

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přehled senzorů pro měření vibrací

vedoucí práce: Ing. Zuzana Kabešová

2012

autor: Vladimír Vacek

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vladimír VACEK**
Osobní číslo: **E09B0203P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Přehled senzorů pro měření vibrací**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte základní fyzikální podstatu vibrací a proveďte krátký úvod do problematiky měření vibrací.
2. Zpracujte přehled snímačů vibrací a jejich uplatnění.
3. Proveďte průzkum trhu se zaměřením na nové trendy.
4. Zhodnoťte získané poznatky.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. SMETANA, C.: Hluk a vibrace, měření a hodnocení. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901-9362-5.
2. KREINDL, M., Šmíd, R.: Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu, 4. díl edice Senzory neelektrických veličin, 1. vyd., BEN, 2006, ISBN 80-7300-158-6

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zuzana Kabešová
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 17. října 2011
Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2012


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato bakalářská práce se zaměřuje na vibrační senzory dostupné na současném trhu. Teoreticky je zde zpracován fyzikální princip vibrací, podstata funkce snímačů a použité technologie, které slouží k jejich měření. V práci je uveden průřez nejrozšířenějšími modely, jejich vhodné způsoby použití zároveň s hodnocením jejich vlastností, ať už kladných, tak záporných.

Klíčová slova

Vibrace, chvění, šíření vibrací, snímače vibrací, piezoelektrické akcelerometry, piezorezistivní akcelerometry, akcelerometry s proměnnou kapacitou, laserové snímače.

Title

Summary of sensors for vibrations measurements

Abstract

This bachelor thesis is focused on vibrations sensors available on actual market. Theoretically is processed the physical principle of vibrations, principle of the function of vibration sensors and used technologies, which serve to their measurement. In this thesis are shown the most common vibration sensors, what purpose are they suitable for, together with their positive or negative characteristics.

Key words

Vibrations, trembling, distribution of vibrations, vibration sensors, piezoelectric accelerometers, piezoresistive accelerometers, variable capacitance accelerometers, laser vibrationmeters.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 8.6.2012

Vladimír Vacek

.....

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ	9
1 ÚVOD	11
2 PODSTATA VIBRACÍ.....	12
2.1 VIBRACE - OBECNÝ POPIS	12
2.2 VELIČINY URČUJÍCÍ CHVĚNÍ.....	12
2.2.1 Rychlost kmitavého pohybu	13
2.2.2 Zrychlení kmitavého pohybu.....	13
2.2.3 Fáze kmitavého pohybu	13
2.2.4 Vlnová délka	13
2.2.5 Rychlost šíření akustických vln v pevných látkách	13
2.2.6 Intenzita chvění.....	16
2.2.7 Mechanická impedance.....	16
2.3 HLADINY CHVĚNÍ	16
2.4 ABSOLUTNÍ A RELATIVNÍ VIBRACE	17
2.5 MĚŘENÍ VIBRACÍ	18
2.5.1 Převod neelektrické veličiny na elektrický signál.....	18
2.5.2 Hybridní snímače.....	18
2.5.3 Inteligentní snímače	19
2.5.4 Mechanické snímače	19
2.5.5 Bezdotykové snímače	19
2.5.6 Lasreová interference	19
3 SENZORY VIBRACÍ	20
3.1 ABSOLUTNÍ SENZOR VÝCHYLKY	20
3.2 ABSOLUTNÍ SENZOR RYCHLOSTI.....	20
3.2.1 Elektrodynamický senzor rychlosti	21
3.3 ABSOLUTNÍ SENZOR ZRYCHLENÍ - AKCELEROMETR	22
3.3.1 Piezoelektrický akcelerometr	22
3.3.2 Piezorezistivní akcelerometr.....	27
3.3.3 Kapacitní akcelerometr.....	28
3.3.4 Tepelné akcelerometry.....	29

3.4	SENZORY VÝCHYLKY, POLOHY A POSUVU	30
3.5	LASEROVÉ INTERFEROMETRICKÉ VIBROMETRY	30
4	TRH SENZORŮ VIBRACÍ	31
4.1	KRITÉRIA PRO VOLBU SENZORU	31
4.2	TECHNICKÉ PARAMETRY SENZORŮ	32
4.3	PIEZOELEKTRICKÉ AKCELEROMETRY	33
4.3.1	<i>Piezoelektrické nábojové akcelerometry, IEPE akcelerometry</i>	<i>33</i>
4.3.2	<i>Piezorezistivní akcelerometry</i>	<i>37</i>
4.3.3	<i>Akcelerometry s proměnnou kapacitou</i>	<i>38</i>
4.4	LASEROVÉ VIBROMETRY	38
5	ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ	39
6	ZÁVĚR	42
	POUŽITÁ LITERATURA A INTERNETOVÉ ZDROJE	43
	SEZNAM PŘÍLOH	46

Seznam symbolů

v [m/s]	rychlost kmitání
y [m].....	výchylka hmotného bodu
a [m/s ²].....	zrychlení kmitání
y_o [m].....	amplituda výchylky chvění
ω [rad/s]	úhlový kmitočet
φ_o [°].....	počáteční fáze
λ [m].....	vlnová délka
c [m/s]	rychlost šíření vlny
f [Hz]	frekvence vlnění
T [s]	perioda vlnění
E [N/m ²].....	dynamický modul pružnosti v tahu
ρ [kg/m ³]	hustota prostředí
G [N/m ²]	modul pružnosti ve smyku
c_T [m/s].....	rychlost šíření příčných vln
J [m ⁴].....	moment setrvačnosti průřezu tyče
h [m].....	výška
I [W/m ²]	intenzita chvění
σ_{ef} [N/m ²]	efektivní napětí v materiálu
Z_m [Ns/m].....	mechanická impedance
L_s [dB].....	hladina amplitudy
L_v [dB].....	hladina rychlosti
L_a [dB].....	hladina zrychlení
m [kg].....	hmotnost seismické hmoty
M [kg]	hmotnost měřeného objektu
k [Nm].....	tuhost pružiny
b [kg/s]	součinitel tlumení
F [N]	síla
Q [C]	náboj
d_{33} [C/N]	piezoelektrická konstanta
U [V]	napětí
C [F].....	kapacita

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucí této práce Ing. Zuzaně Kabešové za ochotu, věcné připomínky a cenné rady při vedení v průběhu zpracování této práce.

1 Úvod

Vibrace jsou jevem, se kterým přichází člověk do styku v každodenním životě, aniž by si je uvědomoval. Jsou nedílnou součástí veškerého dění kolem, protože všechna tělesa a částice kmitají, ať už zanedbatelně málo, nebo viditelně. Vibrace mohou být jevem nežádoucím, jako například u součástí různých strojů, kde vibrace způsobují větší namáhání součástí a tím zkracují jejich životnost. Jsou také případy, kdy jsou vibrace jevem požadovaným, jako vibrace u mobilních telefonů, či vibrační lisy pro výrobu materiálů. Tato práce vznikla za účelem zhodnocení senzorů, které jsou k dostání na současném trhu. Cílem je vystihnout a publikovat nejpoužívanější typy a jejich zhodnocení.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních kapitol, které pojednávají a dané problematice. První část je zaměřena na fyzikální princip a veličiny, kterými se dají vibrace charakterizovat a popsat, jakým způsobem se dají změřit a následně analyzovat či uchovat jejich průběh. Část druhá věnuje pozornost jednotlivým technologickým typům senzorů, nehledě na skutečnost, zda se dnes v praxi používají či nikoliv. Snahou je uvést komplexní možnosti snímání chvění. Třetí část stanoví současné požadavky na snímače, zaměří se na konkrétní typy a jejich použití v praxi. Uvede několik typů, které jsou nejčastěji používány s ohledem na jejich technická specifika a vhodnosti aplikace. Kapitola čtvrtá zhodnotí nabyté poznatky a porovná vlastnosti nejpoužívanějších typů snímačů.

2 Podstata vibrací

2.1 Vibrace - obecný popis

Mechanické chvění, neboli vibrace, je zvuk šířící se pevnými materiály a chápeme je jako dynamický jev, při kterém dochází k oscilaci (kmitání) mechanické soustavy jednotlivých hmotných bodů kolem svého rovnovážného bodu. Obecný pojem vibrace či otřesy jsou rozdílné frekvenčním rozsahem. Těleso se nachází v klidové rovnovážné poloze, pokud je hodnota působících sil nulová. Síly působící na těleso mohou mít původ interní (vnitřní) nebo externí (působící z okolí) a jsou určeny směrem budící síly a její frekvencí (kmitočtem). [1][2]

U běžných materiálů dochází při pružných deformacích k určitým ztrátám energie, které je způsobeno vnitřním tlumením. Z toho vyplývá, že při šíření vlnění materiálem dochází k útlumu chvění v závislosti na vzdálenosti od zdroje. Ke snížení energie chvění může dojít například přenesením vibrací materiálu do vzduchového prostředí, změnou materiálu či jeho průřezem, nebo rozvětvením konstrukce. Potom dochází k odrazu akustické vlny zpět ke zdroji a to se projevuje jako útlum. Je důležité si uvědomit, že nedochází k přeměně akustické energie na teplo, ale jen k odrazu zpátky ke zdroji.[4]

Vibrace se rozdělují do dvou hlavních kategorií podle časového průběhu, jak je znázorněno v následující tabulce.

Tab. 2.1 Tabulka rozdělení vibrací [1]

			Sinusové
		Periodické	Vícesinusové
	Deterministické	Neperiodické	Přechodové
Vibrace			
	Náhodné	Nestacionární	
		Stacionární	Silně samostacionární
			Slabě samostacionární

2.2 Veličiny určující chvění

Velikost vibrací lze vyjádřit amplitudou, fází a jejich časovými derivacemi, rychlostí a zrychlením. Kmitání soustavy hmotných bodů je dáno kombinací šesti pohybů v ortogonální soustavě souřadnic, a to posunem a rotací kolem os x , y , z . [1][2]. V určitém časovém okamžiku můžeme u pohybu hmotného prostředí určit jeho výchylku od rovnovážné polohy, rychlost nebo zrychlení pohybu. [4]

2.2.1 Rychlost kmitavého pohybu

Rychlost kmitání získáme z první derivace okamžité výchylky podle času

$$v = \frac{\partial y}{\partial \tau} \quad (2.1)$$

kde v [m/s] rychlost kmitání,
 y [m] výchylka kmitajícího bodu z rovnovážné polohy. [4]

2.2.2 Zrychlení kmitavého pohybu

Zrychlení získáme první derivací rychlosti podle času

$$a = \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 y}{\partial \tau^2} \quad (2.2)$$

kde a [m/s²] zrychlení mechanického kmitání. [4]

2.2.3 Fáze kmitavého pohybu

Všechna kmitání svůj pohyb nezačínají z rovnovážné polohy a záznamové zařízení, které zaznamenává okamžitou výchylku závislou na čase, mohlo být uvedeno do provozu až v čase t_0 po rozkmitání oscilátoru.

$$y = y_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2.3)$$

kde y_0 [m] amplituda výchylky chvění,
 ω [rad/s] úhlový kmitočet,
 φ_0 [°] počáteční fáze kmitavého pohybu. [5]

2.2.4 Vlnová délka

Velmi důležitým parametrem je vlnová délka. Obecně lze říci, že je to vzdálenost mezi dvěma nejbližšími po sobě následujícími vlnoplochami, které mají stejné akustické stavy. Dále jí lze definovat také jako délku vlny, kterou urazí zvuková vlna za jednu periodu. [6]

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

kde λ [m] vlnová délka,
 c [m/s] rychlost šíření vlny,
 f [Hz] frekvence vlnění,
 T [s] perioda vlnění. [6]

2.2.5 Rychlost šíření akustických vln v pevných látkách

Určení rychlosti šíření akustických vln v pevných látkách je složité. Lze proto odvodit vztahy pro rychlost šíření podélných a příčných vln v pevných látkách a pro ohybové vlny.

- **Rychlost šíření podélných vln**

Pro výpočet šíření podélných vln v tenkých tyčích lze použít vztah

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.5)$$

kde E [N/m²] dynamický modul pružnosti v tahu,
 ρ [kg/m³] hustota prostředí.

Z výrazu (2.5) je zřejmé, že rychlost šíření bude tím větší, čím větší bude dynamický modul pružnosti a čím menší bude hustota prostředí.

Rychlost šíření akustických vln v deskách obsahuje ve vztahu (2.5) i Poissonův poměr, který se značí μ a spočte se jako

$$\mu = \frac{E - 2G}{2G} \quad (2.6)$$

kde G [N/m²] modul pružnosti ve smyku.

