opotřebení. Základním prvkem piezoelektrického snímače zrychlení je výřez z piezoelektrického materiálu, obvykle z uměle polarizované piezoelektrické keramické hmoty nebo z křišťálu, vykazující výrazný piezoelektrický jev. Podstatou piezoelektrického jevu je vznik elektrického náboje na čelních stěnách výřezu piezoelementu při jeho mechanickém namáhání (tahu, tlaku či stříhu) viz obr. 5.



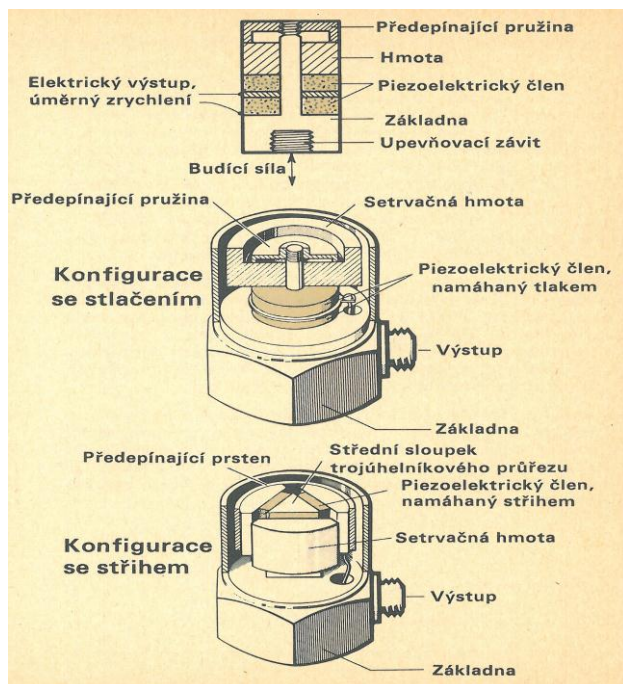
Obr. 5

Vznikající elektrický náboj je úměrný působící mechanické síle. Umístí-li se na piezoelement hmota o hmotnosti m a tato kombinace se rozkmitá, vzniká dynamická síla F , která je podle Newtonova zákona úměrná působícímu zrychlení

$$F(t) = m a(t) \quad (9)$$

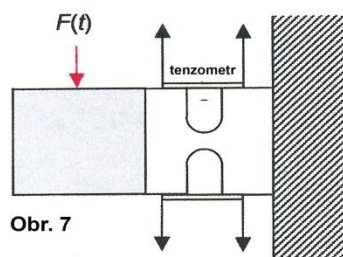
Protože piezoelement snímače generuje elektrický náboj q , který je úměrný působící síle F a tato síla je úměrná působícímu zrychlení a , nazývá se tento piezoelektrický snímač akcelerometrem neboli snímačem zrychlení. Na obr. 6 jsou zobrazeny různé konstrukce klasických piezoelektrických snímačů zrychlení. Jednou z nevýhod piezoelektrických akcelerometrů je skutečnost, že i když jsou to snímače aktivní, jsou to zároveň snímače s velkou výstupní elektrickou impedancí a velikost výstupního elektrického signálu (náboje) může být značně ovlivněna kapacitou kabelu a tedy i jeho délkou a též i vstupní

kapacitou zesilovače. Proto se piezoelektrické snímače připojují buď na vstup zesilovačů náboje, nebo se zesilovač umístí přímo do pouzdra snímače a potom je výstupní impedance akcelerometru malá a signál ze snímače již prakticky závislý na délce připojovacího kabelu. Vestavěné integrované zesilovače ve snímači jsou obvykle napájeny konstantním elektrickým proudem mezi 2 mA a 20 mA. Takové snímače se nazývají CCLD (= Constant Current Line Drive)

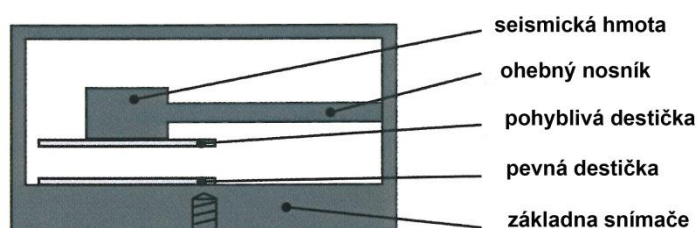


Obr. 6

Vedle piezoelektrických snímačů se stále více rozšiřují i snímače, které snímají působící sílu úměrnou zrychlení vibrací jinak než pomocí piezoelektrického jevu. Na obr. 7 je zobrazen princip snímače s piezorezistivními snímači neboli tenzometry. Tento způsob snímání bývá použit např. v snímačích mechanických rázů a i v tzv. snímačích MEMS (=Micro-Electro-Mechanical Systems), které představují novou generaci moderních snímačů vibrací, které mohou měřit zrychlení od velmi nízkých kmitočtů. Tenzometry (obvykle polovodičové) se ve snímači zapojují obvykle do můstku a tím se zvyšuje jejich citlivost a zároveň snižuje jejich teplotní závislost.

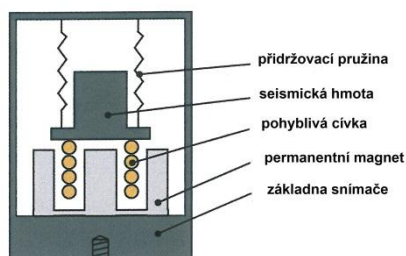


Akcelerometr s kapacitním snímačem je též využíván při konstrukci miniaturních snímačů vibrací typu MEMS. Na obr. 8 je zobrazen princip kapacitního akcelerometru.



