

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Volba a použití akcelerometru při měření vibrací

Martin Polák

Bakalářská práce

2010

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin POLÁK**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Provozní spolehlivost dopravních prostředků
a infrastruktury**
Název tématu: **Volba a použití akcelerometru při měření vibrací**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

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

V práci bude popsána volba akcelerometru pro měření vibrací a způsob jeho použití. Práce teoreticky popíše vše, co může ovlivnit správnost měření vibrací akcelerometrem. Některé možné vlivy budou prakticky ověřeny.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace : měření a hodnocení. 1. vydání. Praha : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5

HELEBRANT, František, ZIEGLER, Jiří. Technická diagnostika a spolehlivost II. : Vibrodiagnostika. 1. vydání. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. 173 s. ISBN 80-248-0650-9

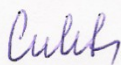
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Kukla, Ph.D.

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **26. února 2010**

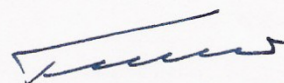
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2010**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 29. 5. 2010

Martin Polák

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Kuklovi, Ph.D. za ochotu, pomoc s praktickým měřením, cenné rady a věcné připomínky. Dále bych chtěl poděkovat svojí rodině za podporu.

ANOTACE

Bakalářská práce je věnována volbě akcelerometru pro měření vibrací a způsobu jeho upevnění na měřený objekt. Je v ní teoreticky popsáno, co může ovlivnit správnost měření vibrací akcelerometrem. Obsahuje také experimentální ověření vlivu různých upevnění na naměřené hodnoty vibrací.

KLÍČOVÁ SLOVA

vibrodiagnostika, vibrace, akcelerometr, upevnění snímače, vlivy na měření

TITLE

Choice and usage of accelerometer during measuring of vibrations

ANOTATION

Bachelor thesis is focused to choice the accelerometer for measuring vibration and its method of attachment to the measured object. It is theoretically described what may affect the accuracy of the measurement of vibration using accelerometer. It also includes experimental verification of the influence of various attachments to the measured vibration.

KEYWORDS

vibrodiagnostics, vibration, accelerometer, attachment of a sensor, influences on the measurement

Obsah

	strana
Úvod	9
1 Vibrodiagnostika	10
2 Měření vibrací – teorie	12
2.1 Snímače výchylky	12
2.2 Snímače rychlosti	13
2.3 Snímače zrychlení – Akcelerometry	13
2.3.1 Výběr snímače zrychlení – akcelerometru [11]	13
2.3.2 Piezoelektrický akcelerometr	14
2.3.3 Piezorezistivní akcelerometry	16
2.3.4 Akcelerometry s proměnnou kapacitou (klasické a MEMS)	17
2.3.5 Použití akcelerometrů	17
2.3.6 Vlivy na správnost měření pomocí akcelerometru	18
3 Experimentální část	20
3.1 Měřicí řetězec	20
3.1.1 Měníč frekvence	20
3.1.2 Zkušební zařízení pro měření vibrací	21
3.1.3 Otáčkoměr	23
3.1.4 Snímače vibrací	23
3.1.5 Analyzátor	24
3.1.6 Vyhodnocovací zařízení	24
3.2 Zpracování signálů	26
3.2.1 FFT analýza	26
3.2.2 CPB analýza	27
3.3 Upevnění snímačů na měřený objekt	29
3.3.1 Referenční měření	29
3.3.2 Přidržení rukou	30
3.3.3 Přidržení rukou – bez redukce	30
3.3.4 Přilepení voskem	31
3.3.5 Přilepení oboustranně lepicí páskou	31

3.3.6	Přilepení pěnovou oboustranně lepicí páskou	32
3.3.7	Nedotažení snímačů při jejich montáži	32
3.3.8	Měření mimo osu hřídele	32
4	Vyhodnocení výsledků měření	34
4.1	Vyhodnocení pro různá upevnění snímačů na měřený objekt	34
4.1.1	Přidržení rukou	36
4.1.2	Přidržení rukou – bez redukce	37
4.1.3	Přilepení voskem	39
4.1.4	Přilepení oboustranně lepicí páskou	40
4.1.5	Přilepení pěnovou oboustranně lepicí páskou	41
4.1.6	Nedotažení snímačů při jejich montáži	42
4.1.7	Měření mimo osu hřídele	43
	Závěr	44
	Seznam použitých zdrojů	46
	Seznam obrázků	48
	Seznam zkratk	50
	Přehled veličin	51
	Seznam příloh	52

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou výběru správného akcelerometru a měření vibrací pomocí různě upevněných akcelerometrů. Cílem práce je teoreticky popsat, co může ovlivnit správnost měření vibrací akcelerometrem, ověřit praktickým měřením vliv některých způsobů upevnění snímačů na výsledky měření. Dále určit, které způsoby upevnění jsou vhodné pro různé situace v praxi. Součástí práce je i ověření některých dalších faktorů ovlivňujících naměřené hodnoty vibrací. Pro testování bylo použito zkušební zařízení pro měření vibrací umístěné na Katedře dopravních prostředků a diagnostiky.

Měření vibrací je jeden z nejvýznamnějších prostředků technické diagnostiky pro zjišťování aktuálního technického stavu měřeného objektu. Technický stav pohyblivého strojního zařízení bezprostředně ovlivňuje nejen kvalitu produkce, ale i bezpečnost provozu, hlučnost a dopady na okolí.

1 Vibrodiagnostika

Slovo vibrace pochází z latinského slova vibrō, což znamená třást se. Je to časová změna velikosti určující veličiny, která popisuje pohyb nebo polohu mechanické soustavy, je-li velikost střídavě větší a menší než nějaká střední hodnota nebo referenční veličina. [7] Jedná se tedy o mechanické kmitání – oscilaci tělesa nebo struktury kolem rovnovážné polohy. Doba, která je nezbytná k vykonání jednoho kmitu se označuje perioda. Počet kmitů za sekundu se nazývá frekvence neboli kmitočet, má jednotku Hertz [Hz] a je to převrácená hodnota periody. Okamžitá poloha hmotného bodu nebo tělesa při mechanickém kmitání, kterou zaujímá vzhledem k rovnovážné poloze, se označuje jako okamžitá výchylka. Absolutní hodnota okamžité výchylky se nazývá velikost okamžité výchylky. Největší velikost okamžité výchylky se nazývá amplituda (výkmit, rozkmit). Nejjednodušší forma vibrací je závaží umístěné na pružině, které vykonává přímočarý vratný pohyb.

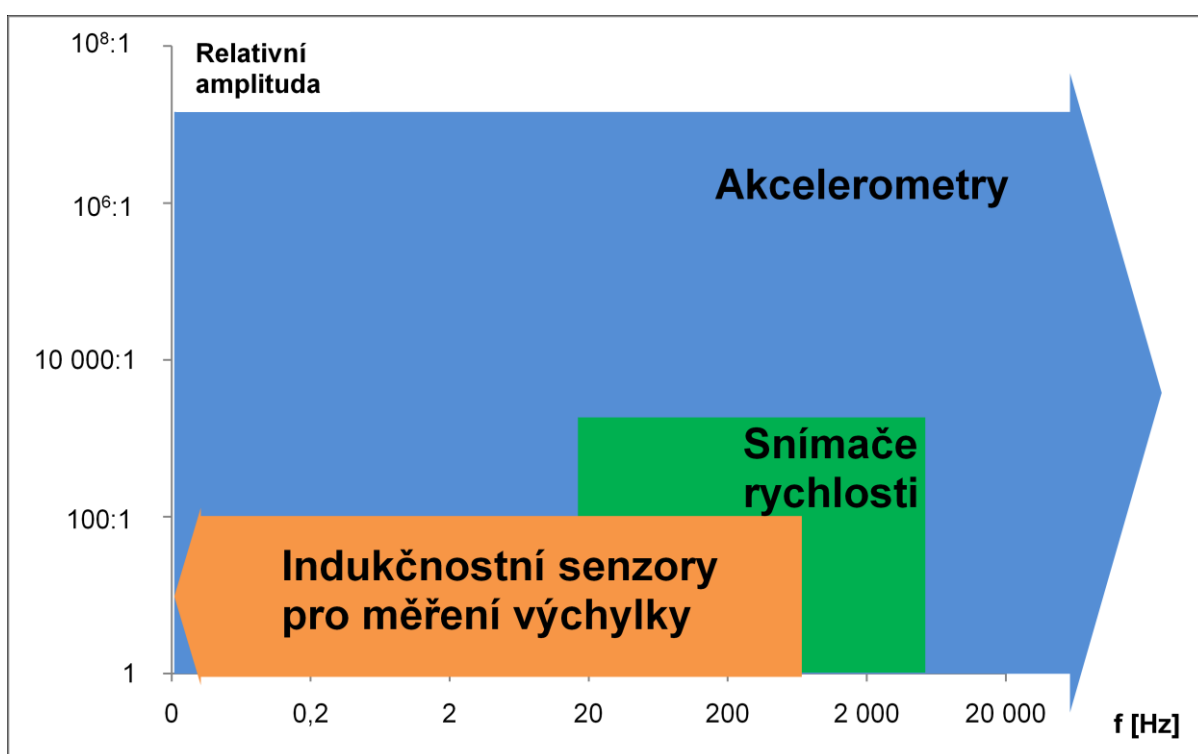
Vibrace jsou důležitou oblastí mechaniky, protože se s nimi setkává každý člověk během celého života. Techniky ale zajímá kmitání mechanických strojů. Vibrace stroje jsou úzce vázány s dynamickým namáháním stroje a technickým stavem hřídelí, ložisek, převodovek, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, nevyvážeností rotujících dílů, vůlemi v kluzných ložiscích, opotřebením, únavou materiálů, vznikajícími trhlinami, korozi aj. Jsou buzeny jak rotujícími, tak přímočaře se pohybujícími tělesy. Pro jejich zjišťování se postupně vyvíjela metodika od pouhého používání sluchu a hmatu, přes mechanické pákové snímače výchylky, bezkontaktní snímače až po indukční a moderní piezoelektrické snímače. Obor, který zkoumá vibrace v provozu, se nazývá vibrodiagnostika. ([1], [9])

Provoz všech točivých strojů se neobejde bez vznikajících vibrací. Jejich hlavními příčinami jsou vůle pohyblivých součástí, dynamické síly provázející výrobní nepřesnosti, tření a odvalování stýkajících se součástek a nevyváženost součástí s rotačním a translačním pohybem. Toto chvění může vyvolat rezonanci jiných součástí, a tedy může dojít k dalšímu zesílení vibrací a hluku. Vibrace stroje mohou sloužit i jako důležitý zdroj informací o jeho provozních vlastnostech a technickém stavu. Toho využívá jeden z oborů technické diagnostiky – vibrodiagnostika. Je to jedna z hlavních metod bezdemontážní nedestruktivní diagnostiky. Hlavní úlohou vibrodiagnostiky je odhalení skutečného technického stavu objektu a tím možnost efektivně plánovat údržbu a opravy. Na základě analýzy dat z provedeného měření lze odhalit zhoršený technický stav objektu. Následně je možné přikročit

k opravě včas a zabránit tak hrozící poruše objektu. Na druhou stranu se zamezí zbytečným preventivním prohlídkám, při kterých je nutné zařízení odstavit z provozu. [2]

2 Měření vibrací – teorie

Měření vibrací se provádí snímači, které převádějí mechanické kmitání zpravidla na elektrický signál. Snímače vibrací dělíme na snímače výchylky, rychlosti a zrychlení kmitání. Další významné rozdělení je na absolutní a relativní snímače. Absolutní snímače měří vibrace vzhledem k vlastní setrvačné soustavě. Používají se tam, kde není k dispozici vhodný relativní pevný bod k upevnění vztažného bodu senzoru (velké motory, ložiskové skříně, jedoucí vozidla, letadla, apod.). Relativní senzory vibrací jsou užitečné např. při vyhodnocování vibračního pohybu jedné části stroje vůči druhé (např. vibrace hřídele vůči víku ložiska). [1]



Obr. č. 1 – Pracovní rozsahy snímačů vibrací dle [9]

2.1 Snímače výchylky

Výchylka určuje změnu vzdálenosti nebo polohy vzhledem k poloze referenční. Snímač výchylky je zařízení, které měří relativní vzdálenost mezi dvěma povrchy. Vyhodnocení výchylky je v diagnostice strojů vhodné pro měření vůlí v mechanismech. Tyto vůle jsou obvykle měřitelné v nízkofrekvenční oblasti kmitů (v řádech hertzů), neboť při vyšších otáčkách stroje kinematika hřídele již neodpovídá maximálním hodnotám vůlí. [1]

Mezi nejpoužívanější snímače ve vibrodiagnostice pro měření výchylky patří indukčnostní senzory, které využívají závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Tento typ senzorů je náchylný na parazitní vlivy (např. délka kabelu k měřicím obvodům,

vnější elektromagnetické pole). Z těchto důvodů se vyrábějí jako integrované (v kovovém stíněném krytu je kromě cívky zabudována také základní část elektroniky). Tyto senzory mají obvykle kmitočtový rozsah 0 – 10 000 Hz. [10]

2.2 Snímače rychlosti

Často používanou veličinou ve vibrodiagnostice je efektivní hodnota rychlosti, neboť je přímým měřítkem škodlivosti vibrací z hlediska přenosu energie. Rychlost vibrací lze snímat akcelerometrem, kdy musíme výstupní signál integrovat, nebo lze použít elektrodynamický senzor. Ten může mít pohyblivou cívku nebo pohyblivý magnet. Při vzájemném pohybu magnetu (magnetická indukce B ve vzduchové mezeře) a cívky (délka vodiče l) dochází k indukci napětí u na cívce. Napětí na cívce je pak vyjádřené ve vztahu (1). ([1], [6])

$$u = B \cdot l \cdot v \quad (1)$$

Výhodou elektrodynamických senzorů rychlosti je vysoká úroveň výstupního signálu a malý vnitřní odpor, snímače lze tedy používat bez zesilovače. Nevýhodou je omezený horní kmitočet (do 3,5 kHz) a větší citlivost na parazitní magnetické pole.

2.3 Snímače zrychlení – Akcelerometry

K měření vibrací se používají snímače zrychlení zvané akcelerometry, které přeměňují vstupní zrychlení na výstup (zpravidla elektrický), jenž je úměrný vstupnímu zrychlení. Jsou to dnes nejpoužívanější snímače. Lze s nimi měřit nejen zrychlení, ale po integraci hodnoty zrychlení i rychlost a po dvojnásobné integraci také výchylku. Pro zrychlení platí vztah (2). Akcelerometry pracují na rozdíl od snímačů rychlosti v podrezonanční oblasti. Dělí se na piezoelektrické, piezorezistivní a kapacitní. ([1], [7], [11], [12])

Vztah mezi zrychlením (a), rychlostí (v) a výchylkou (y) je následující:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} \quad (2)$$

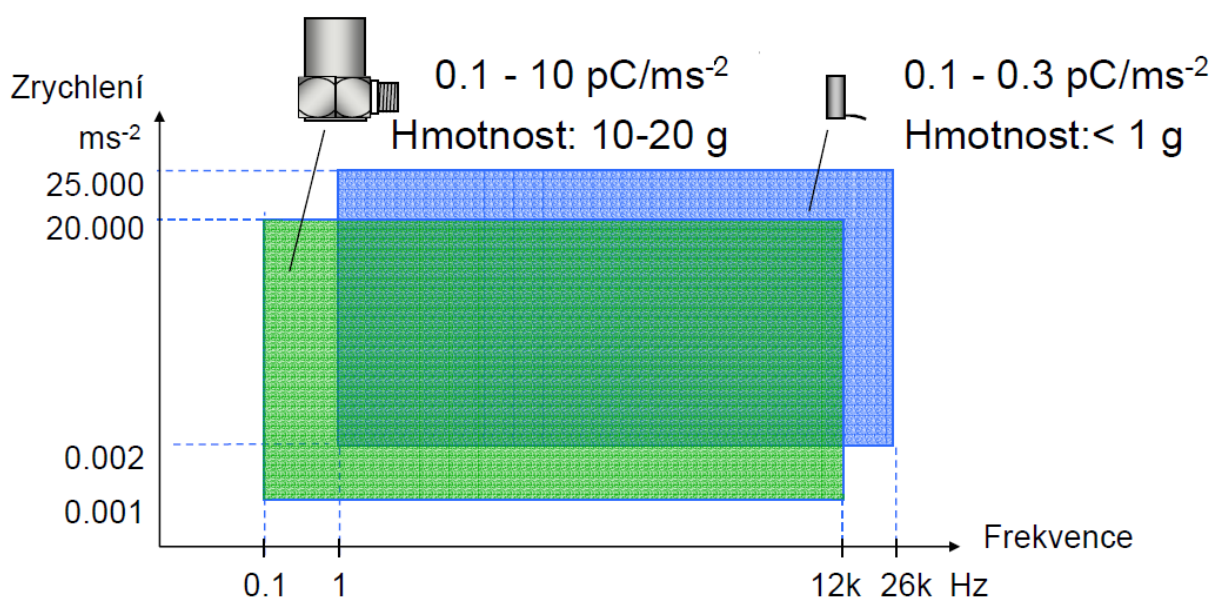
2.3.1 Výběr snímače zrychlení – akcelerometru [11]

Při výběru akcelerometru pro určitou aplikaci se musí brát zřetel na následující podmínky:

- 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 má měřit?

- jsou tam elektromagnetická pole?
- je v dané oblasti vysoká úroveň elektrického rušení?
- je povrch, kde má být umístěn snímač, uzemněn?
- je okolní prostředí korozivní?
- vyžaduje se v daném prostředí instalace přístrojů v nevýbušném provedení?
- je dané prostředí vlhké nebo se skrápějící vodou?