Pro rychlost šíření podélných vln v desce pak platí následující vztah.

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1 - \mu^2}} \quad (2.7)$$

V následující tabulce je uveden přehled o rychlostech šíření podélných vln v běžných materiálech, ve vodě a vzduchu. [4]

Tab. 2.2 Tabulka rychlosti šíření podélných vln v rozličných látkách [4]

materiál	ρ [kg/m ³]	E [N/m ²]	c_L [m/s]
Vzduch 20°C	1,21		344
Voda 13°C	1000		1440
Pryž tvrdá	1100	$2,2 \cdot 10^9$	1400
Pryž měkká	900	$4,4 \cdot 10^4$	70
Korek	250	$6,3 \cdot 10^7$	500
Bukové dřevo	650	$1 \cdot 10^{10}$	3900
Hliník	2700	$6,2 \cdot 10^{10}$	4800
Ocel	7850	$2,6 \cdot 10^{11}$	5750
Olovo	11400	$2,3 \cdot 10^{10}$	1410
Sklo	2700	$7,5 \cdot 10^{10}$	5270

- **Rychlost šíření příčných vln**

Rychlost šíření příčného vlnění, se značkou c_T a jednotkou [m/s], lze vypočítat vztahem

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.8)$$

Po dosazení do rovnice (2.6) dostaneme výraz, který nám ukazuje, že poměr mezi rychlostí podélných a příčných vln je konstantní. [4]

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (2.9)$$

- **Ohybové vlny**

Složení podélného a příčného vlnění vzniká vlnění ohybové v tělesech, které mají jeden rozměr mnohem větší než druhý, jako jsou například desky a tyče. U ohybového vlnění závisí rychlost šíření vlny na frekvenci, zatímco u předchozího podélného a příčného vlnění rychlost na frekvenci nezávisela. Rovnice pro výpočet ohybového kmitání pak můžeme zapsat ve tvaru

$$c_B = \sqrt{2\pi f^2} \sqrt{\frac{4EJ}{m'}} \quad (2.10)$$

kde J [m⁴] moment setrvačnosti průřezu dané tyče,
 m' [kg/m] hmotnost jednotkové délky tyče.

Pro tyče s obdélníkovým průřezem můžeme rovnici zjednodušit na vztah

$$c_B = \sqrt{1,8c_L h f} \quad (2.11)$$

kde h [m] výška obdélníkového průřezu tyče.

Rychlost šíření ohybových vln je opravdu závislá jak na materiálových konstantách, rozměru tyče, tak i frekvenci zvuku, který se danou tyčí šíří, jak můžeme vidět ze vztahu (2.10) a (2.11).

Dále nám vztah (2.11) ukazuje, že s rostoucí frekvencí se zvyšuje také rychlost ohybového vlnění, což ovšem neplatí bez určitého omezení, jímž je rychlost c_L , k níž se c_B jen blíží. Pokud se tyčí šíří určité ohybové vlnění, které má určité spektrum, pak dochází k rozkladu vlnění na jednotlivé složky, které jsou závislé na kmitočtu. Tento jev se nazývá disperze. Disperzi můžeme dokázat například tak, že vyvoláme na začátku tyče určitý impuls. Zároveň budeme na konci tyče kontrolovat výstupní tvar signálu, který bude jiný, protože každý impuls má své vlastní spektrum a jeho jednotlivé frekvenční složky se materiálem šíří odlišnou rychlostí. Potom dochází k deformaci vstupního signálu. [4]

2.2.6 Intenzita chvění

Při šíření chvění pevnými materiály dochází ke střídavým změnám napětí σ [N/m²], jenž má podobný význam jako akustický tlak při šíření zvuku ve vzduchu. Množství energie chvění, procházející plošnou jednotkou za jednu sekundu, neboli intenzita chvění, můžeme vyjádřit pomocí právě zmíněného napětí v materiálu a rychlosti chvění.

$$I = \sigma_{ef} v_{ef} \quad (2.12)$$

kde I [W/m²] intenzita chvění,
 v_{ef} [m/s] efektivní rychlost chvění,
 σ_{ef} [N/m²] efektivní napětí. [4]

2.2.7 Mechanická impedance

Důležitou veličinou, se kterou se pracuje při výpočtech a úvahách šíření akustického signálu v konstrukcích, je mechanická impedance Z_m [Ns/m], která určuje poměr mezi budící silou F [N] a rychlostí šíření chvění v určitém místě. [4]

$$Z_m = \frac{F}{v} \quad (2.13)$$

2.3 Hladiny chvění

Pod pojmem hladina rozumíme logaritmický poměr měřené veličiny k její stanovené referenční hodnotě. Platí zde Fechnerův - Weberův zákon, který říká, že minimální postřehnutelná změna je dána poměrem mezi velikostí změny podnětu k jeho výchozí intenzitě. Tedy můžeme říci, že intenzita počitku je logaritmu intenzity podnětu úměrná. [8]

Obecný vztah pro přepočtení veličin charakterizujících chvění z hodnoty absolutní na relativní je následující

$$L = 20 \log \frac{H}{H_0} \quad (2.14)$$

kde L [dB] hladina určující veličiny,
 H hodnota měřené veličiny,
 H_0 referenční hodnota určující veličiny.

Kvůli zpětnému přepočtu je nutno uvádět použitou vztažnou (referenční) hodnotu. Pokud není tato hodnota uvedena, pak se předpokládá, že byla použita obecná referenční hodnota, která je zmíněna v následující tabulce. [4]

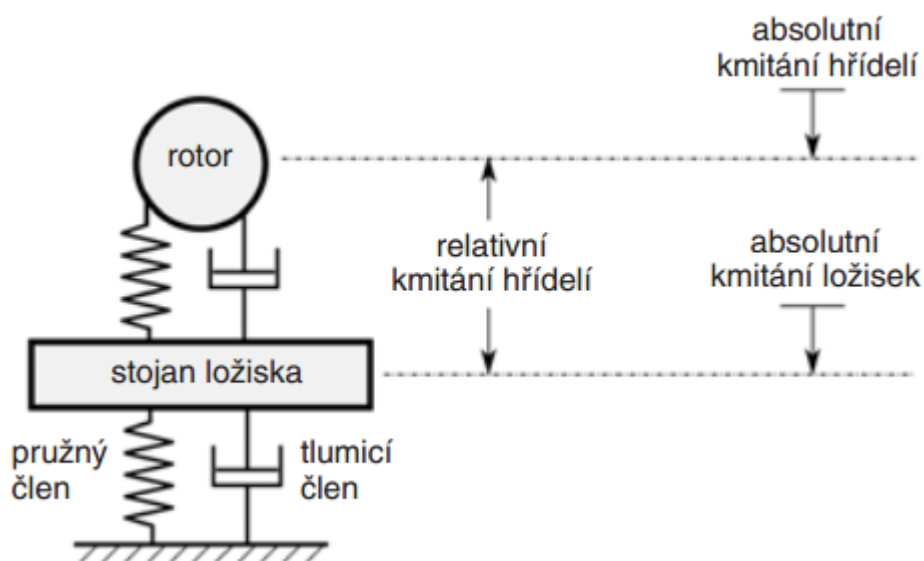
Tab. 2.3 Tabulka referenčních hodnot určujících veličin [2]

Veličina	Vzorec	Referenční hodnota
Hladina amplitudy	$L_s = 20 \log \frac{s}{s_0}$	$s_0 = 10^{-12} \text{ m}$
Hladina rychlosti	$L_v = 20 \log \frac{v}{v_0}$	$v_0 = 10^{-8} \text{ m/s}$
Hladina zrychlení	$L_a = 20 \log \frac{a}{a_0}$	$a_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$

2.4 Absolutní a relativní vibrace

Při měření vibrací je důležité si uvědomit, zda se jedná o vibrace relativní nebo absolutní, což má velký význam při výběru příslušného typu snímače.

Absolutní vibrace popisují pohyb sledovaného tělesa, stroje či zařízení vzhledem k Zemi. Při relativním popisu vibrací jde zpravidla o pohyb vzhledem k nějaké uměle vytvořené základně. Takovou základnou je nejčastěji rám měřeného stroje, který ještě může samostatně různě kmitat vůči zemskému souřadnému systému souřadnic. Absolutní a relativní vibrace jsou demonstrovány na Obr. 2.1. Rozhodujícím faktorem se pak stává dostupnost měřené části. Například kmity hřídele uložené v kluzných ložiskách utlumí mazivo, zde je vhodné využít snímač relativní.



Obr. 2.1 Absolutní a relativní kmity. Převzato z [7]

Jak již bylo řečeno, mechanické kmitání je dáno kromě frekvence také výchylkou, rychlostí a zrychlením, které jsou na sobě vzájemně závislé. Pro funkci snímače vibrací je

důležitý pohyb seismické hmoty s hmotností m uvnitř snímače, vzhledem k objektu o hmotnosti M , který je předmětem měření. Pak platí vztah

$$ma + bv + ky = F_b \quad (2.15)$$

kde	m [kg]	hmotnost seismické hmoty snímače,
	M [kg]	hmotnost měřeného objektu,
	k [Nm]	tuhost pružiny,
	b [kg/s]	součinitel tlumení,
	F_b [N]	budící síla. [7]

2.5 Měření vibrací

Snímače chvění využívají nejčastěji fyzikálního principu, kdy je převod malého posuvu převáděn na elektrický signál, který je dále vyhodnocován. Z hlediska vývoje bylo a je využíváno více principů, které jsou následně popsány. [3]

2.5.1 Převod neelektrické veličiny na elektrický signál

Mezi významné přednosti těchto senzorů patří:

- převod analogového signálu do digitální podoby,
- záznam, uchování a následné pozdější zobrazení,
- zesílení či zeslabení, analýza, nebo jiné úpravy výstupu,
- přenos signálu na vzdálené místo.

Elektrické snímače vibrací se z hlediska použití a principu dělí na dva zásadně odlišné typy. [3]

- **Aktivní - energetické**

Tyto typy přístrojů přeměňují určitou část energie, kterou odebírají z měřeného objektu, na energii elektrickou, kterou využívají k vlastnímu chodu. Není proto potřeba je speciálně napájet baterií, či jiným zařízením. Do této skupiny řadíme snímače indukční, piezoelektrické, fotočlánky a termočlánky.

- **Pasivní - parametrické**

Jsou to snímače, které mění vlivem měřené veličiny parametr, kterým může být například odpor, indukčnost, kapacita a další veličiny. [3]

2.5.2 Hybridní snímače

Jsou dalším krokem ve vývoji. Mimo převodníku měřeného signálu na signál elektrický obsahují jednoduché elektronické obvody, které nejčastěji plní úkoly, jako je

zesílení výstupního signálu, či snížení výstupní impedance snímače. Zpravidla se jedná o snímače pevně připojené k měřenému objektu. [3]

2.5.3 Inteligentní snímače

Inteligentní neboli smart snímače obsahují již složité elektronické obvody s pamětí a procesorem. Přímou ve snímači lze provádět operace, jaké jsou například automatické přepínání rozsahů nebo kompenzace různých rušivých vnějších vlivů, jako je teplota. [2]

Při posuzování snímačů je potřeba také zaměřit pozornost na to, zda nemá snímač vliv na měřený objekt či naopak. Potom je třeba se rozhodnout, jedná-li se o snímač bezdotykový (taktilní) nebo o snímač bezdotykový (proximitní), který na měřený objekt má vliv zanedbatelný. [3]

2.5.4 Mechanické snímače

Jde o zařízení, které je při měření vibrací v kontaktu s měřenou součástí. Dříve se používaly mechanické snímače s mechanickým záznamem výchylky pomocí systému přítlačných pružin, ramének a různých převodů. Avšak časem byl tento způsob nahrazen modernějším přístupem a dnes se ke snímání vibrací s mechanickým kontaktem používají převážně akcelerometry, které jsou spojeny s měřenou součástí ať pevně či pružně. Propojení snímače a řídicí jednotky je pak realizováno datovými kabely. [9]

2.5.5 Bezdotykové snímače

Bezkontaktní snímače jsou dnes velmi rozšířené a to zejména proto, že je možno je používat bez nutnosti mechanického zásahu do měřené součásti. Naopak mezi nevýhody lze zařadit například nutnost dodržení malé vzdálenosti mezi snímačem a měřenou částí. [9]

2.5.6 Lasreová interference

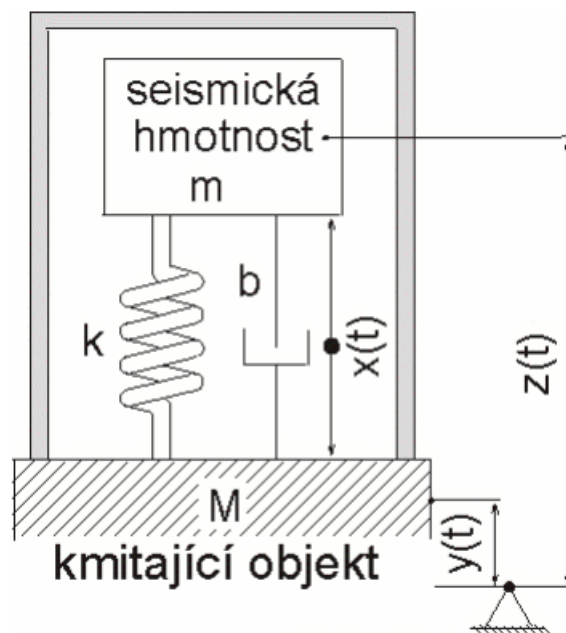
Měření pomocí laserové interference poskytuje bezpochyby nejpřesnější výsledky, které jsou ovšem kompenzovány vysokou pořizovací cenou, většími rozměry a složitostí nastavení správné funkce systému. Předností tohoto způsobu snímání je například možnost měření z větší vzdálenosti a velký rozsah snímatelné výchylky. [9]

3 Sensory vibrací

Pro měření vibrací jsou v praxi používány snímače vibrací. Tyto senzory můžeme rozdělit do kategorií, podle jejich principu. Dělíme je na snímače výchylky, rychlosti a nejpoužívanější snímače zrychlení, které se nazývají akcelerometry.

