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

VLIV TEPLOTY NA SNÍMAČE VIBRACÍ

TEMPERATURE INFLUENCE OVER VIBRATION SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE **PETR KADUBEC**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **ING. DANIEL ZUTH**
SUPERVISOR

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky
Akademický rok: 2007/08

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Kadubec Petr

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:

Vliv teploty na snímače vibrací

v anglickém jazyce:

Temperature Influence over Vibration Sensors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Snímače vibrací (akcelerometry) mohou výrazně ovlivnit výsledky získávané na sledovaném objektu při jeho diagnostice a přitom jsou často vystaveny negativním vlivům prostředí, především teploty.

Cíle bakalářské práce:

Práce se zabývá teoreticky i prakticky vlivem teploty okolí, teploty povrchu objektu a pod. na spolehlivosti a přesnosti získávaných dat pro vibrační diagnostiku. Součástí bude také experimentální ověření vlivů.

Doporučená osnova zadání:
1. Vlivy prostředí především teploty na měření
2. Snímače vibrací
3. Vlivy teploty na snímače vibrací
4. Experimentální ověření vlivu teploty

Seznam odborné literatury:

JANOUŠEK, I.; Kozák, J.; Taraba, O. a kol.; Technická diagnostika. :1. vydání Praha, SNTL Praha, 1988. 432 s. ISBN 04-236-88.
KREIDL, M.; Šmíd, R.; Technická diagnostika. : 1. vydání Praha: BEN – technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
Firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Daniel Zuth

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 11. 12. 2007

L.S.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT

Šeda

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

v.z. R. Kubíček

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

LICENČNÍ SMLOUVA

(na tomto místě je vloženo licenční ujednání)

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem teploty na snímače vibrací. Snímače vibrací jsou osazeny na zařízeních, jenž svou činností mnohdy vytváří teplo, nebo jsou osazeny v prostředí, kde jsou jiné zdroje tepla. Teplem ovlivněné snímače vibrací mohou výrazně ovlivnit výsledky diagnostiky sledovaného zařízení.

ABSTRACT

This graduation thesis deals with temperature influence on vibration sensors. Vibration sensors are situated on facilities which heat up temperatures during its activity or are situated on a place where another resources of a heat are. Affected vibration sensors can markedly influent result of the diagnostic facilities.

KLÍČOVÁ SLOVA

Snímač vibrací, teplota, měření, odchylka,

KEYWORDS

Vibration sensor, temperature, measuring, deviation,

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval Ing.Danielu Zuthovi za jeho ochotu a odbornou pomoc.

Obsah

Zadání závěrečné práce…… 3
Licenční smlouva……. 5
Abstrakt…… 7
1. Úvod……. 13
2. Měření…….. 15
2.1. Vyhodnocování výsledků měření…….. 16
2.2 Chyby měření…….. 16
2.2.1. Rozdělení chyb……... 16
2.2.2. Zdroje chyb měření…… 18
3. Diagnostika…….. 19
3.1. Souvislosti diagnostiky…….. 19
3.2. Způsoby provádění diagnostiky……. 20
3.3. Vibrodiagnostika…… 20
3.3.1 Možnosti vibrodiagnostiky…….. 21
4. Vibrace……. 23
4.1. Fyzikální podstata vibrací……..... 23
4.2. Výskyt vibrací…… 23
4.3. Základní vlastnosti kmitání……... 23
4.4. Rozdělení kmitání……..... 24
5. Snímače vibrací…… 27
5.1. Snímače výchylky, snímače polohy a snímače posuvu……. 29
5.2. Snímače rychlosti …….. 30
5.3. Snímače zrychlení – akcelerometry…… 31
5.3.1. Základní rozdělení akcelerometrů…….. 31
5.3.2. Piezorezistivní akcelerometr…….. 31
5.3.3. Tepelné akcelerometry…… 31
5.3.4. Piezoelektrické akcelerometry……. 32
5.4. Konstrukce piezoelektrických snímačů……. 32
5.4.1. Konstrukce "Delta Shear(R)"…… 32
5.4.2. Konstrukce "Planar Shear"…….. 33
5.4.3. Konstrukce s centrálně tlakovým namáháním……. 33
5.5. Uchycení piezoelektrických snímačů…… 34
6. Vliv teploty na snímače vibrací…… 35
7. Provozní podmínky strojů a zařízení…… 37
8. Prakticky test……... 39
8.1. Použité vybavení – test č. 1…… 40
8.2. Popis testu č. 1…… 41
8.3. Použité vybavení – test č. 2…… 45
8.4. Popis testu č. 2…… 47
9. Závěr…… 51
10. Seznam použité literatury…….. 53

1. Úvod

Měření je všeobecně znehodnocováno okolními vlivy, které ovlivňují výsledek. Jedním z těchto vlivů je teplota, která výrazně ovlivňuje většinu zařízení, mezi nimiž jsou i přístroje pro vyhodnocení vibrací. Toto je velmi závažné, pokud se jedná o důležité diagnostické zařízení. Pokud je tento vliv zanedbáván a nekompenzuje se vhodným způsobem, dochází k nezanedbatelným odchylkám, které mohou výrazně ovlivnit výsledky diagnostiky sledovaného zařízení.

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem teploty na snímače vibrací. Snímače vibrací jsou osazeny na zařízeních, jenž svou činností mnohdy vytváří teplo, nebo jsou osazeny v prostředí, kde jsou jiné zdroje tepla.

První část práce se zabývá vibracemi a snímači vibrací obecně. V druhé části se pokusím experimentálně ověřit, jaký bude mít vliv zahřívání snímačů vibrací na hodnoty vibrací, které budou snímače vykazovat. Provedu dva testy, při kterých použiji rozdílné snímače, výsledky se pokusím vhodně zpracovat.

2. Měření

Definice měřicí metody byla uvedena v předchozí kapitole a velmi úzce souvisí s termíny měřicí princip a měřicí postup. Každá veličina má pro své určení svou základní – definiční metodu. Jedná-li se o metodu, která „zhmotňuje“ základní definici té které veličiny, pak lze hovořit o metodě definiční (absolutní), zatímco všechny ostatní jsou odvozené (relativní).