Dále je třeba vzít v úvahu, že hmotnost akcelerometrů by měla být mnohem menší než hmotnost monitorovaného objektu. Dynamický rozsah akcelerometru má být širší než je předpokládaný rozsah amplitudy. Frekvenční rozsah akcelerometru má odpovídat předpokládanému rozsahu frekvence. Citlivost akcelerometru by měla být dostatečná, aby výstupní signál byl kompatibilní s návaznými měřicími a vyhodnocovacími přístroji. Pro měření vibrací s vysokou amplitudou se používá snímač s nízkou citlivostí. Naopak snímač s vysokou citlivostí je používán k měření vibrací s malou amplitudou. Platí, že větší, těžší, a tedy citlivější snímač je schopný měřit již od velmi nízkých frekvencí, ale má menší frekvenční rozsah. Lehký snímač není schopný měřit nejnižší frekvence, ale umožňuje měřit frekvence vysoké. ([9], [11])

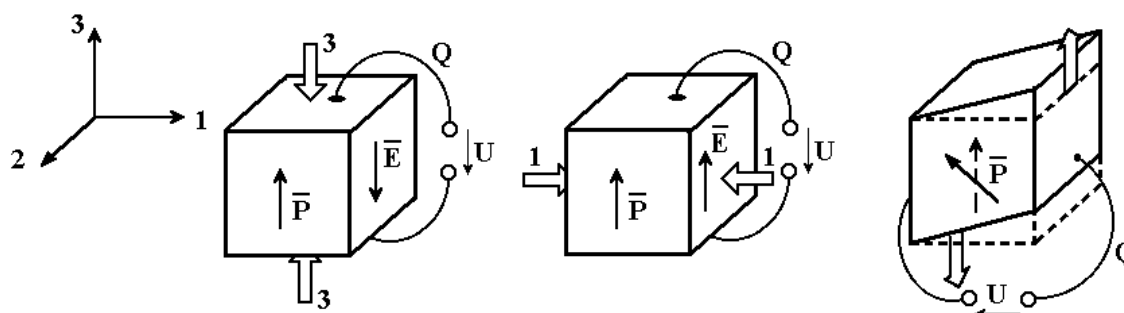


Obr. č. 2 – Volba akcelerometru [9]

2.3.2 Piezoelektrický akcelerometr

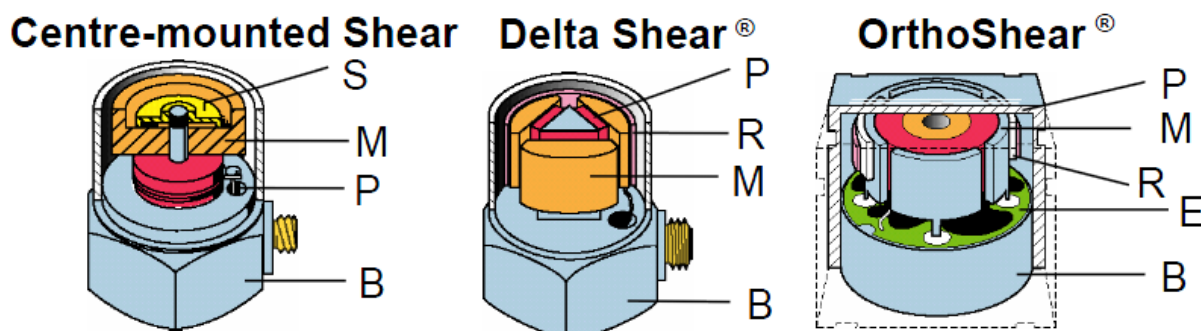
Piezoelektrický akcelerometr je moderní a dnes nejčastěji používaný snímač vibrací. Principem jeho fungování je přímý piezoelektrický jev, při němž se deformací krystalu generuje elektrický náboj úměrný mechanickému namáhání způsobeného vibracemi. Protože

je elektrický náboj úměrný síle a hmota snímače je konstantní, je tedy elektrický náboj také úměrný zrychlení. Elektrické napětí vygenerované krystalem je nutné zesílit. Používají se externí zesilovače, které jsou součástí analyzátoru, nebo má akcelerometr integrovaný zesilovač už ve své konstrukci. Podle směru působení deformace vůči ose rozlišujeme podélný, příčný a stříhový (smykový) jev (viz obrázek č. 3). ([1], [11], [12])



Obr. č. 3 – Podélný, příčný a stříhový piezoelektrický jev dle [1], kde F je síla, E je intenzita elektrického pole, U je napětí, P je vektor polarizace, Q je elektrický náboj.

Existuje několik typů akcelerometrů, některé z nich od firmy Brüel & Kjær jsou na obr. č. 4. Jednotlivé názvy akcelerometrů na obr. č. 4 označené ® jsou registrovanou obchodní značkou firmy Brüel & Kjær.



Obr. č. 4 – Některé typy akcelerometrů, vlevo s tlakovou deformací, uprostřed a vpravo pracujících na stříhovém principu dle [9], kde B je základová deska, P je piezoelektrický člen, S je pružina (působící mechanické předpětí), M je seismická hmotnost, R je připevňovací kroužek a E je zabudovaná elektroda

Pro piezoelektrické elementy akcelerometrů se používají tyto materiály ([1], [13]):

- krystalické piezoelektrické látky (monokrystaly) – např. několik modifikací křemene (oxid křemičitý SiO_2)
- polykrystalické piezoelektrické látky (piezoelektrická keramika) – stávají se piezoelektrickými pouze po polarizaci elektrickým polem, obvykle se jedná o tzv. tuhé roztoky, např. titaničitan barnatý BaTiO_3
- organické polymery (piezoelektrické polymery) – např. polyvinylchlorid (PVC), polyvinylfluorid (PVF)

Základní parametry piezoelektrických akcelerometrů ([1], [11]):

- **dynamický rozsah:** výkmitu zrychlení $\pm a_v (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ nebo násobku normálního gravitačního zrychlení $g_n (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$, $g_n = 9,80665 (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$,
- **frekvenční rozsah:** dolní a horní mez pracovní oblasti,
- **citlivost:** výstupní napětí snímače při měření určité síly vyjádřené v "g", je udávaná v mV/g; frekvence střídavého výstupního napětí odpovídá frekvenci vibrací a výstupní úroveň napětí odpovídá amplitudě vibrací,
- **tepelný rozsah:** záleží na použité elektronice v senzoru, typický rozsah je -50°C až 120°C , vyrábí se i akcelerometry pro použití při vysoké teplotě,
- **vliv okolního prostředí** (např. elektromagnetické pole, vlhkost, akustický tlak)

Mezi přednosti piezoelektrických akcelerometrů patří široký dynamický rozsah, pevná a robustní konstrukce, velká spolehlivost, dlouhodobá stabilita a fakt, že nepotřebuje vnější napájecí zdroj. Nevýhodou je nemožnost měřit konstantní zrychlení.

2.3.3 Piezorezistivní akcelerometry

Piezorezistivní akcelerometry využívají změny odporu piezokeramiky při mechanickém namáhání vzniklém působícím zrychlením. Měření odporu piezomateriálu probíhá prostřednictvím základního nebo polovičního Wheatstonova můstku. Jednoduchá konstrukce výstupu umožňuje senzor napojit na jednoduchý vyhodnocovací obvod. Princip tohoto typu snímače je málo náročný na prostor, proto je možná plná integrace. [14]

Výhodou je možnost měřit i stálou (neměnnou) akceleraci, tj. frekvenci změn od 0 Hz, a velká citlivost. Nevýhodou je významná závislost výstupu na teplotě. [14]

2.3.4 Akcelerometry s proměnnou kapacitou (klasické a MEMS)

Kapacitní akcelerometry jsou vhodné pro měření malých dynamických rozsahů zrychlení. Jsou přesné a velmi citlivé. Základem konstrukce je pouzdro, ve kterém kmitá seismická hmotnost. Obě části mají na sobě umístěné elektrody. Přiblížením jedné dvojice elektrod a oddálením druhé dvojice se mění kapacita. Vyhodnocuje se rozdíl kapacit. [1]

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) je založen na velmi sofistikovaném umístění elektronických, ale především mikro-mechanických prvků, na křemíkovou bázi pomocí moderních výrobních metod. Ty mají svůj původ ve výrobě integrovaných obvodů. Princip činnosti MEMS akcelerometrů je založen na změně kapacity vnitřního proměnného integrovaného kondenzátoru, vlivem působící síly vzniklé zrychlením pouzdra senzoru. Struktura obvodu obsahuje polykrystalický křemíkový senzor a integrované obvody pro zpracování signálu ze senzoru. Struktura senzoru umožňuje měřit kladná i záporná, gravitační i dynamická zrychlení. ([1], [15])

Výhody MEMS akcelerometrů jsou malé rozměry, nízká spotřeba, mechanická odolnost a při velkých výrobních sériích nízká cena. Nevýhodou je, že jsou někdy tak malé, že se s nimi špatně manipuluje.

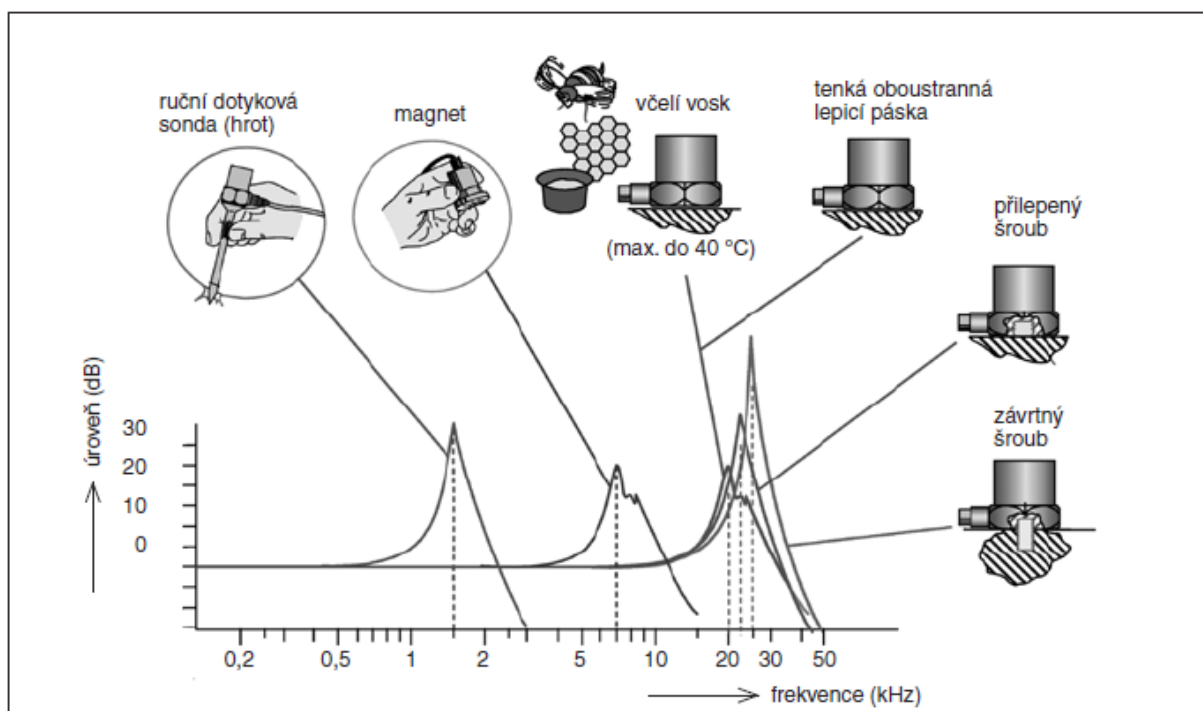
2.3.5 Použití akcelerometrů

Akcelerometry mají skutečně široké možnosti použití. V následujícím přehledu jsou některé vypsány. Přehled vychází ze zdroje [15].

- senzory pro airbagy, zařízení pro řízení jízdní stability vozidla (ESP) v automobilovém průmyslu
- měření vibrací (ochrana harddisků, hlídání funkce motorů, diagnostika strojů)
- měření natočení a detekce otáčení
- přesné měření náklonu s rychlou odezvou
- měření a detekce pohybu a rychlosti (černé skřínky)
- měření a detekce seismické aktivity
- detekce pádu, monitorování rázů při přepravě
- měření odstředivé síly a zrychlení
- navigační systémy: GPS, elektronický kompas (E-compass)
- další zařízení: pedometr, mobilní telefony, MP3 přehrávače, roboti, přenosná elektronika, herní simulátory

2.3.6 Vlivy na správnost měření pomocí akcelerometru

Způsob přichycení akcelerometru k měřenému objektu ovlivňuje značnou měrou hlavně snímáný kmitočtový rozsah vibrací. Pro jednotlivé způsoby uchycení je kmitočtový rozsah zobrazen na obr. č. 5. Dále může docházet k utlumení nebo zvýraznění některých frekvencí. [3]



Obr. č. 5 – Vliv způsobu uchycení snímače na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku [16]

Nejlepší způsob připevnění snímače je pomocí šroubového spojení. Snímač se musí utáhnout předepsaným momentem. Správnost měření může ovlivňovat mechanické namáhání základny. Dobré vlastnosti má připevnění senzoru včelím voskem. Rezonance s tímto upevněním se dosahuje až při frekvencích nad 20 kHz. Vosk není však použitelný tam, kde jsou vyšší povrchové teploty. Místo vosku se používají také různá lepidla. Při větší tloušťce spojovací vrstvy může dojít ke značnému amplitudovému zkreslení. Také u oboustranně lepicí pásky platí, že její větší tloušťka může výrazně zkreslit naměřené hodnoty. Přichycení montážním magnetem je vhodné pro nižší frekvence. Předpokládá také feromagnetický a hladký povrch měřeného objektu. K měření vibrací jsou nevhodné ruční sondy přikládáné na vibrující povrch. ([1], [3], [6], [9], [16])

Důležité je také aby hmotnost snímače včetně úchytu byla minimálně 10x nižší, než je hmotnost vyšetřované soustavy. Rezonanční kmitočet by měl být nejméně 5x vyšší, než horní mezní kmitočet měření. [3]

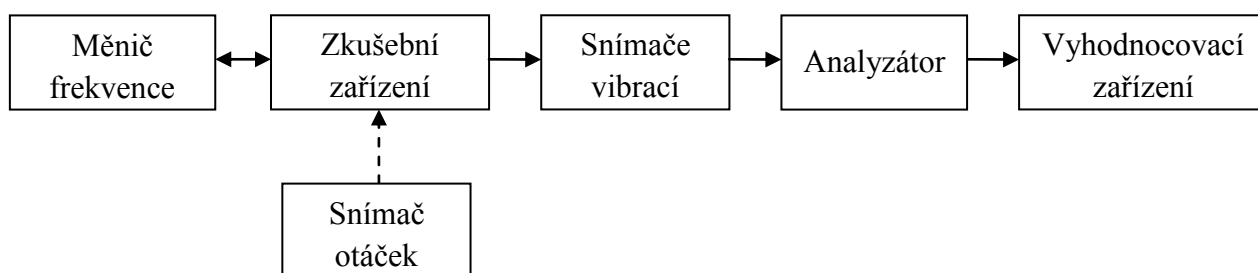
Kromě upevnění mají na výsledek měření vliv i další rušivé vlivy. Jedním z nich je, když je poškozen kabel od snímače v místě spoje tohoto kabelu s konektorem snímače. Je tedy nutné propojit snímač s měřicí stanicí nepoškozeným kabelem. Pokud se u stíněného kabelu změni vlastnosti dielektrika oddělujícího vodič od stínění, může docházet k triboelektrickému jevu, který zvyšuje úroveň šumu. Šum vzniká také působením silného elektrického a elektromagnetického pole a při měření ve velice hlučném prostředí. V provozech s několika stroji je také nutné změřit vibrace pozadí, tedy vibrace nezpůsobené přímo měřeným objektem. Výsledky měření mohou také ovlivnit jevy jako např. vlhkost, korozivní prostředí, teplota a její změny, radioaktivní prostředí, zemnicí smyčky a kmity v příčné ose. ([3], [6], [9])

3 Experimentální část

Tato část práce se věnuje ověření některých faktorů, ovlivňujících měření vibrací, v praxi. Je zde popsáno měřicí zařízení, zpracování signálu, různé testované upevnění snímačů na měřicí objekt a další faktory ovlivňující naměřené hodnoty vibrací.

3.1 Měřicí řetězec

Měřicí řetězec byl sestaven ze zařízení vlastněného Katedrou dopravních prostředků a diagnostiky Univerzity Pardubice.

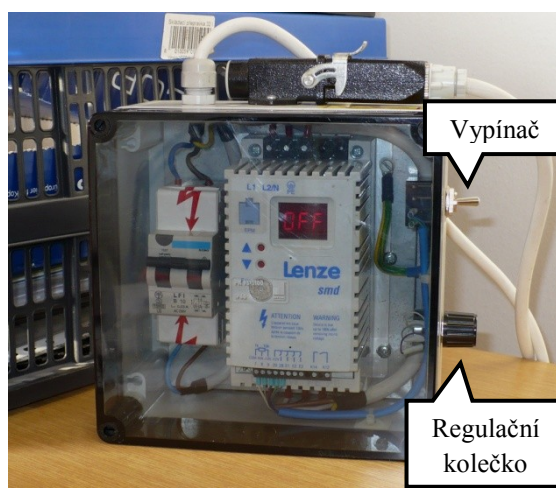


Obr. č. 6 – Měřicí řetězec

3.1.1 Měnič frekvence

K plynulé regulaci asynchronního motoru zkušebního zařízení pro měření vibrací byl použit měnič frekvence značky Lenze 8200 SMD. Při měření vibrací byl nastaven na hodnotu 143 W. To odpovídá 900 otáčkám motoru za minutu. Otáčky byly takto zvoleny z důvodu, že by při nízkých otáčkách vibrace měly malou energii, akcelerometry by tak naměřily pouze nízké hodnoty zrychlení, které by nedovolily posoudit rozdílné upevnění. Naopak při vysoké rychlosti otáčení by mohly výsledky více ovlivnit další součásti zkušebního zařízení (např. ložiska).

