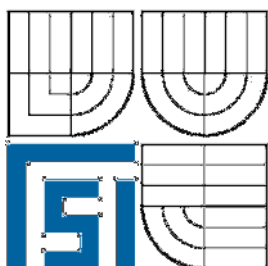




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

VLASTNOSTI MODERNÍCH AKCELEROMETRŮ

PRESENT-DAY ACCELEROMETER PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZBYNĚK STŘELEC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky
Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Střelec Zbyněk

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vlastnosti moderních akcelerometrů

v anglickém jazyce:

Present-day Accelerometers Properties

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době se na trhu objevují mikročipové snímače a to nejen v oboru vibrodiagnostiky. Práce se zaměřuje na moderní mikročipové akcelerometry a to zejména ohledně použitelnosti v technické diagnostice. Práce je součástí řešení VVZ MSM 0021630529 - Inteligentní systémy v automatizaci.

Cíle bakalářské práce:

- Zpracovat problematiku vibrodiagnostiky
- Vybrat vhodné prvky
- Proměřit vlastnosti konkrétního akcelerometru MMA7260Q
- Naměřené hodnoty porovnat s piezoelektrickými snímači

Seznam odborné literatury:

1. JANOUŠEK, I., KOZÁK, J., TARABA, O. a kol.: Technická diagnostika. Praha, SNTL Praha 1988. 432 ISBN 04-236-88.
2. KREIDL, M. a kol.: Diagnostické systémy. Praha: Vydavatelství ČVUT Praha 2001 352 ISBN 80-01-02349-4.
3. Firemní literatura
4. časopisy Automa, Automatizace

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Daniel Zuth

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 27. 11. 2009

L.S.



prof. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

LICENČNÍ SMLOUVA

(Na tomto místě je vloženo licenční ujednání)

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá moderními mikročipovými akcelerometry a jejich použitelností v technické diagnostice. V práci je provedeno porovnání méně známého, ale v dnešní době dost využívaného akcelerometru MMA 7260Q od firmy Freescale s běžným piezoelektrickým akcelerometrem.

ABSTRACT

This bachelor's thesis is interested in a modern microchip accelerometers and their usability in a technical diagnostics. A comparison of lesser-known but nowadays very used accelerometer MMA 7260Q from the company Freescale with a common piezoelectric accelerometer is carried out in this thesis.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akcelerometr, vibrodiagnostika, piezoelektrický snímač

KEYWORDS

Accelerometer, vibrodiagnostics, piezoelectric accelerometer

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Danielu Zuthovi, Ph.D. za jeho ochotu a odbornou pomoc.

OBSAH

Zadání závěrečné práce.....	3
Licenční smlouva	5
Abstrakt	7
1. Úvod	13
2. Měření	15
3. Technická diagnostika	17
3.1. Základní pojmy	17
3.2. Diagnostické modely	18
4. Vibrodiagnostika	21
4.1. Základy mechanického kmitání a snímačů vibrací	21
4.2. Senzory výchylky, polohy a posuvu	24
4.3. Senzory rychlosti	24
4.4. Senzory zrychlení - akcelerometry	25
4.5. Analýza signálu v časové oblasti	26
4.6. Analýza signálu ve frekvenční oblasti	26
5. Piezoelektrické akcelerometry	29
5.1. Základní vlastnosti	29
5.2. Princip a struktura piezoelektrických akcelerometrů	29
5.3. Typy piezoelektrických akcelerometrů	32
6. Mikročipové akcelerometry	33
6.1. Použití	33
6.2. Princip funkce integrovaného senzoru Freescale	33
6.3. Akcelerometr MMA 7260Q	34
6.3.1. Hlavní parametry MMA 7260Q	34
6.3.2. Vnitřní zapojení senzoru	35
6.3.3. Příklad obvodového zapojení	36
7. Praktický test	37
7.1. Zapojení akcelerometru MMA 7260Q	37
7.2. Použité vybavení	38
7.3. Praktické proměření akcelerometrů.....	41
7.3.1. Měření č.1	42
7.3.2. Měření č.2	48
8. Závěr	53
9. Seznam použité literatury	55

1. ÚVOD

V této práci se budu zabývat moderními mikročipovými akcelerometry, které jsou v dnešní době dost využívány a setkáváme se s nimi stále častěji i v běžném životě, např. v mobilních telefonech, automobilovém průmyslu nebo GPS zařízeních.

Na začátku své práce se věnuji teoretickým základům které jsou nezbytné pro lepší chápání problematiky akcelerometrů. Dále se podrobněji věnuji vlastnostem a popisu jednotlivých akcelerometrů a také jejich využitím v praxi. V poslední části této práce se zaměřuji na praktické proměření konkrétního akcelerometru a sestavení grafů naměřených hodnot.

2. MĚŘENÍ

Měření je neoddělitelnou složkou našeho každodenního života a jeho všudypřítomnost si již mnohdy ani neuvědomujeme. Historie měření sahá daleko do minulosti. Rozvoj měření, měřicích metod a prostředků šel historií lidstva ruku v ruce spolu s dělbou práce a obchodem až po dnešní dokonale organizovanou podobu.

Ještě ve středověku bylo měření a měrové soustavy velmi roztržité a v podstatě se jednalo o jakési národní, či spíše regionální řešení, která ale s postupem doby překračovala omezené hranice a nalézala širší uplatnění až po dnešní podobu, která se datuje od podpisu Metrické konvence 20. května 1875 v Paříži, tehdy tento významný metrologický dokument podepsalo 18 zakládajících států, zatímco v dnešní době má Metrická konvence 48 členských států, mezi ně patří také Česká republika.

Měřením a vším, co s ním souvisí, se zabývá vědní obor tzv. metrologie, jehož základními oblastmi pozornosti a činnosti jsou veličiny a jejich jednotky, metody měření, měřidla, vlastnosti a schopnosti osob, péče o fyzikální konstanty a vlastnosti látek a materiálů.

V praxi nejsou žádná měření, žádná měřicí metoda ani žádný přístroj absolutně přesné. Nejrůznější negativní vlivy, které se v reálném měřicím procesu vyskytují, se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou měřené veličiny. Výsledek měření se tak vždy pohybuje v určitém tolerančním poli kolem skutečné hodnoty, ale téměř nikdy nenastane ideální ztotožnění obou hodnot. Výsledný rozdíl mezi oběma hodnotami je někdy tvořen velmi složitou kombinací dílčích faktorů. Tento rozdíl se v minulosti nazýval chybou měření.[1]

3. TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Zahrnuje teorii, metody a prostředky související s organizací prověrek technického stavu objektu i formulaci při tom vznikajících matematických a technických problémů, metody a prostředky jejich řešení, metody a prostředky technické realizace navržených zařízení, popřípadě jejich začlenění do nadřazeného systému řízení provozu objektu.[2]

Technickou diagnostiku můžeme rozdělit podle různých hledisek na:

- | | |
|----------------|------------------|
| ▪ přímá | ▪ souborná |
| ▪ nepřímá | ▪ komplexní |
| ▪ částečná | ▪ subjektivní |
| ▪ celková | ▪ objektivní |
| ▪ mezioperační | ▪ závad a poruch |
| ▪ výstupní | ▪ funkční |
| ▪ provozní | |

3.1. Základní pojmy

Objekt (technické) diagnostiky je objekt, u něhož provádíme nebo hodláme provádět prověrku jeho technického stavu za účelem splnění některého z úkolů diagnostiky. Objektem může být výrobní celek, jeho element, strojní prvek, samostatný výrobek atp.

Formalizací funkcí a struktury objektu pro účely řešení úkolů technické diagnostiky získáváme diagnostický model objektů. Je dán strukturou vnitřních bloků objektu, jejich parametry a charakteristikami těchto parametrů.

Základním úkolem diagnostiky je vyslovení diagnózy charakterizující technický stav objektu z hlediska výskytu poruch, přičemž forma diagnózy musí být vhodně využitelná pro optimalizaci profylaktických úkonů s cílem uvést objekt do normálního stavu.

Technický stav objektu definujeme jako souhrn vlastností objektu, které vystihují jeho schopnost vykonávat požadované funkce v daný okamžik. (Popis požadovaných funkcí a podmínek použití tvoří nedílnou součást definice objektu).[3]

Diagnóza je vyhodnocení okamžitého technického stavu objektu. Z hlediska terminologie spolehlivosti se jedná o vyhodnocení provozuschopnosti objektu za daných technických podmínek. Mezi základní úkoly diagnostiky patří detekce a lokalizace vady nebo poruchy.

Prognóza je extrapolace vývoje technického stavu do budoucnosti. Cílem prognózy je např. stanovení na základě statistických vyhodnocení pravděpodobnosti bezporuchového stavu v následujícím období nebo na základě vad stanovení termínů dílčích a generálních oprav nebo výměn komponentů objektu.

Geneze je analýza možných a pravděpodobných příčin vzniku poruchy nebo vady, a tím předčasného zhoršení technického stavu objektu.[4]

Diagnostické prostředky tvoří soubor technických zařízení a pracovních postupů pro analýzu a vyhodnocení stavu diagnostikovaného objektu. Pracovní postup je diagnostický algoritmus (tj. sled elementárních úkonů diagnostikování) včetně programového vybavení pro vyhodnocování dat, aplikace pokročilých metod zpracování signálů, metod výběru vhodných diagnostických parametrů, sestavení matematických modelů aj. Diagnostické algoritmy mohou být závislé nebo nezávislé dle toho, jestli v časovém postupu vycházíme z předcházející diagnózy nebo ne. Diagnostické prostředky mohou být realizovány buď jako pevně zabudovaná součást objektu (tzn. vnitřní prostředky jsou např. mikroelektronické senzory vybavené obvody pro zpracování, analýzu a unifikaci signálu), nebo samostatně (tzn. vnější prostředky jsou např. frekvenční analyzátoři, číselně osciloskopy aj.). Při volbě diagnostického prostředku je nutné respektovat předem požadovanou rozlišovací schopnost signálu v čase i v amplitudě.[4]

Objekt je provozuschopný, jestliže je schopen vykonávat stanovené funkce dle technických podmínek.

Porucha je pak jev způsobující ukončení provozuschopnosti objektu. *Funkčnost* objektu je schopnost objektu vykonávat specifickou funkci dle technických podmínek. Objekt může být ve stavu funkčním, ale pokud není schopen vykonávat všechny funkce dle technických podmínek, není provozuschopný. V praxi zřídka dochází k tzv. náhlé poruše (někdy až katastrofické poruše se závažnými následky) vlivem skokové změny jednoho nebo více parametrů, ale k postupné změně hodnot parametrů. Tento jev je označován jako *vada*, což je stav, při němž dochází k odchylce hodnoty naměřeného parametru bez příčinné souvislosti (např. v chování objektu), přičemž nejsou překročeny meze předepsané v technických podmínkách.[4]

3.2. Diagnostické modely [2]

Model, tedy zjednodušené zobrazení originálu, se využívá ke sledování chování systému a také k jeho simulaci (tj. řízené sledování vlastností originálu volbou vstupních veličin na modelu). Simulací nahrazujeme nákladný nebo nerealizovatelný experiment na skutečném systému.

Diagnostický model je zobrazení bezporuchových a poruchových stavů prvků originálu nebo bezporuchového a poruchového chování objektu. U složitých systémů provádíme dělení na dílčí subsystémy, které se modelují postupně v tzv. víceúrovňové modelování. Základní dělení diagnostických modelů je na:

- fyzikální, tj. hmotný a reálný objekt, sestavený na stejném principu jako originál (zmenšený model strojního zařízení) nebo analogickým principu (např. elektrický model tepelného nebo hydraulického systému),
- abstraktní, tj. matematický model.

Podrobnějším členěním lze modely rozdělit do následujících skupin:

Matematické modely jsou nejčastěji tvořeny soustavou rovnic a nerovnic a vztahů, mezi diagnostikovanými veličinami můžeme dále dělit:

Analytický model popisuje systém soustavou algebraických (statický model) nebo diferenciálních a diferenčních rovnic (dynamický model). Další možná dělení jsou na modely procesního chování a modely strukturní, lineární a nelineární, deterministické a stacionární nebo nestacionárně stochastické, spojité a diskrétní, parametrické a nparametrické.

Model procesního chování (tj. funkční model) je dán pouze vstupními, stavovými a výstupními veličinami systému. Pokud má pouze vstupy a výstupy modelujeme tzv. černou skříňku.

U *fyzikálně matematického modelu* je nutná perfektní znalost fyzikálních a chemických zákonitostí pro daný systém. Pro neznalost těchto předpokladů a značnou složitost se tento model téměř nepoužívá.

Empirický model vychází z experimentálně naměřených dat na vstupech a výstupech reálného systému.

Parametrický model má konstanty (koeficienty, parametry) předem odhadnutých rovnic získány identifikačními algoritmy. To provádíme buď statistickým vyhodnocením naměřených dat nebo z dynamických odezev. V praxi nejčastěji používáme kombinovaný způsob.

Logický model je modelování systému pomocí matematické logiky. U tohoto modelu se nevyskytují fyzikální proměnné, ale pouze vstupní, výstupní a stavové veličiny. Tyto nabývají pouze binárních hodnot log 0 a log 1. Při konstrukci logického modelu využíváme logických funkcí a Booleovské algebry. Pro sestavení modelu je vhodná výchozí tabulka s dvouhodnotovým popisem vlastností každého funkčního bloku. Obvykle bývá provozuschopnost definovaná logická „1“ a neprovozuschopnost (porucha) jako logická „0“.

Aplikace matematické logiky je vhodná pro objekty s vyznačenou funkční a blokovou strukturou. Každý blok musí mít definované vstupy a výstupy. Pro modelování vztahů mezi strukturálními parametry je logické modelování nevhodné. Logický model lze zadat ve tvaru grafů, tabulek a matic přechodů.

Topologický model - protože uvedené matematické modely jsou u složitějších systémů velmi náročné na matematický popis, používáme s výhodou pro popis vlastností a chování jednotlivých reálných prvků topologický model ve formě orientovaného grafu.