3.1 Absolutní senzor výchylky

Funkce absolutního senzoru výchylky vibrací je naznačena na následujícím obrázku. Pružné části soustavy jsou dány tuhostí k , což je poměr síly a její odpovídající změny deformace pružného prvku. Dále jsou určeny součinitelem viskózního tlumení b , který je parametrem tlumení u soustavy s jedním stupněm volnosti a je dán silou při jednotkové rychlosti $F = b \cdot v$. Pokud předpokládáme, že vibrující těleso M , které vykonává časově proměnný pohyb $y(t)$ vůči fiktivnímu klidovému bodu a že toto vibrující těleso je budičem síly mechanické soustavy, pak pro rovnováhu sil působících na hmotnost m soustavy platí stejný vztah jako v rovnici (2.15). Jinak řečeno, výchylka seismické hmotnosti m je vyhodnocována vůči základně, tedy vibrujícímu tělesu M . Z toho vyplývá, že se jedná o zařízení, které měří vzdálenost mezi dvěma povrchy. [2]



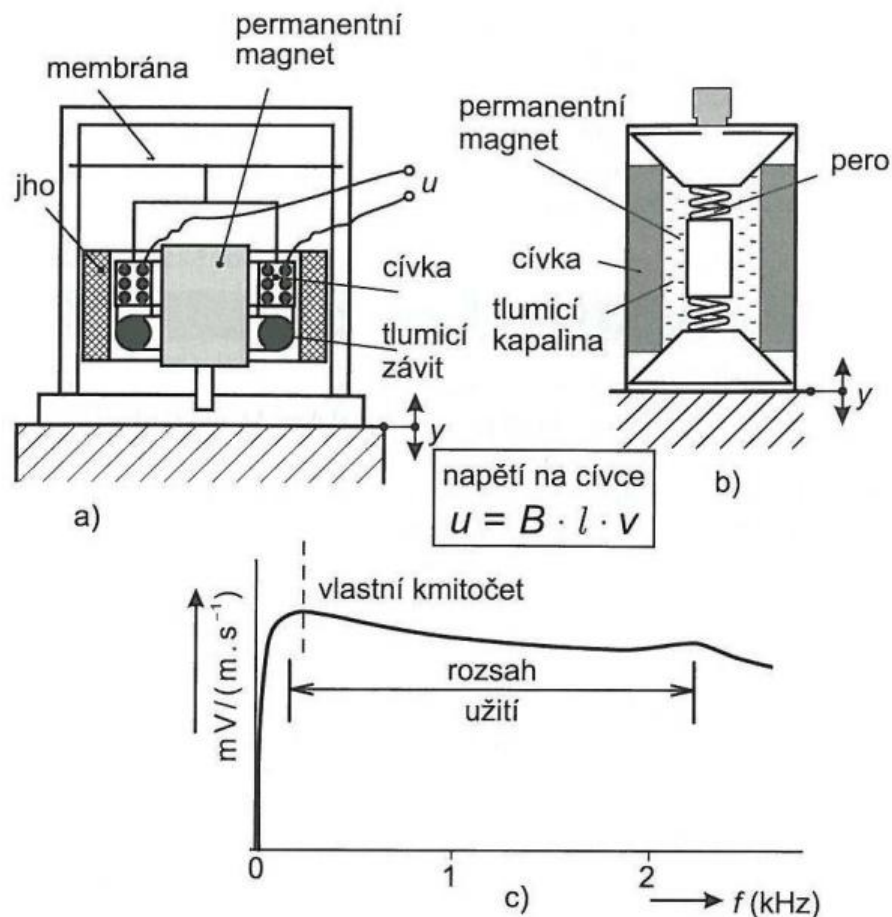
Obr. 3.1 Model absolutního senzoru vibrací. Převzato z [2]

3.2 Absolutní senzor rychlosti

Pro měření rychlosti vibrací je možno použít i senzoru pro měření zrychlení, neboť následnou integrací získáme hodnotu rychlosti, kterou potřebujeme. Nebo lze použít absolutní elektrodynamický snímač. [2]

3.2.1 Elektrodynamický senzor rychlosti

Absolutní elektrodynamický senzor rychlosti je založen na absolutním senzoru amplitudy, o kterém bylo psáno v předchozím bodě. Dvě provedení snímače jsou znázorněny na následujícím obrázku. Ve své podstatě snímač měří výchylku vibrací, ale vzhledem k vnitřnímu uspořádání dochází vzájemným pohybem magnetu (magnetická indukce B ve vzduchové mezeře) a cívky (délka vodiče l) k indukci napětí u na cívce. V závislosti na výchylce vibrací se mění magnetický tok a výstupní napětí na cívce je úměrné derivaci proměnného magnetického toku, tedy rychlosti vibrací.



Obr. 3.2 Absolutní elektrodynamický senzor rychlosti

a) s pohyblivou cívkou, b) s pohyblivým magnetem, c) charakteristika. Převzato z [2]

Seismickou hmotu m , v provedení s pohyblivou cívkou, tvoří cívka a naopak v provedení s pohyblivým magnetem jej tvoří permanentní magnet. Membránou, respektive pružinou, je dána tuhost. Pro získání pracovní oblasti kolem rezonanční frekvence je optimální hodnota poměrného útlumu B od 0,5 do 0,7 a nastavuje se u provedení s pohyblivou cívkou tlumícím závitem a u provedení s permanentním magnetem tlumící kapalinou. Resonanční kmitočty jsou v rozmezí od 1 Hz do 100 Hz.

Výhodou absolutních elektrodynamických senzorů rychlosti je malý vnitřní odpor a vysoká úroveň výstupního signálu. Snímač je možno použít bez zdroje napájení a napětí lze měřit libovolným číslicovým multimetrem bez speciálních zesilovačů.

Naopak nevýhodou tohoto snímače je omezený horní kmitočet (2000 Hz až 3500 Hz), citlivost na parazitní magnetické pole a větší rozměry. V současnosti se elektrodynamické akcelerometry stále vyrábějí, ale vzhledem k cenově dostupné alternativě, v podobě integrované elektroniky v piezoelektrických akcelerometrech, je jejich podíl na trhu stále menší. [2]

3.3 Absolutní senzor zrychlení - akcelerometr

Akcelerometry měří zrychlení, to znamená, že změnu pohybu (zrychlení) převádějí na měřitelný elektrický signál.

Základní dělení akcelerometrů:

- **Piezoelektrické**

Využívají piezoelektrický krystal, který vytváří náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí na každý objekt.

- **Piezorezistivní**

Využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu.

- **Kapacitní**

Využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně kapacity.

- **Tepelné**

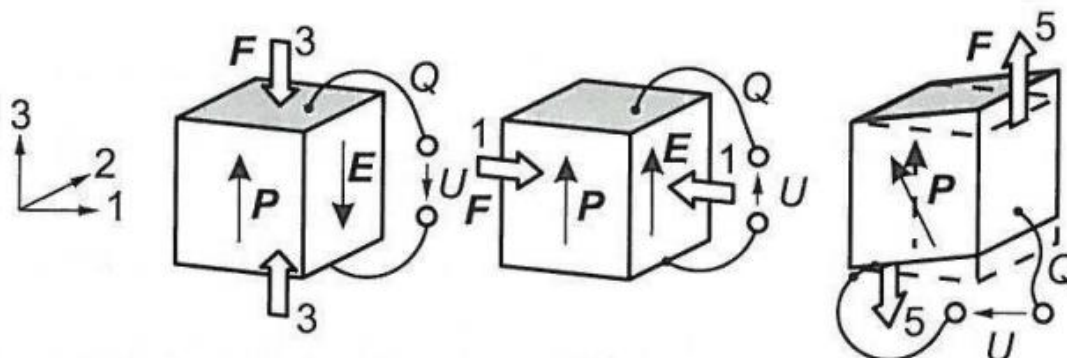
Využívají rozdílného přenosu tepla v plynech na základě pohybujícího se topného tělíška. [10]

3.3.1 Piezoelektrický akcelerometr

Piezoelektrický akcelerometr patří k nejrozšířenějším snímačům. Jeho předností je, že ho není potřeba napájet, vyznačuje se dlouhodobou stabilitou, širokým pracovním kmitočtovým a dynamickým rozsahem a linearitou v těchto rozsazích, pevnou robustní konstrukcí a vysokou spolehlivostí. [3]

Podstatou piezoelektrického senzorů je přímý piezoelektrický jev, při němž deformací vybraných krystalických nebo polykrystalických látek vzniká dvojpólový elektrický moment objemového prvku a ve výsledném efektu způsobí elektrickou polarizaci čidla.

Piezelektrický jev závisí na směru deformace vzhledem k osám krystalové mřížky. Při využívání piezelektrického jevu rozlišujeme dle směru působení vůči ose anizotropie podélný, příčný a stříhový jev, jenž jsou popsány na následujícím obrázku. [2]



Obr. 3.3 Podélný, příčný a stříhový (smykový) piezelektrický jev. (F je síla, E je intenzita elektrického pole, P je vektor polarizace, Q je elektrický náboj). Převzato z [2]

Tyto snímače nemají pohyblivé části, které by byly náchylné k opotřebení a jak již bylo řečeno, jsou přímo zdrojem elektrického signálu (náboj Q), který je úměrný zrychlení chvění. [3] Umístí-li se na povrchu elektrody, pak se na nich indukují volné náboje Q . Známeli pak piezelektrickou konstantu d_{33} , která je často označována, jako nábojová konstanta, tak platí následující vztah

$$Q = d_{33} \cdot F \quad (3.1)$$

kde F [N] síla deformující piezelektrický element,
 d_{33} [C/N] piezelektrická konstanta
 Q [C] náboj.