Obr. 8

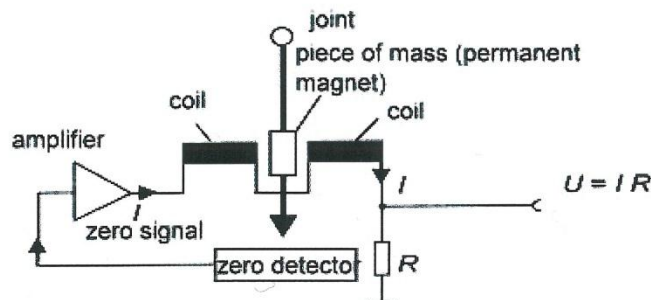
Na obr. 9 je znázorněn princip indukčního snímače vibrací, který využívá indukce elektromotorického napětí v cívce, která se pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu. Dle Faradayova zákona je indukované elektromotorické napětí úměrné časové změně magnetického toku, tedy je úměrné rychlosti pohybu cívky v mezeře magnetu. Tento typ snímače rychlosti vibrací je velmi citlivý, je aktivní (nevyžaduje napájecí napětí) a používal se již před zavedením piezoelektrických akcelerometrů. Dnes je využíván hlavně pro seismická měření v pásmu nízkých kmitočtů od 0,1 Hz až do několika stovek Hz.



Obr. 9

Perspektivním typem akcelerometrů jsou servo snímače, které používají řídicí obvod ke kompenzaci působící síly. Externě působící síla $F(t) = m a(t)$ je kompensována opačně působící silou F_i , která je generována uvnitř snímače

tak, aby výsledná síla byla nulová. Elektrický signál (proud nebo napětí), který vytváří uvnitř snímače kompensující sílu je zároveň výstupním signálem úměrným zrychlení vibrací. Kompensace působící síly vzniká působením magnetického pole cívky na permanentní magnet (Obr. 10). Činnost snímače nulové polohy bývá založena na dvojitém kapacitním snímači. Servo snímače jsou vhodné pro měření vibrací v pásmu velmi nízkých kmitočtů od kmitočtu 0 Hz až do několik stovek Hz. Jejich využití je široké, jsou vhodné i pro inerciální navigaci letadel, lodí, raket atd.



Obr. 10

2.8. Citlivost snímačů vibrací

Jedním z důležitých parametrů každého snímače vibrací je jeho **citlivost** S (přenos), který je definován jako poměr výstupního elektrického signálu snímače U k určující veličině vibrací Y , která na snímač působí. Obecně je citlivost snímače komplexní číslo

$$\bar{S} = \frac{\bar{U}}{\bar{Y}} = |\bar{S}| e^{j\varphi_s} = \frac{|\bar{U}| e^{j\varphi_U}}{|\bar{Y}| e^{j\varphi_Y}} \quad (10)$$

kde $\varphi_s = \varphi_U - \varphi_Y$ udává fázové zpoždění výstupního signálu snímače vůči působícím vibracím.

Pro praxi ve většině případů postačuje znát velikost (magnitudu) citlivosti snímače, údaj o fázovém zpoždění je důležitý pouze při speciálních měřeních např. při modální analýze. Velikost citlivosti se má vyjadřovat pouze jako podíl souměřitelných jednotek, např. podíl pouze efektivních hodnot nebo podíl pouze amplitud.

Pro piezoelektrické snímače zrychlení vibrací (akcelerometry) je velikost citlivosti S

$$S = \frac{C}{a} \quad (11)$$

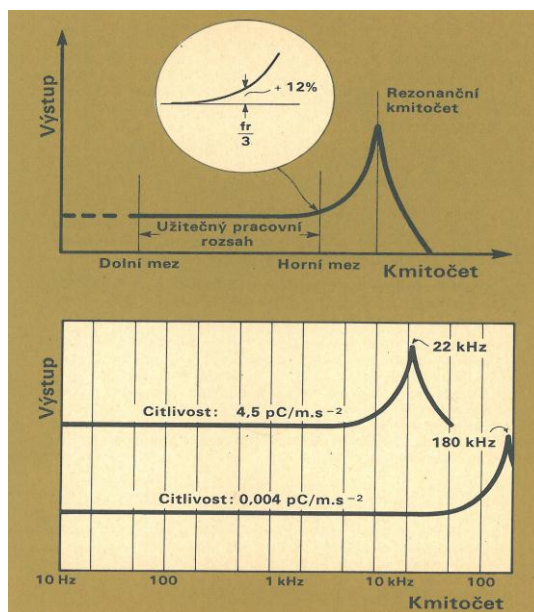
kde C je elektrický náboj generovaný snímačem [C], a je zrychlení vibrací působící na snímač [$m \cdot s^{-2}$].

Velikost jmenovité citlivosti piezoelektrických akcelerometru leží obvykle v rozsahu od 0,001 pC/($m \cdot s^2$) až do 100 pC/($m \cdot s^2$).

Jmenovitá citlivost akcelerometrů, jejichž činnost je založena na jiném než piezoelektrickém jevu a u piezoelektrických akcelerometrů s vestavěným zesilovačem, leží citlivost obvykle v pásmu 1 mV/($m \cdot s^2$) až 10 V/($m \cdot s^2$). U indukčních snímačů bývá jmenovitá citlivost 1 mV/($mm \cdot s^{-1}$) až 10 V/($mm \cdot s^{-1}$).