Nejběžnější je členění metod na přímé a nepřímé, přičemž další členění přímých metod podle následujícího schématu je vcelku známé pro většinu případů. Metody měření můžeme obecně dělit podle různých kritérii:

- způsobu určení měřené veličiny
- způsobu získání měřené hodnoty
- způsobu snímání veličiny
- druhu měřené veličiny

Podle způsobu určení měřené veličiny dělíme metody na

- definiční - korespondují se základní definicí veličiny
- odvozené - je odvozena na jiných principech a základech než základní definice veličiny

Podle způsobu získání měřené hodnoty dělíme metody na

- Přímé - veličina se měří přímo, prostřednictvím stejné veličiny
- Porovnávací - (komparační) přímé porovnání veličin stejného druhu, například čárkové měřidlo
- Vyrovnávací - (kompenzační) časté jako můstkové metody v elektrotechnice apod. účinek je vyrovnán, vyvážen, veličinou stejného druhu
- Nahrazovací - (substituční) účinek veličiny je nahrazen jinými známými hodnotami téže veličiny, například vážení, koncové měrky u měření délek apod.
- Přemisťovací - (transpoziční) jedná se o postupné přemisťování měřené veličiny a známých hodnot téže veličiny například u vážení
- Nepřímé - veličina je měřena zprostředkovaně přes jiné veličiny a její hodnota vypočtena, či jinak nepřímo určena

Podle způsobu snímání měřené hodnoty se rozlišují

- dotykové
- bezdotykové

Podle druhu měřené hodnoty se rozlišují

- mechanické
- optické
- elektrické

2.1. Vyhodnocování výsledků měření

Vyhodnocení výsledků měření bylo dlouhá léta spojeno s klasickou analýzou chyb, která ale v dnešní době bývá doplněna novým přístupem. Tím jsou v souladu s nejnovějšími národními i mezinárodními předpisy z oblasti metrologie nejistoty měření.

2.2. Chyby měření

V praxi nejsou žádné měření, žádná měřící metoda ani žádný přístroj absolutně přesné. Nejrůznější negativní vlivy, které se v reálném měřícím 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. Chyby se vyjadřují v absolutních nebo relativních hodnotách. Jako chyba absolutní $\Delta(x)$ [2] se označuje rozdíl mezi hodnotou naměřenou x_m a skutečnou x_s..

$$\Delta(x) = x_m - x_s$$

Podělíme-li absolutní chybu skutečnou hodnotou, dostaneme poměrné vyjádření chyby, tj. chybu relativní $\delta(x)$ [2].

$$\delta(x) = \frac{\Delta(x)}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s}$$

2.2.1. Rozdělení chyb

Chyby měření se podle jejich působení na výsledek měření rozdělují na:

- chyby systematické
- chyby náhodné
- chyby hrubé

Systematickou nazýváme chybu, jejichž hodnota se při stejných podmínkách při měření nemění, je konstantní co do velikosti a znaménka, nebo která se při změně podmínek měření mění podle určité (známé) závislosti a svým způsobem „systematicky“ ovlivňují výsledek měření. Na rozdíl od náhodné chyby systematickou chybu nemůžeme charakterizovat na základě opakovaných měření. Ke stanovení jejich velikosti postačí zpravidla vztah pro výpočet absolutní chyby. Z hlediska uživatele měřící techniky jsou systematické chyby sympatické tím, že je lze z velké části určit a jejich vliv je možné zmenšit vhodnou kompenzací, uplatněním příslušných korekcí, odstraněním příčin které je vyvolávají, či kombinací uvedených třech způsobů. Zjišťování a odstraňování systematických chyb bývá náročné a nákladné, a proto se uskutečňuje jen tam, kde je to nevyhnutelné. Možnost rozpoznání systematické chyby je více či méně omezená (poznáme

vlastně jen nějaký její odhad a ne její skutečnou hodnotu), a proto odstraníme jen její odhad, přičemž vždy zůstává nevyloučitelná část, jejíž hodnotu nepoznáme. Tuto část systematické chyby nazýváme nevyloučitelnou systematickou chybou.

Náhodné chyby působí zcela nahodile, jsou těžko předvídatelné a nelze je vyloučit. Při opakování měření se mění jejich velikost i znaménko, jak odpovídá předpokládanému zákonu rozdělení pravděpodobnosti. Pro určení jejich velikosti se vychází z opakovaného měřením s použitím statistických metod odpovídajících patřičnému pravděpodobnostnímu modelu, reprezentovanému zákonem rozdělení příslušné náhodné chyby. V praxi velmi často jde o normální-Gaussovo rozdělení, které se používá ve většině aplikací.
Při opakovaném měření nezávislé veličiny *X* za stejných podmínek, dostáváme v důsledku náhodných chyb různé hodnoty x_1 , x_2 ,...x_i ,...x_n . Výsledek měření je reprezentován aritmetickým průměrem získaným z naměřených hodnot [2] tj.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} x_i$$

kde *n* je počet měření

Náhodnou chybu v klasické teorii chyb nejčastěji zastupuje směrodatná odchylka výběrového souboru *s(x)*, méně často směrodatná odchylka aritmetického průměru získané z následujících vztahů [2].

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta^2 (x_i)}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

Obě směrodatné odchylky charakterizují, jak jsou výsledky měření (náhodné chyby) rozptýlené. Hodnota směrodatné odchylky (nebo její některý násobek, dvounásobek, trojnásobek) není však hodnota chyby, jak se to často interpretuje. Směrodatná odchylka nebo její násobek vyjadřují jen hranici, kterou může náhodná chyba s určitou pravděpodobností překročit, nebo nepřekročit. To už ale souvisí s nejistotou měření. Náhodné chyby existují, neumíme je však v jednotlivých případech určit, ale umíme z pravděpodobnostního hlediska popsat jejich chování a ve výsledku měření z nich hodnotíme nejistotou.

Hrubé chyby jsou z předchozího pohledu zcela nevyzpytatelné. Měření zatížené hrubou chybou znehodnotí celý experiment, a proto naměřené hodnoty které výrazně „vybočují z řady“, což bývá velmi často projevem tohoto druhu chyb, se vyloučí z dalšího zpracování. Omezit riziko jejich výskytu lze důsledným dodržováním příslušných měřících postupů, podmínek měření a pozorností obsluhy.