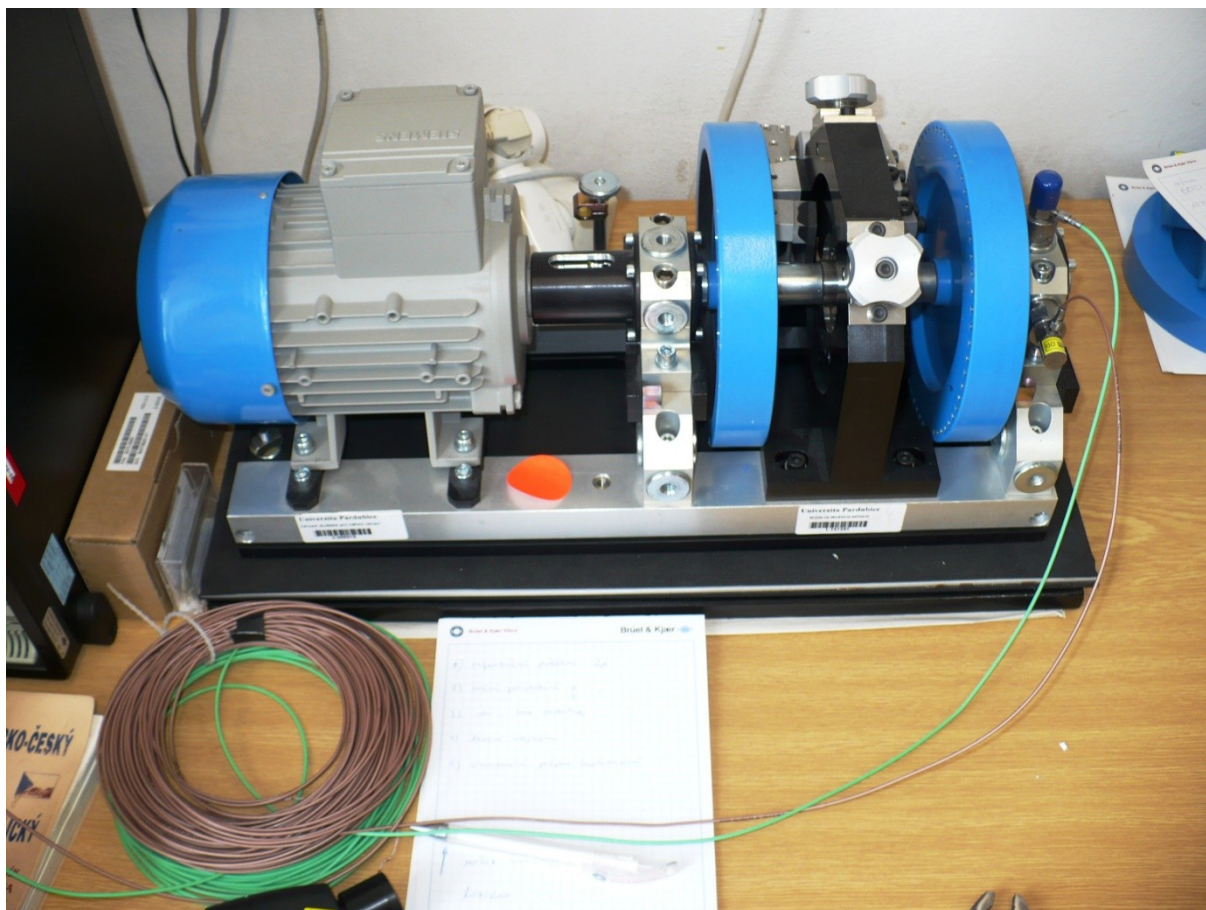
Výsledky by tak vyšly podobné a na grafech by se také tolik neprojevilily různé způsoby upevnění.



Obr. č. 7 – Měnič frekvence Lenze SMD

3.1.2 Zkušební zařízení pro měření vibrací

Zkušební zařízení, které je vyfoceno na obr. č. 8, se skládá z asynchronního elektromotoru, hřídelové spojky, hřídele uložené ve dvou ložiskách, ložiskových stojanů a ocelových kotoučů.

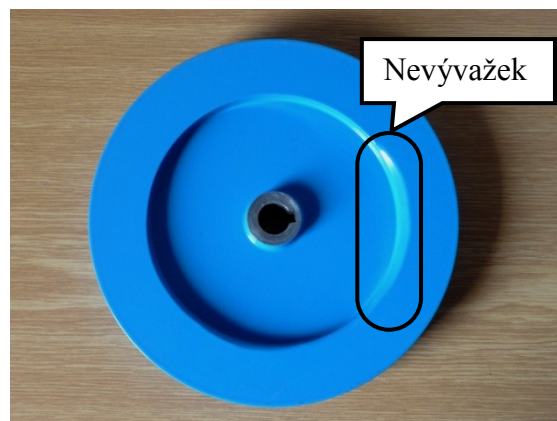


Obr. č. 8 – Zkušební zařízení pro měření vibrací

Základní popis jednotlivých částí zkušebního zařízení:

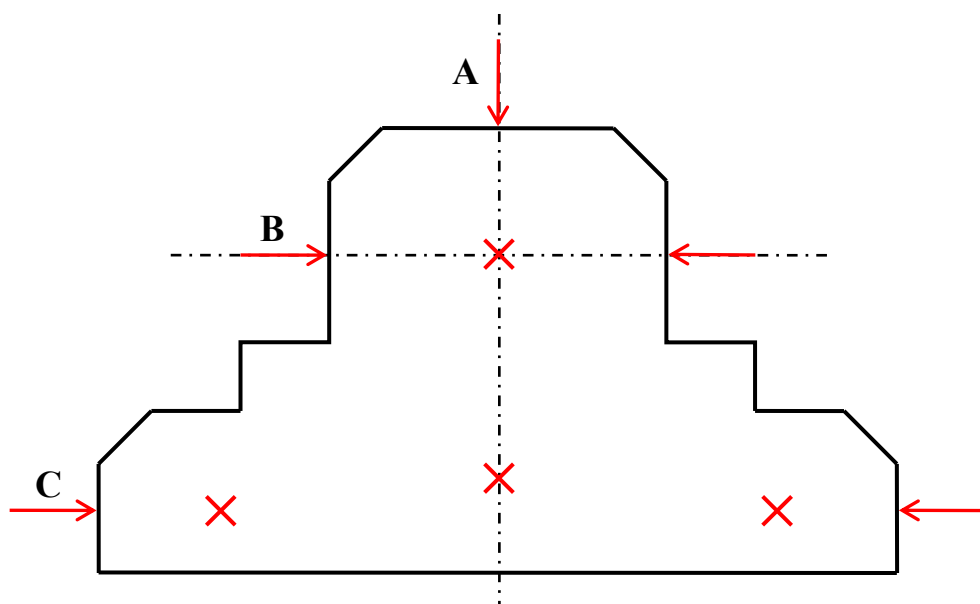
1. Asynchronní motor – Siemens s výkonem 0,25 kW napájený z běžné elektrické sítě 230 V/50 Hz. Maximální otáčky motoru jsou 1350 ot/min.
2. Hřídelová spojka – Rotex[®] GS – Kovová spojka s plastovým mezikusem slouží k tlumení rázů a vibrací. Více o spojce v příloze C.
3. Ložiska – ZVL 6202 – Jednořadá kuličková ložiska s vnějším průměrem 35 mm a vnitřním průměrem 15 mm. Ložiska obsahují 8 kuliček.

4. Ocelové kotouče – Použit byl jeden vyvážený a jeden nevyvážený kotouč. Nevyvážený kotouč byl použit z důvodu vyvolání větších vibrací pro jejich lepší měřitelnost. Nevývažek na kotouči je vidět na obr. č. 9.



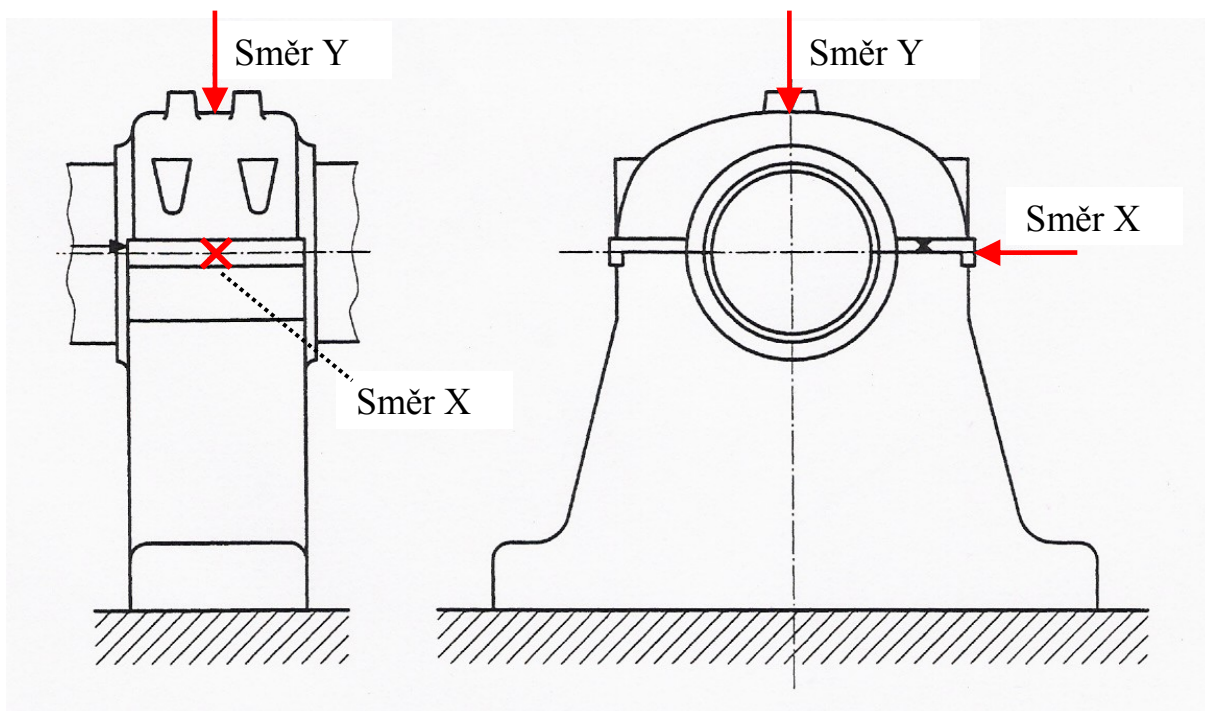
Obr. č. 9 – Nevyvážený kotouč

5. Ložiskové stojany – Na pravém ložiskovém stojanu (z pohledu obr. č. 8) je umístěno celkem 11 měřicích bodů pro akcelerometry označených na obrázku č. 10 červenými šipkami a křížky. Pro tuto práci byly použity 3 měřicí body označené písmeny A, B a C. V bodě A byly měřeny hodnoty pro osu Y a v bodech B a C pro osu X.



Obr. č. 10 – Náčrt ložiskového stojanu s umístěním měřicích bodů

Měřicí body se závitem zkušebního zařízení pro měření vibrací jsou umístěny v souladu s normou ČSN ISO 10816-1 – Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 1: Všeobecné směrnice.



Obr. č. 11 – Měřicí body na ložiskových stojanech dle normy ČSN ISO 10816-1 [8] – doplněno o popisy

3.1.3 Otáčkoměr

Voltcraft DT-1L – Bezdotykový digitální otáčkoměr vysílající laserový paprsek, který je odražen speciální odrazkou nalepenou na rotujícím kotouči. Přístroj vyhodnocuje frekvenci odražených pulzů a tím určí počet otáček za minutu. Více o otáčkoměru v příloze B.

Rychlost otáčení kotoučů byla (900 ± 3) ot/min, což je 15 ot/s. Kontrola rychlosti pomocí laserového otáčkoměru proběhla při každém měření.

3.1.4 Snímače vibrací

2x Kistler 8702B100 – Tento piezoelektrický snímač má rozsah ± 100 g, citlivost 50 mV/g, je schopen snímat frekvenční rozsah 0,5 Hz až 10 kHz a má rezonanční frekvenci 54 kHz. Citlivý element snímače je vyroben technologií quartz-shear. Jedná se o modifikaci křemene (SiO_2) a využívá stříhového principu. Obrázek snímače je na obr. č. 12, detailnější informace jsou v příloze A.



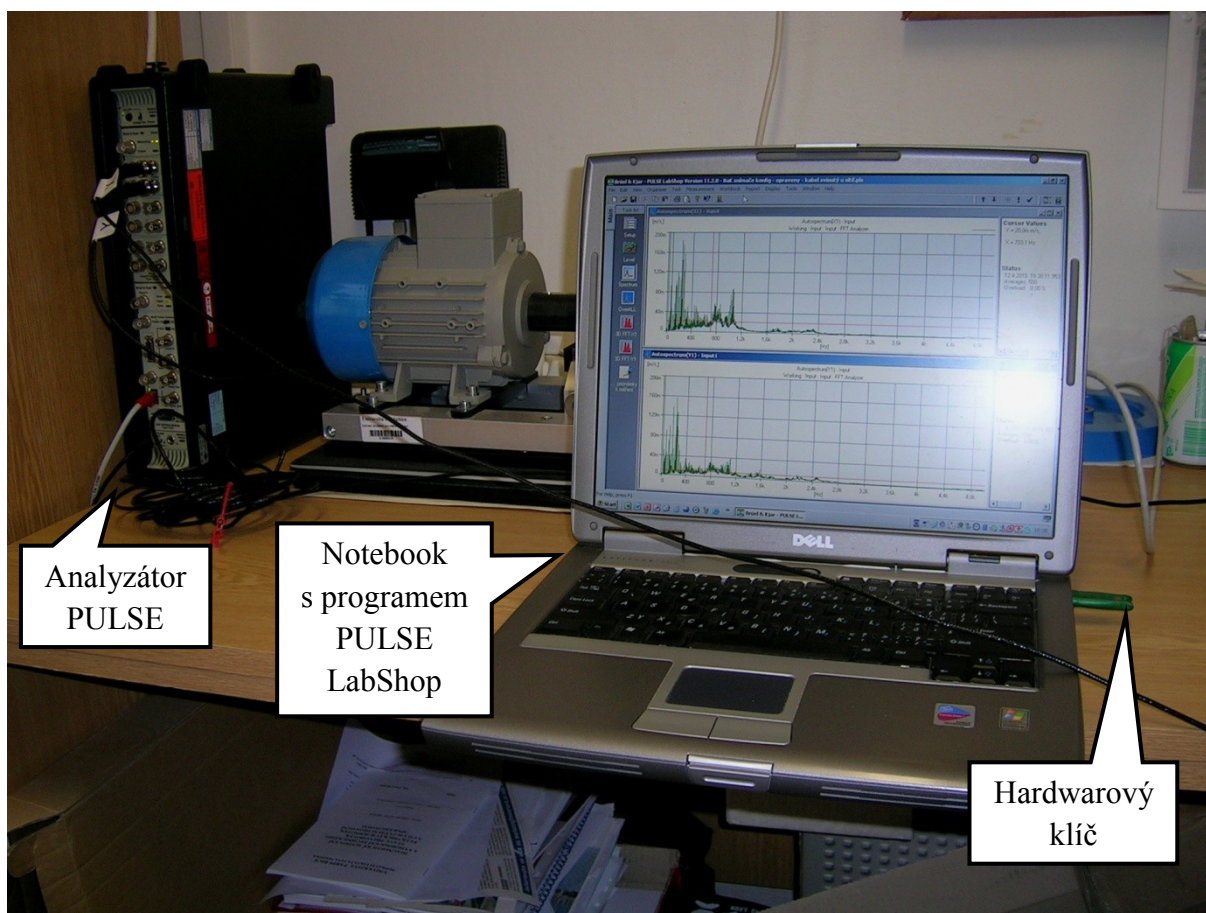
Obr. č. 12 – Snímač Kistler

3.1.5 Analyzátor

Multianalyzátor PULSE 3032A obsahující 6 kanálový modul. Pro měření byly využity dva kanály, pro každý snímač jeden. Tento přístroj byl propojen s notebookem pomocí síťového kabelu. Na obr. č. 13 je vidět analyzátor i vyhodnocovací zařízení.

3.1.6 Vyhodnocovací zařízení

Notebook s programem PULSE LabShop ve verzi 11.2.0 od firmy Brüel & Kjær. Tento program umožňuje pracovat v reálném čase, sledovat výsledky měření a analýzy okamžitě po změření. PULSE LabShop podporuje multianalýzu, tedy zpracování dat několika způsoby současně. Pro každé měření je možnost uložit vlastní projekt, kde jsou uchovány informace o nastavení parametrů měření. Toto nastavení se dá při opakovaném měření načíst ze souboru s koncovkou .pls vytvořeného programem a se stejným nastavením měřit znovu. To je výhodné zejména v provozu, kdy provádíme měření na jednotlivých objektech stále stejně. Pro tuto práci byla používána FFT analýza a oktávová CPB analýza. Program neumožňuje měření bez hardwarového klíče, který se zasune do USB portu notebooku.