2.9. Kmitočtový rozsah snímačů vibrací

Ačkoliv je energie vibrací převážné většiny mechanických soustav z velké části soustředěna v pásmu kmitočtů od 10 Hz do 1 kHz, měření se často provádí až do 10 kHz, protože se v pásmu vysokých kmitočtů nezdá nacházet významné a z hlediska analýzy zajímavé složky chvění. Při výběru snímače vibrací je tudíž nutno věnovat pozornost i pracovnímu kmitočtovému rozsahu a používat snímače, zaručující pokrytí potřebného rozsahu. Dolní kmitočtová mez piezoelektrických akcelerometrů je dána zejména dolním mezním kmitočtem předzesilovače a může být i pod 1 Hz. Horní mez pracovního kmitočtového rozsahu snímačů vibrací je určena vlastním rezonančním kmitočtem jejich systému, složeného z hmoty a pružiny. Na obr. 11 jsou znázorněny kmitočtové závislosti elektrického výstupu při konstantních velikostech vibrací. Rezonanční kmitočet snímače závisí na konstrukci snímače, obvykle rozměrově malé snímače s nízkou hmotností mají vyšší rezonanční kmitočet než snímače velké a hmotnější. Pro praktické měření vibrací se doporučuje stanovit horní pracovní kmitočet tak, aby byl 1/3 rezonančního kmitočtu snímače. Toto praktické pravidlo zaručuje měření složek vibrací na kmitočtech ležících v okolí třetiny rezonančního kmitočtu s chybou, nepřesahující 12%.



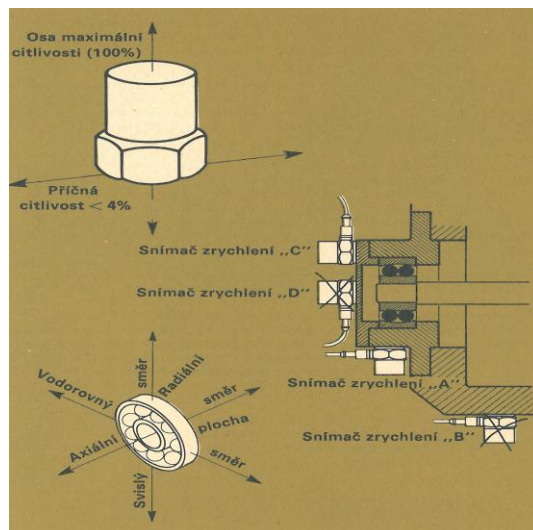
Obr. 11

2.10. Upevnění snímačů vibrací

Upevnění snímačů vibrací k měřenému objektu může značnou měrou ovlivnit výsledky měření vibrací. Snímač se upevňuje tak, aby směr, ve kterém se provádí měření, odpovídal směru osy maximální citlivosti snímače (Obr. 12). Místo upevnění snímače je zpravidla určováno důvody měření vibrací určitého objektu. Např. při měření vibrací ložiska by měl být snímač upevněn tak, aby snímal především vibrace ložiska. Proto umístění snímače v bodě A bude v dané situaci optimální (Obr. 12). Naproti tomu snímač upevněný v poloze B bude měřit vibrace ložiska, ovlivněné přenosem přes spojovací díly zařízení spolu s vibracemi, generovanými jinými díly zařízení. Snímač upevněný v bodě D může měřit vibrace zvětšené rezonancí víka ložiska. Bod C je vhodný pro měření axiálních vibrací ložiska.

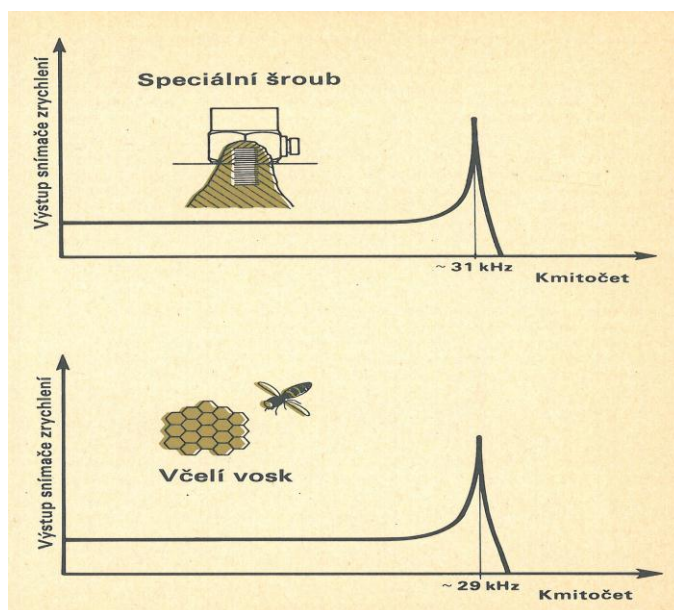
Odezva a reakce mechanických soustav a systémů na vynucené mechanické kmitání jsou velmi složité, takže amplitudy i kmitočtová spektra vibrací, měřené na několika nepříliš od sebe vzdálených místech jednoho a téhož dílu či součásti, se mohou vzájemně výrazně lišit. Tyto rozdíly mohou být zvláště výrazné v oblasti vysokých kmitočtů (větších než 1 kHz).