Použití modelů v diagnostice lze obecně rozdělit také do kombinací objektů a podmínek. Nejen samotné diagnostické objekty lze modelovat, v praxi se velmi často modelují zejména podmínky provozu, které umožňují uskutečnit nejrůznější zrychlené

zkoušky nových či inovovaných strojů, přístrojů a zařízení. Diagnostika a modelování se takto dá dělit na:

- Reálný objekt v reálných podmínkách
- Model v reálných podmínkách
- Reálný objekt v modelových podmínkách
- Model v modelových podmínkách

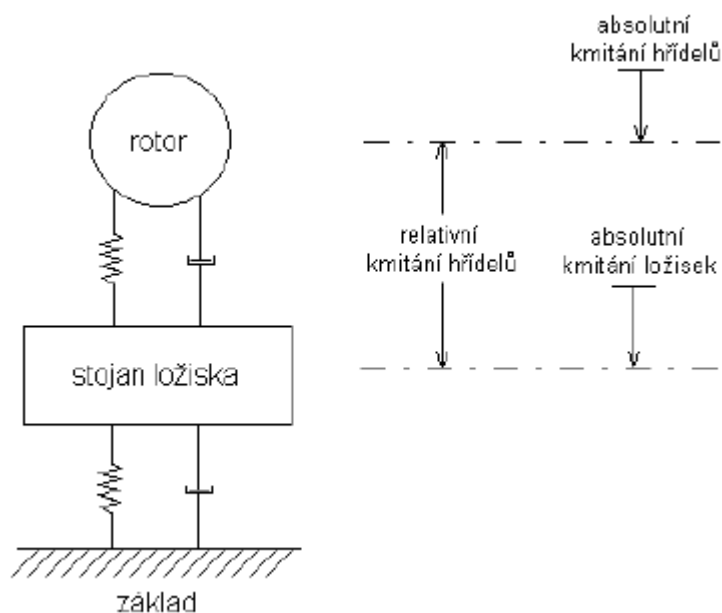
4. VIBRODIAGNOSTIKA

Vibrační diagnostika neboli vibrodiagnostika je jednou z metod bezdemontážní nedestruktivní diagnostiky rotačních strojních zařízení. Využívá vibrace, které generuje zařízení v chodu, jako zdroj informací o způsobu jeho provozu. Vibrodiagnostika je rovněž významným nástrojem moderních prediktivních a proaktivních metod údržby strojních zařízení. Pomocí vibrodiagnostiky se údržba strojních zařízení plánuje dle skutečného stavu a odpadájí mnohdy zbytečné preventivní opravy, což vede k nemalým úsporám náhradních dílů i času potřebného na opravy strojních zařízení. Na pravidelně monitorovaných zařízeních se rovněž prodlužuje perioda odstávek, které je možné plánovat s dostatečným předstihem s tím, že je z výsledků měření zřejmé, jaký uzel bude předmětem oprav.[6]

4.1. Základy mechanického kmitání a snímačů vibrací

Mechanické kmitání je dynamický jev, při němž hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy. Tuhé těleso prezentujeme jako celek, který lze nahradit hmotným bodem a termín kmitání je ekvivalentní pojmu *vibrace*. Kmitání lze popsat polohovým vektorem tj. amplitudou a fází v časovém okamžiku.

Vlnění je dynamický jev šířící se postupnými vlnami pružným prostředím, přičemž jednotlivé body kmitají s různou výchylkou a fází. Stojaté vlnění vznikne tehdy, pokud se vlivem odrazu v tělese superponují dvě vlnění stejného druhu a šíří se proti sobě stejnou rychlostí. Rozložení maxim a minim výchylek kmitajících bodů prostředí se u stojatého vlnění v čase nemění. Stojaté vlnění je určitý druh kmitání. Oba uvedené jevy tj. mechanické kmitání a vlnění se v praxi superponují.[5]



Obr.1 Absolutní a relativní kmitání. [2]

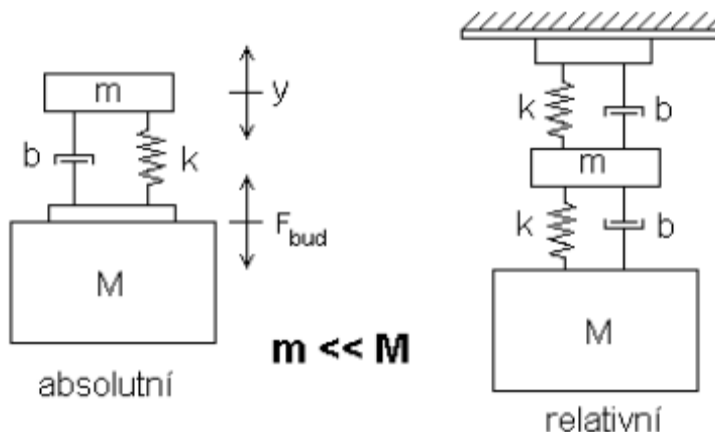
Žádný stroj nelze vyrobit, aby za provozu nebyl doprovázen vibracemi. Tyto mechanické kmity jsou pro každý stroj charakteristickou veličinou a odráží jeho vnitřní vazby a stavy a také spojení s okolím. Protože vibrační diagnostika je velice propracovaná metoda zjišťování stavu strojů, jsou vibrace vhodnými diagnostickými signály pro komplexní informace o technických stavech objektů. Mimo informací o vnitřních stavech jednotlivých uzlů a dílů mohou vibrace podat údaje o místě a příčině poruchy s vysokou přesností.

Kmitání je spojeno s dynamickým namáháním stroje a technickým stavem ložisek, hřídelí převodovek, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, nevyvážených rotujících součástí, vůlemi v kluzných ložiscích atd. Technický stav je dán opotřebením, uvolněním spojů, únavovými lomy, korozí atd.[2]

Kmitání dělíme na periodické, neperiodické a náhodné. Pokud periodické kmitání obsahuje jedinou frekvenci, nazýváme ho harmonické. Další rozlišení u strojů a zařízení je na absolutní a relativní kmitání (viz obr. 1). U absolutního kmitání tělesa je jeho pohyb vztahován k pevnému bodu (gravitační pole zeměkoule), relativní je vyhodnocováno vůči zvolenému reálnému bodu.[2] Podle stejného principu můžeme rozlišit senzory kmitání na:

- senzory absolutní
- senzory relativní

Snímače obou přibližuje obr. 2.



Obr.2 Mechanický model absolutního a relativního snímače vibrací.[2]

Diferenciální rovnice, kterou lze popsat zjednodušeně kmitání seismické hmoty snímače, nabývá podoby:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = Ma = F_s \quad (1)$$

Principiálně může být snímač vibrací řešen jako snímač výchylky kmitů, rychlosti kmitů nebo zrychlení kmitů – akcelerometr, což je dnes také nejčastější případ. Snímání diagnostických signálů se děje při elektronickém zpracování dat senzory, které převádějí

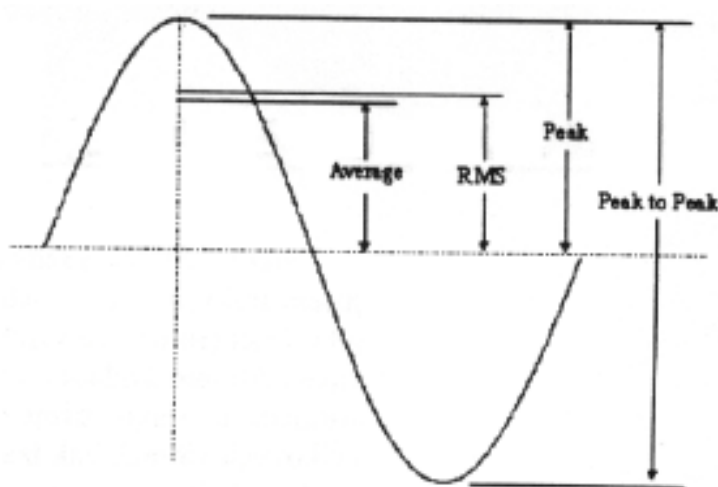
mechanickou veličinu na elektrický signál. Elektrické senzory neelektrických veličin dělíme do dvou skupin na aktivní (nepotřebují ke svému provozu zdroj elektrické energie) a pasivní (ke své funkci potřebují napájení z vnějšího zdroje elektrické energie).

Celkové vibrace představují celkovou vibrační energii měřenou v jistém frekvenčním rozsahu. Měřením celkových vibrací stroje nebo jeho částí a porovnáním této hodnoty s její normální úrovní se získají informace o stavu stroje.[2]

Měření celkových vibrací používá tato vyjádření: špičková hodnota (peak), špička – špička (peak to peak), průměrná hodnota (average) a efektivní hodnota (RMS).

Špičková hodnota (výkmit) určuje vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní. Hodnota *špička – špička* udává největší rozkmit hodnoceného sinusového kmitu a její použití je výhodné tam, kde pro hodnocení chvění je závazná výchylka chvění.

Průměrná hodnota je průměrnou hodnotou amplitudy průběhu vlny. U ideálního sinusového průběhu se průměrná hodnota rovná nule (průběh v kladném i v záporném stavu je shodný). Většina průběhu vln však nemá ideální sinusovou charakteristiku. *RMS (efektivní hodnota)* je odvozena matematickou cestou, porovnáváním energií nebo výkonu stejnosměrného a střídavého proudu. U ideální sinusové křivky je efektivní hodnota rovna 0,707 ze špičkové hodnoty. Vše názorně ukazuje obr. 3.[2]



Špička (Peak) = 1,0
 Efektivní hodnota (RMS) = 0,707 x špička
 Průměrná hodnota (Average) = 0,637 x špička
 Špička-špička (Peak-to-Peak) = 2 x špička (někdy také rozkmit)

Obr.3 Ideální harmonický pohyb.[2]

Je-li základní harmonický pohyb popsatelný rovnicí

$$x(t) = X_0 \cdot \sin \omega t, \quad (2)$$

pak střední hodnota veličiny je

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (3)$$

a efektivní hodnota této veličiny

$$x_{\text{ef}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt = RMS \quad (4)$$

Měření vibrací je vlastně měřením periodického pohybu. U měření vibrací jsou důležité tři měřitelné veličiny (charakteristiky), a to výchylka, rychlost a zrychlení. K získání správné poruchové charakteristiky se musí k měření vibrací zvolit vhodný způsob měření a typ snímače.

Výchylka určuje změnu vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze. Ve vibrační diagnostice jsou dnes nejrozšířenější indukčnostní snímače využívající závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které měří relativní vzdálenost mezi dvěma povrchy.

Rychlost se měří v $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, jako rychlost změny výchylky vibračního signálu. Je to nejběžnější způsob měření vibrací. Nejčastěji se používají poměrně levné akcelerometry, z nichž se hodnota rychlosti získává integrováním hodnot zrychlení.

Vibrace ve formě *zrychlení* se měří pomocí akcelerometru. Akcelerometr obvykle obsahuje jeden nebo více piezoelektrických krystalů a hmotné těleso. Je-li piezoelektrický krystal deformován, vzniká elektrický signál úměrný zrychlení. Krystal je deformován hmotným tělesem, když těleso kmitá spolu s částí, ke které je akcelerometr uchycen.[2]

4.2. Senzory výchylky, polohy a posuvu

Senzory výchylky, polohy a posuvu realizujeme na indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém aj. principu. Ve vibrodiagnostice jsou nejrozšířenější indukčnostní senzory. Vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu jsou tyto senzory náchylné 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.

Snímače výchylky kmitů zpravidla vynikají vysokou hmotností oproti nízké tuhosti a tlumení. V praxi se vyskytují dosti často, avšak v této skupině snímačů nalezneme i všechny ostatní snímače posunutí, což je velmi důležitý parametr například u délkových teplotních dilatací tepelně energetických strojů apod.[2]

4.3. Senzory rychlosti

Pro měření rychlosti kmitání se používají buď senzory zrychlení a výstupní signál z tohoto senzoru se integruje, nebo senzor elektrodynamický. Snímač rychlosti kmitů by měl vynikat vysokým tlumením oproti nízké hmotnosti a tuhosti.[2]

Výhody elektrodynamických senzorů rychlosti:

- nízká cena
- vysoká úroveň výstupního signálu i při nízkých kmitočtech kmitání
- velmi malý vnitřní odpor
- možná aplikace bez zdroje napájení

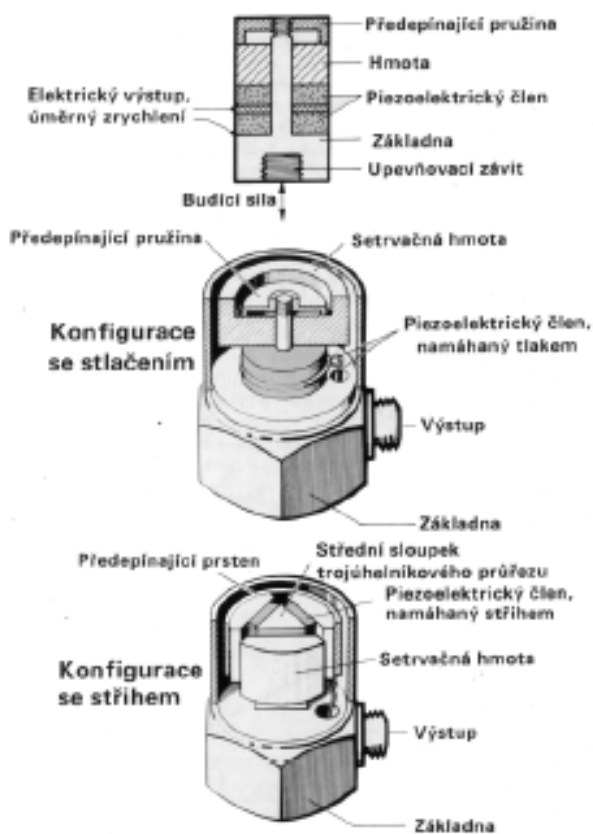
Nevýhody:

- omezení horního kmitočtu (max.3 500 Hz)
- citlivost na parazitní magnetická pole

I přes uvedené výhody se dnes v naprosté většině moderních diagnostických systémů používají piezoelektrické akcelerometry s integrovanou elektronikou.

4.4. Sensory zrychlení – akcelerometry [2]

Kromě nejužívanějších piezoelektrických akcelerometrů lze pro měření zrychlení kmitání použít integrované tenzometrické nebo kapacitní akcelerometry nebo elektrodynamické senzory rychlosti doplněné derivačním obvodem.



Obr.4 Možná uspořádání piezoelektrických akcelerometrů.[2]

Výhody piezoelektrických akcelerometrů:

- velký dynamický rozsah senzorů od 5 000 do 10 000 Hz, se speciální aparaturou lze měřit od 0,01 Hz do 20 000 Hz
- malé rozměry a hmotnost akcelerometrů
- necitlivost na parazitní magnetické pole

Nevýhody:

- vyšší pořizovací cena měřicího řetězce
- nízká úroveň výstupního signálu, nelze aplikovat bez zesilovače a tedy bez napájecího zdroje

4.5. Analýza signálu v časové oblasti

Vyhodnocení signálu v časové oblasti dělíme na vyhodnocení celkového kmitání a časových průběhů signálů. Celkové kmitání souvisí se všemi frekvencemi kmitání v daném měřicím bodě. Porovnává se naměřená hodnota celkového kmitání s předchozím měřením, kdy stroj pracoval bez poruchy. Další srovnání je s nastavenými kritickými hodnotami. Diagnostikování stroje pomocí celkového kmitání je standardní metoda, výhodou je rychlost vyhodnocení a nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je, že signály s malou amplitudou se ztrácejí ve vibračním šumu (z převodovek, ze sousedního stroje) a tato metoda neumožňuje lokalizovat příčinu kmitání stroje.