Obr. č. 13 – Analyzátor a vyhodnocovací zařízení

3.2 Zpracování signálů

U signálů lze vnímat souhrnné charakteristiky nebo frekvenční spektra. Souhrnnou charakteristikou je např. hladina hluku či vibrací ve zrychlení nebo rychlosti. Tato hladina je efektivní hodnotou signálu. Frekvenční spektrum (zkráceně spektrum) představuje podíl harmonických složek v obecném signálu. Spektrum je funkcí frekvence a je to obecně spojitá funkce. [4]

Frekvenčními filtry lze v reálném čase přímo vyhodnotit úroveň složek z jistého frekvenčního rozsahu s tím, že jsou ostatní složky spektra potlačeny. U reálných filtrů časového průběhu signálu je vždy přechodové pásmo mezi nepropustným a propustným pásmem frekvencí. Pro zjednodušení lze použít ideální filtr bez přechodového pásma, tj. se spodní (f_s) a horní (f_h) mezní frekvencí. S jejich pomocí lze definovat absolutní šířku propustného pásma (3), nebo relativní šířku (4), kde f_c je střed propustného pásma filtru. Vzájemný vztah mezi šířkami dílčích pásem frekvenčního rozsahu spektra určuje základní skupiny analyzátorů – FFT a CPB. [4]

$$\Delta f = f_h - f_s \quad (3)$$

$$\frac{\Delta f}{f_c} \quad (4)$$

3.2.1 FFT analýza

DFT (diskrétní Fourierova transformace) se používá při převodu časového signálu na signál frekvenční. Převáděný časový signál T se rozdělí na N úseků, hodnoty funkce v koncových bodech těchto úseků se použijí pro výpočet amplitud příslušných složek. Frekvence těchto složek se však nevztahují k periodě signálu, ale k použitému časovému úseku T . Zkratka FFT znamená Fast Fourier Transform (rychlá Fourierova transformace). Je to algoritmus výpočtu diskrétní Fourierovy transformace, který umožňuje snížit počet prováděných dílčích výpočtů a tím celý výpočet značně zrychlit. Čím více je vzorků, tím více je znát úspora času. Pro dosažení optimálního času výpočtu se měřený úsek dělí na počet stejných úseků, jejichž počet je roven právě mocnině 2 (např. 512 nebo 4098). Výsledkem transformace bude počet harmonických (odvozených od daného intervalu), který je polovinou počtu úseků (vzorků). Frekvence první harmonické bude převrácenou hodnotou transformovaného intervalu a frekvence dalších harmonických budou celistvými násobky základní harmonické až do frekvence $N/2T$. Příklad FFT analýzy je na grafu č. 1. ([1], [4], [18])

Tato analýza využívá konstantní absolutní šířku pásma a má lineární frekvenční osu. Střed propustného pásma u FFT analyzátorů představuje aritmetický průměr horní a dolní frekvence (5). Šířka pásma filtru B je tedy konstantní. [4]

$$f_c = \frac{f_s + f_h}{2} \quad (5)$$

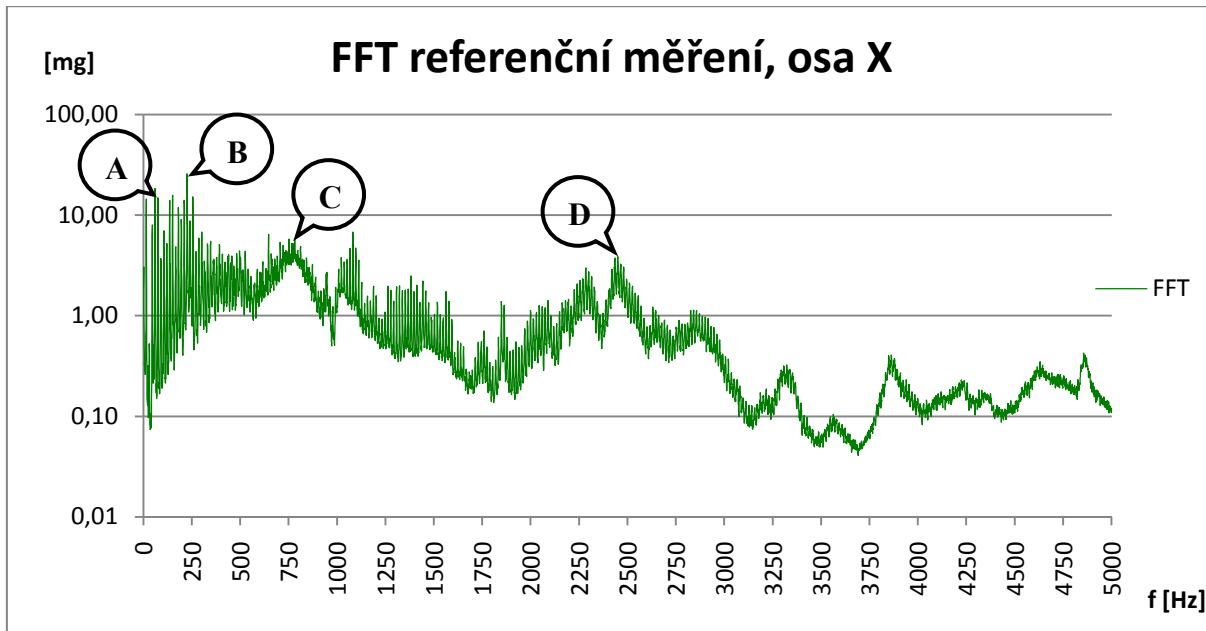
3.2.2 CPB analýza

CPB znamená Constant Percentage Bandwidth, tedy česky analýza s konstantní procentuální šířkou pásma. Pro CPB analýzu je charakteristická logaritmická frekvenční osa, která rozšiřuje oblast nízkých frekvencí a komprimuje oblast frekvencí vysokých. Střed propustného pásma u CPB analyzátorů je definován geometrickým průměrem horní a dolní frekvence (6). Šířka propustného pásma se udává v oktávách. 1/1 oktávy má šířku pásma cca 70 %, třetinooktávové pásmo cca 23 %, 1/12 oktávy cca 6 % a 1/24 oktávy asi 3 %. Šířka pásma B se vypočítá podle vztahu (7). ([4], [17], [19])

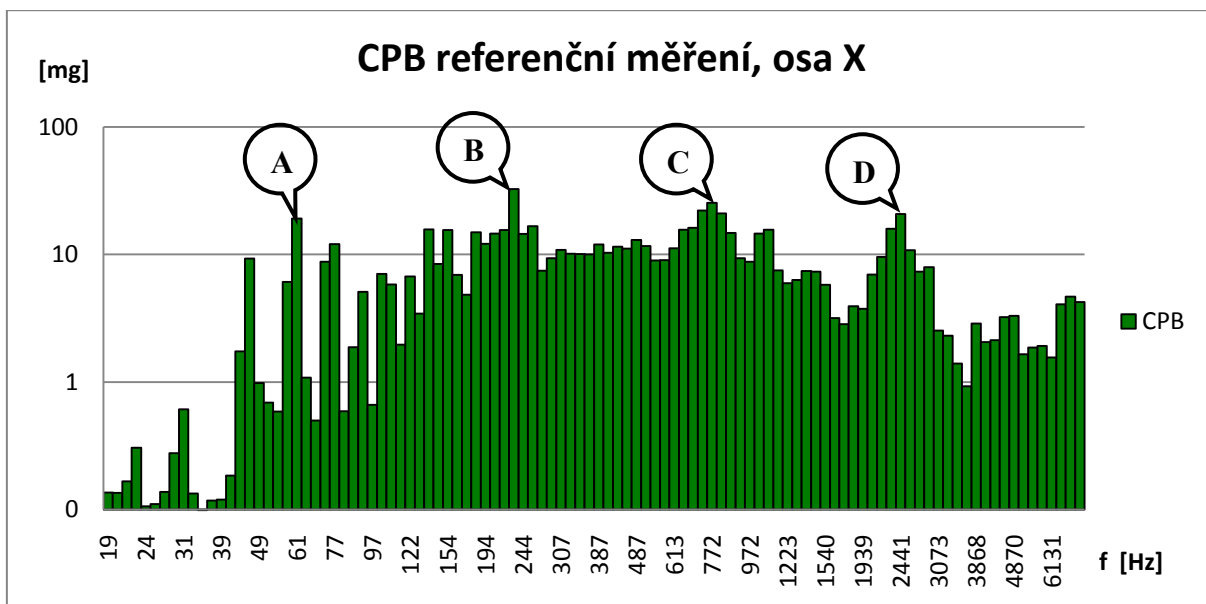
$$f_c = \sqrt{f_s f_h} \quad (6)$$

$$B = y\% = \frac{y \cdot f_c}{100} \quad (7)$$

Na obr. č. 15 je graf s příkladem CPB analýzy ze stejného měření jako graf na obr. č. 14. Je tedy možné porovnat výsledky mezi sebou. Body A, B, C a D popisují stejné významné frekvence v obou grafech.



Obr. č. 14 – Příklad FFT analýzy



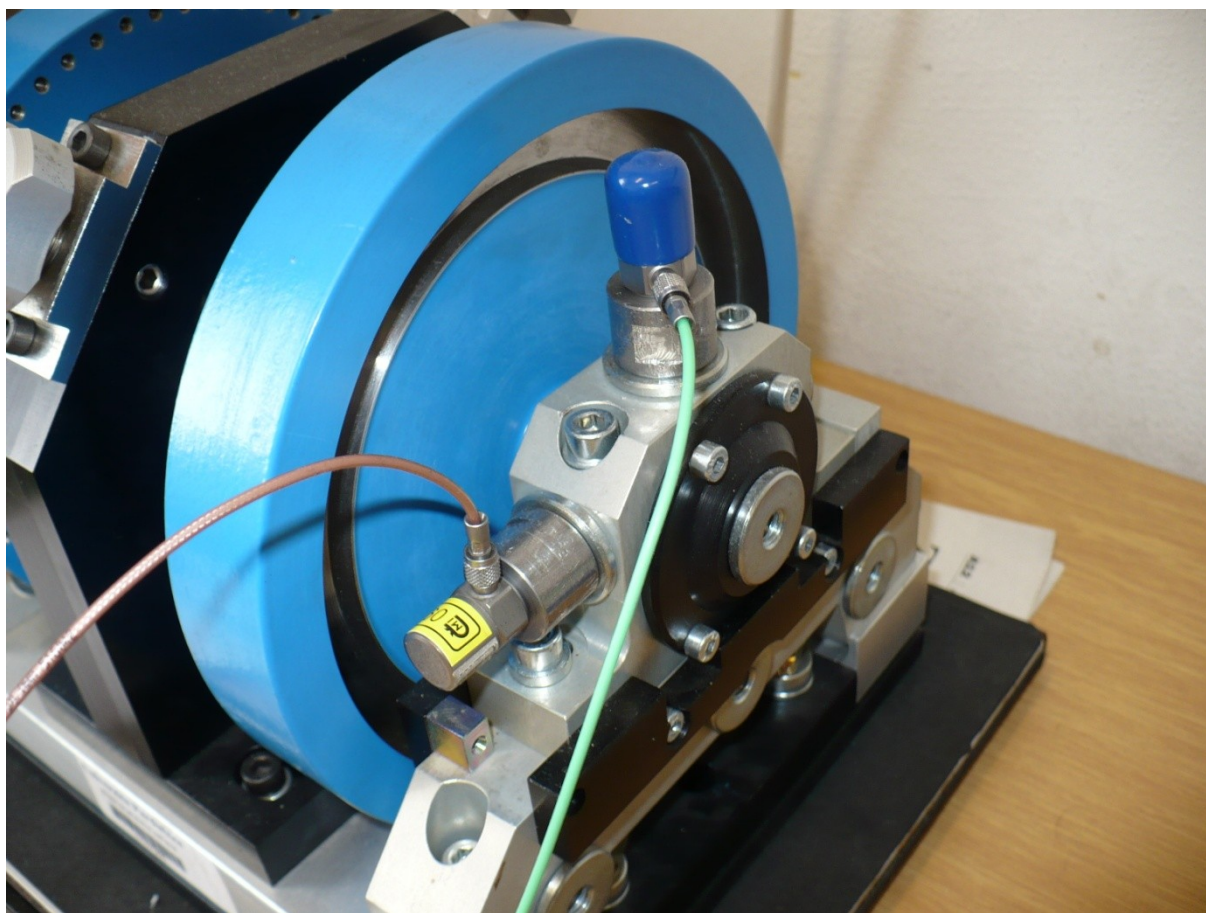
Obr. č. 15 – Příklad CPB analýzy

3.3 Upevnění snímačů na měřený objekt

V následujících bodech je ověřeno, jak některé způsoby uchycení akcelerometrů na měřicí objekt ovlivní výsledky měření. Také se zjišťuje ovlivnění výsledků měřením s nedotaženými snímači a dále mimo osu hřídele umístěným snímačem pro osu X.

3.3.1 Referenční měření

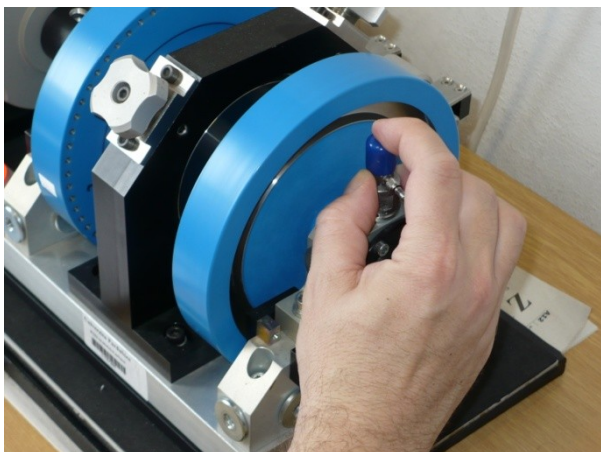
Jako referenční měření byl brán stav, kdy byly oba snímače přišroubovány ke konstrukci ložiskového stojanu (viz obr. č. 16). Toto měření je z popisovaných možností nejpřesnější, nejvíce odpovídá požadavkům na měření vibrací podle normy ČSN ISO 10816-1. Snímač pro osu Y byl umístěn na měřicím bodě označeným na obr. č. 10 symbolem A. Snímač pro osu X byl umístěn v měřicím bodě označeným B. Vzhledem k rozdílnému závitu ve snímačích a ložiskovém stojanu bylo nutno použít redukci mezi snímači a stojanem. Vliv této ocelové redukce na naměřené hodnoty je ověřen v bodu 3.3.3. Snímače byly při měřeních popsanych v bodech 3.3.2 až 3.3.6 umístěny na stále na stejných místech, tedy v bodech A a B na obr. č. 10.



Obr. č. 16 – Referenční měření

3.3.2 Přidržení rukou

První změnou oproti přišroubování bylo přidržení jednotlivých snímačů na ložiskovém stojanu. Tento způsob měření vibrací se hojně používal v minulosti a jsou pro něj využívány speciální snímače opatřené hrotem. V praxi se používá pro zjištění vhodného měřicího místa a dále by se mohl využít pro krátkodobé měření na vhodném místě stroje, kde ovšem není připravený závit.



Obr. č. 17 – Přidržení rukou – osa Y



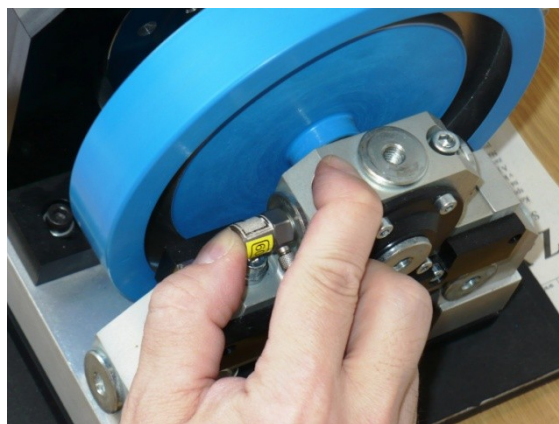
Obr. č. 18 – Přidržení rukou – osa X

3.3.3 Přidržení rukou – bez redukce

Při dalším měření bylo cílem ověřit, zda má na naměřené hodnoty vliv našroubovaná redukce mezi snímačem a přípravkem. Proto byla redukce odmontována a hodnoty byly naměřeny stejně jako v předchozím kroku. Snímače byly přidržovány přibližně stejnou silou. Redukce musela být namontována z důvodu, že akcelerometry Kistler jsou opatřeny závitem M6 a ložiskový stojan má závit M8. Redukce byly ze snímačů odmontovány pouze pro tento bod měření.



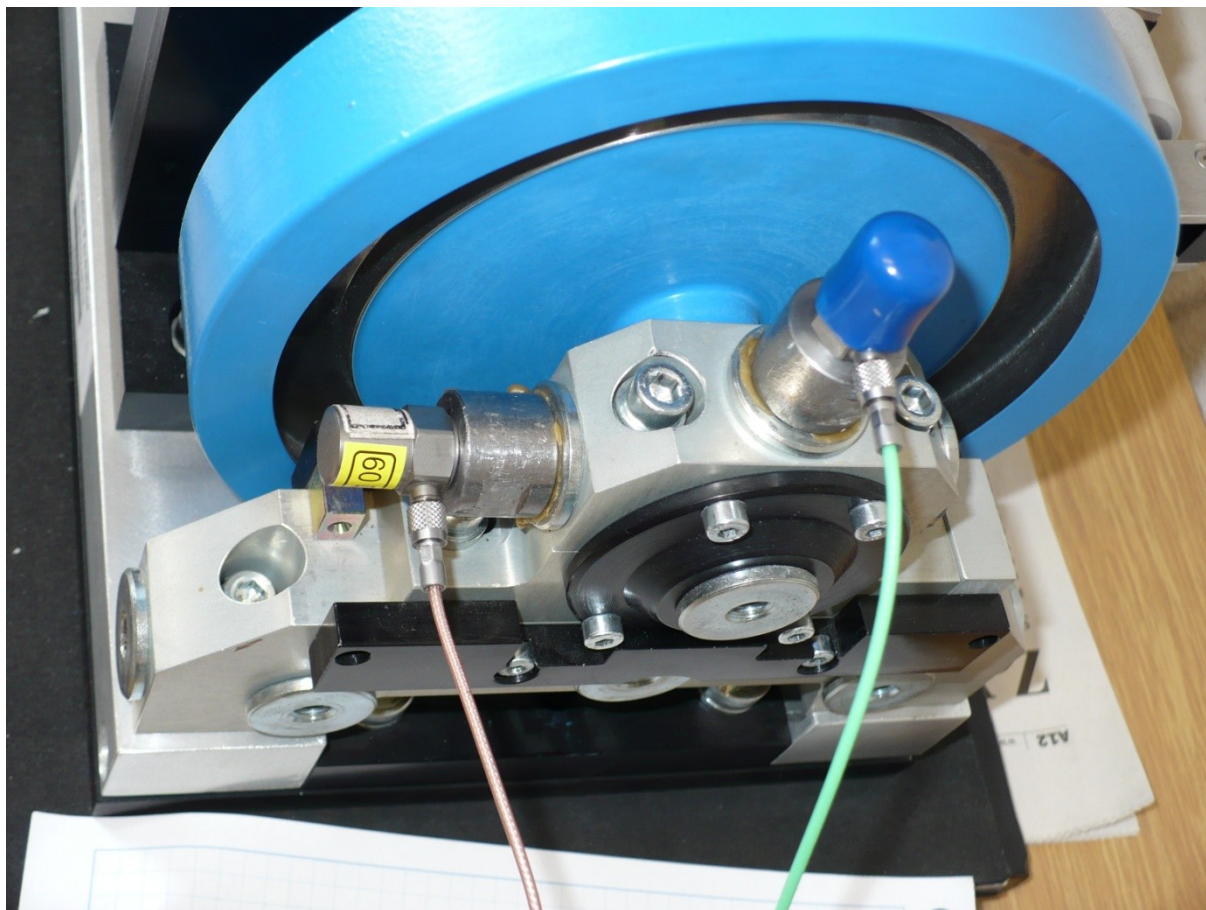
Obr. č. 19 – Přidržení rukou b.r. – osa Y



Obr. č. 20 – Přidržení rukou b.r. – osa X

3.3.4 Přilepení voskem

Po pouhém přidržení byl jako další pokus zvolen přilepení snímačů včelím voskem. Tato metoda je v praxi často používaná a je vhodná pro krátkodobé a střednědobé měření na měřicím místě bez závitu. Adhezní síla musí spolehlivě udržet snímač na ploše a současně musí být možné jej bez poškození sejmut. Mimo vosku se v praxi používá také zubní cement nebo kyanoakrylátová lepidla. [20]



Obr. č. 21 – Přilepení snímačů voskem

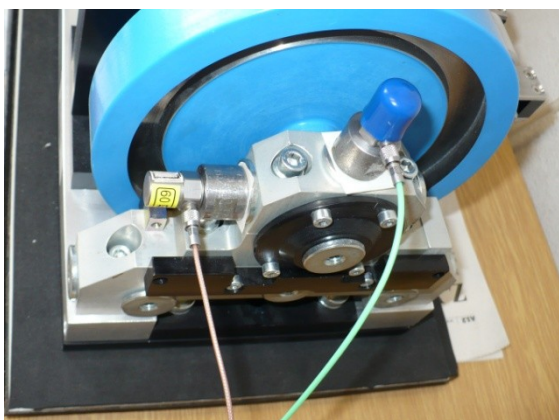
3.3.5 Přilepení oboustranně lepicí páskou

Alternativa k použití včelího vosku je oboustranně lepicí páska. Při tomto použití odpadá nepříjemná práce – nahřívání včelího vosku a jeho nakapání na snímač nebo měřicí místo. Při aplikaci vosku se navíc může vosk natéct do závitu, odkud se následně špatně dostává.