Piezelektrický element je vlastně ve své podstatě kondenzátor o kapacitě C s dielektrikem se dvěma elektrodami. Pro elektrické napětí na elektrodách elementu platí

$$U = \frac{Q}{C} \quad (3.2)$$

kde U [V] napětí,
 C [F] kapacita elementu. [2]

Piezelektrický element je na výstupu připojen na elektrické rozhraní párem elektrod. Vlastnosti výstupního signálu jsou dány vnitřními integrovanými obvody ICP (Integrated Circuit - Piezoelectric), které mění vysokoimpedanční signál ve formě náboje Q , na nízkoimpedanční napěťový signál U . Při používání reálných akcelerometrů jsou určité limity

měření. U těchto senzorů je možné zrychlení měřit jen v určitém frekvenčním rozsahu, který je dán konstrukcí senzoru, protože u některých provedení je citlivost závislá na frekvenci. Seismická hmota a piezokeramika uvnitř senzoru představují pružnou hmotu systému, který se pak chová jako pružina s vlastní rezonancí a tak určuje horní frekvenční limit akcelerometru. Pro dosažení širšího frekvenčního rozsahu by měla být rezonanční frekvence pružné hmoty co nejvyšší. Tohoto cíle se obvykle dosahuje ubráním seismické hmoty, ovšem důsledkem toho je nižší citlivost senzoru. Podle zaměření použití senzoru se tak v praxi vybírá příznivá varianta. Například akcelerometr pro měření nárazů a otřesů potřebuje mít vyšší rezonanční frekvenci na úkor nižší citlivosti, kterou v daném případě zřetelně nepotřebujeme. [10]

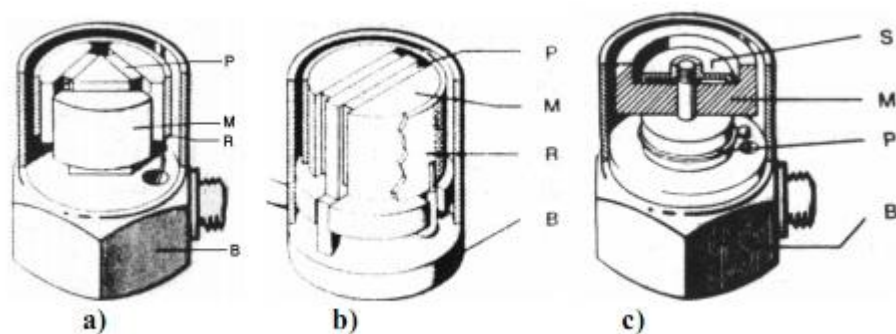
Smykový mód (Shear mode)

Konstrukčně jsou piezoelektrické akcelerometry konstruovány velmi často se smykovým namáháním, méně často pak s namáháním tlakovým. Velmi často se používá konstrukce typu Delta Shear (*Obr. 3.4a*) se třemi dvojicemi piezokrystalů a setrvačných hmot upevněných na trojbokém středovém sloupku s použitím předepnutého prstence. Tyto snímače se vyznačují vysokou citlivostí, malou hmotností a vysokou vlastní frekvencí. Další předností tohoto konstrukčního typu je oddělení základny snímače od vlastního snímacího mechanismu, což umožňuje vyrábět snímače, které se dají použít ve vysokých teplotách či s větší odolností proti mechanickému namáhání.

Konstrukce pojmenovaná jako Planar Shear (*Obr. 3.4b*) je svou funkcí velmi podobná předchozímu typu. Ovšem jsou zde použity pouze dvě dvojice krystalů a setrvačných hmot na plochém středovém sloupku. Přednosti této konstrukce jsou shodné s předchozím zmiňovaným typem, pouze má menší citlivost, což může být v některých měřeních nežádoucí.

Kompresní mód (Compression mode)

Jednoduchou konstrukci představuje snímač s centrálním tlakovým namáháním (*Obr. 3.4c*). Tato konstrukce se vyznačuje menší citlivostí při větší hmotnosti setrvačné hmoty snímače. Piezoelektrický element a setrvačná hmota jsou namontovány na válcovém středovém nosníku s použitím předepjaté diskové pružiny. Nedostatkem této konstrukce je, že signál ze snímače je ovlivněn změnami tvaru a namáhání jeho základny. Tento nedostatek lze částečně vyřešit volbou speciálního materiálu, ale i přesto nepodává nej přesnější výsledky. [7]

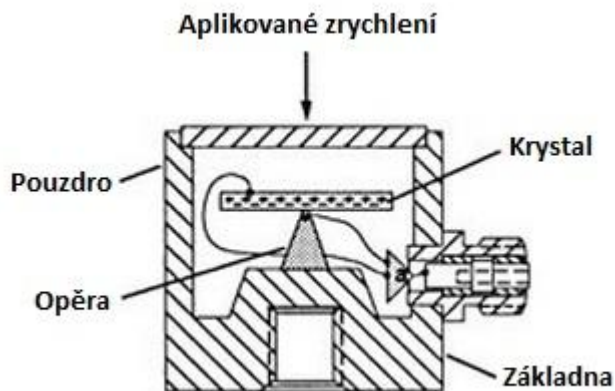


Obr. 3.4 Základní konstrukční uspořádání piezoelektrických akcelerometrů. Převzato z [7]
 a) Delta Shear, b) Planar Shear, c) snímač s centrálním tlakovým namáháním (B - těleso snímače, M - seismická hmota, P - piezoelektrický prvek, R - předpínací prstenec, S - předpínací disk)

Akcelerometry v kompresním módu patří k nejzákladnější a nejpoužívanější konstrukci. Vyznačují se jednoduchou konstrukcí, vysokou tuhostí a odolností. Vyrábí se řadu let a tudíž jsou dobře dostupné. Využívají se k běžnému měření v lehkém i těžkém průmyslu, pro dlouhodobé sledování správné funkce, kondice komponent a zařízení. Akcelerometry tohoto typu se dále dělí na tři typy, jako je vzpřímená, převrácená a izolovaná struktura. [10]

Ohybový mód (Flexural mode)

Akcelerometry této konstrukce jsou tvořeny snímacím krystalem ve tvaru nosníku, který při působení zrychlení podporuje vznik napětí na krystalu. Piezoelektrický krystal může být připevněn přímo k tomuto nosníku. Toto provedení zajišťuje nízký profil snímače, malou váhu, teplotní stabilitu a nízkou cenu. Vlastností této struktury je necitlivost na příčný pohyb. Mají nízkou rezonanční frekvenci a nejsou vhodné pro monitorování strojů, kde jsou vystaveny velkým nárazům a vibracím. Používá se pro nízké frekvence otřesů, nízké přetížení a tedy i nízkofrekvenční aplikace, jako je seismická aktivita. Konstrukce je na Obr. 3.5. [10]



Obr. 3.5 Konstrukce akcelerometru typu Ohybový mód. Převzato z [10]

Jako materiál pro piezoelektrické elementy akcelerometrů se používají modifikace křemene (SiO_2 - oxid křemičitý), piezokeramiky (feroelektrické dielektrikum titaničitan barnatý BaTiO_3 , PZT-keramika), pro extrémní teploty LiNbO_3 a některé piezoelektrické polymery (PVC). [2]

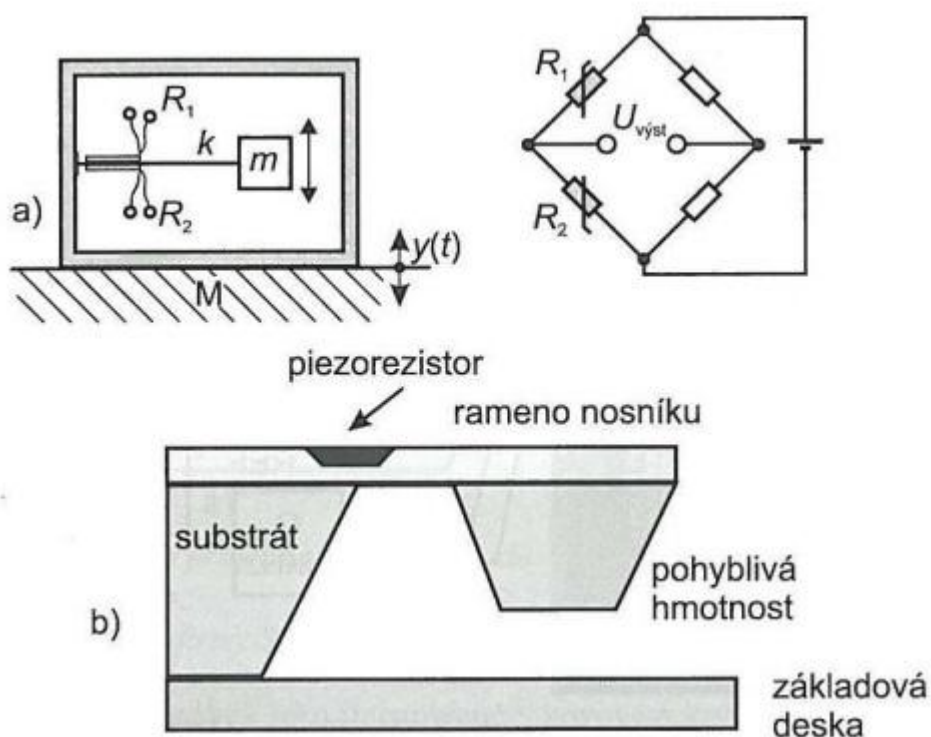
Rozdělení dle použití a typu měření

Akcelerometry se používají v mnoha vědeckých i průmyslových odvětvích jako je údržba, letecká technika, zdravotnictví, automobilový průmysl nebo například řízení procesů. Ovšem pro měření klasického zrychlení, nárazů a vibrací se využívá mírně odlišný princip.

- **Seismické senzory** - používají se pro měření vibrací budov (monitorování budov). Mají vysokou citlivost, které se dosahuje přímo vnitřním snímacím elementem a ne pouze vnitřní elektronikou. To je důvod, proč mají nejvyšší rozlišení a nejnižší šum. Detekují tedy i velmi slabé chvění či otřesy. Obvykle využívají ohybovou konstrukci.
- **Senzory otřesů a vibrací** - používají se pro měření chvění konstrukcí pohyblivých strojů. Často je u nich vyžadována velká teplotní odolnost a robustní provedení, které dobře odolává prašnému a vlhkému prostředí. Přesnější senzory jsou obvykle konstruovány ve smykovém módu, naopak méně přesnější pak v módu kompresním.
- **Akcelerometry pro měření pohybu** - používají se pro měření zrychlení a pohybu objektu, ke kterému jsou připevněny. Obvykle se vyrábějí ve smykovém nebo kompresním módu. [10]

3.3.2 Piezorezistivní akcelerometr

Piezorezistivní akcelerometry mají základ v piezorezistivním jevu. Oproti piezoelektrickým akcelerometrům je zde použit piezorezistivní materiál, který převádí sílu vzniklou seismickou hmotou na změnu odporu. [11] Při ohybovém namáhání se mění rezistivita piezorezistivních elementů obvykle uspořádaných do Wheatstoneova můstku. Rezonanční kmitočet je do 30 kHz, oproti piezoelektrickým sensorům mohou měřit i stálou (neměnnou) akceleraci, to znamená, že frekvenční rozsah je od 0 Hz do 7 kHz. Ze všech typů akcelerometrů mají piezorezistivní nejvyšší poměr citlivosti (do 25 mV/g_n) vůči hmotnosti a vzhledem k napěťové citlivosti se používají k dlouhodobým testům, ovšem jsou teplotně závislé. Příklady uspořádání piezorezistivních akcelerometrů je na Obr. 3.6. [2]



Obr. 3.6 Uspořádání piezorezistivních akcelerometrů. Převzato z [2]

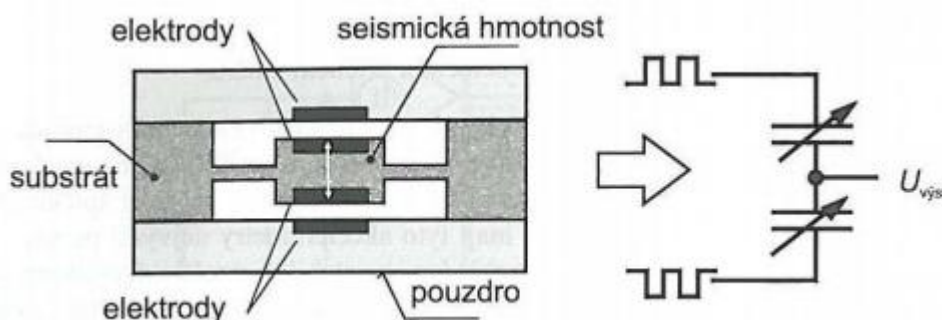
a) polovodičové tenzometry na vetknutém nosníku, b) princip MEMS (Mikro-elektromechanické systémy) technologie.