Pomocí databáze výsledků měření celkového kmitání byly sestaveny doporučené mezní hodnoty kmitání, prostřednictvím efektivní rychlosti kmitání v kmitočtovém pásmu 10 - 1000 Hz. Příkladem je vyhodnocení mohutnosti kmitání podle ISO 2372. Mechanické kmitání se měří při jmenovitých otáčkách stroje na ložiskových víkách, případně na ložiskových štítech nebo kostře a to ve třech vzájemně kolmých směrech.[2]

4.6. Analýza signálu ve frekvenční oblasti

Správná aplikace frekvenční analýzy odstraňuje nevýhody analýzy v časové oblasti. Její pomocí můžeme lokalizovat vznikající poruchy jednotlivých částí objektu. Úplná frekvenční analýza je reprezentována jak amplitudovým, tak fázovým spektrem. Fázové spektrum je zvláště důležité pro indikaci typu nevyváženosti a samozřejmě pro metody vyvažování. Frekvenční spektrum tvoří podklad pro rozlišení závad na rotujícím stroji (např. nevyváženosti, ozubená soukolí, ložiska a pod.). Průběžné monitorování, zobrazení rozběhů a doběhů strojů a trendy postupného zhoršování technického stavu je možné analyzovat na trojrozměrných diagramech.[2]

Značka	Jednotka	Název a vysvětlení
S	m	okamžitá výchylka kmitů, tj. vzdálenost kmitajícího bodu (tělesa) od zvoleného bodu (displacement)
x_0	m	amplituda kmitání, tj. maximální hodnota určující veličiny harmonického kmitání (amplitude)
x_r	m	rozkmit, tj. maximální rozdíl výkmitů v daném časovém intervalu (peak to peak)
φ	rad	fáze harmonické veličiny v čase $t = 0$; (phase angle)
ω	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	úhlový kmitočet, úhlová frekvence (angular frequency), (phase angle), $\omega = 2\pi f$
T	s	perioda, tj. nejkratší doba, po níž se kmitavý děj a tedy také každá hodnota určující veličiny pravidelně opakuje (period); (pozn.: základní perioda kmitání je z hlediska spektrální analýzy nejdelší perioda kmitání) (period of vibration)
F	Hz	frekvence, kmitočet, platí: $f = 1/T$ (frequency)
V	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost kmitání $v = ds/dt$ (velocity); pro harmonické kmitání platí $v_m = s_m\omega$; složené periodické kmitání lze po rozkladu na jednotlivé harmonické složky definovat efektivní hodnotou rychlosti dle vztahu: $v_{\text{ef}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_{0i}^2$
U	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	mohutnost kmitání, tj. maximální efektivní hodnota rychlosti kmitání v daném časovém intervalu na vybraných místech (severity)
A	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	zrychlení kmitání $a = dv/dt$ (acceleration); pro harmonické kmitání měřeného objektu platí: $a_0 = \omega \cdot v_0 = \omega^2 \cdot s_0$ $a_{\text{ef}} = \omega \cdot v_{\text{ef}}$
B	$\text{m}\cdot\text{s}^{-3}$	ryv, tj. veličina udávající časovou změnu zrychlení $b = da/dt$ (jerk)
\bar{x}		střední hodnota určující veličiny (mean value) $\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad \bar{x} \doteq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) $ $x(t)$ je určující veličina mechanického kmitání; $x_i(t)$ jsou diskrétní hodnoty veličiny; T je daný časový interval pro $x(t)$; (platí jak pro periodické, neperiodické tak i náhodné kmitání)
x_{ef}		Efektivní hodnota určující veličiny (RMS...root-means-square) $x_{\text{ef}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad \bar{x}_{\text{ef}}^2 \doteq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2(t)$ $x(t)$ je určující veličina mechanického kmitání (většinou rychlost nebo zrychlení); $x_i(t)$ jsou diskrétní hodnoty veličiny; T je daný časový interval pro $x(t)$; (platí jak pro periodické, neperiodické tak i náhodné kmitání)
L	dB	hladina určující veličiny kmitání $L = 20 \log \frac{A}{A_0}$, kde A_0 je referenční hodnota určující veličiny
Poznámka: Některé referenční (vztažné) hodnoty vibrací. Odpovídají hladině $L = 0$ dB.		
	- rychlost kmitavého pohybu	$v = 1,00 \cdot 10^{-9} [\text{m/s}]$
	- zrychlení kmitavého pohybu	$a = 1,00 \cdot 10^{-6} [\text{m/s}^2]$
	- síla	$F = 1,00 \cdot 10^{-6} [\text{N}]$

Tab.1 Přehled vybraných veličin a vztahů ve vibrodiagnostice.[2]

5. PIEZOELEKTRICKÉ AKCELEROMETRY

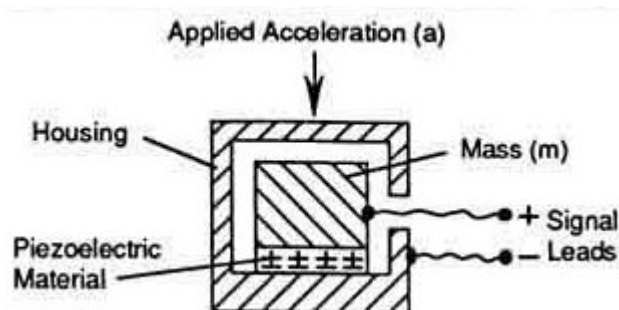
5.1. Základní vlastnosti

- využívají piezoelektrický materiál, který generuje náboj úměrný mechanickému namáhání vzniklé působící akcelerací
- měření náboje piezokrystalu probíhá buď přímo pomocí externí elektroniky s vysokou vstupní impedancí, nebo častěji vnitřní elektronika senzoru konvertuje náboj na napěťový výstup s nízkou impedancí
- jednoduchá konstrukce umožňuje senzor napojit na jednoduchý vyhodnocovací obvod
- nemohou být použity pro měření frekvencí nižších než 0.1 Hz, tedy měření konstantního zrychlení

5.2. Základní princip a struktura piezoelektrických akcelerometrů

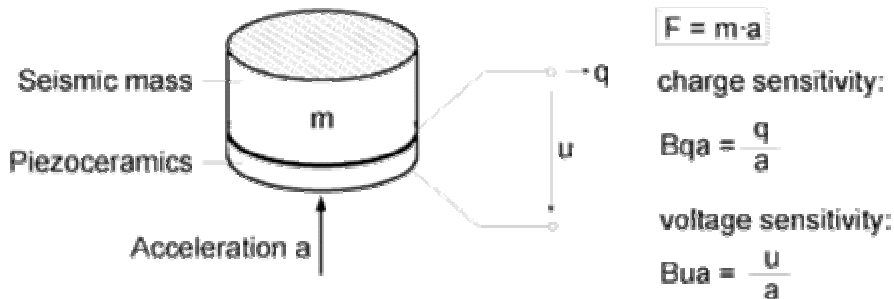
Základ piezoelektrických akcelerometrů tvoří dvě hlavní části:

- *Piezoelektrický materiál (Piezoceramic material)* - snímač měřící zrychlení
- *Seismická hmota (Seismic mass)* - převádí dle Newtonova zákona hodnotu zrychlení na sílu ($F=m \cdot a$)



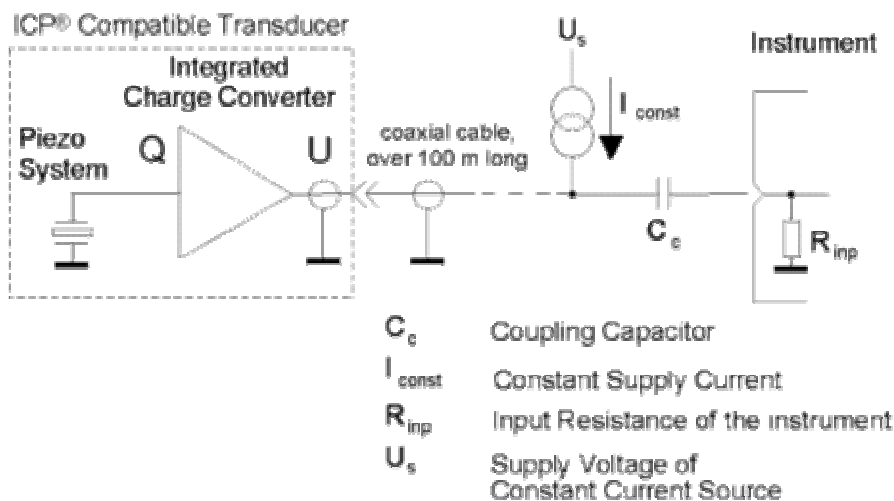
Obr.5 Nejjednodušší blokové schéma principu piezoelektrických akcelerometrů.[7]

Jedna strana piezoelektrického materiálu (snímač, resp. převodník zrychlení) je upevněn na tuhou podpěru základny senzoru. Část pojmenovaná jako seismická hmota je připevněna na piezosnímač, případně také k druhé straně pouzdra – (viz obr. 5). Jestliže je akcelerometr vystaven zrychlení a (vibracím, akceleraci, otřesům), generovaná síla F , která působí na piezoelektrický element, způsobí vygenerování náboje, resp. napětí na výstupu senzoru. Podle Newtonova zákona je tato síla úměrná zdroji zrychlení a seismické hmotě. Piezoelektrický efekt tak generuje na výstupu náboj q úměrný působící síle. Protože seismická hmota má konstantní hmotnost, výstupní signál v podobě náboje je úměrný akceleraci senzoru. Pokud je akcelerometr pevně upevněn k testovanému objektu, měří i jeho zrychlení (zrychlení celé soustavy). Akcelerometr charakterizuje nábojová citlivost (charge sensitivity) Bqa , resp. napěťová citlivost (voltage sensitivity) Bua – (viz obr. 6).[7]



Obr.6 Fyzikální princip piezoelektrického akcelerometru se základními výpočty.[7]

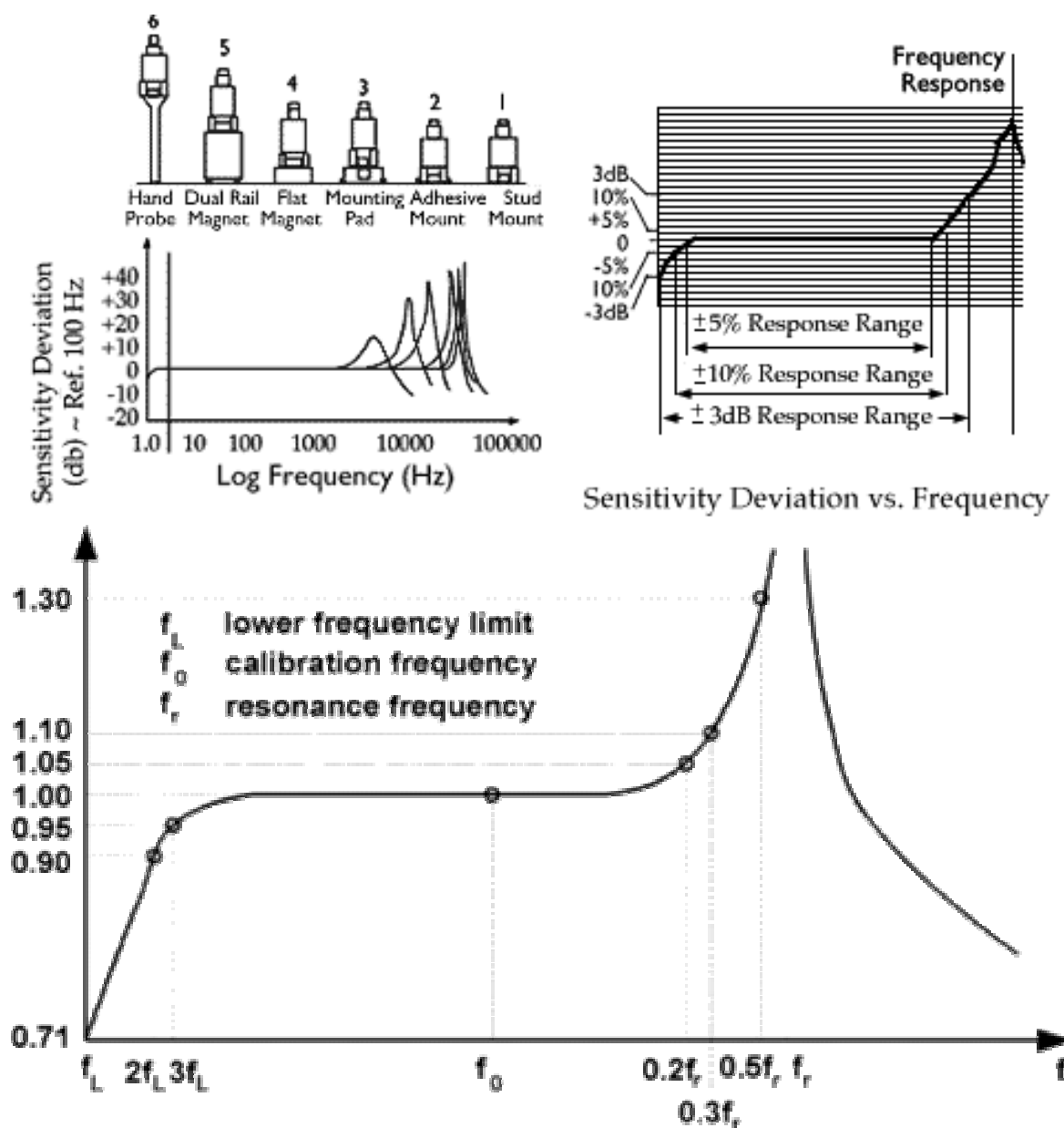
Piezoelektrický element je připojen na výstupní elektrické rozhraní přes pár elektrod. Vlastnosti výstupního signálu jsou obvykle dány vnitřními integrovanými elektrickými obvody ICP (Integrated Circuit - Piezoelectric), které přeměňují vysokoimpedanční signál v podobě náboje Q na nízkoimpedanční napěťový signál U (viz obr.7).[7]



Obr.7 Blokové principiální schéma a vlivy připojení piezoelektrického akcelerometru k měřicímu systému uživatele.[7]

Avšak u reálných piezoelektrických akcelerometrů samozřejmě existují limity měření. U tohoto druhu senzorů je možné zrychlení měřit jen uvnitř platného provozního frekvenčního rozsahu, který je daný konkrétní konstrukcí senzoru, protože citlivost je zvláště u některých provedení významně závislá na frekvenci.