Pokud je zapotřebí měřit složky vibrací ve třech navzájem kolmých osách, použijeme tříosé snímače, které se skládají ze třech jednoosých snímačů navzájem kolmo spojených.

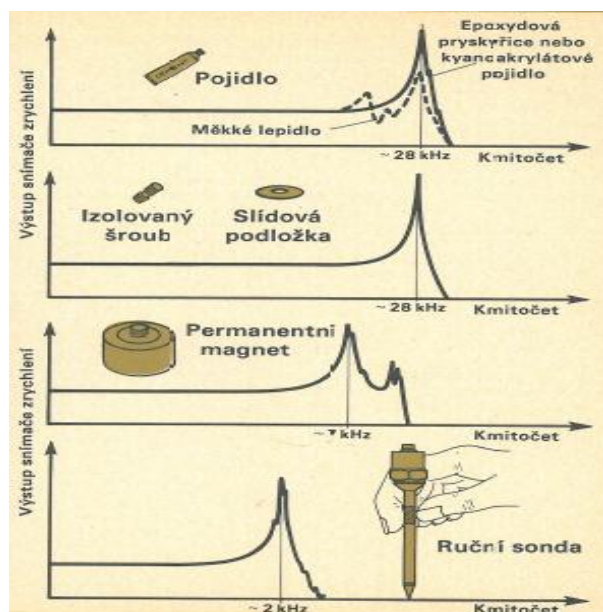


Obr. 12

Existuje několik možností mechanického upevnění snímače na měřený objekt: přišroubování, přilepení, pomocí permanentního magnetu a ruční sondou se snímačem přidržovaným rukou. Nedokonalé upevnění snižuje rezonanční kmitočet upevněného snímače a výrazně zmenšuje jeho použitelný pracovní kmitočtový rozsah. Obr. 13 a 14 zobrazují vliv různého upevnění snímače na rezonanční kmitočet.



Obr. 13



Obr.14

2.11. Kalibrace snímačů vibrací

Kalibrace snímačů vibrací nabývá na zvýšeném významu tak, jak vzrůstá potřeba přesných měření vibrací, kterým jsou vystaveny při práci osoby a široký rozsah zařízení. Též při vývoji snímačů vibrací a při jejich výrobě je nutno snímače kalibrovat. Metody kalibrace snímačů vibrací jsou celosvětově standardizovány v ISO normách řady 16063, z nichž tři nejdůležitější byly vydány v češtině:

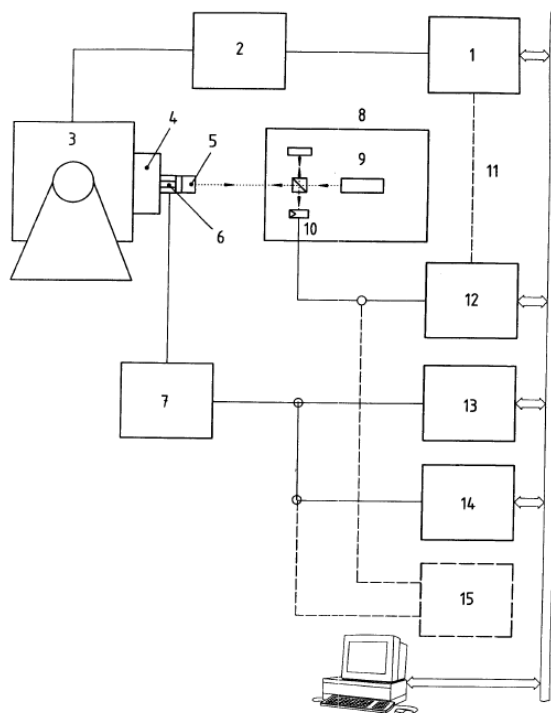
- [1] ČSN ISO 16063-1/2000 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 1: Základní pojetí“
- [2] ČSN ISO 16063-11/2001 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 11: Primární kalibrace vibracemi pomocí laserové interferometrie“
- [3] ČSN ISO 16063-21/2004 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 21: Kalibrace vibracemi porovnáním s referenčním snímačem“.

V těchto normách jsou popsány podrobně metody a postupy kalibrace snímačů vibrací a to na dvou úrovních etalonáže.

První stupeň etalonáže se zabývá kalibracemi na nejvyšší (primární) úrovni, kdy se kalibrují etalonové (referenční) akcelerometry, které se používají na druhém stupni etalonáže ke kalibračním pracovním snímačům vibrací. Měření amplitudy výchylky na primární úrovni se provádí absolutní metodou, tj. přímým porovnáním s etalonem délky, což je v současnosti vlnová délka laserového elektromagnetického záření. Měření amplitudy výchylky harmonických vibrací se provádí laserovým interferometrem, pro výpočet amplitudy zrychlení nebo rychlosti se využívají vztahy (6) a (7), které platí pro vzájemný přepočet určujících veličin vibrací harmonického průběhu. Relativní nejistoty stanovení citlivosti akcelerometru na primární úrovni etalonáže vibrací bývají menší než 0,5 %.

V normě [2], která se zabývá kalibracemi etalonových snímačů vibrací na primární úrovni, jsou popsány tři metody interferenčního měření. V současnosti se prakticky používají jen dvě a to metoda „počítání interferenčních proužků“ a metoda „sinusové aproximace“. Kalibrace snímače vibrací metodou „počítání interferenčních proužků“ používá Michelsonův interferometr s jedním fotodetektozem pro snímání pohybujícího se interferenčního pole, které se skládá ze světlých a tmavých proužků.