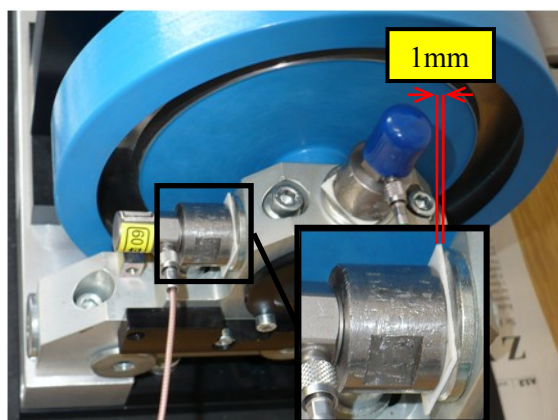
Pro připevnění snímačů byla použita oboustranně lepicí páska od firmy Ulith tloušťky 0,08 mm. Upevnění je vidět na obr. č. 22.

3.3.6 Přilepení pěnovou oboustranně lepicí páskou

Druhá varianta oboustranně lepicí pásky byla od firmy Scotch. Jedná se o pěnovou lepicí pásku tloušťky cca 1 mm. Detail upevnění je vidět na obr. č. 23. Již na první pohled bylo jasné, že pro svoji velkou tloušťku a pěnovou strukturu použití této pásky ovlivní hodnoty naměřené nejvíce. Toto upevnění bylo použito pro ověření, do jaké míry se takovéto zjevně nevhodné upevnění projeví ve výsledném spektru a zda by se mohlo jednat o nouzovou variantu upevnění.



Obr. č. 22 – Přilepení tenkou oboustranně lepicí páskou firmy Ulith



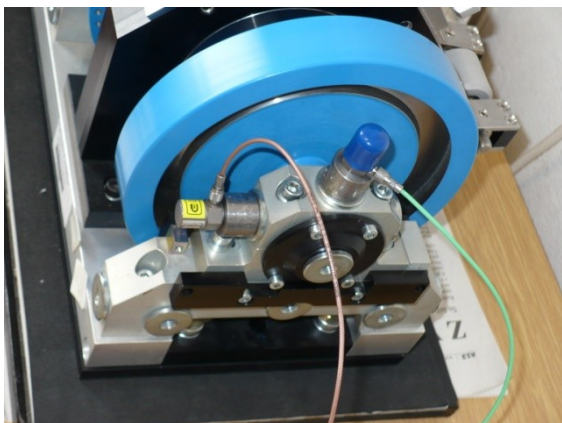
Obr. č. 23 – Přilepení pěnovou oboustranně lepicí páskou

3.3.7 Nedotažení snímačů při jejich montáži

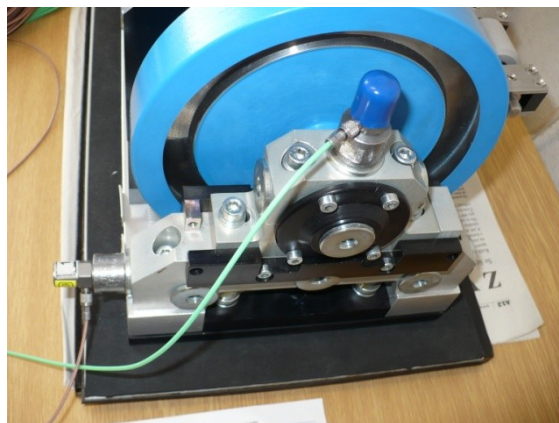
Při montáži snímačů může nedbalostí dojít k nedostatečnému dotažení snímačů. Vlivem vibrací se mohou dále povolit. Při testování této chybné instalace akcelerometrů byly oproti správnému upevnění snímače o čtvrt otáčky (90°) povoleny. Upevnění je znázorněno na obr. č. 24.

3.3.8 Měření mimo osu hřídele

Snímač pro osu X byl umístěn v bodě C dle obr. č. 10. Konstrukce průmyslového stroje neobsahuje vždy měřicí místo přímo v ose hřídele. Cílem tohoto bodu je zjistit, jaký vliv na výsledné hodnoty má měření mimo osu hřídele. Obrázek tohoto připevnění je na obr. č. 25.



Obr. č. 24 – Nedotažené snímače



Obr. č. 25 – Měření mimo osu hřídele

4 Vyhodnocení výsledků měření

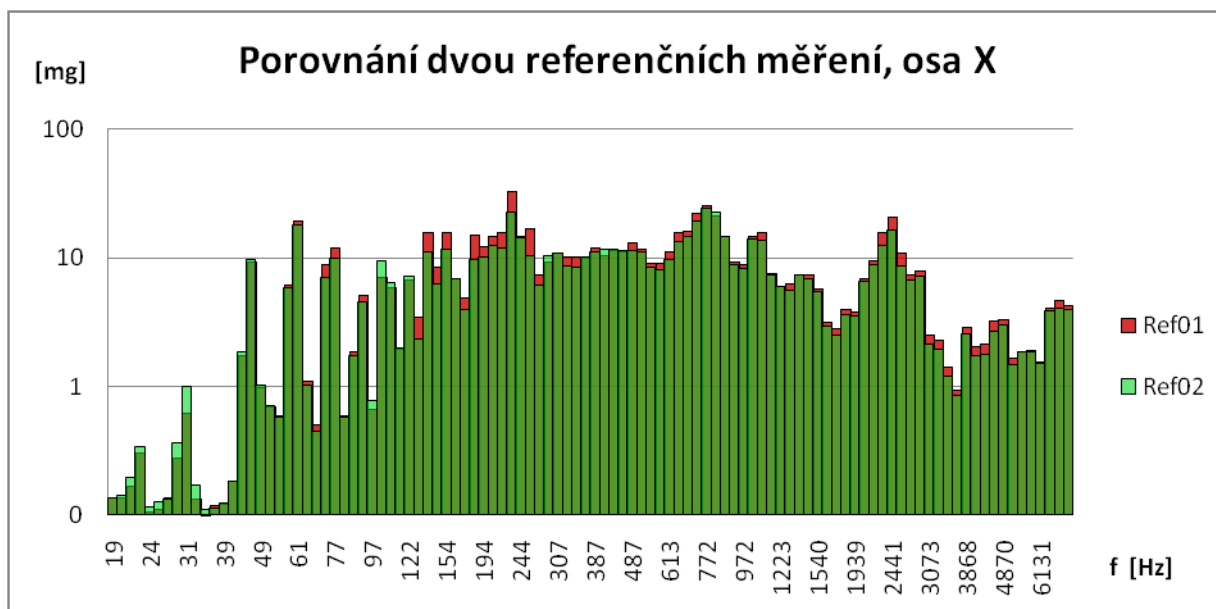
Všechna měření byla provedena ve frekvenčním pásmu 0 – 5 kHz. Pro CPB analýzu byl špatně nastaven frekvenční rozsah, na grafech jsou tedy vidět hodnoty až do 7 kHz. Rozdíly byly porovnávány jen do 5 kHz. Šířka propustného pásma byla 1/12 oktávy. Pro vyhodnocení výsledků je použito grafů vykreslených programem Microsoft Excel 2007 z dat, které měřicí program ukládá do textových souborů. Hodnoty zrychlení jsou uloženy v jednotkách g^2 . Pro lepší zobrazení do grafů byla použita druhá odmocnina těchto hodnot, kterou používá pro zobrazení grafů i program PULSE LabShop. Tato hodnota byla nakonec vynásobena tisícem, a tedy jednotka pro osu y v grafech je mg. Pro názorné porovnání jsou použity grafy CPB analýzy, výsledky byly také ověřeny na grafech FFT analýzy.

4.1 Vyhodnocení pro různá upevnění snímačů na měřený objekt

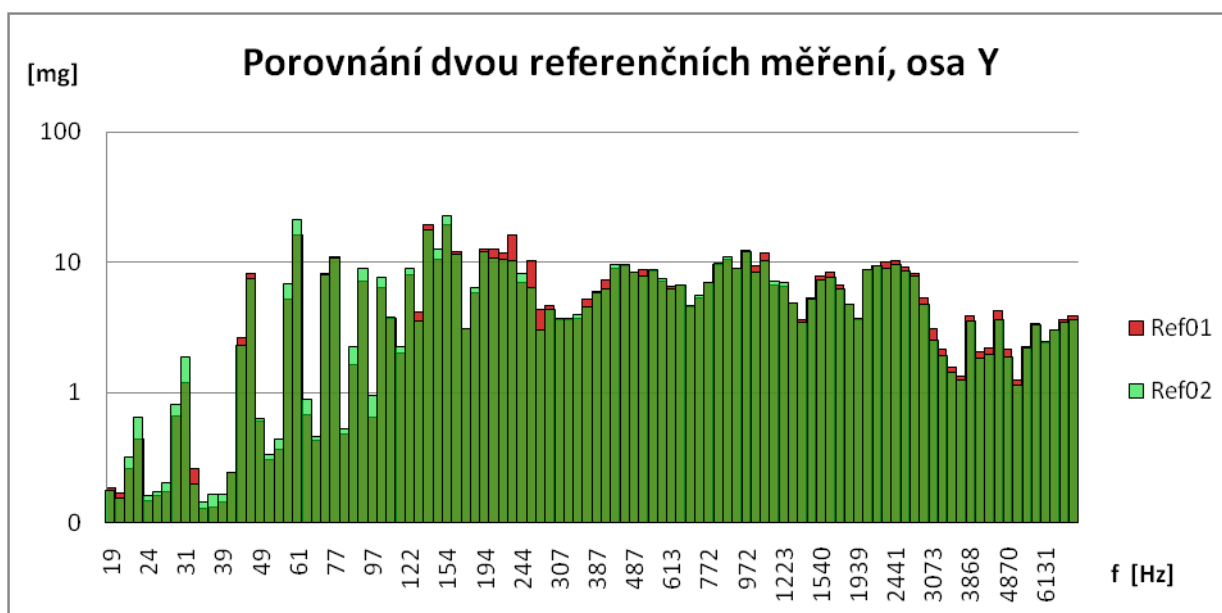
Grafy jsou použity z CPB analýzy s logaritmickou osou y. Na těchto grafech jsou názorně vidět rozdíly ve spektrech způsobené různým upevněním akcelerometrů. Tam, kde je ve sloupcích nahoře vidět červená barva, mají amplitudy červeného spektra (většinou referenčního) vyšší hodnotu. Pokud je vidět pouze tmavě zelená barva, amplitudy se překrývají. Tam, kde je nad tmavě zelenou vidět i světle zelená barva, jsou vyšší amplitudy zeleného spektra (porovnávaného). Protože by mohlo dojít k nedorozumění, zda je myšlena osa x (nebo y) jako osa grafu, nebo jako směr měření akcelerometrem, je směr měření v celé této práci označen velkým písmenem X (Y).

Základem všech grafů (vyjma bodu 4.1.2) je červeně zobrazené spektrum referenčního měření označené Ref. Referenční měření bylo provedeno dvakrát za sebou při stejných podmínkách. Výsledné spektrum, se kterým jsou porovnány výsledky ostatních měření, je získáno aritmetickým průměrem jednotlivých hodnot ze dvou referenčních měření. Pro ukázkou, jak se jednotlivá referenční měření od sebe lišila je na obrázcích č. 26 a 27 zobrazeno porovnání těchto spekter.

Jak je na porovnávaných grafech zobrazených na obrázcích č. 26 a 27 vidět, i výsledky stejně upevněných snímačů referenčních měření se mezi sebou liší. Největší rozdíly jsou v pásmu okolo 200 Hz.



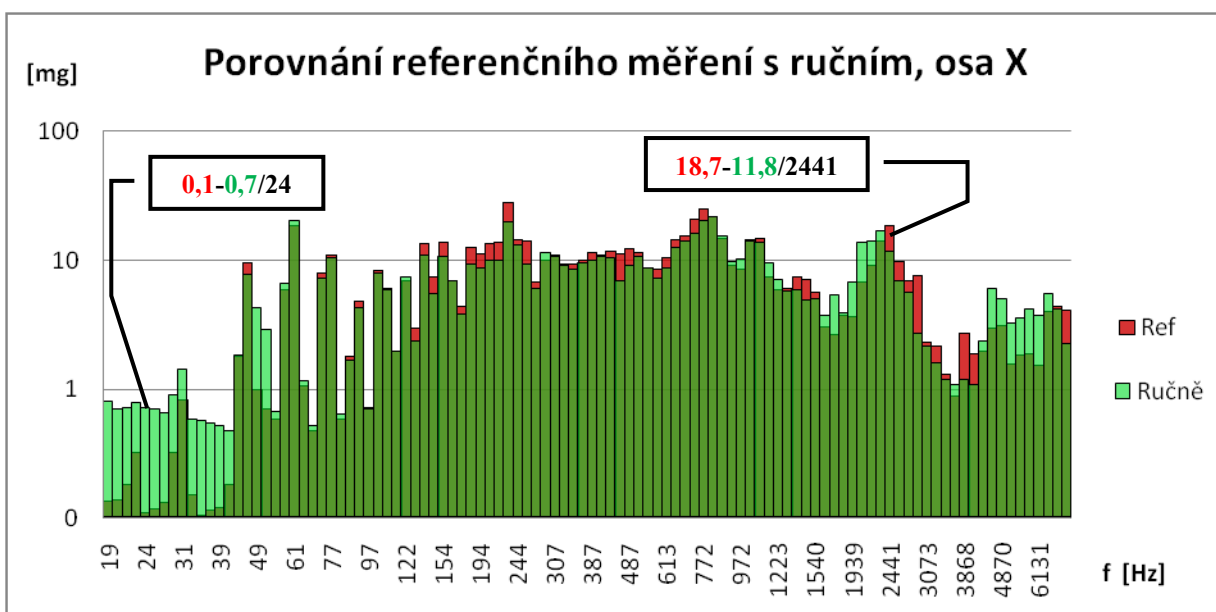
Obr. č. 26 – Porovnání dvou referenčních spekter, osa X



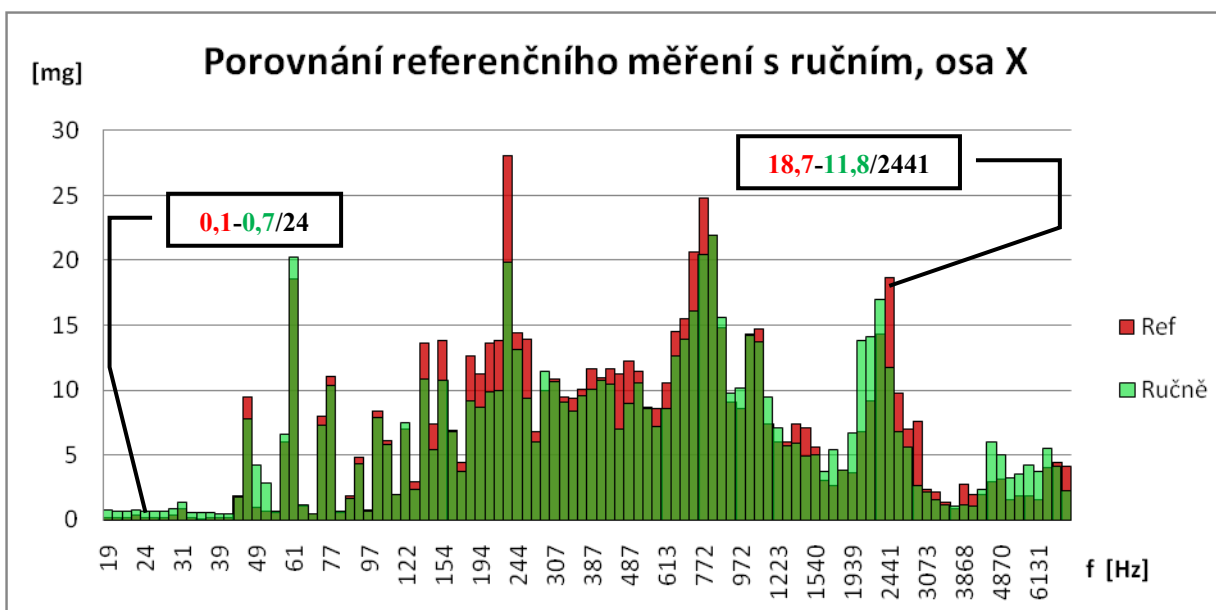
Obr. č. 27 – Porovnání dvou referenčních spekter, osa Y

4.1.1 Přidržení rukou

První graf porovnávající výsledky různého upevnění je na obr. č. 28. Na tomto grafu jsou na první pohled největší rozdíly v oblasti cca do 45 Hz. Zde však je nutné si uvědomit specifika grafu s logaritmickou osou y. Ve skutečnosti je rozdíl např. u frekvence 24 Hz cca 0,6 mg, u hodnoty 2,44 kHz je rozdíl hodnot již cca 6,9 mg. Názorné porovnání výsledků zobrazených s logaritmickou a lineární osou y je vidět na obrázcích č. 28 a 29. Popisky na grafu jsou ve tvaru hodnota ref. [mg] - hodnota ručně [mg] / hodnota frekvence [Hz].