Z tohoto pohledu může být piezoelektrický akcelerometr považován za mechanickou dolnofrekvenční propust s rezonanční špičkou. Seismická hmota a piezokeramika (včetně dalších pružných komponent) formují pružnou hmotu systému, který se tak chová jako pružina s vlastní rezonancí, a tak definuje horní frekvenční limit akcelerometru. Aby bylo dosaženo širšího provozního frekvenčního rozsahu, měla by být rezonanční frekvence pružné hmoty co nejvyšší. Toho se obvykle dosahuje ubráním seismické hmoty. To však naopak snižuje citlivost senzoru.[7]



Obr.8 Typická frekvenční závislost piezoakcelerometrů a závislost citlivosti (sensitivity) na frekvenci (frequency) a provedení senzoru.[7]

Na frekvenční křivce lze pozorovat několik užitečných rozsahů. Na zhruba pětina rezonanční frekvence je odezva senzoru 1.05. To znamená, že měřicí chyba v porovnání s nižšími frekvencemi je 5%. Na zhruba 1/3 rozsahu je chyba 10 %. Z tohoto důvodu lze frekvenční rozsah považovat za lineární právě do 1/3 hodnoty rezonanční frekvence. 3dB limit s přibližně 30 % chybou obdržíme zhruba na 1/2 hodnoty rezonanční frekvence. Spodní frekvenční limit hlavně závisí na zvoleném předzesilovači a může být často donastaven. Pro napěťové zesilovače je spodní frekvenční limit funkcí RC časově konstantě formované akcelerometrem, kabelem a vstupní kapacitou zesilovače dohromady se vstupním odporem zesilovače R_{inp} (viz obr.7).[7]

5.3. Typy piezoelektrických akcelerometrů

Akcelerometry pro měření klasického zrychlení, nárazů a vibrací využívají mírně odlišné konstrukce. Ty upřednostňují určité požadované vlastnosti na úkor jiných. Rozdílné je hlavně vzájemné uspořádání komponent: piezoelektrického snímače, seismické hmoty a pouzdra.[7] Nejběžnější jsou následující tři provedení:

- *Smykový mód (Shear mode)* - pro senzory se zvýšenou odolností na vliv teploty a parazitní vibrace pouzdra
- *Ohybový mód (Flexural mode)* - pro velmi citlivé senzory - seismické akcelerometry
- *Kompresní mód (Compression Mode)* - základní a nejjednodušší provedení - běžné průmyslové akcelerometry

6. MIKROČIPOVÉ AKCELEROMETRY

6.1. Použití

Akcelerometry lze použít v mnoha aplikacích, jako například:

- Automobilový průmysl - senzory pro airbagy, zařízení pro řízení jízdní stability vozidla (ESP)
- Měření vibrací (ochrana harddisků, hlídání funkce motorů)
- 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

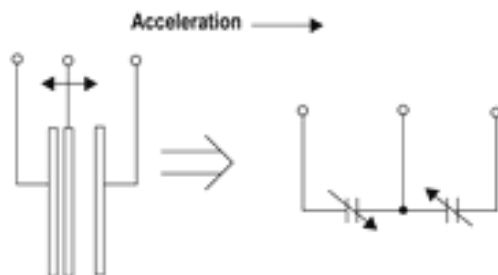
V praktickém testu byl použit kapacitní akcelerometr MMA 7260Q s integrovaným zpracováním signálů, jednopólovým filtrem typu dolní propust, teplotní kompenzací a externí volbou měřicího rozsahu a citlivosti od firmy Freescale, pro svoji nízkou cenu a nízkou spotřebu v běžném provozu. Akcelerometr je tedy vhodný i pro bateriově napájená zařízení.

6.2. Princip funkce integrovaného senzoru Freescale

Freescale akcelerometr, resp. senzor zrychlení, je povrchově integrované mikrozařízení, které sestává ze dvou částí:

- senzor - mechanické části - povrchově integrované kapacitní měřící buňky (g-cells)
- ASIC integrovaných obvodů pro zpracování signálů ze senzoru

Celá mechanická struktura senzoru spolu s vyhodnocovacími obvody na jednom monolitickém integrovaném obvodu. Princip měření je založen na změně kapacity vnitřního proměnného integrovaného kondenzátoru vlivem působící síly vzniklé zrychlením pouzdra senzoru. Struktura obvodu obsahuje polykřemíkový mikromechanický senzor a integrované obvody pro zpracování signálu ze senzoru. Struktura senzoru umožňuje měřit kladná i záporná statická i dynamická zrychlení.[8]



Obr.9 Princip senzoru akcelerometru.[8]

Samotný integrovaný senzor je vlastně povrchová mikromechanická polykřemíková struktura (nosník, pružiny, pevné úchyty) "plovoucí" na povrchu křemíkového monokrystalu. Křemíkové pružiny umožňují pohyb celé mechanické struktury po povrchu monokrystalu a zároveň poskytují mechanický odpor síle vzniklé zrychlením. Prohnutí a deformace takovéto struktury je převedena na změnu kapacity diferenciálního kondenzátoru (viz obr.9). Ten je složen z dvou pevných desek a desky pevně spojené s deformujícím se nosníkem (beam).[8]

6.3. Akcelerometr MMA 7260Q

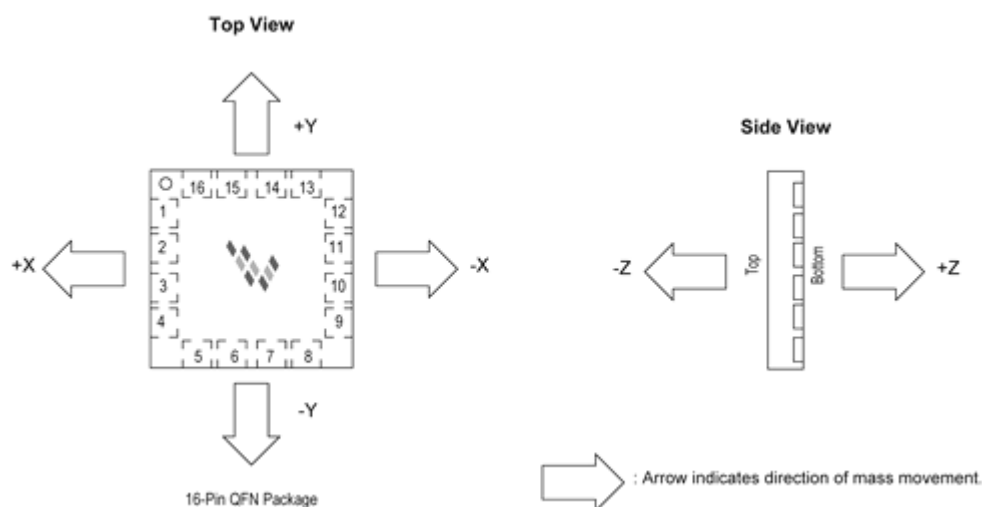
MMA7260Q je levný senzor zrychlení s možností externího nastavení a změny rozsahu v pevných krocích $\pm 1.5g/2g/4g/6g$ přivedením logických úrovní napětí 0 nebo 1 na dva vstupy g-Select (viz tabulka 2). Tak lze při použití libovolného mikrokontroléru (viz obr.12) softwarově nastavit vnitřní zisk senzoru a tím měnit rozsah i citlivost. To je vhodné pro aplikace vyžadující rozdílnou citlivost pro optimální výkon a přesnost měření. Dále je součástí senzoru vyhodnocovací logika, provádějící převod působícího zrychlení na výstupní napěťový signál.[8]

6.3.1. Hlavní parametry MMA7260Q

- *Napájení:* 3.3 V, cca 500 μA , sleep mód = 3 μA
- *Rozsah měření zrychlení:* $\pm 1.5g / 2g / 4g / 6g$ v osách X, Y, Z, volba rozsahu (viz tab.2)
- *Výstup:*
 - napěťový signál 1.65 V při 0 g (teplotní drift $\pm 2 \text{ mg}/^\circ\text{C}$)
 - citlivost 200 až 800 mV/g (viz. tab. 2.) (teplotní drift $\pm 2 \text{ } \%/^\circ\text{C}$)
- *Max. zrychlení bez poškození senzoru:* $\pm 2000 \text{ g}$
- *Frekvenční šířka pásma měření zrychlení:* v osách X a Y = 350Hz, v ose Z = 150 Hz
- *Teplotní rozsah:* -20°C až $+85^\circ\text{C}$
- *Nelinearita:* max. $\pm 1 \text{ } \%$ plného rozsahu
- *Pouzdro:* 16pin QFN, rozměry 6 x 6x 1.45 mm

g-Select2	g-Select1	g-Range	Sensitivity
0	0	1.5g	800mV/g
0	1	2g	600mV/g
1	0	4g	300mV/g
1	1	6g	200mV/g

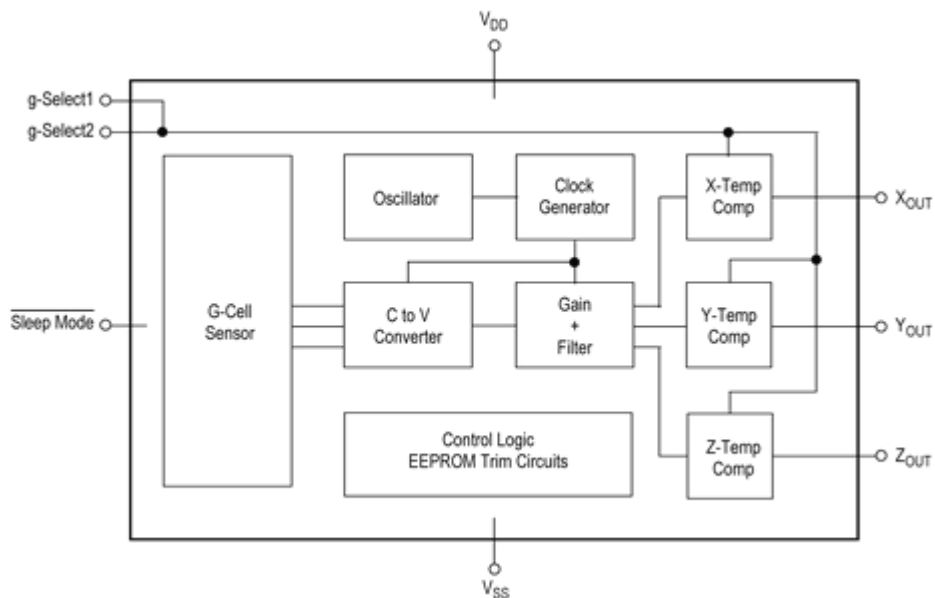
Tab.2 Volba rozsahu (range) a citlivost (sensitivity) senzoru přivedením log. úrovní na vstupy g-Select.[8]



Obr.10 Příklad orientace senzoru pro měření zrychlení v osách X-Y a Z.[8]

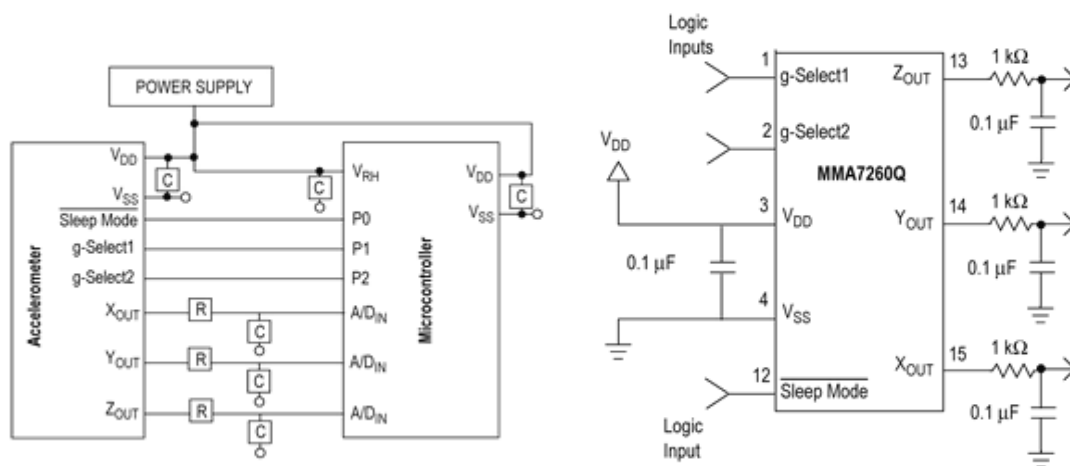
6.3.2. Vnitřní zapojení senzoru

Na obrázku 13 je blokové schéma senzoru MMA7260Q obsahující hlavní části. Základem je samotný senzor zrychlení G-Cell, který pracuje jako převodník zrychlení $g \rightarrow$ kapacita C . Jeho výstup je přiveden na vstup převodníku kapacita $C \rightarrow$ napětí V (C to V Converter) a poté na obvody zesílení a filtrace (Gain + Filter). Protože bloky převodníku i 1-pólového filtru pracují na principu spínaných kapacitorů (nejjednodušší varianta pro plnou integraci), je na jejich vstup přiveden hodinový spínací signál z oscilátoru upravený v bloku generátoru hodin (Clock Generator). Spínací / vzorkovací frekvence je 11 kHz. Proto by vzorkovací frekvence a hodinové signály dále připojených MCU, A/D převodníků nebo spínaných zdrojů měli být jiné, aby nenastávalo k interferencím.[8]



Obr.11 Vnitřní bloková struktura senzoru MMA7260Q.[8]

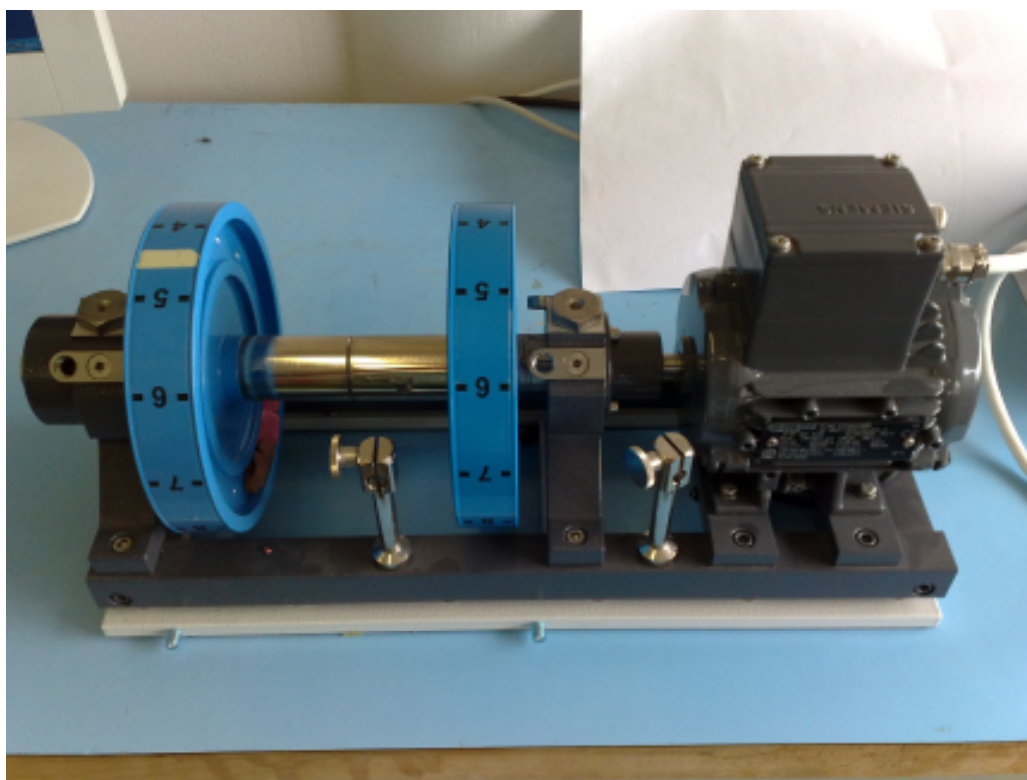
6.3.3. Příklad obvodového zapojení



Obr.12 Příklad propojení akcelerometru MMA7260Q s MCU (vlevo) a volba hodnot odporů R a kondenzátorů C (vpravo).[8]

7. PRAKTICKÝ TEST

K testu byl použit model vibračního stroje, který se skládá ze dvou kotoučů osazených na hřídeli. Hřídel je uložena v ložiscích, která jsou pevně uložena v rámu stroje. Zařízení je poháněno motorem Siemens 0,09 kW a jeho součástí je i frekvenční měnič Siemens Sinamics G110. Použitím plastické hmoty, která se přilepila na kotouč, jsme dosáhli jednoduché vibrace. Při rotaci kotouče pak tato vibrace způsobovala harmonické kmitání, které bylo snímáno dvojicí akcelerometrů (piezoelektrickým a MMA 7260Q).