Blokové uspořádání při kalibraci etalonového snímače zrychlení metodou „počítání interferenčních proužků“ je na obr. 15



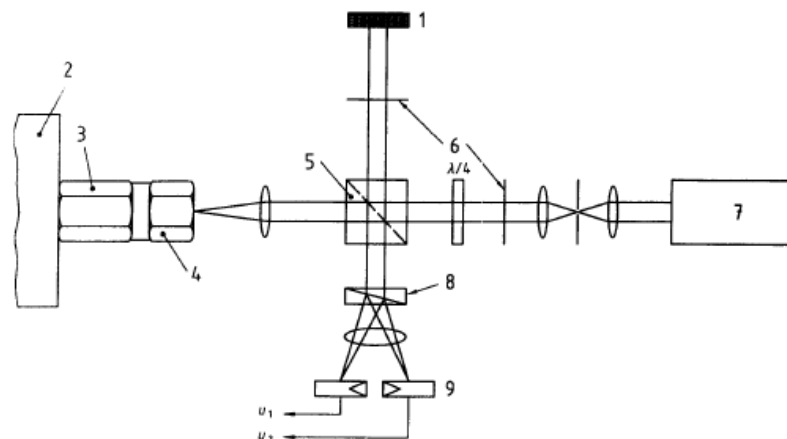
Obr. 15

Kalibrovaný snímač 6 se upevní na upínací stolek 4 elektrodynamického vibrátoru 3, který je napájen z generátoru 1 přes výkonový zesilovač 2 a generuje vibrace harmonického průběhu. Na kalibrovaný snímač je připevněno zrcátko 5, které se snímačem kmitá a odráží zpět do interferometru 8 měřicí optický svazek laseru. Výstupní signál z kalibrovaného snímače je po zesílení v předzesilovači 7 měřen voltmetrem 13. Měřič harmonického zkreslení 14 a osciloskop 15 jsou pomocné přístroje. Výstupní signál z fotodetektoru interferometru 10 se zavádí do čítače 12, kde se měří jeho kmitočet. Lze odvodit, že citlivost S kalibrovaného akcelerometru je dána vztahem

$$S = \frac{U}{ff_f} \times 0,3202 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} \quad (12)$$

kde U je amplituda výstupního elektrického signálu z akcelerometru,

f je kmitočet vibrátoru, f_f je frekvence interferenčních proužků.

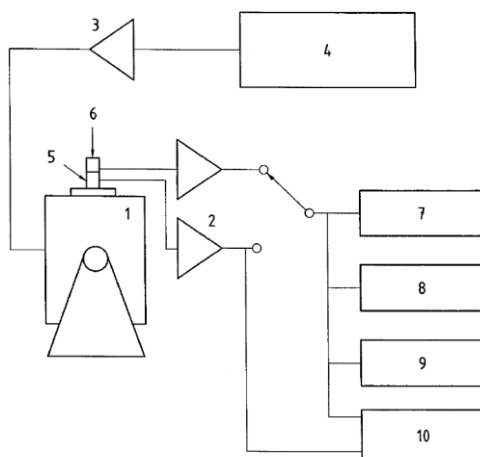


Obr. 16

Na obr.16 je uspořádání interferometru s kvadraturním výstupem, kde časový průběh signálu z druhého fotodetektoru je posunut o 90° vzhledem k prvnímu, a který se používá při kalibraci pomocí druhé etalonové metody „sinusové aproximace“. Tato metoda umožňuje měřit i fázový posun mezi mechanickým pohybem (vibracemi) a signálem z kalibrovaného akcelerometru. Při kalibraci se všechny tři signály (ze snímače a z obou fotodetektorů interferometru) digitalizují a uloží do paměti počítače. Poté počítačový program algoritmem sinusové aproximace vytvoří z dat uložených v paměti analogové napětí, jehož časový průběh a i velikost amplitudy výchylky odpovídá časovému i amplitudovému průběhu vibrací a protože je k dispozici i amplitudový a časový průběh elektrického signálu z kalibrovaného akcelerometru, lze vypočítat jak velikost citlivosti akcelerometru, tak i fázový posun.

Druhý stupeň etalonáže se používá ke kalibracím pracovních snímačů vibrací, které se používají při praktickém měření vibrací. Kalibrace se provádí porovnávací metodou pomocí etalonového (referenčního) snímače, který byl zkalibrován absolutní metodou laserovým interferenčním vibrometrem na primární úrovni etalonáže. Relativní nejistoty stanovení citlivosti akcelerometru na sekundární úrovni etalonáže vibrací mohou v závislosti na kmitočtu být od 0,5 % až do několika procent.

V normě [3], která se zabývá kalibracemi pracovních snímačů vibrací na sekundární úrovni, je podrobně popsána porovnávací metoda. Blokové uspořádání při kalibraci pracovního akcelerometru je na obr. 18.