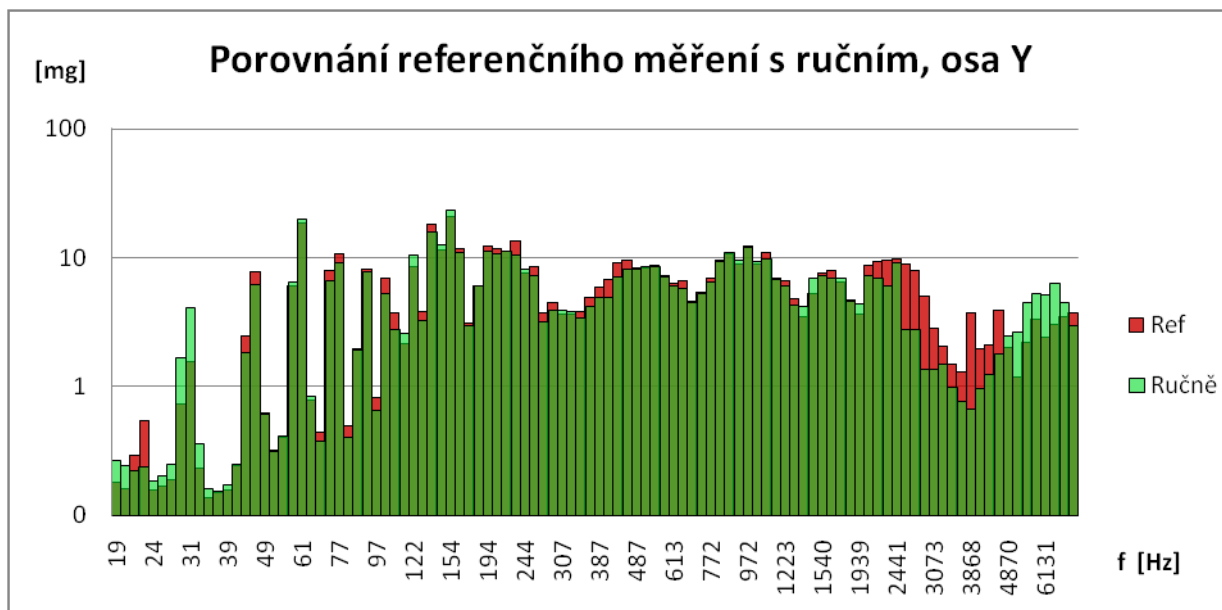


Obr. č. 28 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přidržení rukou, osa X



Obr. č. 29 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přidržení rukou, osa X, lineární osa y

Po porovnání grafů zobrazených na obr. č. 28 a 29. jsou tedy vidět největší rozdíly okolo frekvence 200 Hz, kde jsou amplitudy pro ruční přidržení nižší. Dále jsou viditelné rozdíly kolem frekvencí 700 a 2300 Hz, kde pro okolí 700 Hz jsou amplitudy ručního měření nižší a pro okolí 2300 Hz jsou amplitudy vzhledem k referenčnímu měření posunuté doleva. V grafu na obr. č. 30 pro osu Y jsou největší rozdíly v pásmu 2,6 – 4,3 kHz, kde jsou amplitudy ručního měření nižší. Naopak vyšší jsou nad 4,3 kHz a v okolí 30 Hz.

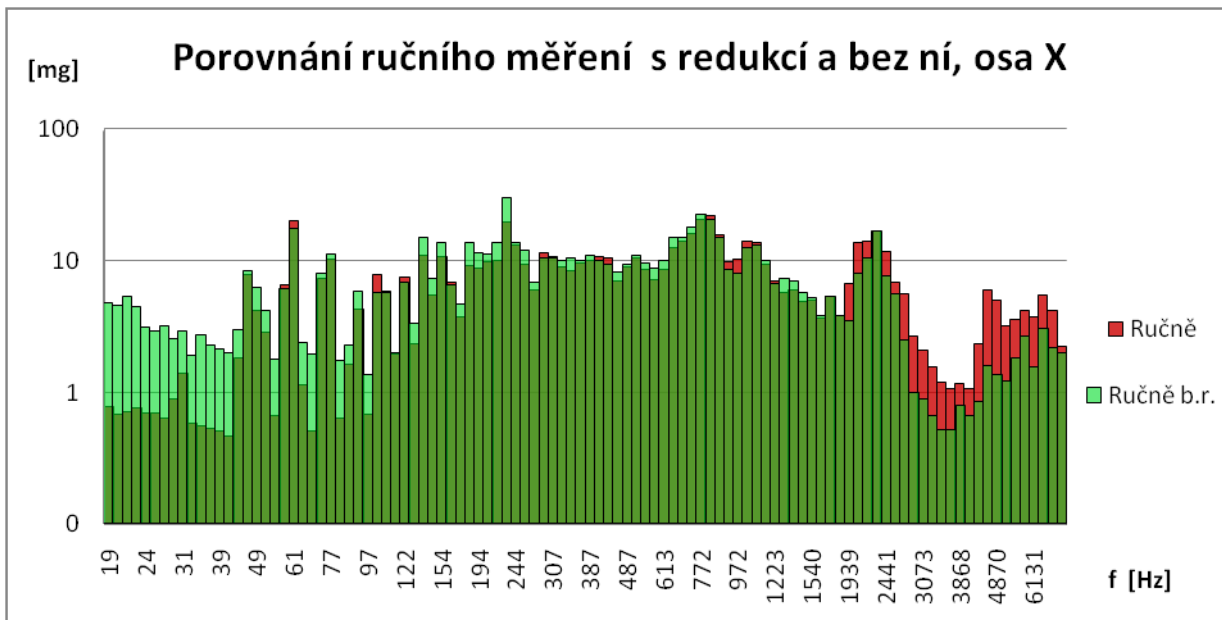


Obr. č. 30 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přidržení rukou, osa Y

4.1.2 Přidržení rukou – bez redukce

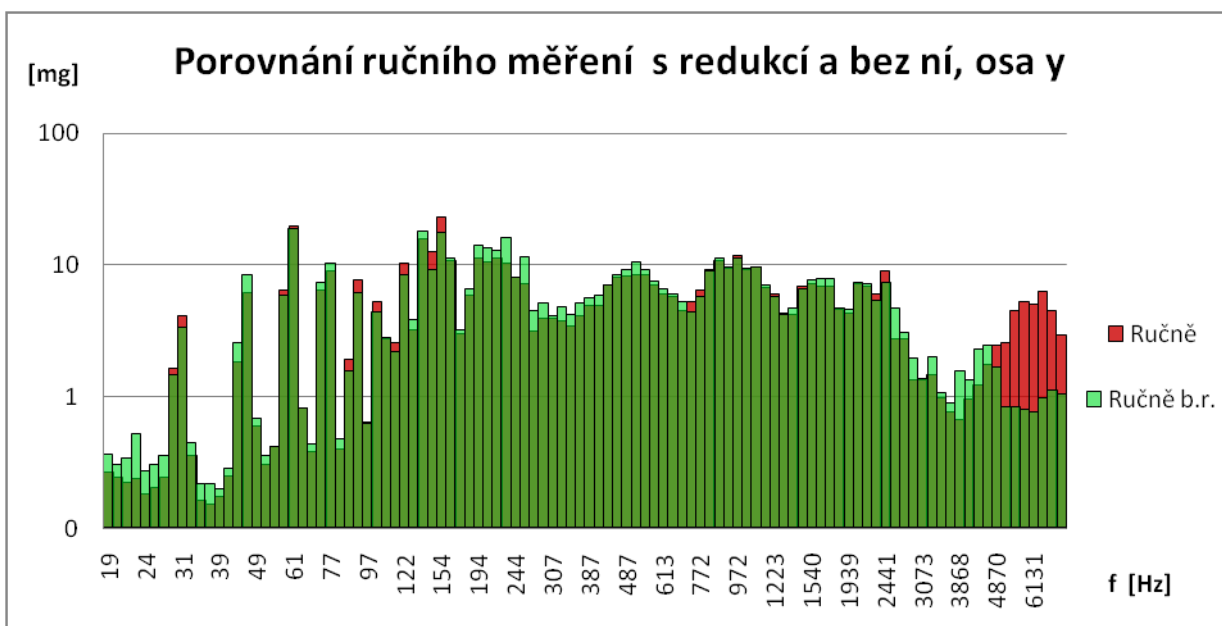
Cílem tohoto bodu je ověření vlivu redukce na výsledné hodnoty. Proto jsou výsledky porovnávány s hodnotami naměřenými v bodě 4.1.1, nikoli s referenčním měřením.

V porovnávacím grafu osy X je vidět větší citlivost snímače bez redukce pro nižší frekvence (cca do 100 Hz), amplitudy jsou zde tedy větší. Naopak pro vyšší frekvence zhruba od 2 kHz jsou amplitudy spektra bez redukce nižší.



Obr. č. 31 – Porovnání naměřených hodnot při držení rukou s redukcí a bez redukce, osa X

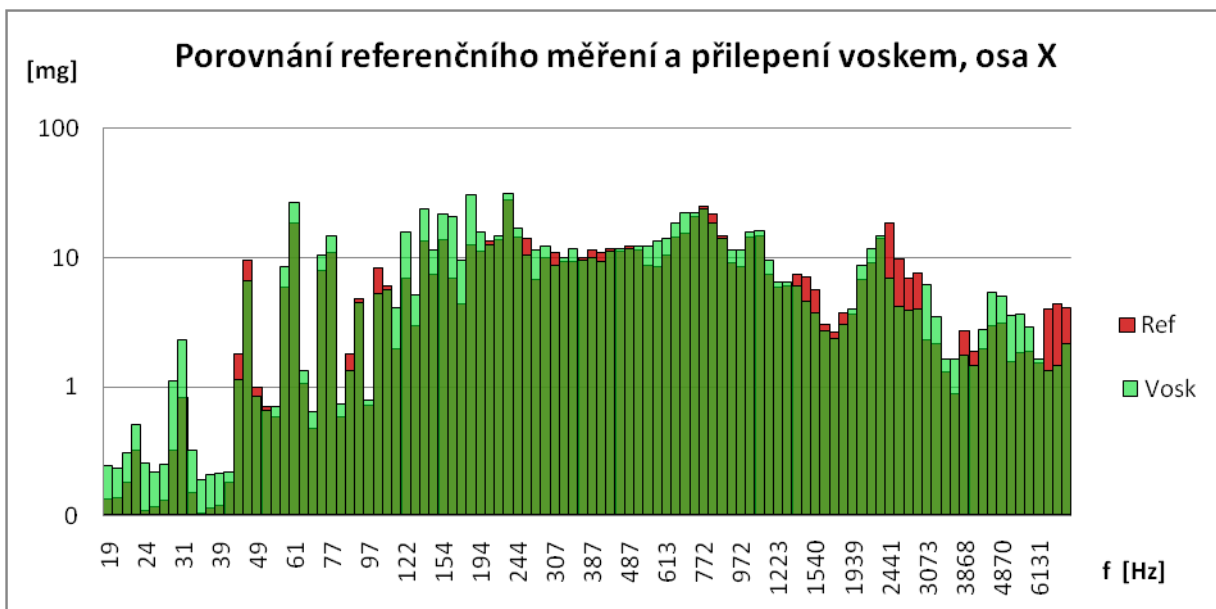
Pro graf osy Y je vidět výrazný rozdíl amplitud pro vysoké frekvence od cca 4,6 kHz. Ostatní část spektra naopak poměrně věrně kopíruje spektrum s redukcí.



Obr. č. 32 – Porovnání naměřených hodnot při držení rukou s redukcí a bez redukce, osa Y

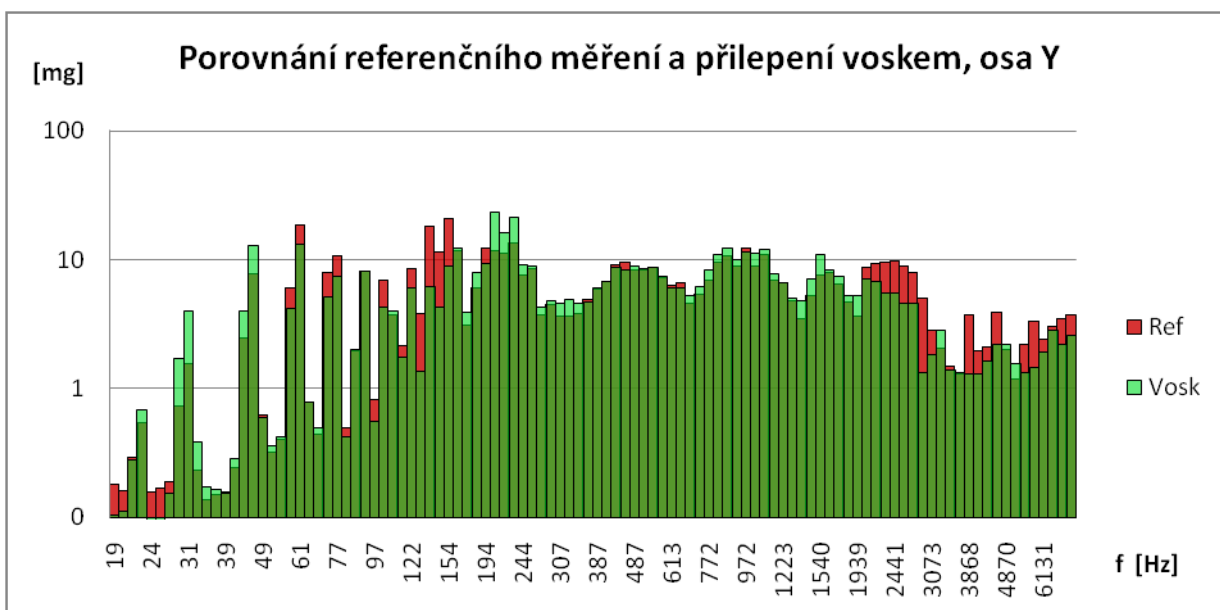
4.1.3 Přilepení voskem

Upevnění akcelerometru pomocí vosku je v praxi často používané. Platí pro něj, že největší odlišnosti od referenčního měření jsou pro osu X v oblasti kolem 150 Hz s vyššími hodnotami amplitud, dále ve frekvenčním pásmu cca 2,3 – 2,7 kHz jsou amplitudy nižší.



Obr. č. 33 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení voskem, osa X

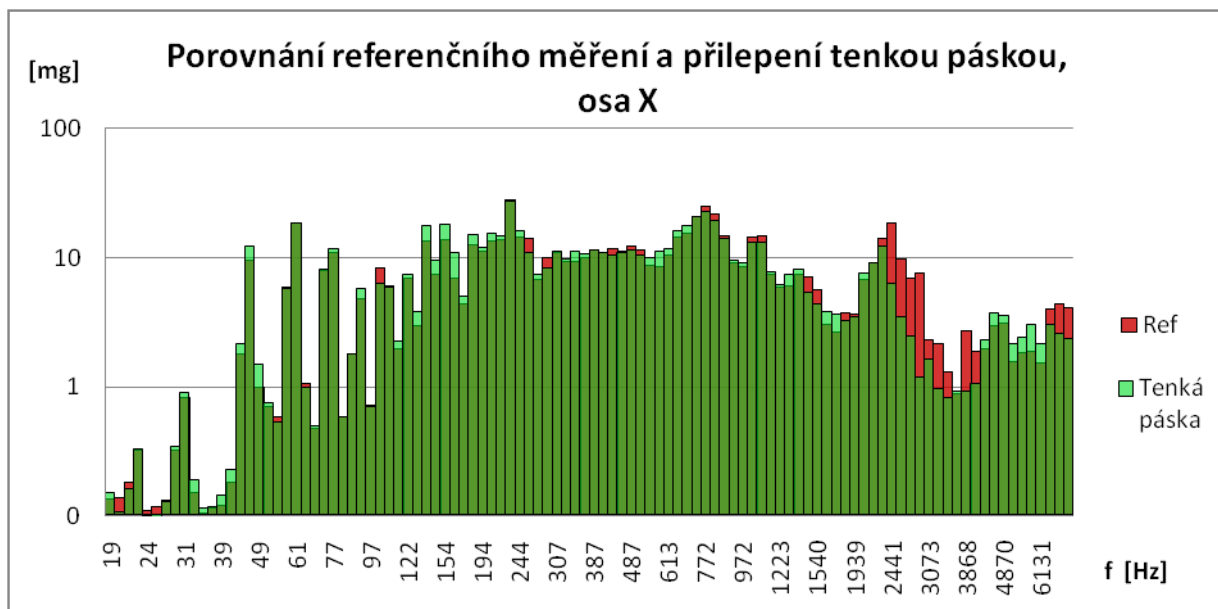
Pro osu Y jsou na obr. č. 34 největší rozdíly amplitud také pro hodnoty kolem 150 Hz a v pásmu cca 2,3 – 2,7 kHz, dále kolem 200 Hz.