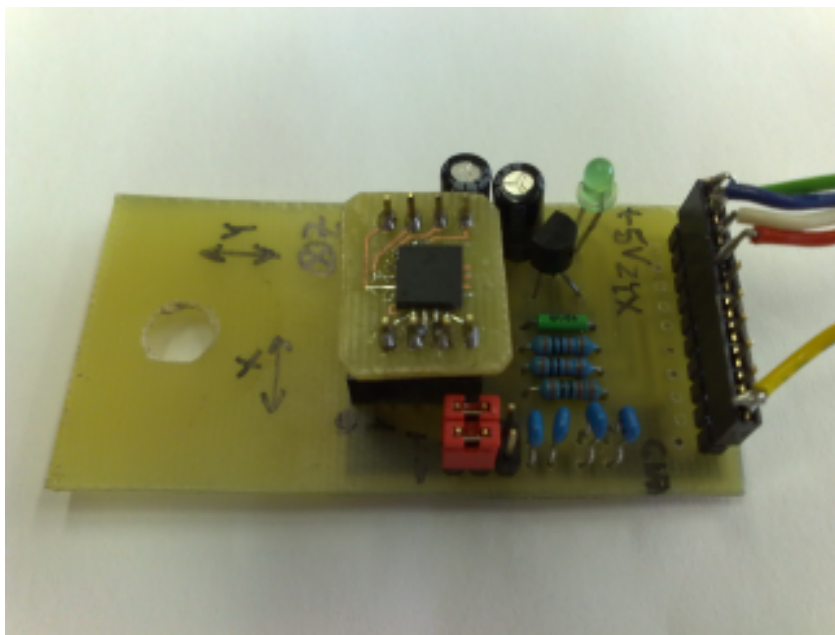


Obr.13 Model vibračního stroje.

7.1. Zapojení akcelerometru MMA 7260Q

Akcelerometr MMA 7260Q byl standardně zapojen dle obvodového zapojení (viz obr. 12). Pro návrh plošného spoje jsem použil freeware verzi programu Eagle od firmy CadSoft. Eagle je editor pro návrh desek plošných spojů.

Byly vytvořeny dvě desky. Akcelerometru byla vytvořena maximalizace, tzn., že je napájen na samostatné menší desce. Je to z důvodu dalšího použití senzoru, než jen pro tuto práci. Druhá deska obsahuje ostatní součástky dle obvodového zapojení (viz obr.12). Obě jsou spojeny přes pájecí kolíky.



Obr.14 Deska s akcelerometrem MMA 7260Q.

Součástky použité na desce:

- 2 x 3 pinový jumper
- lineární regulátor napětí 3,3 V
- 4 x rezistor
- 2 x kondenzátor
- led dioda
- sada pájecích kolíků

7.2. Použité vybavení

Piezoelektrický snímač CTC AC 150-1A

- citlivost 100 mV/g



Obr. 15 Piezoelektrický snímač CTC AC 150-1A

Měřicí přístroj Adash 4900 Vibrio

Obr. 16 Měřicí přístroj Adash 4900 Vibrio

Vstupy:	1x IPC (pro připojení akcelerometru)
Výstupy:	1x mono AC, 8 ohm /0,5 W (pro připojení sluchátek)
Měřicí pásma:	- 10 Hz – 1 kHz [mm/s] - 2 Hz – 200 Hz [mm/s] - 5 kHz – 16 kHz [g] - 1,5 kHz – 16 kHz [g] - 0,5 kHz – 16 kHz [g]
Zpracování dat:	- měření efektivních hodnot (TRUE RMS) - měření špičkových hodnot (TRUE PEAK) - odhad otáčkové frekvence (120 – 12 000 RPM) - spektrální analýza - časový signál
Měřicí rozsah:	automatický, max. 80g peak pro snímač 100 mV/g, +/-12V peak AC

Laboratorní zdroj Statron 2229

Obr. 17 Laboratorní zdroj Statron 2229

Výstupní napětí regulovatelné: 0 - 30 V
Výstupní proud regulovatelný: 0 - 3 A
Výstupní napětí / proud pevné: +/- 15V / 0,5A
Výstupní napětí / proud pevné: 5V / 1A

Fluke 123 industrial scopemeter



Obr. 18 Fluke 123 industrial scopemeter

Vlnový rozsah: 20 MHz
Citlivost: 5 mV - 500 V/div

Měřicí karta PCI 6024E



Obr. 19 Měřicí karta PCI 6024E

Karta obsahuje:

- 16 analogových vstupů
- 12-bitový A/D převodník 200kS/s
- 2 analogové výstupy
- 8 digitálních vstupů i výstupů

7.3. Praktické proměření akcelerometrů

Do desky s akcelerometrem MMA 7260Q byla vyvrtána díra tak, aby se dala připevnit k piezoelektrickému snímači (viz obr. 20) a oba jsou pevně spojeny s magnetem. Takto připravené akcelerometry byly s magnetem přichyceny na model vibračního stroje, aby vibrace způsobené vibračním zařízením snímaly současně.



Obr. 20 Uchycení obou akcelerometrů na magnet.

7.3.1. Měření č. 1

Pomocí frekvenčního měniče se měnily otáčky vibračního zařízení a způsobované vibrace byly oběma akcelerometry snímány. Ke snímání hodnot byly použity přístroje Fluke 123 industrial scopemeter a měřicí přístroj Adash 4900 Vibrio. Hodnoty jsem vizuálně sledoval a zapisoval do poznámkového sešitu. Měření jsem provedl vícekrát ve dvou osách a průměrné hodnoty zapsal do tabulky. Osa X, horizontálně kolmo na hřídel a osa Y, vertikálně vzhledem k hřídeli.

Tabulka 3 obsahuje naměřené hodnoty

měření v ose X					měření v ose Y				
ot/min	rms		peak		ot/min	rms		peak	
	freescala(V)	piezo(g)	freescala(V)	piezo(g)		freescala(V)	piezo(g)	freescala(V)	piezo(g)
600	0,176	0,030	1,930	0,080	600	0,221	0,030	2,740	0,180
	0,178	0,030	1,950	0,080		0,22	0,030	2,750	0,180
	0,178	0,030	1,940	0,080		0,218	0,030	2,740	0,170
	0,179	0,030	1,940	0,080		0,222	0,030	2,750	0,180
	0,178	0,030	1,950	0,080		0,221	0,030	2,740	0,180
900	0,172	0,020	1,820	0,040	900	0,182	0,020	2,590	0,090
	0,173	0,020	1,820	0,040		0,181	0,020	2,600	0,090
	0,172	0,020	1,830	0,040		0,182	0,020	2,590	0,090
	0,172	0,020	1,830	0,040		0,182	0,020	2,580	0,100
	0,173	0,020	1,850	0,040		0,181	0,020	2,590	0,090
1200	0,174	0,020	1,850	0,060	1200	0,186	0,020	2,630	0,110
	0,173	0,020	1,880	0,060		0,185	0,020	2,630	0,120
	0,174	0,020	1,860	0,060		0,186	0,020	2,640	0,110
	0,173	0,020	1,860	0,060		0,187	0,020	2,620	0,110
	0,174	0,020	1,870	0,060		0,185	0,020	2,640	0,110
1500	0,175	0,030	1,900	0,080	1500	0,19	0,030	2,700	0,150
	0,175	0,030	1,930	0,080		0,192	0,030	2,710	0,150
	0,174	0,030	1,920	0,080		0,192	0,030	2,730	0,160
	0,176	0,030	1,920	0,080		0,192	0,030	2,690	0,150
	0,175	0,030	1,930	0,080		0,191	0,030	2,700	0,150

Tab. 3.

Tabulka 4 obsahuje hodnoty po převedení na dynamické zrychlení

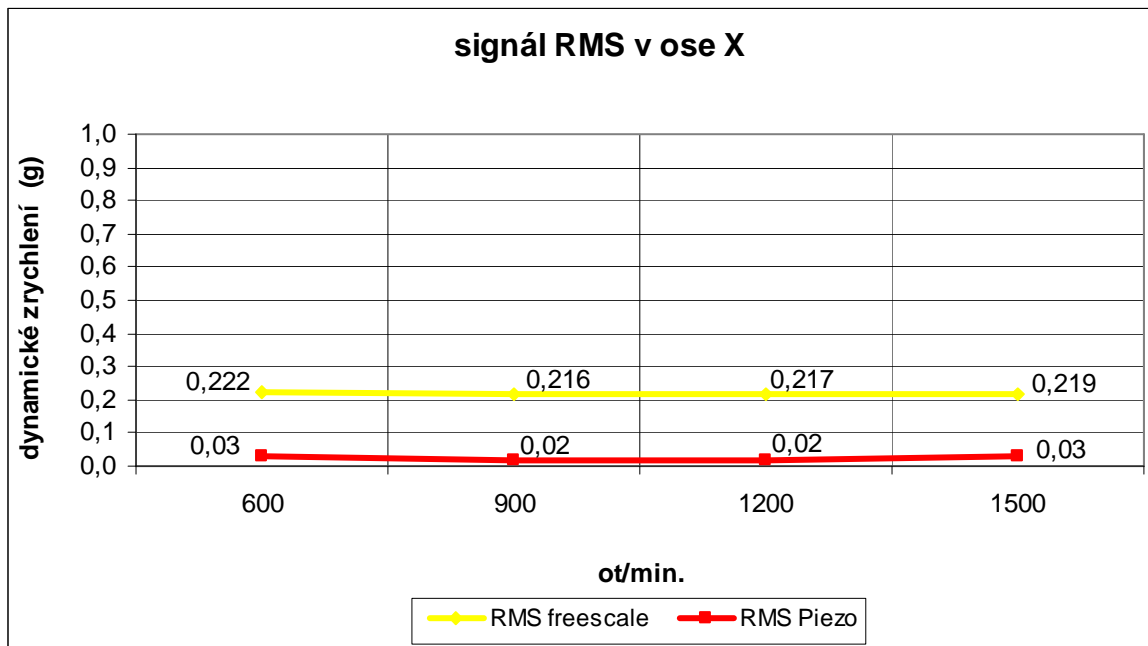
měření v ose X					měření v ose Y				
ot/min	rms		peak		ot/min	rms		peak	
	freescale(g)	piezo(g)	freescale(g)	piezo(g)		freescale(g)	piezo(g)	freescale(g)	piezo(g)
600	0,220	0,030	0,175	0,080	600	0,276	0,030	0,181	0,180
	0,223	0,030	0,188	0,080		0,275	0,030	0,188	0,180
	0,223	0,030	0,181	0,080		0,273	0,030	0,181	0,170
	0,224	0,030	0,181	0,080		0,278	0,030	0,188	0,180
	0,223	0,030	0,188	0,080		0,276	0,030	0,181	0,180
900	0,215	0,020	0,106	0,040		900	0,228	0,020	0,087
	0,216	0,020	0,106	0,040	0,226		0,020	0,094	0,090
	0,215	0,020	0,113	0,040	0,228		0,020	0,087	0,090
	0,215	0,020	0,113	0,040	0,228		0,020	0,081	0,100
	0,216	0,020	0,125	0,040	0,226		0,020	0,087	0,090
1200	0,218	0,020	0,125	0,060	1200	0,233	0,020	0,113	0,110
	0,216	0,020	0,144	0,060		0,231	0,020	0,113	0,120
	0,218	0,020	0,131	0,060		0,233	0,020	0,119	0,110
	0,216	0,020	0,131	0,060		0,234	0,020	0,106	0,110
	0,218	0,020	0,138	0,060		0,231	0,020	0,119	0,110
1500	0,219	0,030	0,156	0,080		1500	0,238	0,030	0,156
	0,219	0,030	0,175	0,080	0,240		0,030	0,163	0,150
	0,218	0,030	0,169	0,080	0,240		0,030	0,175	0,160
	0,220	0,030	0,169	0,080	0,240		0,030	0,150	0,150
	0,219	0,030	0,175	0,080	0,239		0,030	0,156	0,150

Tab. 4.

Tabulka 5 obsahuje aritmetický průměr hodnot z tab. 4

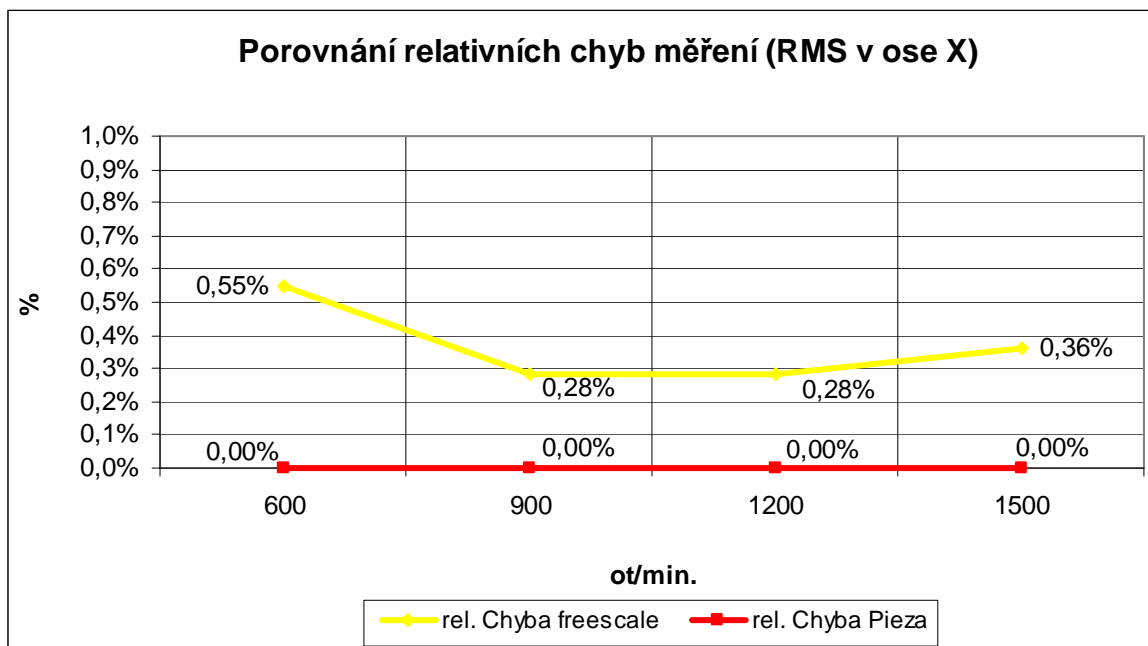
měření v ose X					měření v ose Y				
ot/min	rms		peak		ot/min	rms		peak	
	freescale(g)	piezo(g)	freescale(g)	piezo(g)		freescale(g)	piezo(g)	freescale(g)	piezo(g)
600	0,222	0,030	0,183	0,080	600	0,276	0,030	0,184	0,178
900	0,216	0,020	0,113	0,040	900	0,227	0,020	0,087	0,092
1200	0,217	0,020	0,134	0,060	1200	0,232	0,020	0,114	0,112
1500	0,219	0,030	0,169	0,080	1500	0,239	0,030	0,160	0,152

Tab. 5.