Obr. 18

Kalibrovaný pracovní akcelerometr **6** se spojí (sešroubuje) s etalonovým akcelerometrem **5** a tato dvojice se upevní na pohyblivý stolek elektrodynamického vibrátoru **1**, který je napájen přes výkonový zesilovač **3** z generátoru sinusového napětí **4**. Výstupní signály z obou akcelerometrů jsou zesíleny v předzesilovačích **2** a měřeny voltmetrem **7**. Pomocné měřicí přístroje **8** (měřič zkreslení), **9** (osciloskop) a **10** (fázoměr) rozšiřují možnosti kalibrace i o měření fázového zpoždění. Velikost citlivosti kalibrovaného snímače se vypočítá ze vztahu

$$S_2 = \frac{x_2}{x_1} S_1 \quad (13)$$

kde S_1 je velikost citlivosti etalonového snímače,

x_1 je výstup etalonového snímače,

x_2 je výstup kalibrovaného snímače.

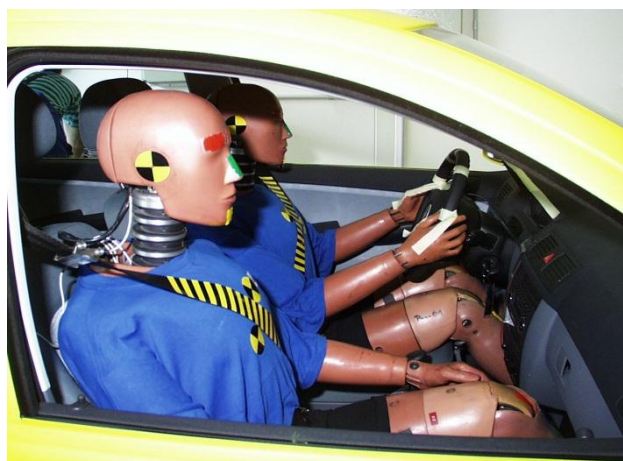
3. MĚŘENÍ MECHANICKÝCH RÁZŮ

3.1. Význam měření mechanických rázů

Mechanické rázy se měří v různých oblastech zkušebnictví. Významné je měření rázů při barierových zkouškách odolnosti silničních vozidel (tzv. crash testy) viz obr. 19 a 20, kde zrychlení působící na zkušební figuríny při nárazu vozidla je měřeno pomocí snímačů rázů (akcelerometrů). Měření mechanických rázů se provádí též při zkouškách obalů, které chrání přepravované výrobky, při zkouškách pevnosti a funkčnosti bezpečnostních pásů v dopravních prostředcích a podobně.



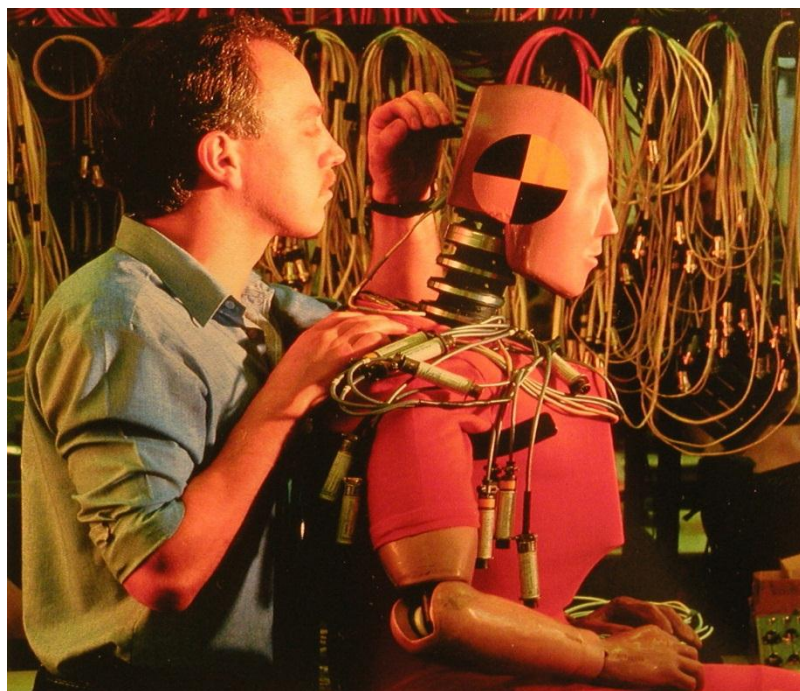
Obr. 19



Obr. 20

3.2. Snímače rázů a jejich kalibrace

Snímače rázů jsou v podstatě jednoosé nebo tříosé snímače přímočarého mechanického kmitání (akcelerometry), jejichž funkce je obvykle založena na principu piezoelektrického nebo piezorezistivního jevu. Protože při barierové zkoušce vozidla dochází k jeho větší či menší destrukci a zkoušku nelze tedy se stejným vozidlem opakovat a zejména, aby byly výsledky zkoušek získaných v různých zkušebnách srovnatelné, jsou na správnost měření mechanických rázů při crash testech kladeny přísné podmínky. Týká se to celého měřicího řetězce měřiče rázů (tzv. datového kanálu), sestávajícího ze snímačů rázů (akcelerometrů), analogo-digitálních převodníků, digitálních filtrů a digitálního záznamového zařízení. Montáž snímačů rázů do zkušební figuríny před cash testem ukazuje obr. 21.