Výsledná chyba měření je vyjadřována jako součet systematické *e* a náhodné složky ε což lze zapsat jako [2]

$$\Delta(x) = |e| + |\varepsilon|$$

a její maximální hodnotu je možné odhadnout jako

$$\Delta_{max} = (\bar{x} - x_s) + 2s$$

Součinitel rozšíření směrodatné odchylky souvisí s pravděpodobností pokrytí intervalu a typem rozdělení. Dvojka u Gaussova rozdělení přísluší často užívané 95% pravděpodobnosti.

2.2.2. Zdroje chyb měření

Celý proces měření se setkává s celou řadou nedokonalostí a problémů, které se zákonitě musí odrazit také ve výsledcích měření a chybách., podle původu je můžeme rozdělit do řady zdrojů.

- **Chyby přístroje** – jsou to chyby, které plynoucí z nedokonalosti použitých měřících přístrojů, které mohou vzniká během výroby, montáže a popř. i opotřebením. Svou roli zde sehrává i změna charakteristik a parametrů přístroje v čase (stárnutí). Hodnoty některých chyb udává výrobce formou korekčních křivek, ostatní chyby udává jako maximální dovolenou chybu přístroje (se znaménkem ±) a nevztahují se na jeden přístroj, ale na celý typ přístroje.

- **Chyby instalace** jsou chyby plynoucí z nedostatku zapojení, uložení a nastavení měřidel, ze vzájemného ovlivňování měřidel zapojených paralelně nebo sériově, chyby plynoucí z ovlivnění hodnot měřené veličiny měřidlem apod.

- **Chyby metody** jsou chyby plynoucí z nedokonalosti použitých měřících metod, z použití přibližných hodnou fyzikálních konstant a nepřesně odpovídajících závislostí.

- **Chyby pozorování** jsou chyby způsobené nedokonalostí smyslů pozorovatele nebo jeho nesoustředěním.

- **Chyby vyhodnocení** jsou chyby vznikající zpracováním naměřených hodnot (použití přibližných vztahů, zaokrouhlováním, nedostatečným vyčíslením konstant, chyby interpolace, extrapolace, linearizace apod.)

- **Vlivy prostředí** chyby, které vnáší do měření nedokonalost a nestálost parametrů prostředí, jejich kolísání a negativní vliv na jednotlivé součásti měření dle [2]

3. Diagnostika

Diagnostika je obor zabývající se metodami a prostředky vhodnými ke zjišťování stavu, vlastností a parametrů objektů.

V technické diagnostice jsou diagnostikovanými objekty stroje, zařízení, přístroje a jiné technické systémy, např. části řízeného technologického zařízení či bloky řídicího systému. Technický stav těchto systémů se zpravidla zjišťuje nedestruktivními metodami a bez demontáže.

Diagnostická veličina nese informaci o technickém stavu objektu. Její hodnota může být přímo měřena, získávána z jiných systémů nebo zadávána operátorem.

Diagnóza je vyhodnocení provozuschopnosti technického objektu, tj. jeho okamžitého technického stavu. Diagnóza se stanovuje na základě hodnot diagnostických veličin (problémem je vztah n : m pro příčiny a důsledky).

Technický stav sledovaného objektu je jeho schopnost vykonávat požadované funkce za stanovených podmínek užívání; objekt je buď v bezvadném, provozuschopném, nebo v poruchovém stavu.

Diagnostické prostředky jsou technická zařízení a počítačové programy a s nimi související postupy určené ke stanovení diagnózy.

Diagnostickým systémem se nazývá souhrn diagnostických prostředků, jejich obsluhy a sledovaného objektu.

3.1. Souvislosti diagnostiky

Diagnostické systémy nejsou téměř nikdy instalovány pro diagnostiku samotnou. Většinou fungují jako podpůrný nástroj využívaný také dalšími systémy nebo procesy při provozu a správě technologických zařízení. Nejčastěji jsou s diagnostikou „spojovány“ pojmy:

- spolehlivost
- bezpečnost
- údržba

Diagnostika a spolehlivost spolu těsně souvisejí díky velké pozornosti věnované všemi výrobci kvalitě (jakosti) jejich výrobků. Tato kvalita je podmíněna spolehlivostí výrobního zařízení, čili jeho schopností správně a bez poruch fungovat po celou potřebnou dobu. Technická diagnostika zde zjišťováním technického stavu pomáhá určit (nebo alespoň odhadnout), nakolik je provozované zařízení ještě spolehlivé. Prostřednictvím dodržování kvality výroby má tedy diagnostika vliv i na systémy řízení jakosti (normy řady ISO 9001 apod.).

Diagnostika a bezpečnost. Náhlé poruchy nespolehlivého technologické zařízení mohou být příčinou úrazu nebo materiálních škod. Funkční diagnostika umožňuje předcházet vzniku poruch, popř. zamezit eskalaci již vzniklé poruchy (a omezit rozsah škod), čímž má přímý vliv na bezpečnost provozu, dle [11].

Diagnostika a údržba.

- údržba po chybě – nic se nediagnostikuje a poruchy se prostě odstraňují poté, co nastanou.

- údržba preventivní – zde již probíhají plánované prohlídky, testy a popř. výměny zařízení.

- údržba prediktivní – zde se již uplatňují jak diagnostika off-line, tak i diagnostika on-line a pracovníci údržby se s použitím jejich metod snaží co nejpřesněji predikovat blížící se poruchy.

- údržba proaktivní – jde de facto o stejný přístup jako u prediktivní údržby, s tím rozdílem, že diagnostika je nedílnou součástí technolog. zařízení a řídicího systému již ve fázi projektu.

3.2. Způsoby provádění diagnostiky

Podle způsobu provádění diagnostiky ji lze rozdělit na tyto druhy:

periodická diagnostika – ruční měření s danou periodou, efektivní systém určování budoucího vývoje detekovaných stavů

jednorázové měření – zjištění okamžitého stavu, prognóza o budoucím vývoji detekovaných stavů je ale obtížná

kontinuální měření – nepřetržité sledování stavu strojního zařízení, obvykle vyvedeno do ochran a při překročení nastavených poplachových úrovní odstavení zařízení

3.3. 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 odpadají 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.