V dnešní době jsou požadavky na piezorezistivní akcelerometry poměrně vysoké. Mezi hlavní požadavky patří například malá velikost senzoru, citlivost na zrychlení nižší než jedna setina gravitačního zrychlení, velká šířka pásma, vysoká přesnost, lineární výstup, vysoká spolehlivost, citlivost senzoru pouze na požadovanou složku zrychlení, snadná polečná integrace senzoru a elektroniky na jednom čipu nebo nízká pořizovací cena. [11]

3.3.3 Kapacitní akcelerometr

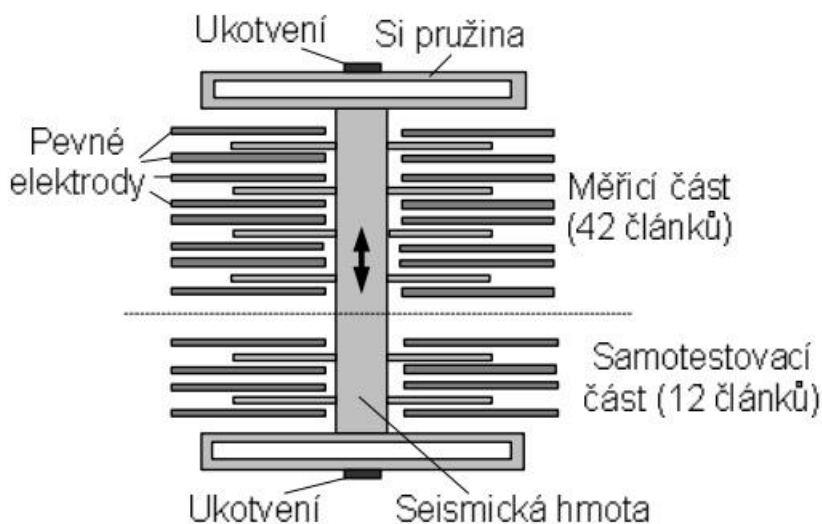
Tyto akcelerometry jsou velmi přesné a citlivé, ovšem jsou vhodné pouze pro nízké dynamické rozsahy zrychlení. Při pohybu seismické hmotnosti dochází ke zvětšování jedné kapacity a zároveň se druhá kapacita zmenšuje a následně se rozdíl kapacit vyhodnocuje. [2]

Princip činnosti je následovný, obecná konstrukce je zobrazena na *Obr. 3.7*. Dvě pevné elektrody tvoří vůči seismické hmotě dvě kapacity, kdy při pohybu seismické hmoty dochází ke změně vzdálenosti desek a tím ke změně kapacit. [12]



Obr. 3.7 Základní uspořádání kapacitního akcelerometru. Převzato z [2]

Princip hřebenového uspořádání kapacitního akcelerometru je takové, že jsou paralelně pospojované diferenční kapacity, kterých může být několik desítek, ale i stovek. Část těchto kapacitorů může být testovací, či budící. Základní princip je stejný, seismická hmotnost s pohyblivými elektrodami je připevněná na pružných závěsech, kdy při pohybu dojde k pohybu seismické hmoty oproti rovnovážnému stavu a tím dochází ke změnám kapacit. Uspořádání hřebenového kapacitního akcelerometru je na *Obr. 3.8*. [12]



Obr. 3.8 Uspořádání hřebenového kapacitního akcelerometru. Převzato z [12]

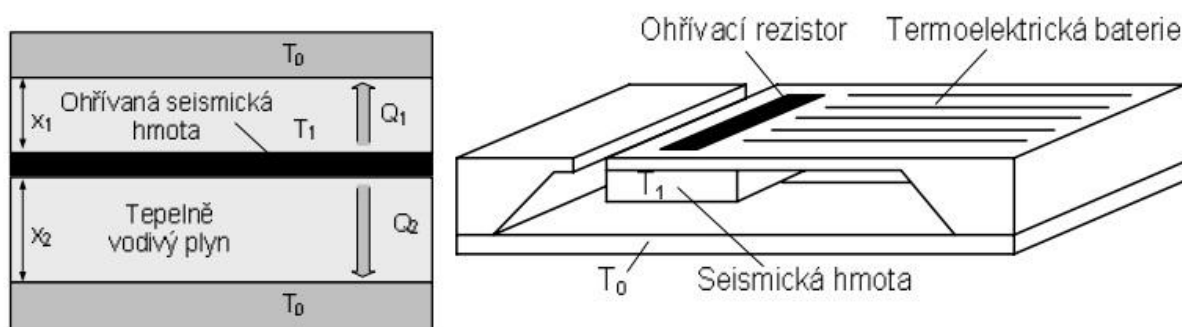
Kapacitní akcelerometry mají obvykle uspořádání založené na MEMS technologii. Základním kamenem je monokrystalický substrát, na kterém je z polykrystalického křemíku na dvou pružných upevněních zavěšena seismická hmotnost ve tvaru hřebínku. Každý zub hřebínku představuje střední pohyblivou elektrodu v soustavě diferenčních kapacitních senzorů s proměnnou vzduchovou mezerou a pevnými elektrodami. [2]

MEMS technologie

MEMS (Mikro-elektro-mechanické součástky) vzniklo spojením oborů elektrotechniky a mechaniky za využití mikrominiaturizace a podpory výroby technologiemi, které pracují v rozměrech řádů mikrometrů. Mikromechanické součástky jsou menší, lehčí, rychlejší a mnohdy přesnější, než jejich makroskopické vzory. Jeden z hlavních důvodů, kvůli kterým došlo k rozšíření nových technologií výroby integrovaných struktur pro mikromechanické systémy, byla velmi nízká cena zhotovení při odběru velkých sérií. V MEMS najdeme pohyblivé mechanické struktury, mikrosenzory či řídicí elektroniku integrovanou do jednoho čipu. [13]

3.3.4 Tepelné akcelerometry

Tepelné akcelerometry využívají fyzikální princip přenosu tepla v plynu a snímání rozložení teplot v okolí zdroje tepla. Topné tělísko zahřívá okolní vzduch ve vzduchové mezeře na konstantní teplotu. Teplotní snímače měří rozložení teploty v závislosti na vzdálenosti od topného tělíska. Teplotní snímače jsou umístěné v pravidelných rozestupech. Tento celek je implementován do vyleptané drážky křemíkového substrátu. Celý senzor je včetně vyhodnocovací elektroniky integrován na jeden CMOS čip v jednom pouzdře. [14]



Obr. 3.9 Uspořádání tepelného akcelerometru. Převzato z [12]

Mezi dvěma komorami je umístěna seismická hmota na tenkém nosníku. Mezi zmíněnými komponenty je teplotně vodivý plyn. Hmota je zahřívána na určenou teplotu T_1 .

Pokud na senzor nepůsobí žádně zrychlení, pak je teplota seismické hmotnosti a okolních komor v rovnováze. Teplo Q_1 a Q_2 vedené od hmoty do komor přes plyn je funkce vzdáleností x_1 a x_2 .

Citlivost tepelného akcelerometru je mnohem menší než u již zmíněných kapacitních či piezoelektrických senzorů. Jejich výhodou je malá náchylnost k elektromagnetickému či elektrostatickému rušení. [12]

3.4 Sensory výchylky, polohy a posuvu

Senzory toho typu lze realizovat indukčností, kapacitním, magnetickým či optickým principem. Ve vibrodiagnostice jsou nejpoužívanější indukčnostní snímače, které využívají indukčnosti cívky a hustu vířivých proudů. [2]

Princip indukčních snímačů využívá především Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Na cívku je přiváděn z oscilátoru vysokofrekvenční střídavý proud. Cívka kolem snímače vytvoří silné proměnlivé elektromagnetické pole. Proud na vstupu i na výstupu cívky je stejný, pokud do elektromagnetického pole není vložen žádný vodič. Vložíme-li do elektromagnetického pole jakýkoliv vodič, začnou se v něm indukovat vířivé proudy, které podle Faradayova zákona vytvoří pole reagující s elektromagnetickým polem, které bylo vytvořeno průchodem proudu cívkou. Tím se mění impedance, která je počítána řídicí jednotkou tak, že porovná fázové posunutí a amplitudu proudu na vstupu a výstupu cívky. Součástí indukčního snímače je demodulátor, který má za úkol odfiltrovat nám užitečnou část signálu vracející se z cívky. Demodulátor je zároveň spojen s oscilátorem, aby byl schopen odlišit část signálu pocházející z oscilátoru a tu část signálu, která je způsobena právě vířivými proudy. [9]

Indukčnostní senzory se vyrábějí jako integrované v kovovém krytu, ve kterém je základní část elektronických obvodů a vyčnívající cívka. Takové uspořádání má proto, aby se zamezilo parazitním elektromagnetickým vlivům z okolního prostředí, jako jsou například přírodní kabely. Frekvenční rozsah je v rozmezí 0 až 10 000 Hz. [2]

3.5 Laserové interferometrické vibrometry

V bezdotykových měřeních se používají vibrometry založené na Dopplerově jevu (LDVs Laser Doppler Vibrometers), protože běžné akcelerometry nedosahují požadovaných parametrů, nebo není možné je z provozních, či rozměrových důvodů použít. Laserové vibrometry měří vibrace do 30 MHz a mají velmi malou nejistotu měření. Dopplerův jev spočívá ve vnímání frekvence vlnění zdroje pozorovatelem, kterému frekvence vlnění přijde

subjektivně se mění v závislosti na pohybu zdroje. Při vzájemném přibližování se zdá pozorovateli frekvence vyšší a naopak při zvětšování vzdálenosti se zdá frekvence nižší.

Princip laserového vibrometru spočívá ve sledování rychlosti pohybu vybraného rastru bodů na kmitajícím objektu. LDV je zaměřen na snímané místo vibrací, sleduje amplitudu a frekvenci kmitání, které jsou následně extrahovány z Dopplerova posunu frekvence laserového paprsku vzhledem k pohybu povrchu. [2]

4 Trh senzorů vibrací

V dnešní době se na trhu objevuje nepřehledné množství senzorů pro měření vibrací. Z celkového pohledu se dnes používají jen určité typy snímačů, mezi které patří zejména akcelerometry piezoelektrické, piezorezistivní, dále akcelerometry s proměnnou kapacitou a laserové vibrometry LDV. V této bakalářské práci jsou zahrnuty senzory výrobců, které jsou dostupné na současném trhu.

4.1 Kritéria pro volbu senzoru

Pro volbu správného senzoru vibrací je potřeba znát určité parametry a podmínky, které slouží ke správnému výběru senzoru a tudíž ke správnému a přesnému výsledku měření. Mezi tyto parametry patří zejména:

- jaká je amplituda měřených vibrací?
- jaká je frekvence měřených vibrací?
- jaký je rozsah teploty dané instalace?
- jaká je velikost a tvar (vibračního, frekvenčního) signálu, který se měří?
- jsou přítomna elektromagnetická pole?
- je v dané oblasti měření vysoká úroveň elektrického rušení?
- je okolní prostředí korozivní?
- je dané prostředí vlhké nebo se skrápějící vodou? [15][29]

Je třeba brát v potaz i další kritéria. Například váha senzoru by měla být mnohem menší, než váha celého měřeného systému. Dynamický rozsah musí být větší než je předpokládaný rozsah amplitudy. Dále je nutné uvážit, kam je třeba, aby vedl konektor z akcelerometru pro připojení vyhodnocovacího zařízení. Zda požadujeme boční či horní konektor. Nedílnou součástí senzorů jsou kabely, které se připojují k výstupnímu konektoru senzoru. Kabely musí splňovat vysoká kritéria, díky vysoké výstupní impedanci, aby nedocházelo ke zkreslení a útlumu signálu. [15][29]

Snímač musí být připevněn přímo na konstrukci měřeného objektu, aby výsledky měření byly přesné a spolehlivé.

- Montáž pomocí plochého montážního magnetu - jedná se zpravidla o dočasnou montáž pro připevnění k feromagnetickým materiálům různých částí strojů či motorů. Umožňují snadnou instalaci na požadované místo.
- Lepidla a závitové šrouby - slouží ke stálé instalaci senzorů. Lepidla jako epoxidy a kyanoacryláty se používají ke spojení snímače s měřeným objektem. Vrstva lepidla musí být co nejtenčí, aby nedocházelo ke tlumení vibrací širokou vrstvou lepidla. Klíč, který je na některých akcelerometrech nasazen na matici snímače, slouží k odtrhnutí snímače od měřené plochy.