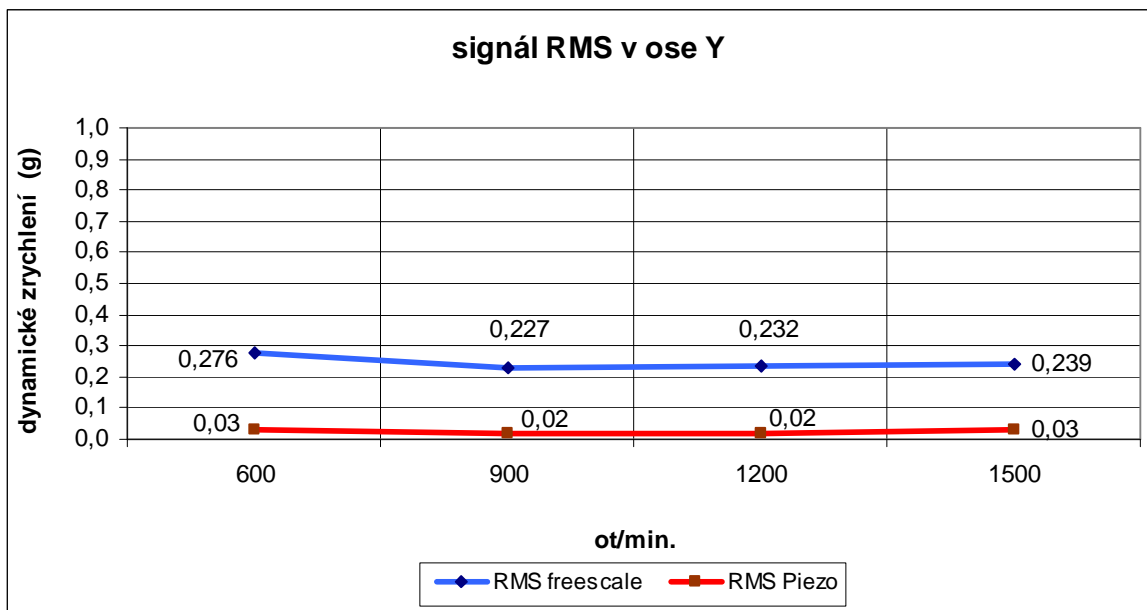


Graf 1.

Aritmetický průměr rozdílu hodnot = 0,193375
 Směrodatná odchylka = 0,003175
 Variační koeficient = 1,64%

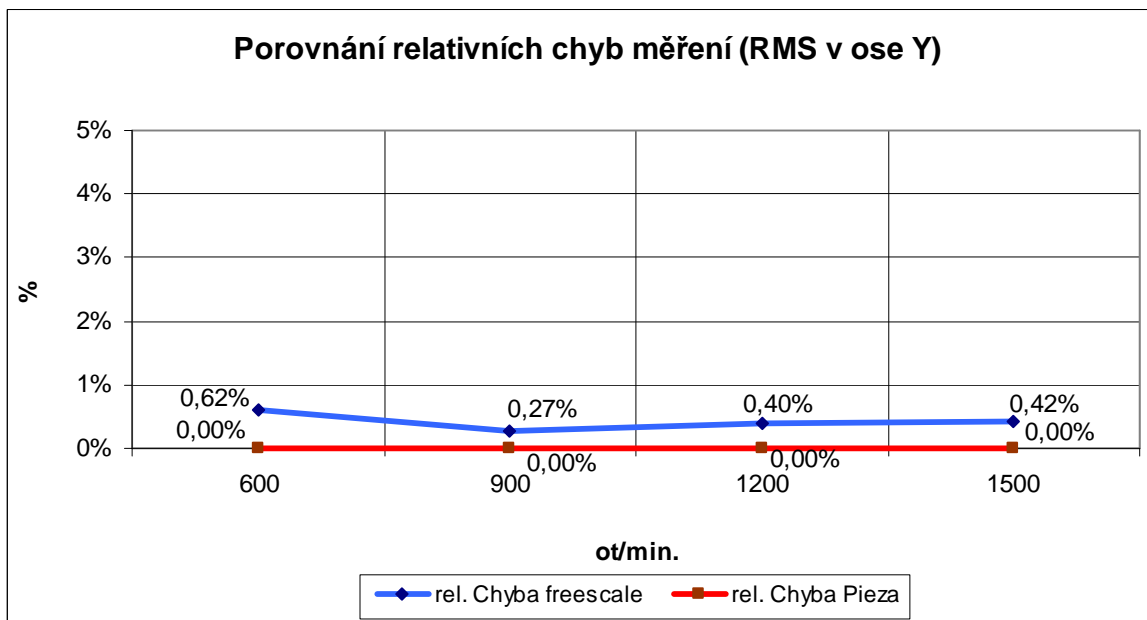


Graf 2.

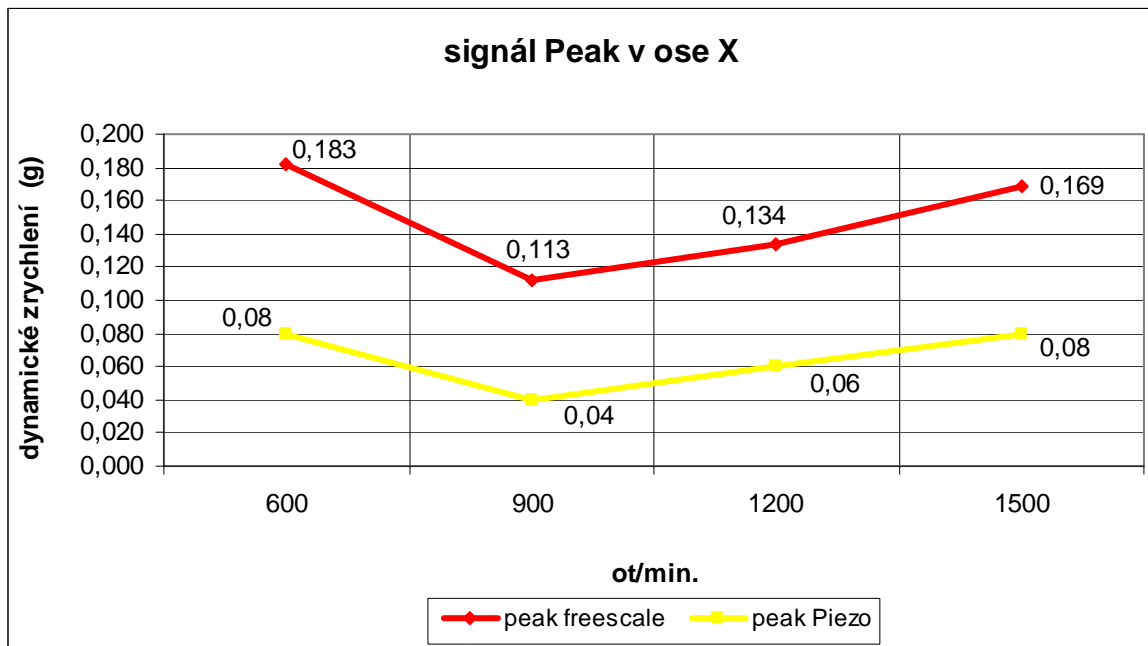


Graf 3.

Aritmetický průměr rozdílu hodnot = 0,2185
 Směrodatná odchylka = 0,015699
 Variační koeficient = 7,19%

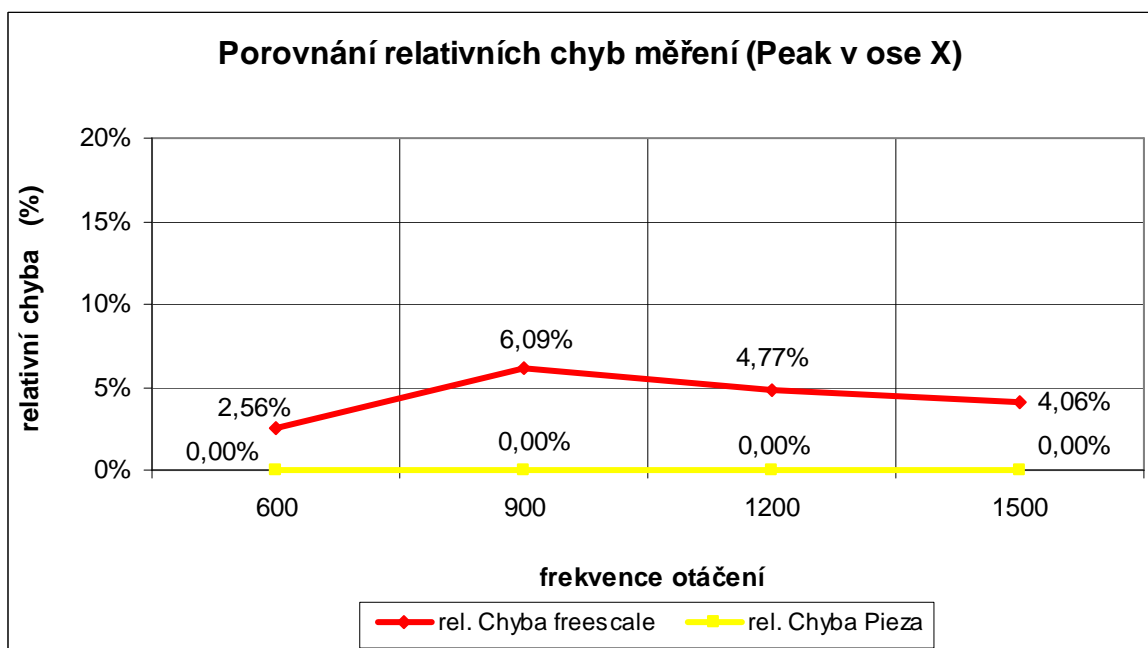


Graf 4.

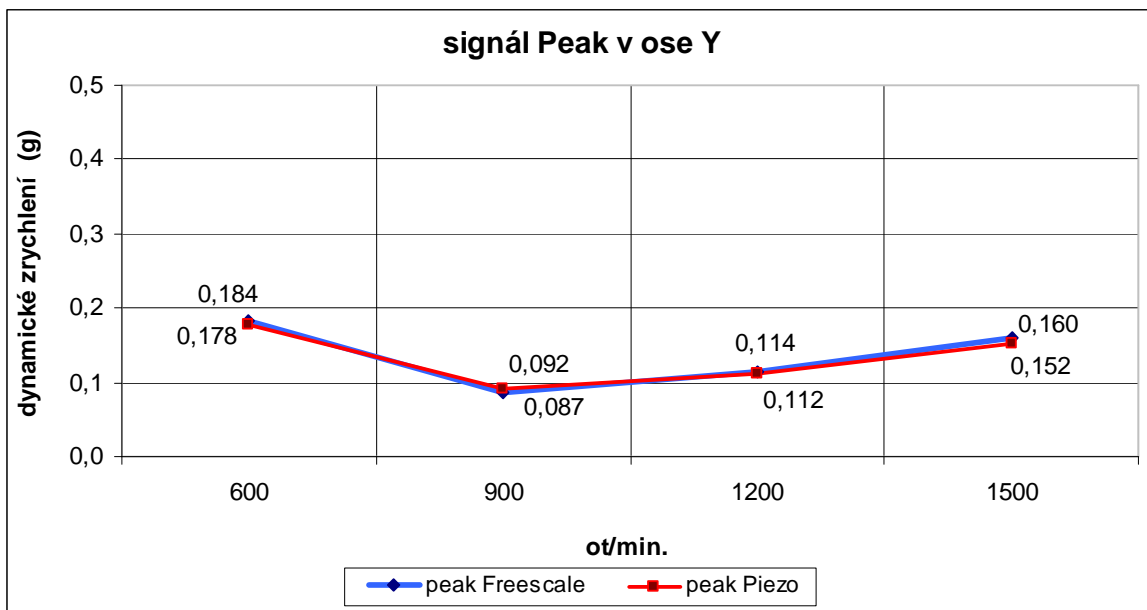


Graf 5.

Aritmetický průměr rozdílu hodnot = 0,084375
 Směrodatná odchylka = 0,012263
 Variační koeficient = 14,53%

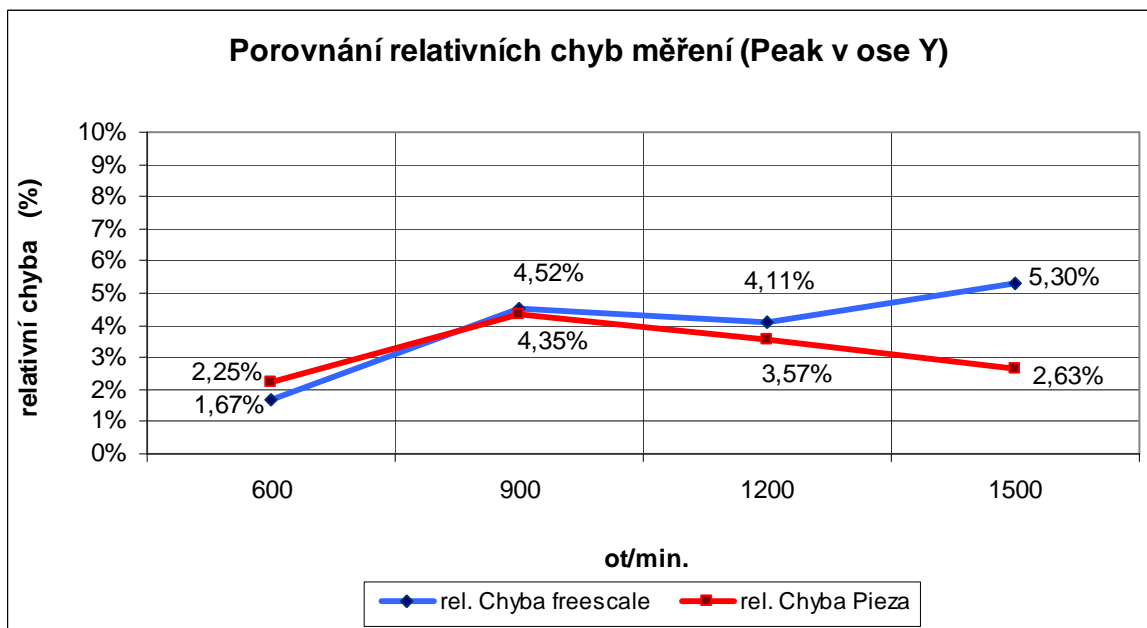


Graf 6.