3.3.1 Možnosti vibrodiagnostiky

Základním měřením je zjišťování celkových vibrací generovaných zařízením. Zjišťovány jsou hlavně mechanické stavy jako nevývaha, nesouosost, mechanické uvolnění, ohnutý hřídel, rezonance, problémy řemenových převodů atd. Toto měření je definováno v normách zabývajících se dovolenými mohutnostmi kmitání na daných zařízeních (ČSN 122011 – ventilátory, ČSN 105041 – kompresory, ČSN ISO 10816 – obecná norma pro většinu strojních zařízení). Předmětem měření je rychlost vibrací mm/sec v pásmu 10 – 1000 Hz v detekci RMS (všechny uvedené normy jsou vztaženy na tento způsob měření). Výjimku tvoří posuzování mohutnosti vibrací na obráběcích strojích, kde jsou nutná přísnější kritéria a kde dlouhodobým sledováním byly zjištěny doporučené hodnoty mohutnosti vibrací.

Pro zjišťování stavu mazání v kluzných i valivých ložiscích, detekování elektrických problémů na elektromotorech, ověřování stavu ozubení a mazání v převodovkách se úspěšně aplikuje měření zrychlení vibrací ve vhodně zvolených frekvenčních rozsazích.

Pro zjišťování přesného stavu ložisek jsou vyvinuty speciální tzv. „obálkové technologie“ zrychlení vibrací. Důvod používání obálkových technologií vychází z poznatku, že odvalováním poškozeného prvku ložiska dochází k nárazům, které vyvolají zvýšené vibrace na frekvenci nárazu, ale hlavně pak na frekvencích rezonančních (10-ky kHz). Cílem obálkových technologií je odfiltrovat a zvýraznit tyto signály od závad v ložisku ve vysokofrekvenční oblasti. Vyhodnocovací software následně dokáže rozlišit, která část ložiska vykazuje poškození (vnější kroužek, vnitřní kroužek, valivé elementy, klec).

Při měření strojního zařízení se používá tzv. multiparametrické monitorování, kdy se snímají všechny uvedené veličiny v různých rozsazích a pásmech a mohou být doplněny i o měření výchylky eventuelně amplitudově - fázové poměry pro upřesnění výsledků měření. S číselnou hodnotou je ukládáno hlavně spektrum vibrací, ve kterém se podrobně rozlišují jednotlivé známky poškození nebo opotřebení uvedené výše, dle [12]

4. Vibrace

4.1. Fyzikální podstata vibrací

Vibrace můžeme definovat jako pohyb pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Velikost vibrací může být vyjádřena výchylkou nebo jejími časovými derivacemi, zrychlením, rychlostí, nebo vlivem kmitavého pohybu. Kvůli široké dostupnosti akcelerometrů se nejčastěji měří a hodnotí velikost zrychlení vibrací. Podle časového průběhu se vibrace dělí na deterministické, u nichž lze okamžitou hodnotu v daném čase přesně určit podle jejich dosavadního průběhu a na vibrace náhodné, které se mění nepředvídatelným způsobem. Zvláštní skupinu kmitání tvoří mechanické rázy (otřesy), které se vyznačují náhlou změnou síly, polohy, rychlosti nebo zrychlení a vyvolávají přechodové vzruchy.

4.2. Výskyt vibrací

Kmitání (vibrace) se vyskytuje v různých oblastech vědy.

Za nejznámější můžeme považovat mechanické kmitání (též kmitavý pohyb, oscilační pohyb nebo vibrace), což je takový mechanický pohyb hmotného bodu, při kterém je tento hmotný bod vázán na určitou rovnovážnou polohu. Hmotný bod se při svém pohybu vzdaluje od této rovnovážné polohy do určité konečné vzdálenosti. Příkladem kmitavého pohybu je pohyb kyvadla, který je označován jako kývání. Kmitající veličinou nemusí být pouze poloha tělesa, ale např. hustota látky, tlak (pulzace) nebo jiná mechanická veličina.

Kmitání se také často vyskytuje u elektrických obvodů (viz např. elektronický oscilátor). Kombinace elektrických a mechanických kmitů se využívá v mikrofonu.

Mimo fyziku se lze s kmitáním setkat také při studiu klimatických změn, v chemii, v biologických nebo sociálních systémech.

4.3. Základní vlastnosti kmitání

Základní vlastnosti a terminologie kmitavého děje lze demonstrovat na příkladu mechanického kmitavého pohybu.

Objekt, který kmitá (osciluje) nebo ve kterém probíhají kmitavé pohyby, se nazývá oscilátor.

Kmitající hmotný bod (těleso) vykoná jeden kmit, pokud koná pohyb do určitého bodu a vrátí se do své původní polohy. U obecného kmitavého děje lze za jeden kmit považovat návrat do původního stavu systému.

Např. při vychýlení mechanického oscilátoru a jeho uvolnění dojde k průchodu rovnovážnou polohou do určité maximální vzdálenosti na opačné straně a opětovnému průchodu rovnovážnou polohou zpět do původní polohy. Tento pohyb tedy představuje jeden kmit.

Uvedeme-li mechanický oscilátor do pohybu úderem do hmotného bodu v rovnovážné poloze, bude se hmotný bod pohybovat z rovnovážné polohy do maximální

výchylky, poté zpět do rovnovážné polohy, jímž projde a bude pokračovat do maximální výchylky na opačné straně, odkud se vrátí zpět do rovnovážné polohy, čímž uzavře jeden kmit. Počet kmitů za jednu sekundu je označován jako kmitočet (frekvence). Doba, která je nezbytná k vykonání jednoho kmitu se nazývá perioda kmitu.

Okamžitá poloha hmotného bodu (tělesa) při mechanickém kmitání, kterou zaujímá vzhledem k rovnovážné poloze se označuje jako okamžitá výchylka. Okamžitá výchylka je veličinou, která se s časem periodicky mění. U obecného kmitavého děje je okamžitou výchylkou odchylka aktuální hodnoty kmitající veličiny v daném čase od rovnovážné polohy této veličiny.

Absolutní hodnota okamžité výchylky se nazývá velikostí okamžité výchylky. Největší velikost okamžité výchylky se nazývá amplituda (výkmit, rozkmit).

Kmitavé pohyby lze skládat, případně lze užít harmonické analýzy k určení kmitavých pohybů, z nichž se výsledný pohyb skládá.