Obr. 21

Požadavky na metrologické vlastnosti měřičů rázů, používaných při crash testech, jsou dány mezinárodní normou ISO 6487 a doporučením SAE J211-1. Oba dokumenty vyžadují, aby přesnost kalibračního zařízení pro dynamickou kalibraci snímačů rázů byla menší než 1,5 % na kmitočtech nižších 400 Hz resp. menší než 2 % v pásmu kmitočtů 400 Hz až 900 Hz. Metody kalibrace snímačů rázů jsou popsány v ČSN ISO 16063-22 [4], která specifikuje přístrojové vybavení a postupy používané při kalibraci snímačů mechanických rázů na

sekundární úrovni etalonáže. Pracovní snímače rázů se dle uvedené normy kalibrují porovnávací metodou s využitím referenčního etalonového snímače rázů. Popsané kalibrační metody platí pro dynamický rozsah zrychlení (maximální hodnota) 100 m/s^2 až 100 km/s^2 , což odpovídá přibližně hodnotám 10 g až 10.000 g ($1 \text{ g} \sim 9,81 \text{ m/s}^2$), přičemž zkušebny požadují kalibrace snímačů rázů obvykle v rozsahu 10 g až 300 g . Metody umožňují zjištění citlivosti S snímače rázů, která se vyjadřuje vztahem

$$S = U/a \quad (14)$$

kde U je špičková hodnota elektrického signálu na výstupu snímače [V],

a je špičková hodnota zrychlení působícího na snímač [m/s^2] nebo [g].

Kalibrační zařízení pro kalibraci snímačů rázů dle [4] lze rozdělit do dvou skupin. První skupina rázových kalibrátorů je založena na principu kovadliny a kladiva a je vhodná pro kalibrace rázy v pásmu nižších hodnot zrychlení (maximální hodnoty od 5 g do 1000 g) s délkou trvání rázu ve tvaru půlperiody sinusového signálu od 3 ms do 8 ms . Do této skupiny patří kalibrátory využívající jako kladiva

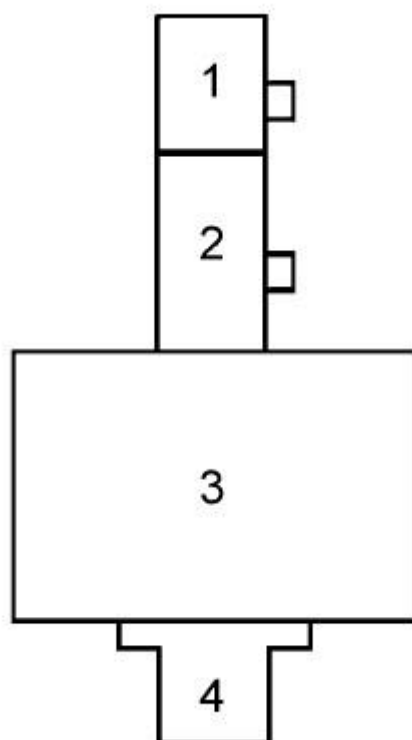
soustavu kyvadel,

padající kuličky,

pneumaticky poháněné písty.

Při kalibracích na kalibrátorech prvního typu (obr. 21) se na kovadlinu (4) upevní nejprve zkušební hmota (3), na ní se upevní referenční snímač (2) se známou citlivostí S_s a na něj se připevní kalibrovaný snímač (1). Po dopadu kladiva (kyvadla, kuličky nebo pneumaticky vystřeleného projektilu) na kovadlinu se vybudí mechanický ráz, jehož zrychlení je více méně půlsinusového časového průběhu. Toto zrychlení se měří současně etalonovým snímačem s citlivostí S_s a kalibrovaným snímačem rázů tak, že se měří maximální hodnoty jejich výstupních elektrických signálů U_s a U_x . Rázová citlivost kalibrovaného snímače S_x se vypočítá ze vztahu

$$S_x = S_s \frac{U_x}{U_s} \quad (15)$$

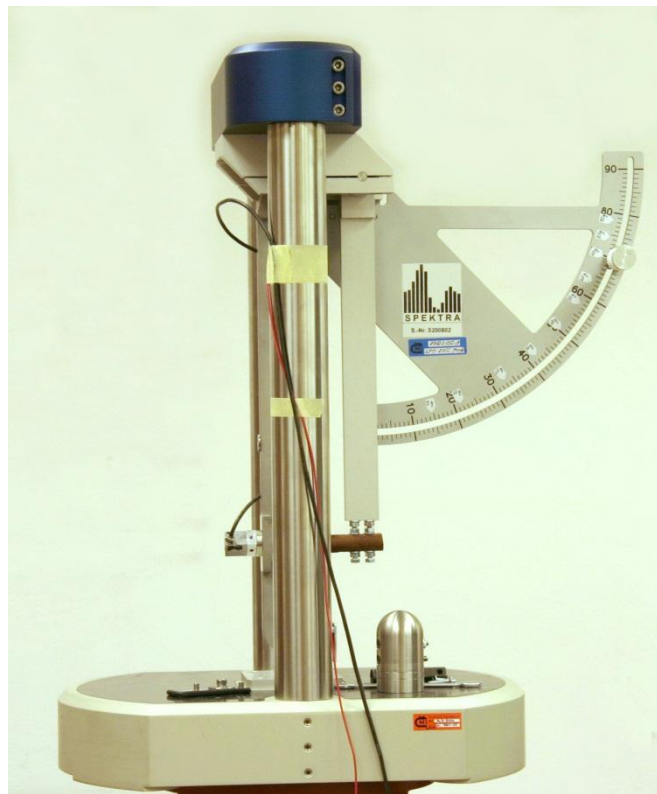


Obr. 21

Kalibrátor snímačů rázů s pneumaticky poháněným projektilem je na obr. 22, kalibrátor snímačů rázů s kyvadlem je na obr. 23.