Montážní závitové šrouby - používají se přednostně, zmíněné montážní postupy se používají pouze pokud není vhodné použití této metody. Závitové šrouby zajišťují pevné a spolehlivé spojení, které zaručuje přesné výsledky. Ovšem u těchto snímačů je nutnost vrtání a vyřezávání závitu, což u některých měření nepřichází v úvahu. [15][29]

4.2 Technické parametry senzorů

Základní technické parametry senzorů na trhu jsou následující:

- Dynamický rozsah - maximální měřitelná amplituda. V katalozích je uváděn v násobcích gramů.
- Frekvenční odezva - určuje jí hmotnost snímače, piezoelektrické vlastnosti krystalu a rezonanční frekvence krytu. Je dána rozsahem s dovolenou odchylkou $\pm 5\%$.
- Uzemnění - je prováděno dvěma způsoby. Uzemněné akcelerometry mají s krytem spojený pól s nižším potenciálem, protože kryt snímače je spojen se signálem, který při montáži může být spojen s vodivým materiálem. Snímače s odizolovaným krytem od signálu jsou naopak citlivé na indukované rušení.
- Resonanční frekvence - kmitočet, při kterém snímač rezonuje, tedy nepodává přesné výsledky. Měření se provádí pod touto hodnotou.
- Horní frekvenční limit - stanovuje, kdy výstupní signál překračuje dovolenou odchylku. Může dojít k mechanické rezonanci snímače.
- Dolní prahová frekvence - výstupní signál začíná klesat a jeho přesnost překračuje dovolenou mez. Citlivost rychle klesá s nižší frekvencí.
- Citlivost - poměr mezi mechanickým vstupem a elektrickým výstupem senzoru. Udává se v mV/ms^{-2} , mV/g , piko coulombech na ms^{-2} nebo pC/g . Frekvence střídavého výstupního napětí odpovídá frekvenci vibrací. Výstupní úroveň napětí

odpovídá amplitudě vibrací.

- Teplotní vliv - citlivost na teplotu. Snímače jsou konstruovány tak, aby teplotně kompenzovaly výstupní signál s ohledem na udržení signálu v limitech v daném rozsahu teplot.
- Teplotní rozsah - je limitován integrovaným obvodem měnící elektrický náboj na nízko impedanční výstup. Obvyklý rozsah teplot je od -50 do 120°C. [15] [16]

4.3 Piezoelektrické akcelerometry

Na trhu je k dostání několik typů snímačů, jak pro použití laboratorní, tak průmyslové. Tyto snímače se liší zejména svou strukturou a ochranou senzoru, jenž je uložen v krytu, který se připevňuje k měřenému objektu.

Akcelerometry měřící pouze v jedné ose vyžadují připevnění senzoru v takovém místě a poloze, ve které je požadováno měření. Tříosé akcelerometry podávají informace o měření ve třech osách x, y, z.

4.3.1 Piezoelektrické nábojové akcelerometry, IEPE akcelerometry

Piezoelektrické nábojové akcelerometry obsahují piezoelektrické materiály uvnitř senzoru, které generují náboj, tudíž nepotřebují zdroj. Ovšem je potřeba vyhodnocovací zařízení, které dokáže výstupní signál zpracovat, to znamená převést na napěťový signál, který je schopno dále analyzovat. Vyznačují se vysokou teplotní odolností, ale jsou omezeny nízkou výstupní citlivostí. Akcelerometry jsou netlumené, proto vysokofrekvenční harmonické složky měřeného objektu mohou způsobit rezonanci akcelerometru a přetížení navazujících elektronických zařízení. Proto je nutné volit senzor s dostatečně vysokou rezonanční frekvencí, která je vyšší, než frekvence, kterou způsobuje měřená struktura. Jsou častou volbou díky jejich malé velikosti, je možné vyrobit téměř jakýkoliv tvar.

Nábojové akcelerometry se používají pro měření chvění zemského povrchu, mají využití v automobilovém průmyslu, při testování kvality jízdy, tedy vibrací v kabině vozu. Pro testování míry chvění u spalovacích motorů a elektromotorů. Při údržbě turbín, kdy se stanovuje toleranční mez vibrací, při kterých již může dojít k poruše. Často se také používají pro nárazové testy. [16][17]

IEPE (Integrated Electronic Piezoelectric) jsou piezoelektrické akcelerometry s integrovaným zesilovačem, který přetváří výstupní signál ze snímače na napěťovou modulaci proudu. Mají vysokou výstupní citlivost, vysoký odstup signálu od šumu a velkou šířku pásma. Tyto vlastnosti zaručují vhodné použití pro všeobecné měření, ale také pro měření vysokých vibračních frekvencí. IEPE akcelerometry jsou vysoce výkonné a mají vyšší výstupní citlivost oproti klasickým nábojovým akcelerometrům. Často jsou osazeny do hermeticky uzavřených pouzder, které je chrání před znečištěním od okolního prostředí. Mají nízkou citlivost na elektromagnetické rádiové záření a nízkou výstupní impedanci kvůli externímu napájecímu stejnosměrnému zdroji. Díky nízkoimpedančnímu výstupu nejsou pro přenos signálu potřeba koaxiální kabely s vysokým stíněním. [16]

Klasické piezoelektrické snímače lze změnit na IEPE snímač přidáním konvertoru, jako je například DeltaTron Converter od firmy Brüel&Kjaer 2646 (*Obr. 4.1b*), který se nasadí přímo na akcelerometr s horním konektorem. Vyžaduje externí zdroj konstantního proudu a mění nábojový výstup z piezoelektrického akcelerometru na napěťovou modulaci proudu. Technická specifika zmíněného konvertoru jsou uvedeny v příloze A.

- Sensory pro univerzální použití - General Purpose Sensors

Akcelerometry k univerzálnímu použití se vyznačují širokým frekvenčním, dynamickým a teplotním rozsahem. Mají nižší citlivost deformace seismické hmoty působící na piezoelektrický element.

Do této kategorie snímačů můžeme zařadit senzory, jako je B&K 4383-S (*Obr. 4.2a*), nebo senzor Endevco 2224C (*Obr. 4.2b*). Oba senzory jsou konstrukce smykového módu. Používají se pro vibrační testy a analýzy u malých konstrukcí. [16][17] Zástupce IEPE snímače v této kategorii je triaxiální akcelerometr B&K 4520 (*Obr. 4.1a*). K univerzálním snímačům patří také senzory, které snímají vibrace ve třech osách, tzv. triaxiální senzory. Ukázky jsou na *Obr. 4.1a*, *Obr. 4.2c* a *Obr. 4.2d*. Technické údaje těchto senzorů jsou uvedeny v příloze A.



Obr. 4.1 a) Triaxiální akcelerometr B&K 4520, b) DeltaTron Converter B&K 2646.

Převzato z [16]



Obr. 4.2 Akcelerometry a) B&K 4383-S, b) Endevco 2224C, c) B&K 4321-S, d) Endevco 2228C. Převzato z [16][17][19]

- Vysoce citlivé senzory - High Frequency

Akcelerometry, které měří nízkoúrovňové a nízkofrekvenční vibrace. Používají se pro analýzu vibrací u přístrojů s minimálním chvěním, kde je potřeba identifikovat již malé vibrace. Také se používají pro měření seismické aktivity. Hodí se pro měření na velkých strukturách. [16]

Do této kategorie senzorů můžeme zařadit senzor B&K 4370, konstrukce DeltaShear. Nebo Endevco model 6233C-100, který se vyznačuje vysokou citlivostí a zároveň pracovní oblastí ve vysokých teplotách, vhodný pro sledování vibrací u plynových turbín. [16][20]

Oba senzory jsou na následujícím obrázku. Technické specifikace jsou uvedeny v příloze A.

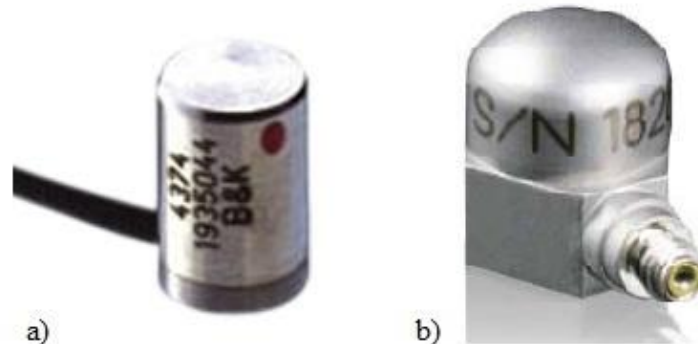


Obr. 4.3 Citlivé akcelerometry a) B&K 4370, b) Endevco 6233C-100. Převzato z [16][20]

- Vysokofrekvenční a nízkorozměrové senzory - Industrial and Miniature

Jako miniaturní senzory se považují ty, jejichž hmotnost je menší než 5 gramů. Frekvenční rozsah mají větší nebo roven 10 kHz. Používají se pro měření malých a křehkých struktur a ve stísněných prostorech. Zajišťují vysokou úroveň měření při vysokofrekvenčním použití. [16]

Zástupcem miniaturního vysokofrekvenčního senzoru je B&K 4374 (Obr. 4.4a), který je konstrukce Planar Shear. Dále Endevco 7240C (Obr. 4.4b), jenž má také konstrukci stříhového módu. Technické specifikace viz příloha A.



Obr. 4.4 Miniaturní vysokofrekvenční akcelerometry a) B&K 4374, b) Endevco 7240C.

Převzato z [16][21]

- Průmyslové senzory - industrial sensors

Průmyslové snímače vibrací jsou k dostání ve variantách již zmíněných. Mohou být konstrukčně uspořádány pro použití vysokofrekvenční či vysokocitlivostní. Odlišné je hlavně jejich pouzdro, které je přizpůsobeno provozu v těžkých podmínkách. Průmyslový snímač B&K 8324 (Obr. 4.5) má kompresní design. Je konstruován do podmínek průmyslového provozu, jako je použití v jaderných elektrárnách a prostorech s vysokými teplotami. Senzor je konstruován k permanentní instalaci na monitorovaný stroj. Technické údaje jsou uvedeny v příloze A.

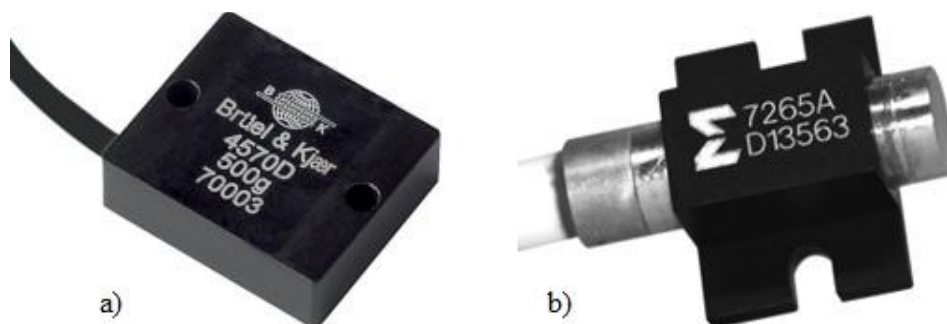


Obr. 4.5 Průmyslový akcelerometr B&K 8324. Převzato z [16]

4.3.2 Piezorezistivní akcelerometry

Tenzometrické prvky piezorezistivního akcelerometru mění elektrický odpor v závislosti na mechanickém namáhání. Monolitický senzor snímače obsahuje integrované mechanické zarážky, je odolný a zachovává vynikající poměr odstupe signálu od šumu. Používá se pro měření nízkofrekvenčních vibrací a rázů, měření pohybu, v automobilovém průmyslu pro crash testy, či snímání nerovností povrchu cest. Obecně můžeme říci, že se používají tam, kde je třeba minimálního hmotnostního zatížení měřeného zařízení a vysoké frekvenční odezvy. U některých měření, při kterých je dosaženo krajní citlivosti senzoru není potřeba zesílení výstupního signálu. Tyto akcelerometry mají minimální tlumení, proto u nich při snímání nízkých frekvencí nedochází k fázovému posuvu. [22]

Piezorezistivní snímač s vysokou citlivostí je například Endevco 7265A (Obr. 4.6b). Piezorezistivní akcelerometry jsou také konstruovány jako MEMS senzory. Tyto senzory obsahují kromě tenzometrických elementů také elektroniku, která je jejich nedílnou součástí. Například senzory od firmy B&K 4574 (Obr. 4.6a), nebo Measurement Specialities 4604 (Obr. 4.7), jsou představiteli piezorezistivních MEMS akcelerometrů. Technické údaje jsou uvedeny v příloze B. [25]



Obr. 4.6 Piezorezistivní akcelerometry a) MEMS B&K 4574, b) Endevco 7265A. Převzato z [23][24]