4.4. Rozdělení kmitání

Kmitající systém je obvykle popisován pomocí diferenciální rovnice nebo soustavy diferenciálních rovnic.

Kmitání lze rozdělit na

- lineární - kmitání lze popsat lineární diferenciální rovnicí nebo soustavou lineárních diferenciálních rovnic (harmonické kmitání)
- nelineární - kmitání nelze popsat lineární diferenciální rovnicí nebo soustavou lineárních diferenciálních rovnic

Podle počtu stupňů volnosti se kmitající systémy dělí na

- systémy s jedním stupněm volnosti
- systémy se dvěma stupni volnosti
- systémy se třemi nebo více stupni volnosti.

Počet rovnic popisujících kmitání je roven počtu stupňů volnosti.

Kmitání lze z kinematického hlediska rozdělit následujícím způsobem.

- periodické - Periodické kmity se opakují po určitém časovém intervalu. Při periodickém pohybu se systém po určitém čase navrátí zpět do původního stavu. Periodické kmity lze dále rozdělit na
- harmonické - Harmonický kmit je periodický pohyb, který lze vyjádřit ve tvaru.

$$y = A\sin(\omega t + \varphi).$$

- anharmonické – Případ, kdy není možné vyjádřit periodický pohyb jako harmonický.
- neperiodické – V případě, kdy se nejedná o periodický pohyb, mluvíme o pohybu neperiodickém (přímočarý pohyb, aperiodické tlumené kmity).

Podle tlumení kmitů lze kmitání dělit na

- netlumené - při kmitání nedochází ke ztrátě energie (nedochází k tlumení kmitavého pohybu)
- tlumené - při kmitání se část energie kmitů ztrácí (např. v důsledku tření nebo odporu prostředí), což ovlivňuje kmitání postupným zmenšování amplitudy.

Působení vnější síly na kmitající systém se označuje jako buzení (též budící nebo vynucující síla).

Buzení se rozlišuje

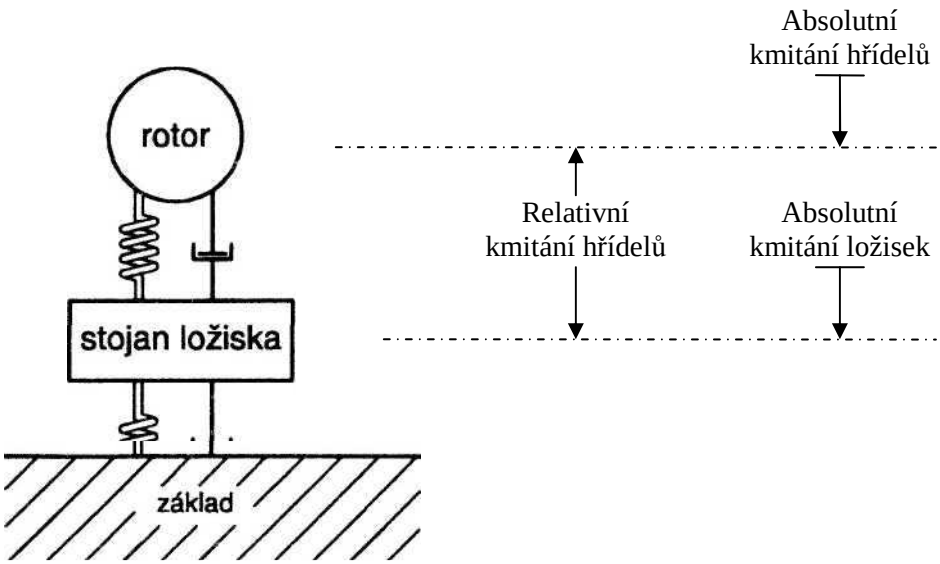
- deterministické - často studovanými případy deterministického buzení je harmonické buzení nebo periodické buzení
- stochastické (náhodné)

Podle vlivu buzení lze kmitání dělit na

- volné - Volné kmitání je kmitání soustavy bez působení vnějších sil, tzn. soustava je vychýlena z rovnováhy, uvolněna a ponechána v pohybu bez působení buzení. Volné kmitání je popsáno homogenními diferenciálními rovnicemi. U lineárního kmitání jsou volné kmity lineární kombinací vlastních kmitů.
- vlastní - Vlastní kmity jsou kmity soustav, na kterou nepůsobí buzení. Vlastní kmity jsou vlastní čísla získaná řešením diferenciální rovnice popisující dané kmitání. Frekvence vlastních kmitů se označuje jako vlastní frekvence (kmitočet).
- nucené - Kmitání je ovlivňováno buzením, dle [9].

5. Snímače vibrací

U strojů a zařízení je nutno rozlišovat veličiny pro absolutní a relativní kmitání**.** U absolutního kmitání tělesa je pohyb tělesa vztahován k pevnému fixnímu bodu. Relativní kmitání tělesa je pak vyhodnocováno vůči zvolenému reálnému bodu, který může být rovněž v kmitavém pohybu (obr. 5.1.).



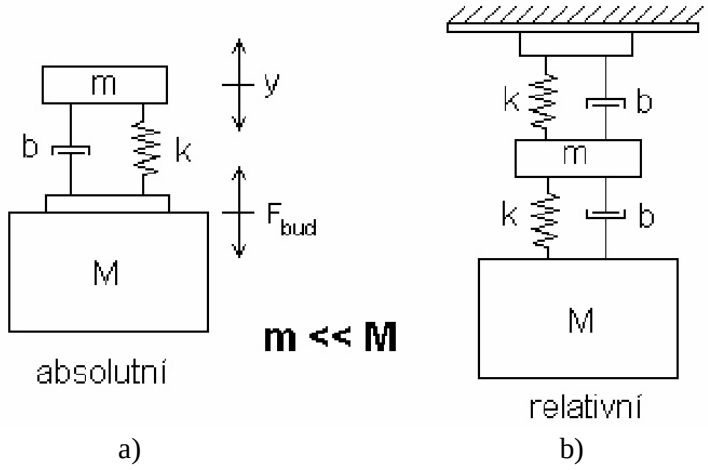
Obr 5.1.
Absolutní a relativní kmitání [13]

Podle stejného principu se senzory kmitání dělí na:

- absolutní senzory kmitání (obr. 5.2.a)
- relativní senzory kmitání (obr.5.2.b)

Kmitání seismické hmoty snímače m lze popsat rovnicí :

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + k\,y = M\,a = F_{bud}$$



Obr. 5.2.
Mechanický model absolutního a relativního snímače [13]

Měření vibrací je prakticky měřením periodického pohybu. Průběh vibrací popisují tři měřitelné veličiny, výchylka, rychlost a zrychlení. K získání přesné 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, které využívají závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které měří relativní vzdálenost mezi dvěma povrchy.