Obr. 22



Obr. 23

Druhá skupina rázových kalibrátorů pracuje s tzv. Hopkinsonovou tyčí, která je obecně definována jako dlouhá tenká tyč s poměrem délky k průměru vyšším než 10, obvykle až 100. Tento typ kalibrátoru je vhodný pro kalibrace v pásmu vyšších hodnot zrychlení (maximální hodnoty až do 20.000 g) s délkou trvání rázu ve tvaru půlperrody sinusového signálu řádu 0,01 ms. Do této skupiny patří kalibrátory s

celou tyčí a porovnáním se snímači rychlosti nebo zrychlení,

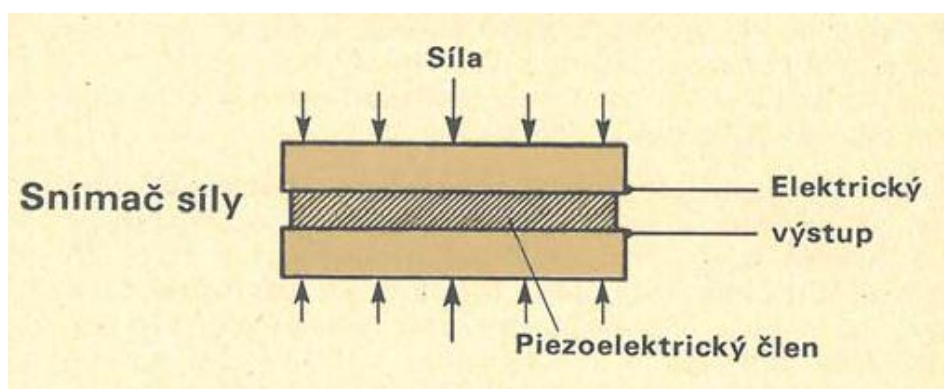
dělenou tyčí a porovnáním se snímačem síly.

Kalibrátor s Hopkinsonovou tyčí pracuje tak, že kalibrovaný snímač rázů se upevní na jeden konec tyče a mechanickým nárazem projektilu do druhého konce tyče se v tyči vybudí podélné vlnění, které se dá aproximovat jako pohyb tuhého tělesa. Podrobnosti jsou uvedeny v článku 5.3 Rázové kalibrátory na principu Hopkinsonovy tyče v ČSN ISO 16063-22 [4].

4. MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH SIL

4.1. Snímače dynamických sil a jejich kalibrace

Dynamické síly se měří např. ve zkušebnictví (cash testy automobilů), modální analýze a při stanovení dynamických vlastností materiálů. Pro měření dynamických sil se používají snímače, jejichž funkce je obvykle založena na principu piezoelektrického jevu (Obr. 24), vzhled snímače dynamické síly je na obr. 25.



Obr. 24



Obr. 25

Kalibrace snímačů dynamických sil se provádí využitím Newtonova zákona, který umožňuje vypočítat velikost dynamické síly působící na kalibrovaný snímač při dynamickém zrychlení ze vztahu

$$\mathbf{F} = \mathbf{m}_{\text{kal}} \cdot \mathbf{a} \quad (16)$$

kde $\mathbf{F}$ je síla, působící na kalibrovaný snímač síly [N],

$\mathbf{m}_{\text{kal}}$ je kalibrační hmota, upevněná na kalibrovaný snímač síly [kg],

$\mathbf{a}$ je dynamické zrychlení působící na kalibrovaný snímač [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Na kalibrovaný snímač dynamické síly se přišroubuje kalibrační tělísko o známé hmotě m_1 a tato sestava se upevní na budič přímočarých vibrací harmonického (sinusového) průběhu o známém kmitočtu (Obr. 26). Etalonovým snímačem zrychlení, který je uvnitř upínacího stolku budiče, se změří vybuzené zrychlení a dle výše uvedeného vztahu (16) se vypočte velikost dynamické síly, která působí na kalibrovaný snímač. Zároveň se změří velikost výstupního elektrického signálu z kalibrovaného snímače dynamické síly, který může mít buď formu elektrického napětí nebo náboje. Výsledkem kalibrace je velikost citlivosti snímače.

$$S_F = U/F \quad (17)$$

kde S_F je citlivost snímače síly [V/N]

U je výstupní elektrický signál ze snímače síly [pC] nebo [V],

F je síla, působící na kalibrovaný snímač síly [N].



Obr. 26

LITERATURA:

- [1] ČSN ISO 16063-1/2000 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 1: Základní pojetí“
- [2] ČSN ISO 16063-11/2001 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 11: Primární kalibrace vibracemi pomocí laserové interferometrie“
- [3] ČSN ISO 16063-21/2004 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 21: Kalibrace vibracemi porovnáním s referenčním snímačem“.
- [4] ČSN ISO 16063-21/2006 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 22: Kalibrace rázy porovnáním s referenčním snímačem“.
- [5] Buehn U.: Compendium of Vibration Calibration, SPEKTRA, Dresden 2007
- [6] Broch J.T.: Mechanical Vibration and Shock Measurements, 1984
- [7] Prášil M.: Kalibrace snímačů mechanických rázů, Metrologie 2/2009

PŘÍLOHY

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií
CZ.1.07/2.3.00/09.0031

Ústav automatizace a měřicí techniky
VUT v Brně
Kolejní 2906/4
612 00 Brno
Česká Republika

<http://www.crr.vutbr.cz>

info@crr.vutbr.cz