Obr. č. 34 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení voskem, osa Y

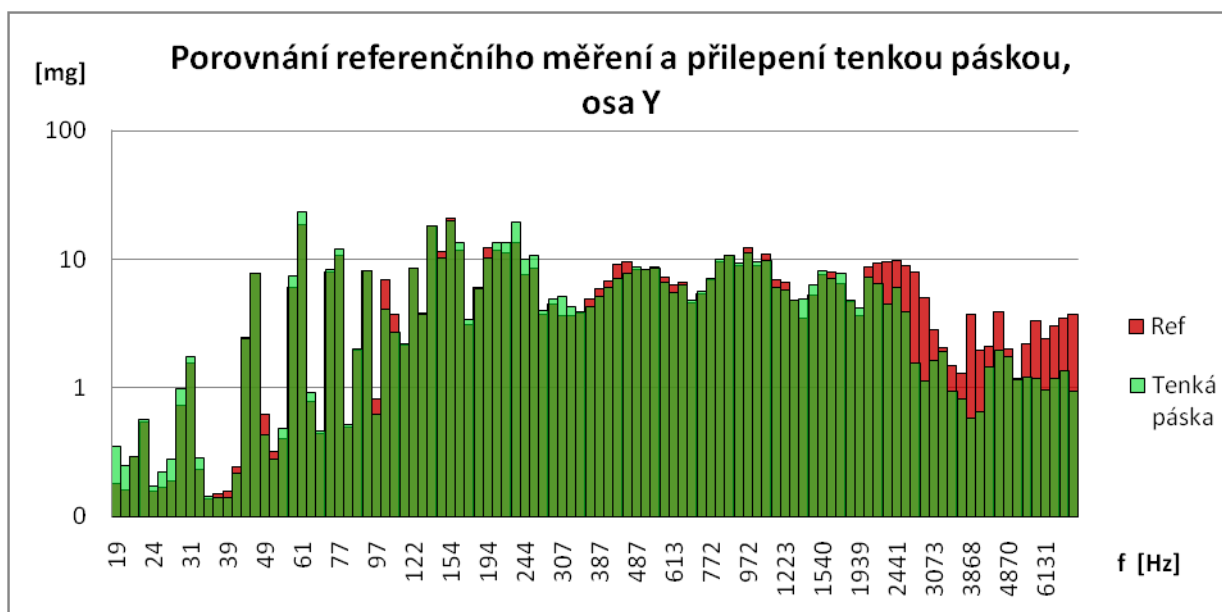
4.1.4 Přilepení oboustranně lepicí páskou

Spektrum pro tenkou oboustranně lepicí pásku se od referenčního liší jen mírně a je mu nejpodobnější. Největší odchylka je patrná cca od 2,3 do 2,9 kHz, kde jsou amplitudy pro tenkou pásku nižší než u referenčního měření.



Obr. č. 35 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení tenkou oboustranně lepicí páskou, osa X

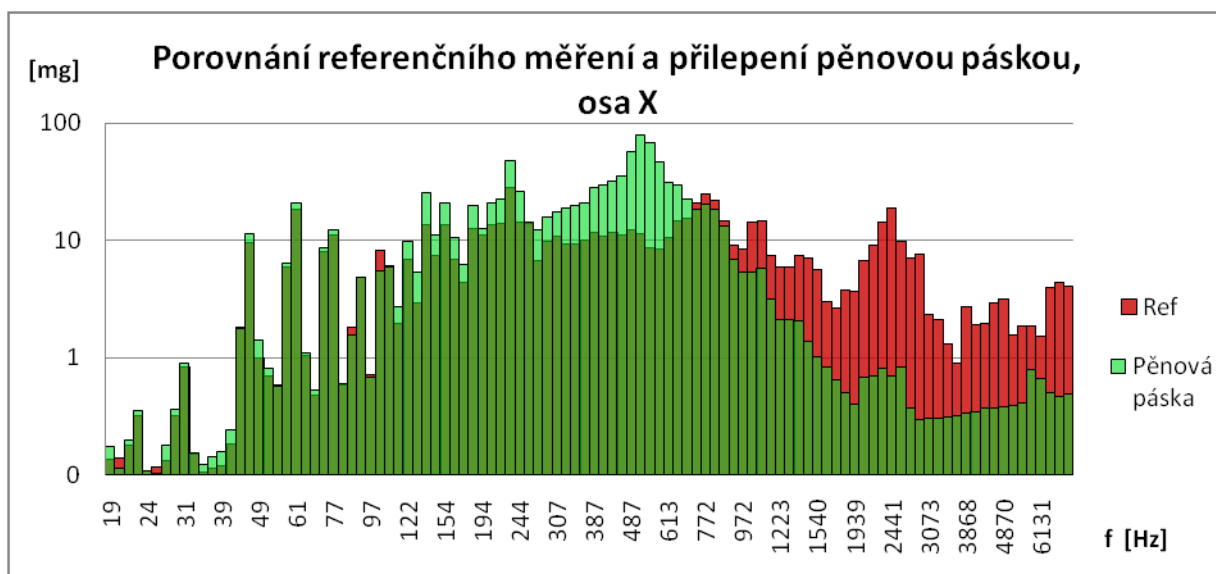
Také pro osu Y vychází graf podobný referenčnímu. Opět jsou nad 2,3 kHz amplitudy nižší.



Obr. č. 36 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení tenkou oboustranně lepicí páskou, osa Y

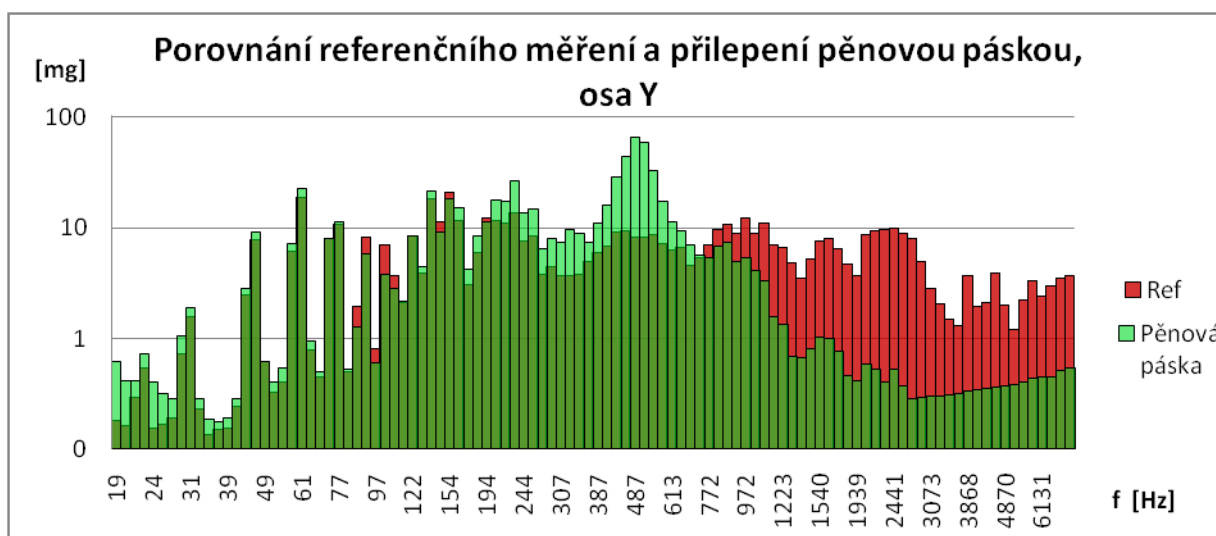
4.1.5 Přilepení pěnovou oboustranně lepicí páskou

V tomto bodě bylo cílem měření zjistit, zda by upevnění pěnovou oboustranně lepicí páskou mohlo sloužit jako nouzová varianta. Pro osu X platí, že cca do 100 Hz jsou hodnoty podobné hodnotám referenčního měření. Nad 100 Hz jsou u pěnové pásky výrazně vyšší amplitudy a v extrému kolem 520 Hz je tento rozdíl cca 70 mg. Naopak nad 900 Hz jsou amplitudy tohoto spektra výrazně nižší, než u spektra referenčního.



Obr. č. 37 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení pěnovou oboustranně lepicí páskou, osa X

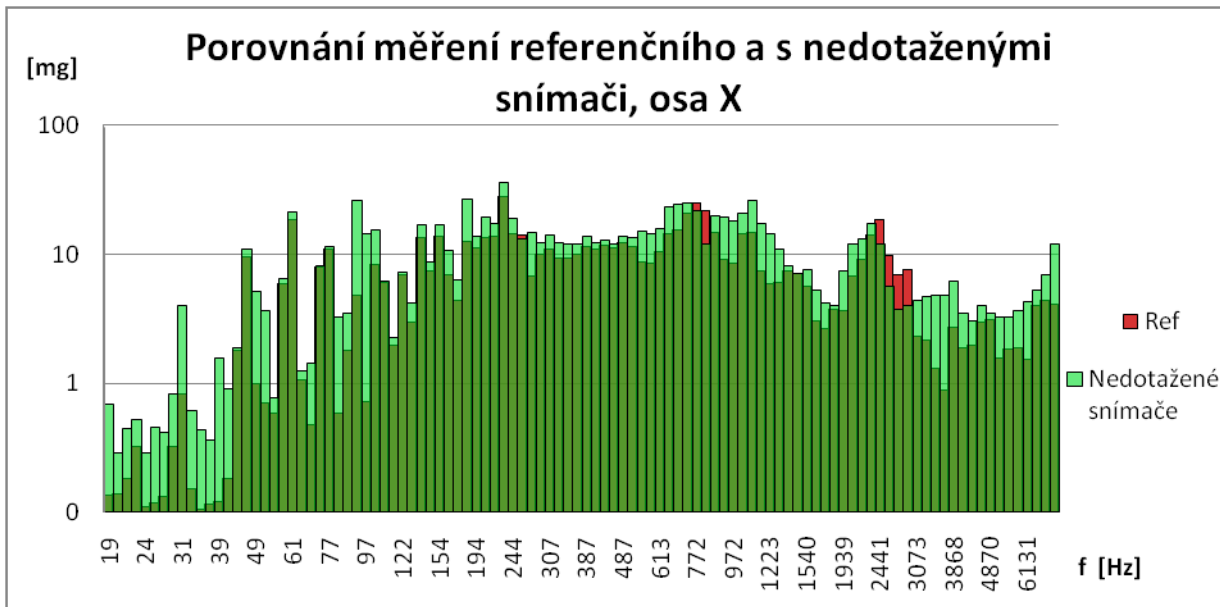
Pro měření v ose Y jsou amplitudy referenčního měření a pěnové pásky podobné cca do 200 Hz. Poté se opakuje stejná situace jako u osy X.



Obr. č. 38 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení pěnovou oboustranně lepicí páskou, osa Y

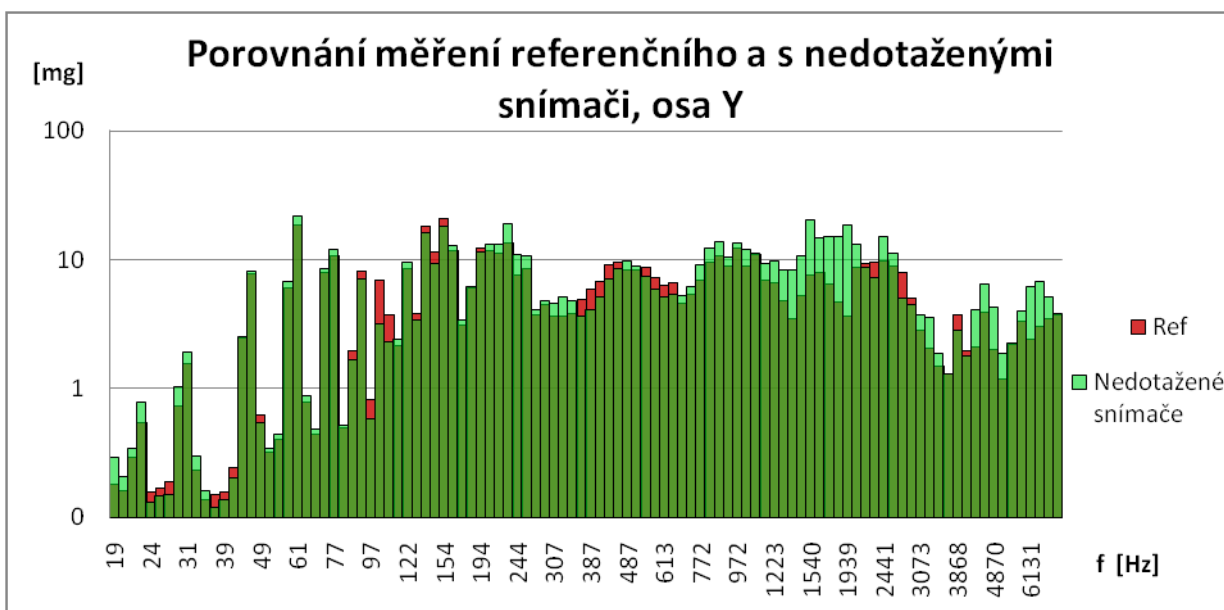
4.1.6 Nedotažení snímačů při jejich montáži

Pro osu X měřenou s nedotaženým akcelerometrem platí, že téměř všechny amplitudy jsou v tomto spektru vyšší než u referenčního spektra. Nižší jsou pro oblast okolo 2,7 kHz.



Obr. č. 39 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro nedotažené snímače, osa X

Pro osu Y hodnoty amplitud více kopírují referenční spektrum, výraznější rozdíly jsou ve frekvenčním pásmu cca 1,3 – 1,9 kHz. Menší rozdíly mohou být způsobeny, protože pro směr měření Y mohl být snímač více dotažený, než pro směr X.

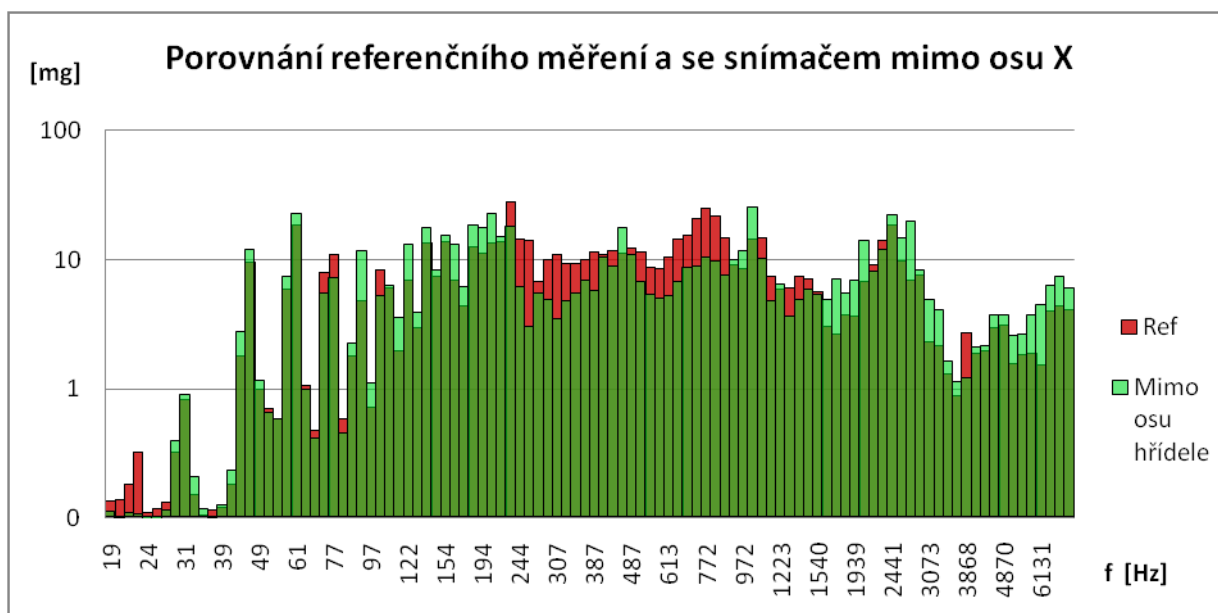


Obr. č. 40 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro nedotažené snímače, osa Y

4.1.7 Měření mimo osu hřídle

Při měření mimo osu hřídle se projevilo pokles amplitud v pásmu od cca 250 do 800 Hz. Vyšší amplitudy se vyskytují především v oblasti cca 1,6 až 3,5 kHz, dále pak cca od 100 do 250 Hz.

Osa Y byla měřena stejně jako u referenčního měření, proto výsledek není potřeba uvádět.



Obr. č. 41 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro měření mimo osu hřídle

Závěr

V závěru jsou shrnuty poznatky o vlivu upevnění akcelerometrů získané měření na zkušebním zařízení pro diagnostiku vibrací. Pro potvrzení správnosti jednotlivých výsledků měření by bylo potřeba naměřit za stejných podmínek a následně porovnat mnohem více pokusů (minimálně 10).

Pokud chceme na stroji měřit opakovaně a pravidelně porovnávat naměřená data, je nejvhodnější vytvořit na stroji takové měřicí body, aby odpovídaly referenčnímu měření. Tedy umístění snímačů ve dvou na sebe kolmých směrech v ose hřídele.

Z porovnání grafů pro přidržení snímačů rukou vyplývá, že se výsledky od referenčního měření poměrně výrazně liší. Nevýhodou je nepohodlné ovládání, kdy se jednou rukou drží snímač a druhou rukou ovládá program na notebooku, který je nutno mít v dosahu. To je možné odstranit pomocí druhého pracovníka, kdy se úlohy rozdělí. Tento způsob měření tedy pro běžné měření nedoporučuji, může sloužit pro výběr měřicího místa, kde bude následně měřeno s jiným typem upevnění.

Namontovaná redukce mezi snímačem a ložiskovým stojanem potlačuje velmi nízké a zvýrazňuje vysoké frekvence. Při nutnosti použití takovéto redukce by proto bylo vhodné před měřeními ověřit její skutečný vliv na výsledky měření.

Pro upevnění pomocí vosku bylo zjištěno, že se hodnoty se pro směr X téměř v celém frekvenčním pásmu odlišují od referenčního měření. Nicméně pro směr Y jsou cca od 250 do 2000 Hz hodnoty velmi podobné. Při upevnění akcelerometru snímajícího směr měření X mohlo dojít k nerovnoměrnému nanesení vosku. Proto se hodnoty mohou takto lišit. Pracovat se včelím voskem není příjemné, při jeho tavení může dojít k popálení kůže a kapky mohou stéci do závitů snímačů.