Rychlost se měří v $mm.s^{-1}$, je to 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.

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.

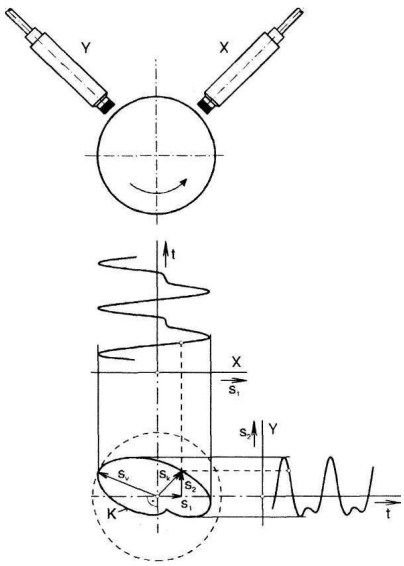
5.1 Snímače výchylky, snímače polohy a snímače posuvu

Senzory výchylky kmitů, senzory polohy a posunutí lze realizovat na indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém, optickém aj. principu. Ve vibrodiagnostice jsou v současné době nejrozšířenějšími indukčnostní senzory využívající závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Vířivé proudy způsobené vysokofrekvenčním magnetickým polem v elektricky vodivém materiálu vytvoří v tomto materiálu sekundární magnetické pole. Intenzita tohoto pole působí proti intenzitě pole budicí cívky, tj. v závislosti na vzdálenosti budicí cívky od vodivého povrchu se intenzita pole cívky více nebo méně zeslabí. Bude-li budicí cívka současně cívkou oscilačního obvodu, dochází při kmitávém pohybu měřeného objektu k amplitudové modulaci oscilačního napětí. Amplitudovou demodulací pak lze získat potřebný signál odpovídající časovému průběhu výchylky.

Vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu jsou tyto senzory náchylné na parazitní vlivy, jako je např. délka kabelu k měřicím obvodům, vnějším elektromagnetickým polím aj. Proto se tyto senzory vyrábějí jako integrované, tzn. že v kovovém stínícím krytu je kromě vyčnívající cívky zabudována základní část elektroniky.

Uvedený typ senzoru výchylky má obvykle kmitočtový rozsah od 0 do 10 000 Hz, což odpovídá 600 000 ot/min. Kmitočet 0 Hz odpovídá statickému měření, např. relativní poloze stojícího hřídele. Vzhledem k tomu, že v technické praxi nebudou otáčky rotujících částí objektu obvykle vyšší než 30 000 ot/min, umožňuje senzor vyhodnotit kmitání s frekvencí řádově vyšší, než je frekvence odpovídající otáčkám.

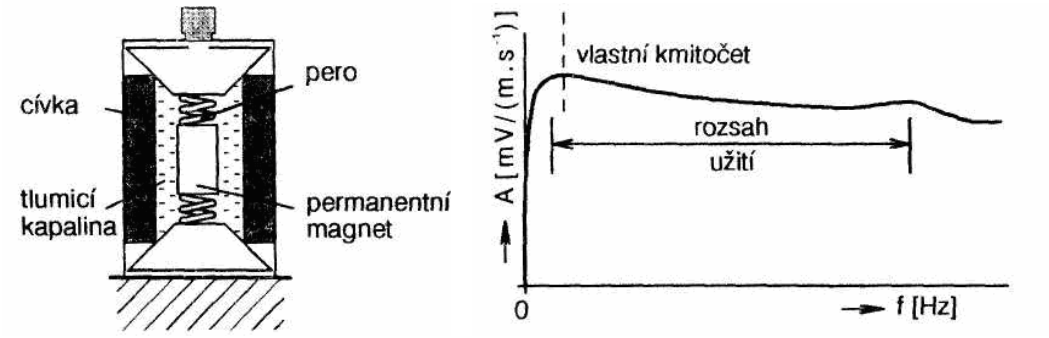
Umístíme-li k rotujícímu hřídeli dva uvedené snímače tak, aby jejich osy svíraly 90°, můžeme vyhodnotit kinematickou dráhu hřídele. (obr 5.3.)



Obr 5.3.
Vyhodnocení kinematické dráhy (tzv. orbitu) rotujícího hřídele. (s_1 , s_2 – okamžité hodnoty výchylky, S_k – okamžitá kinematická výchylka hřídele, K – kinematická dráha hřídele [13]

5.2 Snímače rychlosti

Pro měření rychlosti kmitání lze použít senzor zrychlení a výstupní signál z tohoto senzoru integrovat, nebo senzor elektrodynamický. Příklad uspořádání elektrodynamického senzoru kmitání je na obr. 5.4.



Obr.5.4.
Absolutní elektrodynamický senzor rychlosti kmitání [13]

Měřící cívka se pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu, který tvoří seismickou hmotnost senzoru. V cívce se při kmitavém pohybu přenášeném z měřeného objektu na pouzdro senzoru indukuje elektrické napětí:

$$U = B \cdot l \cdot v$$

Kde : B - indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře, l - délka vodiče cívky, v - rychlost kmitání pouzdra senzoru

Takový elektrodynamický senzor je ve skutečnosti absolutním senzorem amplitudy kmitání, ale vzhledem k vnitřnímu uspořádání je při mechanicko-elektrické transformaci signálu přímo vyhodnocována rychlost kmitání pouzdra. Vlastní kmitočet elektrodynamických senzorů rychlosti je 5-10 Hz. Optimálně zvoleným tlumením lze senzor aplikovat s určitou chybou od rezonančního kmitočtu nebo za použití korekce statické převodní charakteristiky již od 1 Hz. Horní kmitočet uvedeného senzoru se pohybuje v rozmezí 2 000 až 3 000 Hz. Nad touto hranicí frekvence jsou další parazitní mechanické rezonance dané tuhostmi upevnění vnitřních dílů senzoru.