Graf 7.

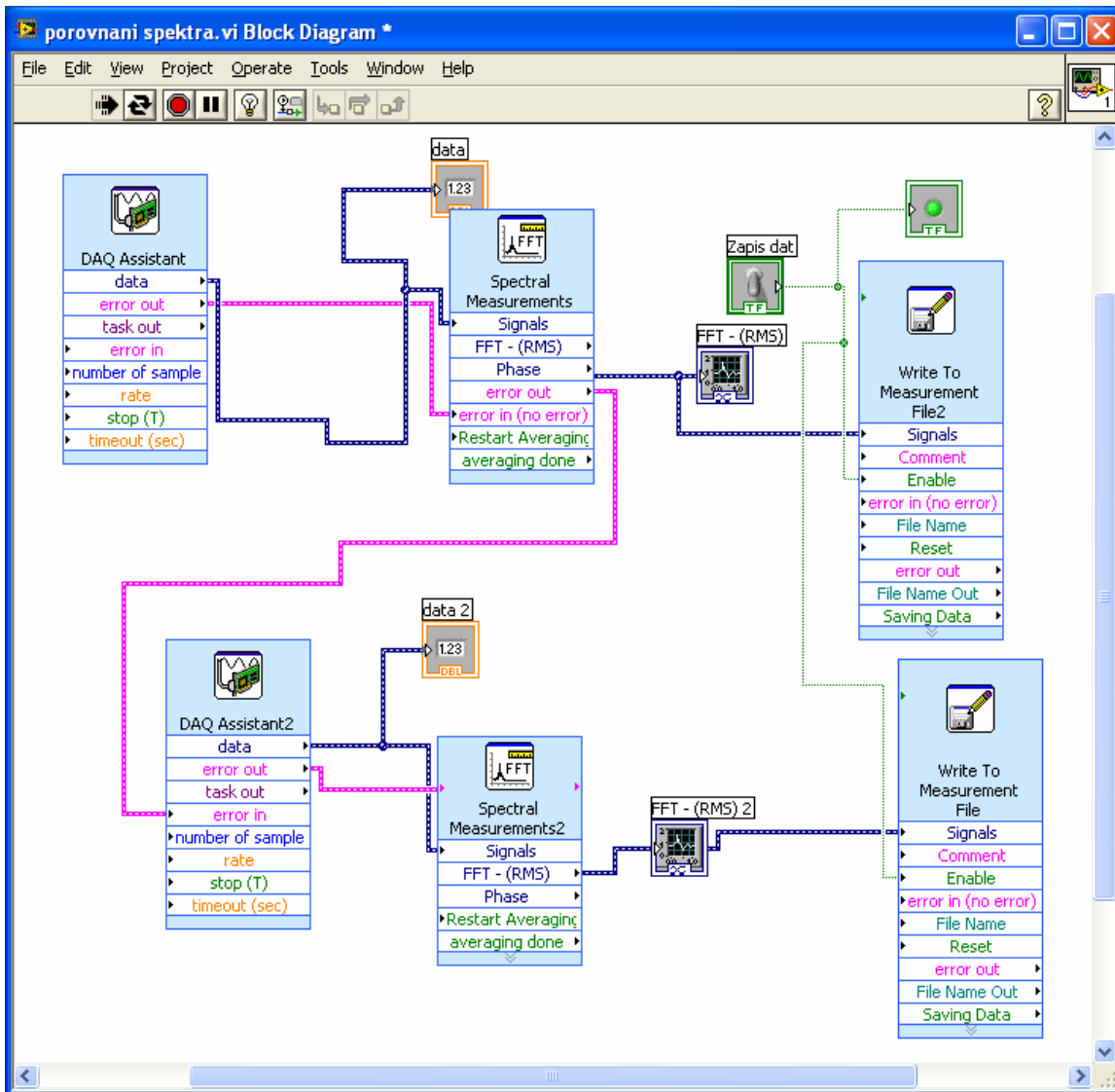
Aritmetický průměr rozdílu hodnot = 0,005
 Směrodatná odchylka = 0,00225693
 Variační koeficient = 45,14%



Graf 8.

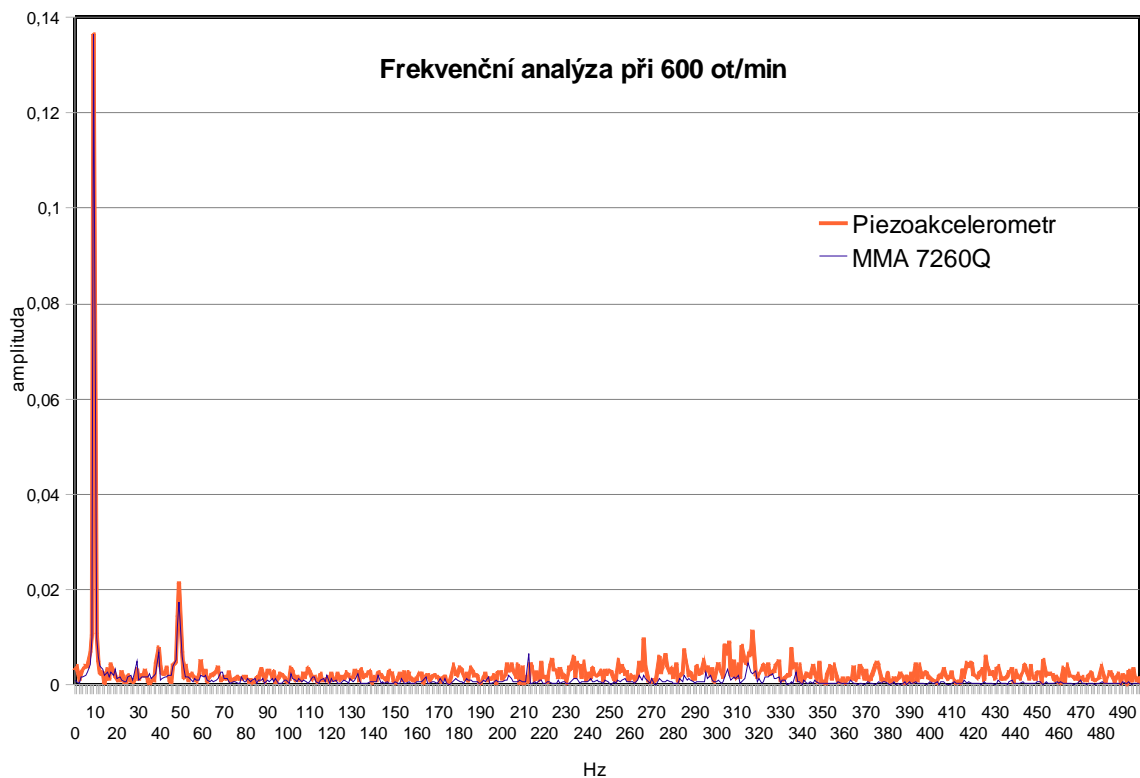
7.3.2. Měření č. 2

Měření č. 2 bylo prováděno na stejném vibračním zařízení, ale ke zpracování dat bylo využito PC s měřicí kartou PCI 6024E a program LabView 8 (viz obr. 21).

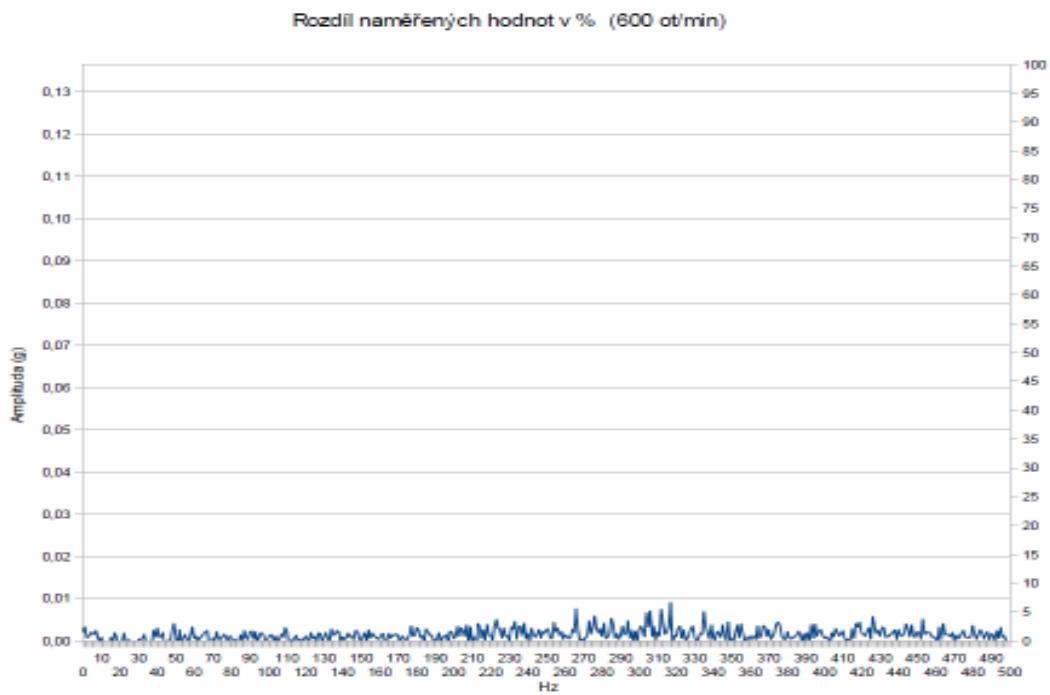


Obr.21 Schéma zapojení měření.

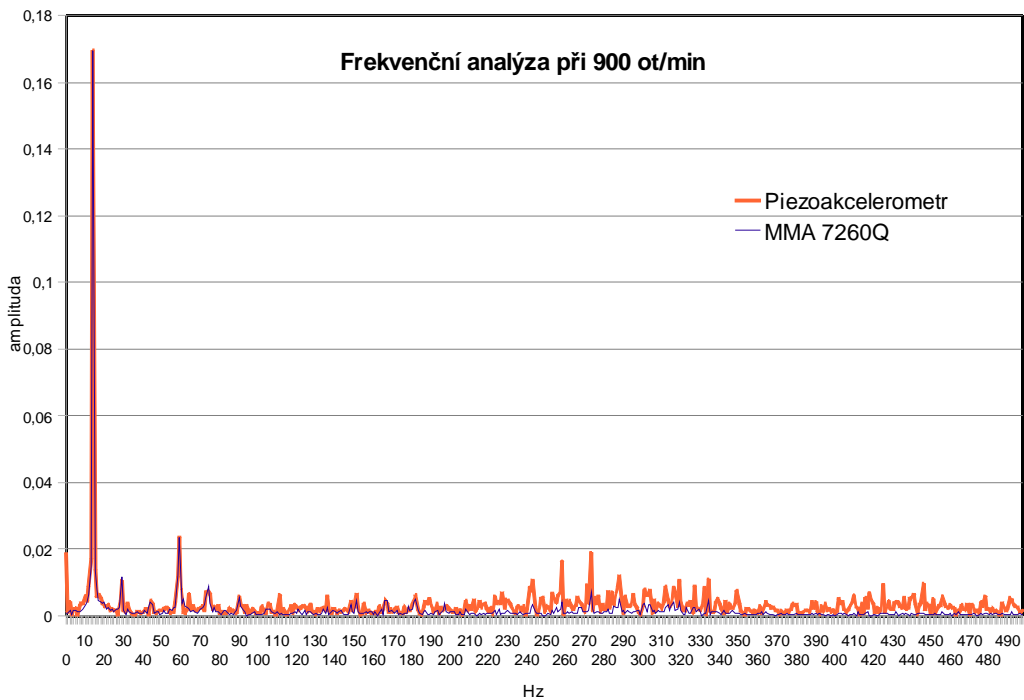
Opět se měnily otáčky vibračního zařízení a výsledné hodnoty byly ukládány do PC pro porovnání frekvenční analýzy obou snímačů. Výsledné hodnoty v jednotlivých otáčkách zařízení představují grafy 9, 11, 13 a 15.



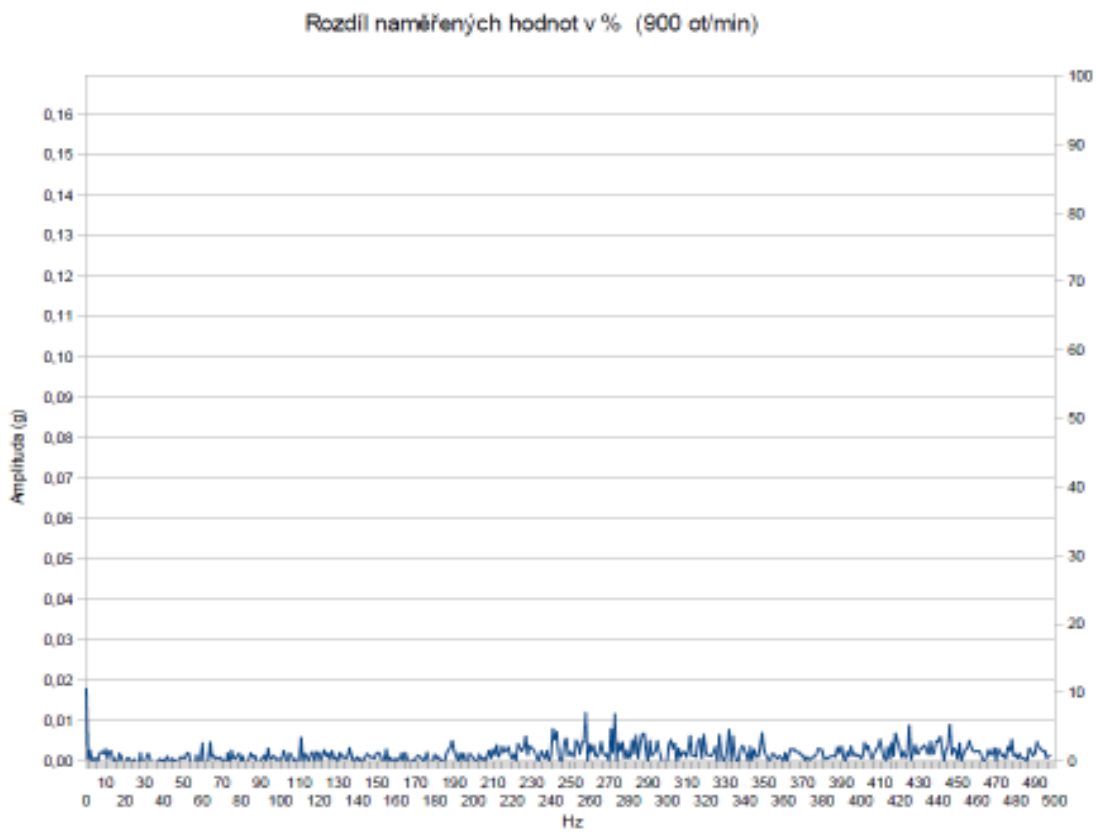
Graf 9.