U spektra upevnění oboustrannou lepicí páskou tloušťky 0,08 mm platí, že je cca do 2 kHz nejpodobnější spektru referenčnímu. Nad tuto frekvenci jsou naměřené amplitudy nižší. S páskou se dobře manipuluje, snímač bezproblémově přilepí. Je zde ale nutné použít velmi tenkou pásku. Oboustranná páška větší tloušťky tlumí vysoké frekvence a zvýrazňuje oblast frekvencí, jak je v práci vyzkoušeno pomocí pěnové oboustranné lepicí pásky tloušťky cca 1 mm. Tato páška by mohla být použita jen při měření velmi nízkých frekvencí (cca do 100 Hz).

Nedotažené snímače při zkušebním měření ovlivňují výsledky tak, že zvýrazní téměř všechny amplitudy. Je tedy zřejmé, že je nutné tuto chybu montáže snímačů vyloučit.

Pokud je měřeno mimo osu hřídele, výsledky se od referenčního spektra liší, protože přenos signálu vibrací zde není ideální. Při opakovaném měření v čase na stejném místě by ale bylo možné porovnávání výsledků mezi sebou.

Při měření vibrací v praxi se měří na stále stejném měřicím místě stroje, akcelerometr se upevňuje stále stejně a hodnoty se porovnávají s předchozími měřeními. Zjišťuje se případné zvětšení amplitud významných frekvencí a překročení nastavených varovných mezí stanovených na základě analýzy stroje a vstupních měření vibrací. Tato práce prokázala, jak může být výsledná analýza vibrací ovlivněna případnými nedostatky při upevnění snímačů. Je třeba, aby si tyto nedostatky pracovníci údržby uvědomovali a vyloučili je, nebo je alespoň zahrnuli do analýzy naměřených výsledků.

Problematika týkající se volby akcelerometru a teoretického popisu možných vlivů na měření je popsána v teoretické části práce.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KREIDL, Marcel; ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika : senzory – metody – analýza signálu*. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [2] ZIEGLER, Jiří; HELEBRANT, František. *Technická diagnostika výrobních zařízení*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1992. 175 s. ISBN 80-7078-111-4.
- [3] SMETANA, Ctirad; et al. *Hluk a vibrace : Měření a hodnocení*. Praha : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
- [4] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha : Sdělovací technika, 1997. 174 s. ISBN 80-901936-1-7.
- [5] HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost II. : Vibrodiagnostika*. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004. 173 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [6] *Měření chvění*. Praha: BRÜEL & KJÆR, 1984. 40 s.
- [7] ČSN ISO 2041. *Vibrace a rázy - Slovník*. Praha : Český normalizační institut, duben 1997. 112 s.
- [8] ČSN ISO 10816-1. *Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 1: Všeobecné směrnice*. Český normalizační institut, 1997. 24 s.
- [9] BRÜEL & KJÆR. *Snímače vibrací a úprava signálu*. [PDF dokument]. [Praha], [2001].
- [10] VDOLEČEK, František. *Spolehlivost a technická diagnostika* [online]. Brno, 2002 [cit. 2010-05-12]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <<http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/FSD.pdf>>.
- [11] OMEGA - *Akcelerometry* [online]. [2007] [cit. 2010-05-23]. Akcelerometry. Dostupné z: <<http://www.omegaeng.cz/prodinfo/Accelerometers.html>>.
- [12] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů - 1. díl – Piezoelektrické* [online]. 2007 [cit. 2010-05-22]. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART303-principy-akcelerometru--1-dil--piezoelektricke.html>>.

- [13] *Piezoelektrické akční členy* [online]. Praha [cit. 2010-05-22]. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky. Dostupné na: <http://dce.felk.cvut.cz/ip/prednasky/IP_piezo.pdf>.
- [14] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů - 2. díl – Piezorezistivní* [online]. 2007 [cit. 2010-05-22]. Dostupný z: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART306-principy-akcelerometru--2-dil--piezorezistivni.html>>.
- [15] VOJÁČEK, Antonín. *Freescall akcelerometry* [online]. 3.6.2005 [cit. 2010-05-23]. Freescall akcelerometry pro malá zrychlení (nízká g). Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART167-freescall-akcelerometry-pro-mala-zrychleni-nizka-g.html>>.
- [16] ZUTH, Daniel; VDOLEČEK, František. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *Automa : časopis pro automatizační techniku* [online]. 2010, 01/2010 [cit. 2010-05-25]. Dostupné z: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>>.
- [17] BRÜEL & KJÆR. *Měření a analýza vibrací : Základní pojmy a úvahy*. [PDF dokument]. [Praha], [2001].
- [18] *Metody analýzy časově proměnných signálů* [online]. [cit. 2010-05-27]. Dostupné z: <www.souch.cz/dok/e/scitani.doc>
- [19] JANDOVÁ, Kateřina. *Vibrodiagnostika* [online]. 2006. [cit. 2010-05-20]. Dostupné z: <http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/tdk/sem2006/VD_JANDOVA.ppt>.
- [20] ZUTH, Daniel; VDOLEČEK, František. Možnosti a problémy moderní (vibro)diagnostiky. *Automa : časopis pro automatizační techniku* [online]. 2009, 10/2009, [cit. 2010-05-29]. Dostupný z: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39703.pdf>>.

Seznam obrázků

	strana
Obr. č. 1 – Pracovní rozsahy snímačů vibrací dle [9]	12
Obr. č. 2 – Volba akcelerometru [9]	14
Obr. č. 3 – Podélný, příčný a stříhový piezoelektrický jev dle [1]	15
Obr. č. 4 – Některé typy akcelerometrů [9]	15
Obr. č. 5 – Vliv způsobu uchycení snímače na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku [16]	18
Obr. č. 6 – Měřicí řetězec	20
Obr. č. 7 – Měřič frekvence Lenze SMD	20
Obr. č. 8 – Zkušební zařízení pro měření vibrací	21
Obr. č. 9 – Nevývážený kotouč	22
Obr. č. 10 – Náčrt ložiskového stojanu s umístěním měřicích bodů	22
Obr. č. 11 – Měřicí body na ložiskových stojanech dle normy ČSN ISO 10816-1 [8]	23
Obr. č. 12 – Snímač Kistler	24
Obr. č. 13 – Analyzátor a vyhodnocovací zařízení	25
Obr. č. 14 – Příklad FFT analýzy	28
Obr. č. 15 – Příklad CPB analýzy	28
Obr. č. 16 – Referenční měření	29
Obr. č. 17 – Přidržení rukou – osa Y	30
Obr. č. 18 – Přidržení rukou – osa X	30
Obr. č. 19 – Přidržení rukou b.r. – osa Y	30
Obr. č. 20 – Přidržení rukou b.r. – osa X	30
Obr. č. 21 – Přilepení snímačů voskem	31
Obr. č. 22 – Přilepení tenkou oboustranně lepicí páskou firmy Ulith	32
Obr. č. 23 – Přilepení pěnovou oboustranně lepicí páskou	32
Obr. č. 24 – Nedotažené snímače	33
Obr. č. 25 – Měření mimo osu hřídele	33
Obr. č. 26 – Porovnání dvou referenčních spekter, osa X	35
Obr. č. 27 – Porovnání dvou referenčních spekter, osa Y	35
Obr. č. 28 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přidržení rukou, osa X	36
Obr. č. 29 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přidržení rukou, osa X, lineární osa y	36

Obr. č. 30 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přidržení rukou, osa Y	37
Obr. č. 31 – Porovnání naměřených hodnot při držení rukou s redukcí a bez redukce, osa X	38
Obr. č. 32 – Porovnání naměřených hodnot při držení rukou s redukcí a bez redukce, osa Y	38
Obr. č. 33 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení voskem, osa X	39
Obr. č. 34 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení voskem, osa Y	39
Obr. č. 35 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení tenkou oboustranně lepící páskou, osa X	40
Obr. č. 36 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení tenkou oboustranně lepící páskou, osa Y	40
Obr. č. 37 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení pěnovou oboustranně lepící páskou, osa X	41
Obr. č. 38 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro přilepení pěnovou oboustranně lepící páskou, osa Y	41
Obr. č. 39 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro nedotažené snímače, osa X	42
Obr. č. 40 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro nedotažené snímače, osa Y	42
Obr. č. 41 – Porovnání referenčního spektra a spektra pro měření mimo osu hřídele	43

Seznam zkratek

b.r.	bez redukce
CPB	relativní procentuální šířka pásma
DFT	diskrétní Fourierova transformace
FFT	rychlá Fourierova transformace
GPS	globální poziční systém

Přehled veličin

<u>Symbol</u>	<u>Název veličiny</u>	<u>Jednotka</u>
a	zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
E	intenzita elektrického pole	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$
f	frekvence	Hz
f_c	střed propustného pásma filtru, centrální frekvence	Hz
f_s	spodní mezní frekvence filtru	Hz
f_h	horní mezní frekvence filtru	Hz
F	síla	N
g	gravitační zrychlení	m/s^2
Δf	frekvenční šířka propustného pásma filtru	Hz
mg	tisícina hodnoty gravitačního zrychlení	
P	vektor polarizace	$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$
Q	elektrický náboj	C
U	napětí	V
v	rychlost	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
y	výchylka	m

Seznam příloh

Příloha A: Popis akcelerometrů KISTLER

Příloha B: Popis digitálního laserového otáčkoměru

Příloha C: Popis hřídelové spojky

PŘÍLOHY

Příloha A – Popis akcelometrů KISTLER

K-Shear[®] Accelerometers

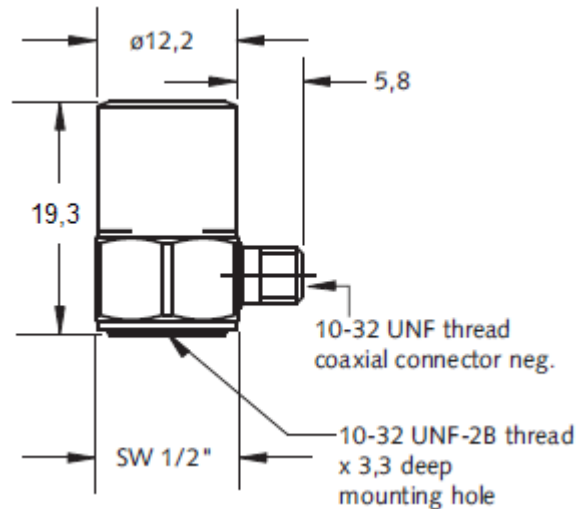


General Purpose, Voltage Mode Accelerometers

Type 8702B100

Small, relatively light weight general purpose accelerometers for vibration measurements in wide range of applications. Available in three measuring ranges 25 g, 50 g and 100 g, all range types are available in a ground isolated option. These accelerometers feature a rugged, hermetically sealed construction.

- Low impedance, voltage mode
- Quartz-shear sensing elements
- Ultra-low base strain
- Minimal thermal transient response
- Lightweight, hermetically sealed Titanium case
- Conforming to CE



Description

The Type 8702B... side connector accelerometer series use a unique shear mode sensing element made of stable quartz crystals. The quartz sensing elements afford excellent long-term stability that ensure repeatable, accurate measurements for many years. Additionally the shear element design provides low transverse sensitivity along with an insensitivity to base strain and thermal transients.

All units are hermetically sealed and are constructed entirely of titanium or a combination of titanium and stainless steel. An internal circuit Piezotron[®] impedance converter provides a high signal level at low impedance output. Models identified with an M1 are ground isolated

versions. All units are hermetically sealed and are constructed entirely of titanium or a combination of titanium and stainless steel.

Application

All types are designed for general purpose vibration measurement in a laboratory or industrial environment. They can be used for environmental testing (with or without temperature cycling), ESS, vehicle tests, automotive NVH testing, rotating machinery vibration analysis.

Specification	Unit	Type 8702B100
Acceleration range	g	±100
Acceleration limit	gpk	±200
Transverse acceleration limit	gpk	±200
Threshold nom.	grms	0,006
Sensitivity, ±5 %	mV/g	50
Resonant frequency mounted nom.	kHz	54
Frequency response, ±5 %	Hz	0,5 ... 10 000
Amplitude non-linearity	%FSO	±1
Time constant nom.	s	1,5
Transverse sensitivity nom., (max. 3)	%	1,5
Environmental		
Base strain sensitivity @ 250 $\mu\epsilon$	g/ $\mu\epsilon$	0,01
Shock limit (1 ms pulse)	gpk	2 000
Temperature coeff. of sensitivity	%/°C	-0,06
Operating temperature range	°C	-55 ... 100
Storage temperature range	°C	-75 ... 120
Output		
Bias nom.	VDC	11
Impedance	Ω	<100
Voltage full scale	V	±5
Current	mA	2
Source		
Voltage	VDC	20 ... 30
Constant current	mA	4
Impedance min.	k Ω	100
Construction		
Sensing element	Type	quartz-shear
Housing/base	material	Titanium/St. Stl.
Degree of protection case/connector (EN 60529)		IP68
Connector	Type	10-32 neg.
Ground isolated		with pad/M1
Mass	grams	8,7/7,5
Mounting (10-32 thd. x 3,3 dp)	Type	stud
Mounting torque	N·m	2

Zdroj: Kistler. *Data Sheets*. [PDF Dokument]. 2008 [cit. 2010-05-26]. Dostupné z: <<http://www.kistler.com/mediaaccess/000-239e-03.08.pdf>>.

Příloha B – Popis digitálního laserového otáčkoměru

Značka: Voltcraft

Typ: DT-1L

Popis

Ruční přístroj pro jednoduché měření počtu otáček. Pomocí laserové jednotky můžete bezdotykově a velmi přesně určit počet otáček u točících se objektů, a to dokonce i při denním světle. Hodnoty se zobrazují na 5místném LCD displeji. Data si můžete nechat zobrazit jako počet otáček v U/min nebo jako počítací jevová funkce. Dále má přístroj paměť na ukládání min./max. hodnot a naposledy naměřené hodnoty zůstanou na displeji zobrazeny pro potřeby záznamu.

Technická data

Rozměry	(D x Š x H) 200 x 75 x 37 (mm)
Rozsah měření otáček, bez kontaktu	2,5 – 99999 rpm
Přesnost měření otáček	0,025 % + 1 číslice
Zobrazení	LCD displej, 5 číslic
Teplotní rozsah	0 – 50 °C
Odstup měření	5 – 50 cm
Provozní napětí	4x AA, 1,5 V
Hmotnost	260 g



Zdroj: *Laserový otáčkoměr DT 10L - VOLTcraft* [online]. [cit. 2010-05-28]. Laserový otáčkoměr DT 10L. Dostupné z : <<http://www.voltcraft.cz/merici-pristroje/laserovy-otackomer>>.

Zdroj obrázku: *Цифровой тахометр DT-1L - Тахометры* [online]. [cit. 2010-05-28]. Цифровой тахометр DT-1L. Dostupné z : <<http://conrad.ru/Ciprovoy-tahometr-dt1l-p-2039.html>>.

Příloha C – Popis hřídelové spojky

ROTEX® GS

Backlash-free shaft coupling

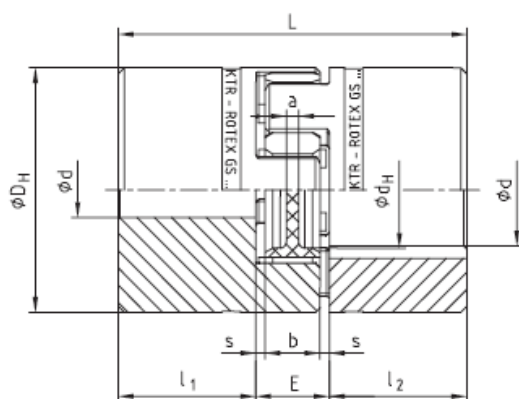
- Spojka bez torzní vůle, snadná montáž - zasunutí dílů spojky do sebe.
- Tlumení vibrací a rázů.
- Odolná proti poškození, nevyžaduje údržbu.
- Krouticí moment: 0,15 Nm - 2 400 Nm.
- Průměry vrtání: 2 mm - 95 mm.

Technical description

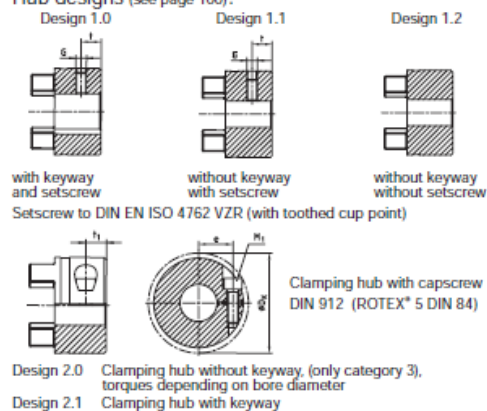
ROTEX® GS is a 3-part, axial plug-in coupling backlash-free under pre-stress. It is convincing even with critical applications by its backlash-free power transmission, its stiffness which is each adapted to the application and its optimum damping of vibrations. This principle of installation offers significant assembly possibilities which optimize the assembly times in production.



- Backlash-free shaft connections for measurement drive with small torques
- Single cardanic coupling in three parts
- Axial plug-in ability - easy blind assembly, without any time-consuming screw connections
- Small dimensions - low flywheel mass
- Maintenance-free, easy to check visually
- Different elastomer hardness of spiders
- Available from stock for all usual shaft dimensions
- Finish bore acc. to ISO fit H7 (apart from clamping hub), keyway, from Ø 6 mm acc. to DIN 6885 sheet 1 - JS9
- Approved according to EC Standard 94/9/EC (only for hub design 1.0 and 2.1)
- Basic programme see page 101



Hub designs (see page 100):



Zdroj: *Hřídelové spojky KTR - ARKOV* [online]. [cit. 2010-05-28]. Hřídelové spojky. Dostupné z: <<http://www.arkov.cz/pdf/rotex-gs.pdf>>.