Výhody:	-nízká cena -vysoká úroveň výstupního signálu i při nízkých kmitočtech -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 ve většině moderních diagnostických systémů používají piezoelektrické akcelerometry s integrovanou elektronikou.

5.3 Snímače zrychlení – akcelerometry

5.3.1. Základní rozdělení akcelerometrů

piezorezistivní - využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu

piezoelektrické - využívají piezoelektrický krystal (přírodní nebo keramiku), který generuje náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí na každý objekt

tepelné - využívají rozdílného přenosu tepla v plynech při klidném nebo pohybujícím se topném tělísku

5.3.2 Piezorezistivní akcelerometr

Je to senzor, který využívá piezorezistivní materiál místo piezoelektrického krystalu a jeho prostřednictvím převádí sílu vzniklou urychlovanou hmotou na změnu odporu. V integrovaných piezorezistivních akcelerometrech se využívá sítě vyleptaných měřících piezorezistivních snímačů zapojených ve Wheatstonově můstku. Výhoda Piezorezistivní akcelerometry proti piezoelektrickým je, že mohou měřit i stálou akceleraci, tzn. frekvenci změn od 0 Hz.

Zavěšená hmota integrovaného piezorezistivního akcelerometru je zátěž na pružině připevněné k rámu. Když se rám pohne, hmota bude mít tendenci zůstat v klidu do doby, kdy napjatá pružina předá dostatek síly hmotě k pohybu. Síla působící na pružinu je úměrná deformaci, a ta je dále přímo úměrná měřenému zrychlení.

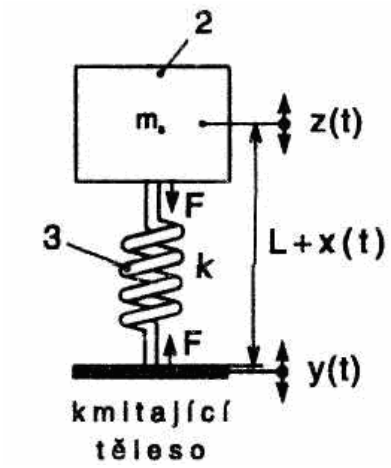
5.3.3 Tepelné akcelerometry

Využívají základní fyzikální princip, který se v podobné verzi používá u kalorimetrických průtokoměrů. Jde o přenos tepla v plynu a snímání rozložení teploty v okolí zdroje tepla. Topné tělísko zahřívá okolní vzduch ve vzduchové komoře na konstantní teplotu. Rozložení teploty v závislosti na vzdálenosti od topného tělíska je měřené teplotními snímači. Ty jsou realizovány soustavou termočlánků hliník/polykrystalický křemík, umístěné v pravidelných rozestupech. Celá tato soustava je implementována ve vyleptaném příkopě křemíkového substrátu. Celý senzor, včetně vyhodnocovací elektroniky, je plně integrován na jednom CMOS čipu senzoru, v jednom pouzdře.

Teplotní akcelerometry patří svojí konstrukcí k nejspolehlivějším senzorům zrychlení. Měření pohybu pomocí přenosu tepla prakticky neumožňuje senzor zničit přetížením, tj. vystavení příliš velké hodnotě zrychlení. Nevýhodou této vlastnosti je velký vliv okolní teploty na citlivost senzoru. To je obvykle nutné kompenzovat dalším teplotním senzorem, termistorem, který je někdy již umístěn přímo na chipu akcelerometru.

5.3.4 Piezoelektrické akcelerometry

Je to absolutním senzor kmitání, který pracuje s vlastní seismickou hmotností. Oproti absolutnímu elektrodynamickému senzoru není vztažná seismická hmotnost v absolutním klidu. Model senzoru dle obr. 5.5. je zjednodušený, neboť je v něm zanedbáno lineární tlumení a předpětí piezoelektrických destiček. Dále se v modelu předpokládá, že spojení akcelerometru s měřeným povrchem kmitajícího objektu má nekonečnou hodnotu tuhosti, a že hmotnost diagnostikovaného objektu je podstatně větší než hmotnost akcelerometru.



Obr 5.5.
Mechanický model piezoelektrického snímače [13]

5.4. Konstrukce piezoelektrických snímačů

Konstrukce piezoelektrických akcelerometrů má tři základní mechanická uspořádání. První dvě jsou založena na principu smykových napětí a třetí řešení je varianta s tlakovým principem.

5.4.1. Konstrukce "Delta Shear(R)"

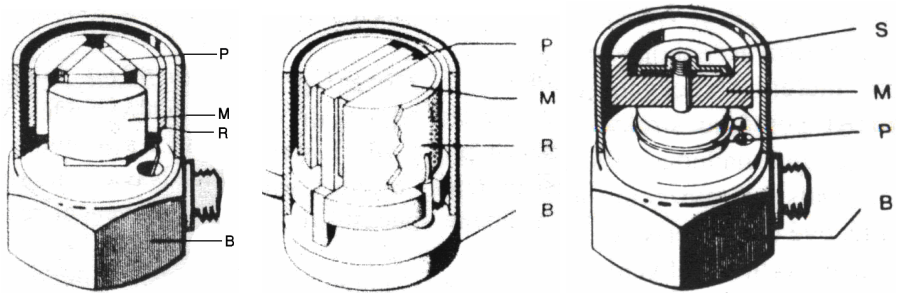
Zde jsou použity tři dvojice piezoelektrických krystalů a tělísek na středovém trojúhelníkovém sloupku. Celá konstrukce je upevněna a předepnuta předpínacím prstencem a není tedy nutné použití žádného lepidla či jiného mechanického spojení. Předpětí piezoelektrických krystalů vyvolané prstencem zaručuje vysoký stupeň linearity celého snímače. Náboj je získáván mezi prstencem a povrchem snímače. Toto je zárukou vysoké citlivosti v poměru ke hmotnosti snímače a má poměrně vysoký vlastní rezonanční kmitočet. Dalšími přednostmi je oddělení základní plochy snímače od vlastního mechanismu, což přináší možnost použití těchto snímačů pro vysoké teploty a odolnost proti mechanickému namáhání. Tyto výše uvedené vlastnosti znamenají, že snímače s konstrukcí "Delta Shear(R)" jsou nejrozšířenější variantou. Schéma této konstrukce je na obr. 5.6.a.