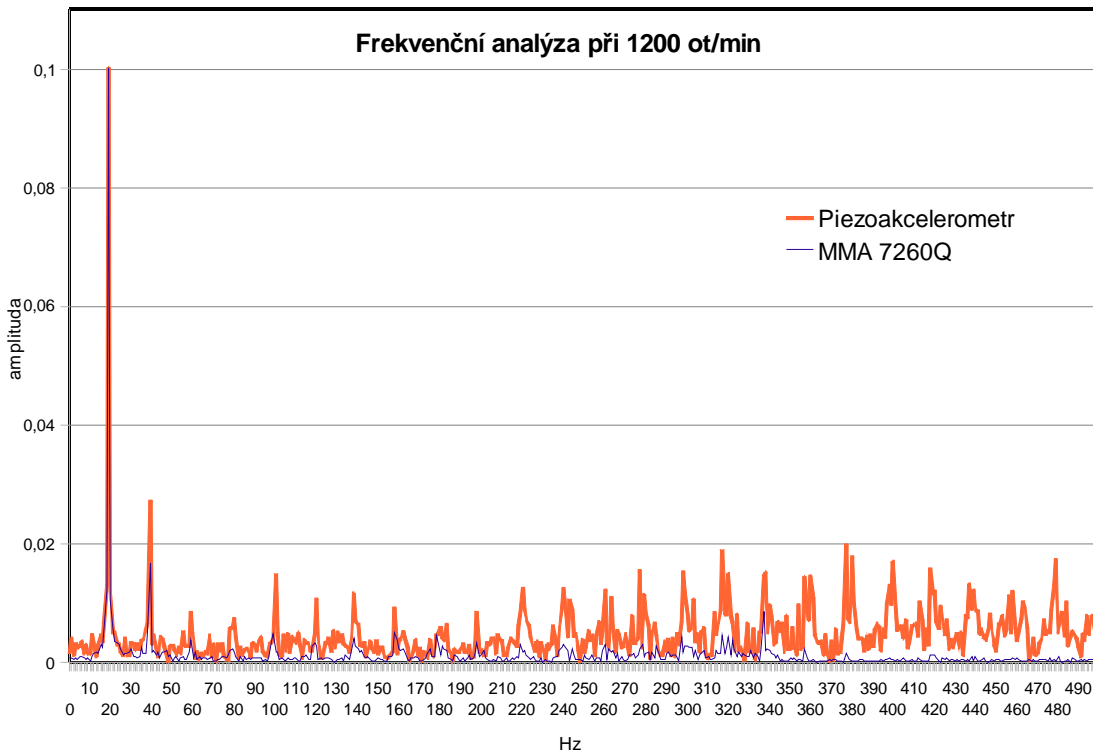
Graf 10.



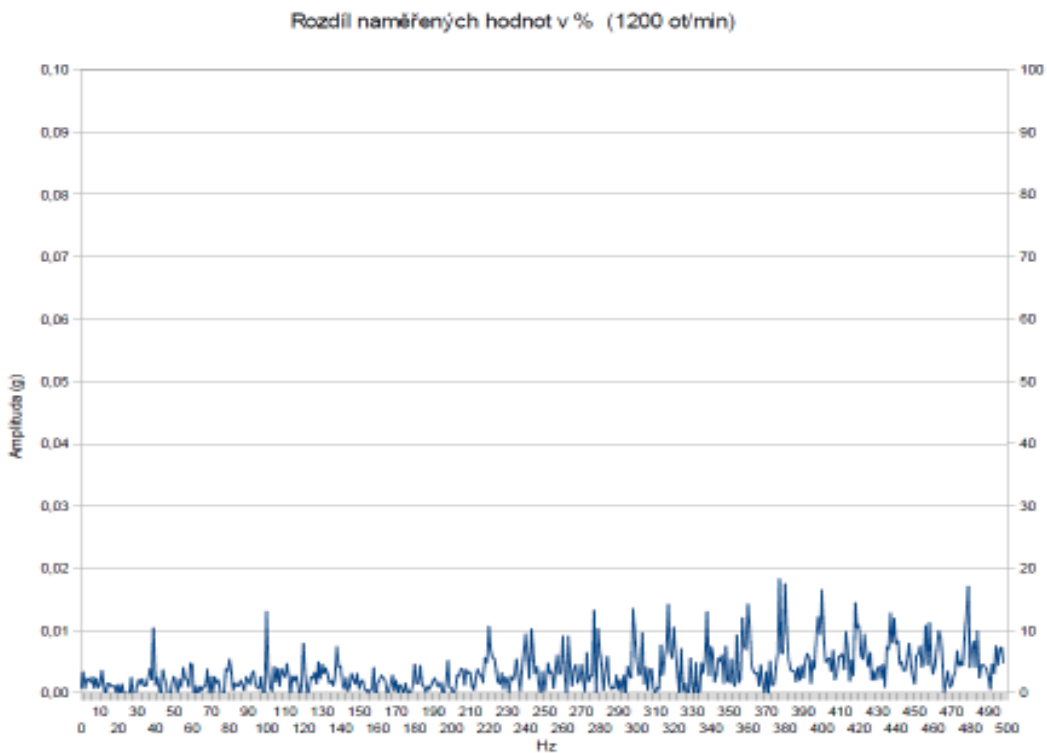
Graf 11.



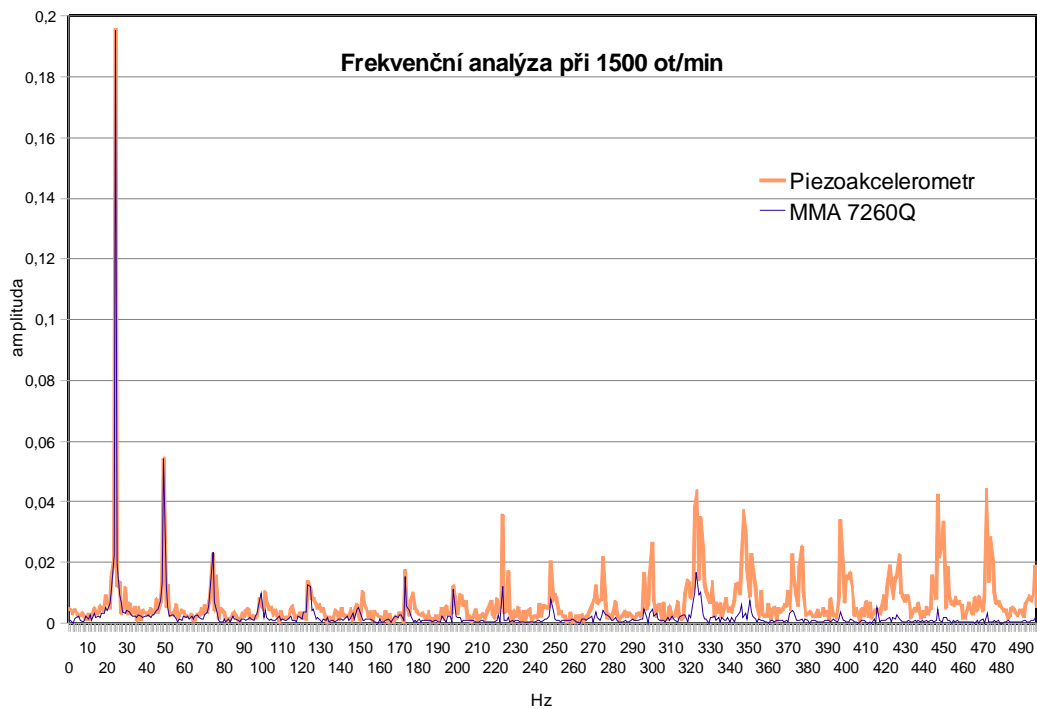
Graf 12.



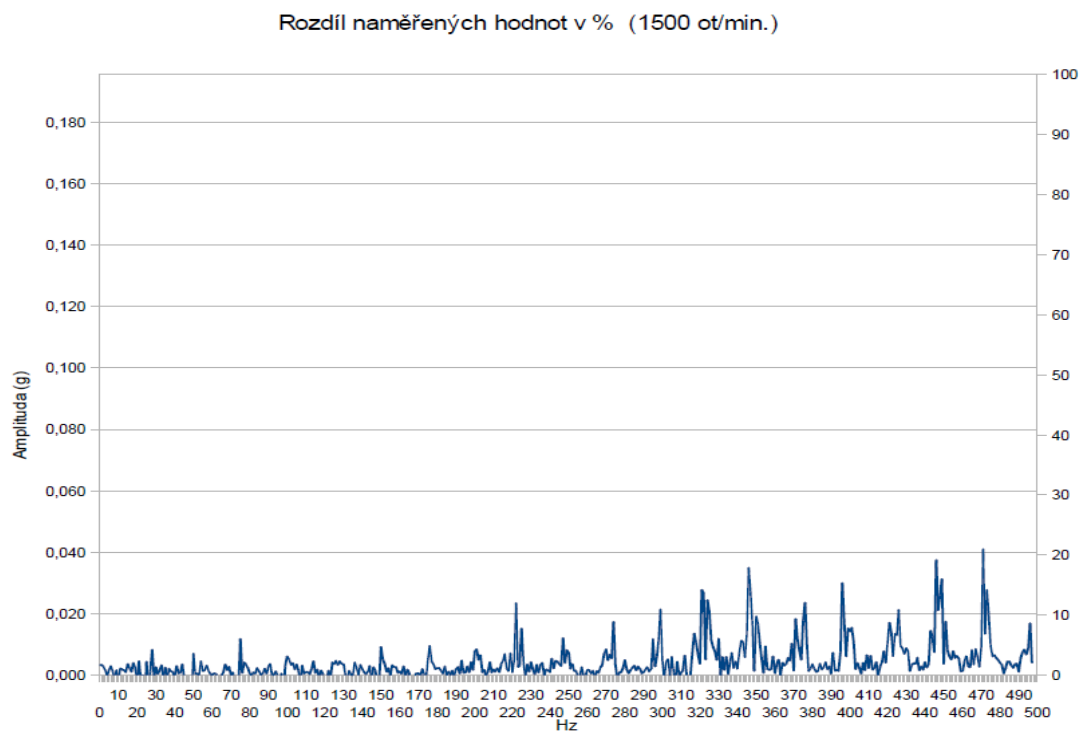
Graf 13.



Graf 14.



Graf 15.



Graf 16.

9. ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem se zabýval akcelerometry používanými v technické diagnostice pro nejrůznější měření a méně známými moderními mikročipovými akcelerometry. V první části této práce se věnuji základním pojmům technické diagnostiky, potřebným k pochopení této problematiky.

Ve druhé části jsem provedl praktické proměření konkrétního akcelerometru MMA 7260Q od firmy Freescale a porovnal ho s běžným piezoelektrickým snímačem. Struktura inteligentních akcelerometrů je u každého výrobce jiná. Aby jsem mohl měření uskutečnit, bylo v první řadě nezbytné navrhnout plošný spoj, na který se takto nachystaný akcelerometr napájel.

V prvním měření jsem se zaměřil na veličiny RMS a PEAK, popisující časový signál. Výsledky jsou zaneseny v grafech 1 až 8. Hodnoty signálu RMS v ose X se liší o 0,193 g a v ose Y o 0,218 g. Vrcholová hodnota PEAK se v ose X liší o 0,084 g a v ose Y o 0,005 g. Při zvyšování jednotlivých otáček reagují oba dva akcelerometry téměř podobně. Důvodem rozdílů v naměřených hodnotách, by mohl být způsob osazení mikročipového akcelerometru.

Při druhém měření byla nevyváha modelu vibračního stroje spolehlivě určena na základě první harmonické hodnoty. V porovnání frekvenční analýzy zmíněných akcelerometrů v měření č.2 bylo prokázáno, že v jisté frekvenční oblasti od 0 do přibližně 200 Hz, lze nahradit piezoelektrické snímače moderními mikročipovými akcelerometry. V této oblasti byly rozdíly naměřených hodnot do 10%.

Výsledky nám naznačují, že moderní mikročipové akcelerometry by mohly být využívány v technické diagnostice např. pro odhalování závad strojních zařízení. Jejich využití, jak test prokázal, je však omezené na nízkofrekvenční oblasti, což nám neumožňuje odhalovat závady např. ložisek, hřídelí, atd.

Moderní akcelerometry nabízí celou řadu využití v moderních technologiích, které jsem už zmínil v této práci a budeme se s nimi setkávat čím dál častěji i v běžném životě.

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VDOLEČEK, František. *Technická měření*. Brno, 2002. [PDF dokument]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupný na WWW: <http://autnt.fme.vutbr.cz/Lab/A1-731a/ETC.pdf>
- [2] VDOLEČEK, František. *Spolehlivost a technická diagnostika*. Brno, 2002. [PDF dokument]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupný na WWW: <http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/FSD.pdf>
- [3] JANOUŠEK, I.; Kozák, J.; Taraba, O. a kol.. *Technická diagnostika*. 1. vydání. Praha, SNTL Praha; 1988. 432 stran. ISBN 04-236-88.
- [4] KREIDL, M.; Šmíd, R.. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha, 2006. 408 stran. ISBN 80-7300-158-6.
- [5] KRIEDL, M. a kol.. *Diagnostické systémy*. 1. vyd. Praha, 2001. 352 stran. ISBN 80-01-02349-4.
- [6] Webové stránky společnosti Lammb [online]. [cit. květen 2009] Dostupné na WWW: <http://www.lammb.cz/>
- [7] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů*. Automatizace.hw [online]. 2007, leden [cit. 25.května. 2009]. Dostupné na WWW: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [8] VOJÁČEK, Antonín. *Freescale akcelerometry pro malá zrychlení(nízká g)*. Automatizace.hw [online]. 2005, leden [cit. 26.května. 2009]. Dostupné na WWW: <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART167-freescale-akcelerometry-pro-mala-zrychleni-nizka-g.html>
- [9] Webové stránky společnosti Adash [online]. [cit. květen 2008] Dostupné na WWW: <http://www.adash.cz/>