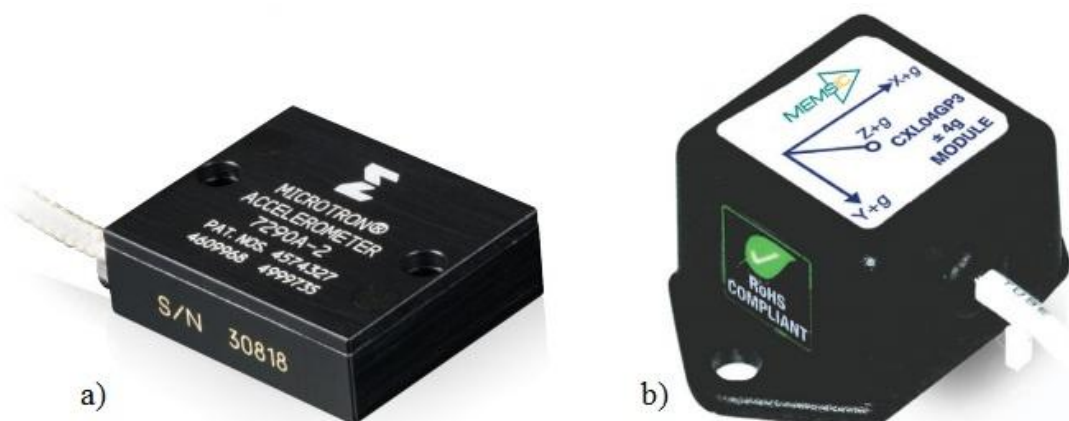


Obr. 4.7 Piezorezistivní MEMS akcelerometr Measurement Specialities 4604. Převzato z [25]

4.3.3 Akcelerometry s proměnnou kapacitou

Mikrosenzor s proměnnou kapacitou tvoří paralelní elektrody kapacitního zařízení. Výsledkem toho je senzor, který reaguje na téměř nulové otřesy (DC respond). Má stabilní tlumící vlastnosti, které zajišťují zvyšování frekvenční odezvy a odolnost vydržit extrémní nárazy a zatížení. Jsou ideální pro měření nízkofrekvenčních vibrací, jako je strukturální hodnocení, testování chvění, či monitorování vibrací automobilových zavěšení a brzd. Plynové tlumení a vnitřní omezovače přetížení rozsahu umožňují senzoru vydržit prudké nárazy a zrychlení, ke kterému může dojít při použití u velkých gravitačních přetížení. [22]

Pro lepší vlastnosti jsou dnešní akcelerometry vyráběné ve formě MEMS. Mezi akcelerometry s variabilní kapacitou patří Endevco 7290A-10 (Obr. 4.8a), nebo MEMSIC CXL-GP Series (Obr. 4.8b). Technické údaje jsou součástí přílohy C.



Obr. 4.8 Kapacitní akcelerometry a) Endevco 7290A-10, b) MEMSIC CXL-GP Series CXL04GP3. Převzato z [26][30]

4.4 Laserové vibrometry

Laserové vibrometry, založené na Dopplerově jevu, jsou vysoce přesné a univerzální snímače. Používají se tam, kde je nemožné nebo nežádoucí připojit klasický snímač přímo na

měřený objekt. Uplatnění nacházejí například pro snímání vibrací u rotujících částí v maximálních rychlostech. Snímají malé, horké či křehké struktury. Laserový paprsek měří skrz vodu, sklo, nebo se používá pro měření vibrací v nebezpečném prostředí. Měření lze provádět na vzdálenosti několika centimetrů až po několik desítek metrů, v závislosti na použitém typu objektivu. [16] Mezi LDV patří B&K 8337 (Obr. 4.9a), nebo LDV od firmy OptoMET (Obr. 4.9b).



Obr. 4.9 Laserový vibrometr a) B&K 8337, b) OptoMET. Převzato z [16][28]

5 Zhodnocení získaných poznatků

Výhody a nevýhody jednotlivých zmíněných senzorů jsou poměrně relativním pojmem, jelikož každý snímač má svá vlastní technická úskalí, která jsou kompenzována jinými vlastnostmi, jenž jsou stěžejní právě při výběru snímače s určitým principem funkce.

Nejpoužívanějšími senzory jsou v současnosti piezoelektrické akcelerometry, díky jejich jednoduché konstrukci, širokému použití a vysoké odolnosti. K dostání jsou triaxiální, které měří vibrace ve třech osách, oproti uniaxiálním, které snímají pouze v jednom směru. Volba takového senzoru závisí zejména na finanční stránce, neboť snímač měřící ve třech směrech je nákladnější, ovšem lze ho nahradit třemi senzory měřících v jednom směru tak, že se vhodnou volbou připevnění k danému objektu.

Při srovnání piezoelektrických senzorů dojdeme k výsledku, že je potřeba brát ohled zejména na místo, kde se budou vibrace měřit. Potřebujeme-li analyzovat vibrace u točivého stroje, který při chodu vydává mnoho tepla, pak je vhodnější použít senzor s vyšší teplotní odolností, jako je například nábojový senzor Endevco 6233C-100 (příloha A), který je přizpůsoben náročným podmínkám provozu. Volbou tohoto senzoru ovšem nezískáme tak přesné výsledky, které bychom získali zvolením některého z akcelerometrů s integrovaným

předzesilovačem (IEPE). Avšak v podmínkách, kde panují vysoké teploty by takový senzor nepodával věrohodné výsledky, protože elektronika integrovaná v něm, by nepracovala standardně. Z toho vyplývá, že IEPE snímače mají obecně vyšší výstupní citlivost, díky vnitřnímu zesilovači, který stačí již připojit k zařízení, které monitoruje a vyhodnocuje vibrace. Výstupní signál z IEPE, který má napěťový charakter, je možné přenášet na mnohem větší vzdálenosti, než signál z nábojového snímače. Výstupní signály jsou přenášeny kabelem, který hraje významnou roli v zaznamenávání výsledků. Protože výstupní signál z nábojového akcelerometru je náboj, je potřeba mít přizpůsobené vedení, které nezkrusí a nezdeformuje informaci. Tyto kabely jsou náročnější na výrobu a tedy i dražší, proto se používají pro přenos jen na krátké vzdálenosti, než koaxiální kabel, který stačí k vedení výstupu převáděném již v senzoru.

Z technických údajů jednotlivých parametrů uvedených v příloze je zřejmé, že senzory sloužící k monitorování jemných vibrací mají frekvenční rozsah nižší, než ty, které jsou vhodné pro použití u velkých vibrací. Je to dáno skutečností, že citlivé snímače rozpoznají několikanásobně větší přetížení, než například průmyslové. Další věcí, která vyplývá z údajů v příloze je ta, že snímače pro měření vibrací o vysoké frekvenci mají nižší citlivost. Je to dáno menší seismickou hmotností uvnitř senzoru, který s menším podílem seismického elementu zaznamenává vibrace od jednotek Hz, oproti senzorům s vyšším podílem seismické hmotnosti, které zaznamenávají otřesy již od desetin Hz. Důkazem tohoto porovnání jsou PE senzory B&K 4370 (vysoká citlivost - větší podíl seismické hmoty), oproti Endevco 7240C (nižší citlivost - menší podíl seismické hmoty).

Standardem v dnešní době se stává u snímačů TEDS technologie (Transducer Electronic Data Sheet), která nesouvisí pouze s piezo senzory, ale obecně se všemi, které v sobě mají zabudovanou elektroniku. Znamená to, že snímač obsahuje čip, na kterém jsou informace o daném typu senzoru, které slouží ke snadnější kalibraci přístroje a jeho použití. Tím se dostáváme k technologii Plug and Play, která čerpá právě z informací TEDS. Důsledek této technologie je ten, že se senzor po připevnění k měřenému objektu nemusí dlouze nastavovat, díky informacím uloženým v TEDS čipu.

Při srovnání piezoelektrických a piezorezistivních akcelerometrů zjistíme, že piezorezistivní akcelerometry jsou citlivější a dají se vytvořit v mnohem menším provedení, při zachování stejné citlivosti. Je to dáno tím, že Wheatstoneův můstek, obsažený v odporovém snímači, lze vyrobit na mikroskopické úrovni, kdežto zmenšením piezoelektrického elementu společně se seismickou hmotností by mělo za následek rapidní ztrátu citlivosti, kvůli velkému ubrání seismické hmoty.

Piezorezistivní snímače a akcelerometry s proměnnou kapacitou mají téměř shodné vlastnosti. Kapacitní snímače jsou ovšem modernější, spolehlivější a teplotně stabilnější. Proto postupně kapacitní senzory nahrazují odporové. Je to dáno skutečností, že piezorezistivní akcelerometr potřebuje pro svou funkci, aby jím procházelo napětí. Tím začne rezistory, které jsou součástí Wheatstoneova můstku, protékat proud. Ten způsobí zahřívání snímače, což má za následek zkreslení výstupního signálu.

Laserové vibrometry jsou samostatnou kapitolou. Z jednoho úhlu pohledu se zdá, že s ostatními zmíněnými senzory nemá nic do činění, jelikož pro snímání vibrací používá naprosto odlišný princip. Ovšem pravdou je, že poskytují nepochybně nejpřesnější výsledky při měření. Tato velmi důležitá vlastnost při analýze vibrací je vykoupěna vysokou pořizovací cenou, oproti ceně ostatních možností. Proto při potřebě analýzy vibrací, je důležité zvážit, zda je nutné pořizovat laserovým vibrometr, nebo postačí-li jiný akcelerometr.

6 Závěr

Měření vibrací je velmi zajímavá problematika. Nejen proto, že s vibracemi se všichni setkáváme v každodenním životě, ale i proto, že vibrace jsou jevem, který každý zná a nějakým způsobem se s ním již setkal. Mnoho lidí si poté položí otázku, co vlastně vibrace jsou a jak se dají změřit, či analyzovat. Právě na tuto otázku jsem se snažil v této práci odpovědět. Mým cílem bylo nastudovat o vibracích a senzorech, kterými se měří, dostatek informací, abych je mohl v této bakalářské práci shrnout a interpretovat takovým způsobem, aby i člověk nezabývající se danou problematikou pochopil princip.

V této práci bylo hlavním cílem prostudovat jaké typy senzorů se pro měření vibrací používají a zpracovat jejich přehled. Tento úkol je zpracován ve třetím bodě, kde jsem popsal mnohé typy snímačů, bez ohledu na jejich uplatnění v praxi. Při získávání informací jsem dospěl k závěru, že v praxi se dnes používají zejména akcelerometry, kterým jsem proto ve své práci, zvláště ve třetím a čtvrtém bodě, věnoval největší pozornost. Důvodem jejich širokého použití je jednoduchá odolná konstrukce, velký frekvenční rozsah a teplotní odolnost, jenž je dominantou zejména nábojových piezoelektrických akcelerometrů. Další vlastnosti jednotlivých typů akcelerometrů a jejich typické použití jsou uvedeny v kapitole čtvrté. Jako přílohu jsem k práci připojil technické údaje o konkrétních typech, které jsem uvedl rovněž ve čtvrtém bodě. Vlastním přínosem práce je shrnutí a ucelení v praxi používaných senzorů, porovnání jejich vlastností v pátém bodě, kde jsem z poznatků, které jsem nabyl v průběhu vypracování vyvodil určité závěry.

Vývoj v oblasti měření vibrací, se v dnešní době vyvíjí velmi rychlým tempem. Dle mého názoru je budoucnost v MEMS technologii, kdy se valná většina výrobců bude snažit implementovat měřicí mechanismy do stále menších senzorů, které nebudou nijak zatěžovat měřený objekt. Jednou z největších slabin u vibračních snímačů je dle mého názoru teplotní odolnost, kdy při vysokých teplotách dochází ke zkreslení výstupního signálu. Tudíž si myslím, že další důležitý krok v budoucnu je ten, že se konstruktéři budou snažit vyvinout způsob, kterým učiní snímače teplotně velmi odolné a stabilní.

Použitá literatura a internetové zdroje

- [1] SMETANA, Ctírad. *Hluk a vibrace. Měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901-9362-5.
- [2] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. ISBN 80-730-0158-6.
- [3] BERAN, Vlastimil. *Chvění a hluk*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010, 202 s. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [4] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1995, 389 s. ISBN 80-010-2246-3.
- [5] Multimediální encyklopedie fyziky. [online]. 2012 [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/157-faze-kmitaveho-pohybu>.
- [6] KOSTELNÍK. *Analýza šíření vibrací spojeným strukturálně akustickým prostorem*. Brno, 2011. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39077. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Pavel Novotný.
- [7] *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2010, roč. 2010, č. 1. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>.
- [8] SMETANA, Ctírad. *Měření hluku a chvění*. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1974.
- [9] WEIGL, Martin. *Měření vibrací*. Brno, 2011. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41669. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Martin Musil.
- [10] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů: piezoelektrické. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2007 [cit. 2012-05-31]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>.
- [11] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů: piezorezistivní. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2007 [cit. 2012-05-31]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>.
- [12] HUSÁK, Miroslav. *Akcelerometry* [online]. Praha, 2009 [cit. 2012-05-31]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf>. Podklady k přednášce. ČVUT Praha.

- [13] *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, 2008, roč. 2008, č. 11. [cit. 2012-05-31]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38122.pdf>.
- [14] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů: tepelné. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2007 [cit. 2012-05-31]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007040901>.
- [15] OMEGA - akcelerometry: Akcelerometry. *Omega Engineering Česká republika* [online]. 2007 [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/accelerometers.html>.
- [16] Accelerometers & Conditioning. *Brüel & Kjaer* [online]. 2009 [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: www.e-pages.dk/bruel/59.
- [17] Test and measurement product catalog. *Endevco Meggit Sensing Systems* [online]. 2012 [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: <http://www.endevco.com/download/Meggit-Sensing-Systems-2012-catalog.pdf>.
- [18] Piezoelectric accelerometer datasheet of Model 2224C. *Endevco Meggit Sensing Systems* [online]. 2012 [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: <http://www.endevco.com/datasheets/2224C.pdf>.
- [19] Piezoelectric accelerometer datasheet of Model 2228C. *Endevco Meggit Sensing Systems* [online]. 2012 [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: <http://www.endevco.com/datasheets/2228C.pdf>.
- [20] Piezoelectric accelerometer datasheet of Model 6233C-100. *Endevco Meggit Sensing Systems* [online]. 2012 [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: <http://www.endevco.com/datasheets/6233C2.pdf>.
- [21] Piezoelectric accelerometer datasheet of Model 7240C. *Endevco Meggit Sensing Systems* [online]. 2012 [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.endevco.com/datasheets/7240C.pdf>.
- [22] Choosing the right accelerometer. *Brüel & Kjaer* [online]. 2010 [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/products/transducersconditioning/vibration-transducers/accelerometers/accelerometers/choosingaccelerometers.aspx>.
- [23] 4570 - Accelerometer. *Brüel & Kjaer* [online]. 2010 [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/products/transducersconditioning/vibration-transducers/accelerometers/accelerometers/4570.aspx>.
- [24] 7265A. *Endevco Meggit Sensing Systems* [online]. 2009 [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.endevco.com/7265a>.
- [25] Vibration Sensor - Model 4604 Accelerometer. *Measurement Specialities* [online].

- 2011 [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: http://www.meas-spec.com/product/tm_product.aspx?id=6407.
- [26] 7290A-10. *Endevco Meggit Sensing Systems* [online]. 2012 [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: <http://www.endevco.com/7290a-10>.
- [27] Product data of Laser Doppler Vibrometer - Type 8337. *Brüel & Kjaer* [online]. 2004, 2010 [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bp2056.pdf>.
- [28] High Speed Digital Laser Doppler Vibrometer. *SVdigital* [online]. 2011 [cit. 2012-06-07]. Dostupné z: http://www.svdigital.com/data/pro3/Laser_Doppler_Vibrometer_Speed_Data_Sheet_EN.pdf.
- [29] Steps to selecting the right accelerometer. *Endevco Meggit Sensing Systems* [online]. 2009 [cit. 2012-06-07]. Dostupné z: http://www.endevco.com/news/archivednews/2010/2010_08/TP327.pdf.
- [30] MEMS Accelerometers. *MEMSIC* [online]. 2010 [cit. 2012-06-08]. Dostupné z: <http://www.memsic.com/products/inertial-systems/accelerometers.html>.

Seznam příloh

Příloha A	Technické údaje piezoelektrických a IEPE akcelerometrů
Příloha B	Technické údaje piezorezistivních akcelerometrů
Příloha C	Technické údaje akcelerometru s proměnnou kapacitou
Příloha D	Technické údaje laserových vibrometrů

Příloha A - technické údaje nábojových piezoelektrických a IEPE akcelerometrů**Brüel&Kjaer 4520**

Boční konektor

Hermeticky uzavřené titanové pouzdro

Triaxiální



Frekvenční rozsah

2 - 7000 Hz

Citlivost

10 pC/ g_n

Teplotní rozsah

-51 - 121°C

Maximální měřitelný rozsah

500 g_n

Maximální provozní šok (špička)

5000 g_n

Rezonanční frekvence

30 kHz

Hmotnost

2,9 g

Upevnění

Lepidlo

Výstup

IEPE [16]

Brüel&Kjaer 2646

Vstupní kapacita

> 200 nF

Citlivost

1 mV/pC

Frekvenční rozsah

0,3 - 100 kHz

Napájení

Konstantní proud 2 - 20 mA

Nezatížený napěťový zdroj 24 - 30 V

Teplotní rozsah

-50 - 125°C [16]

Brüel & Kjaer 4383-S

Boční konektor

Titanové pouzdro

Uniaxiální



Frekvenční rozsah

0,1 - 8400 Hz

Citlivost

31 pC/g_n

Teplotní rozsah

-74 - 250°C

Maximální sinusové vibrace (špička)

2000 g_n

Maximální provozní šok (špička)

5000 g_n

Rezonanční frekvence

28 kHz

Hmotnost

17 g

Upevnění

Montážní čep

Výstup

Náboj z piezokrystalu [16]

Endevco 2224C

Horní konektor

Nerezové pouzdro

Uniaxiální



Frekvenční rozsah

0,1 - 10000 Hz

Citlivost

12 pC/g_n

Teplotní rozsah

-55 - 177°C

Maximální sinusové vibrace (špička)

1000 g_n

Maximální provozní šok (špička)

2000 g_n

Rezonanční frekvence

32 kHz

Hmotnost

16 g

Upevnění

Montážní čep

Výstup

Náboj z piezokrystalu [18]

Brüel&Kjaer 4321-S

3 boční konektory
Titanové pouzdro
Triaxiální



Frekvenční rozsah	0,1 - 10000 Hz
Citlivost	10 pC/g _n
Teplotní rozsah	-74 - 250°C
Maximální sinusové vibrace (špička)	500 g _n
Maximální provozní šok (špička)	1000 g _n
Rezonanční frekvence	40 kHz
Hmotnost	55 g
Upevnění	Montážní čep
Výstup	Náboj z piezokrystalu [16]

Endevco 2228C

2 boční, 1 horní konektor
Pouzdro z anodizovaných slitin hliníku
Triaxiální



Frekvenční rozsah	0,1 - 6000 Hz
Citlivost	2,8 pC/g _n
Teplotní rozsah	-55 - 177°C
Maximální sinusové vibrace (špička)	1000 g _n
Maximální provozní šok (špička)	2000 g _n
Rezonanční frekvence	21 kHz
Hmotnost	15 g
Upevnění	Montážní šroub
Výstup	Náboj z piezokrystalu [19]

Brüel&Kjaer 4370-S

Horní konektor

Nerezové pouzdro

Uniaxiální



Frekvenční rozsah

0,1 - 4800 Hz

Citlivost

100 pC/g_n

Teplotní rozsah

-74 - 250°C

Maximální sinusové vibrace (špička)

2000 g_n

Maximální provozní šok (špička)

2000 g_n

Rezonanční frekvence

16 kHz

Hmotnost

54 g

Upevnění

Montážní čep

Výstup

Náboj z piezokrystalu [16]

Endevco 6233C-100

Boční konektor

Hermeticky uzavřené pouzdro

Uniaxiální



Frekvenční rozsah

0,1 - 3000 Hz

Citlivost

100 pC/g_n

Teplotní rozsah

-55 - 482°C

Maximální sinusové vibrace (špička)

500 g_n

Maximální provozní šok (špička)

1000 g_n

Rezonanční frekvence

12 kHz

Hmotnost

110 g

Upevnění

3x montážní šroub

Výstup

Náboj z piezokrystalu [20]

Brüel&Kjaer 4374

Boční integrovaný konektor

Pouzdro z titanu

Uniaxiální



Frekvenční rozsah

1 - 26000 Hz

Citlivost

1,5 pC/g_n

Teplotní rozsah

-74 - 250°C

Maximální sinusové vibrace (špička)

5000 g_n

Maximální provozní šok (špička)

25000 g_n

Rezonanční frekvence

85 kHz

Hmotnost

0,65 g

Upevnění

Lepidlo

Výstup

Náboj z piezokrystalu [16]

Endevco 7240C

Boční konektor

Pouzdro z nerezové oceli

Uniaxiální



Frekvenční rozsah

1 - 20000 Hz

Citlivost

3 pC/g_n

Teplotní rozsah

-55 - 260°C

Maximální sinusové vibrace (špička)

1000 g_n

Maximální provozní šok (špička)

5000 g_n

Rezonanční frekvence

90 kHz

Hmotnost

4,8 g

Upevnění

Montážní čep

Výstup

Náboj z piezokrystalu [21]

Brüel&Kjaer 8324

Boční konektor

Titanové pouzdro

Uniaxiální



Frekvenční rozsah

1 - 10000 Hz

Citlivost

10 pC/g_n

Teplotní rozsah

-196 - 480°C

Maximální sinusové vibrace (špička)

1000 g_n

Maximální provozní šok (špička)

2000 g_n

Rezonanční frekvence

30 kHz

Hmotnost

66 g

Upevnění

3x montážní šroub

Výstup

Náboj z piezokrystalu [16]

Příloha B - technické údaje piezorezistivních akcelerometrů**Endevco 7265A**

Boční konektor	
Pouzdro z anodizovaného hliníku	
Uniaxiální	
Frekvenční rozsah	0 - 800 Hz
Citlivost (při 100Hz)	5 mV/g _n
Teplotní rozsah	-18 - 66°C
Maximální lineární rozsah (špička)	100 g _n
Maximální šok (špička)	4000 g _n
Hmotnost	5 g
Upevnění	2x montážní šroub
Výstup	Piezoresistive [24]

**Brüel&Kjaer 4574**

Boční konektor	
Pouzdro zeslitin hliníku	
Uniaxiální	
Frekvenční rozsah	0 - 500 Hz
Citlivost	200 mV/g _n
Teplotní rozsah	-55 - 121°C
Maximální lineární rozsah (špička)	10 g _n
Maximální šok (špička)	10000 g _n
Hmotnost	8 g
Zbytková úroveň šumu	350 μV
Upevnění	2x montážní šroub
Výstup	Piezoresistivní [23]



Measurement Specialties 4604

Boční konektor

Pouzdro ze slitin hliníku

Uniaxiální

Frekvenční rozsah

Citlivost

Teplotní rozsah

Maximální lineární rozsah (špička)

Maximální šok (špička)

Hmotnost

Zbytková úroveň šumu

Upevnění

Výstup



0 - 400 Hz

200 mV/g

-55 - 125°C

10 g_n10000 g_n

10 g

300 μV

2x montážní šroub

Piezorezistivní [25]

Příloha C - technické údaje akcelerometru s proměnnou kapacitou**Endevco 7290A-10**

Boční konektor

Pouzdro z anodizovaného hliníku

Uniaxiální

Frekvenční rozsah 0 - 500 Hz

Citlivost 200 mV/g_n

Teplotní rozsah -55 - 121°C

Maximální lineární rozsah (špička) 10 g_nMaximální šok (špička) 10000 g_n

Rezonanční frekvence 3000 Hz

Hmotnost 12 g

Výstup při nulovém namáhání ±50 mV

Upevnění 2x montážní šroub

Výstup Napět'ový

MEMSIC-GP Series CXL04GP3

Boční konektor

Pouzdro z hliníku

Triaxiální

Frekvenční rozsah 0 - 100 Hz

Citlivost 500 mV/g_n

Teplotní rozsah -40 - 85°C

Maximální lineární rozsah (špička) 4 g_nMaximální šok (špička) 2000 g_n

Rezonanční frekvence 1000 Hz

Hmotnost 46 g

Výstup při nulovém namáhání ±2,3 V

Upevnění 2x montážní šroub

Výstup Napět'ový

Příloha D - Technické údaje laserových vibrometrů

Brüel&Kjaer 8337



Frekvenční rozsah	0,5 - 22000 Hz
Vlnová délka laseru	632,8 nm
Vzdálenost od měřeného objektu	0,09 - 30 m
Napájení	11 - 14,5 V DC
Váha	3,5 kg [27]

LDV OptoMET



Frekvenční rozsah	0 - 10 MHz
Vlnová délka laseru	633 nm
Vzdálenost od měřeného objektu	0,045 - 100 m (v závislosti na objektivu)
Napájení	AC 110 - 240 V, DC 24 V
Váha	11 kg [28]