5.4.2. Konstrukce "Planar Shear"

Konstrukce je svým principem velmi podobná předchozímu typu. Liší se pouze počtem piezoelektrických krystalů - zde jsou použity pouze dva. Předpětí, montáž výhody s tím spojené jsou shodné s typem "Delta Shear(R)". V citlivosti a charakteristice nedosahuje tento snímač tak dobrých výsledků jako typ "Delta Shear(R)". Schéma je na obr. 5.6.b.

5.4.3. Konstrukce s centrálně tlakovým namáháním

Jedná se o klasickou, jednoduchou konstrukci, která umožňuje dosáhnout pouze průměrného poměru mezi citlivostí a hmotností snímače. Na válcovém středu se nachází piezoelektrický krystal a setrvačná hmota s předpětím vyvolaným diskovou pružinou. Nevýhodou takového uspořádání je citlivost konstrukce na změny tvaru a namáhání základny snímače, což je provázeno změnami úrovně výstupu. Toto lze kompenzovat speciálními materiály použitými pro těleso snímače, ale samozřejmě na úkor ceny. Proto jsou tyto snímače používány pro měření velmi velkých amplitud chvění a rázů, kde je výstupní signál mnohonásobně vyšší než případné změny citlivosti. Dále se tyto snímače uplatňují jako referenční při kalibraci, kde jsou vnější podmínky řízeny a stabilizovány. Pro toto laboratorní použití jsou snímače navíc upravovány vložením beryliové destičky do základny, pro minimalizaci vlivu ohybu základny. Schéma konstrukce je na obr. 5.6.c.



a) **b)** **c)**

Obr 5.6.
Konstrukční uspořádání snímačů, B - těleso snímače, M - seismická hmota, P - piezoelektrický člen, R - předpínací prstenec, S - předpínací disk [13]

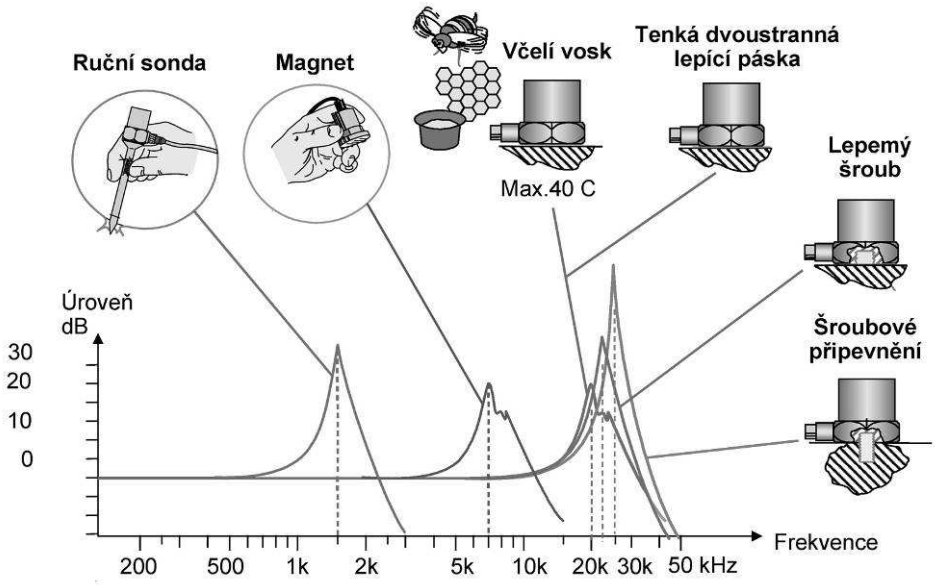
5.5. Uchycení piezoelektrických snímačů

Významný vliv na snímaný kmitočtový rozsah vibrací má také způsob připevnění piezo-elektrického akcelerometru (obr. 5.7.).

Nejpřesnější frekvenční odezvu snímače a maximální využití jeho kmitočtového rozsahu poskytuje upevnění pomocí šroubů s hlavou nebo závrtných šroubů. Velká tuhost šroubového spojení je výhodná i z hlediska vysokého rezonančního kmitočtu 15-30 kHz. Pro zvýšení montážní tuhosti a zlepšení frekvenční odezvy se na montážní plochu nanáší tenká vrstva silikonové vazelíny.

Přilepený snímač má základní rezonanci obvykle nad 10 kHz, u špičkových lepidel až 28 kHz, u včelího vosku dokonce 29 kHz. Síla přilepení musí zabezpečovat spolehlivé držení snímače na ploše, na druhé straně musí umožnit sejmutí snímače bez jeho poškození. Proto se jako lepidlo nejčastěji používají zubní cement nebo také kyanoakrylátová lepidla. Pro připevnění méně hmotných snímačů je možné použít také včelí vosk nebo oboustranně lepící pásku.

Nejméně přesné jsou dotykové přenosné přístroje, ty však mají význam pro hledání vhodného místa pro sběr dat.

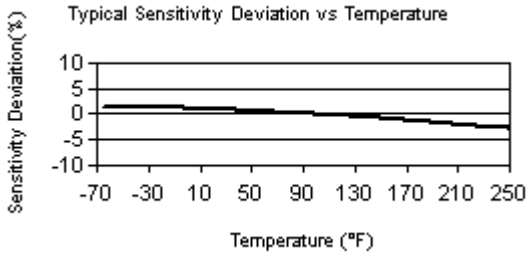


Obr 5.7.
Vliv uchycení snímačů na frekvenční rozsah [13]

6. Vliv teploty na snímače vibrací

Piezoelektrické snímače využívají piezoelektrický krystal, který generuje náboj úměrný síle na něj působící. Jestliže při působení tepla dochází i k rozpínání tohoto krystalu, lze předpokládat, že dochází ke zkreslení velikosti výstupního náboje. Poté je hodnota vibrací, kterou snímač ukazuje odlišná od skutečnosti.

Výrobce PBC uvádí, že s rostoucí teplotou klesá citlivost snímače, tzn. že s rostoucí teplotou ukazuje nižší hodnoty [6]. Průběh má mírně logaritmicky charakter viz graf 6.1.



Graf. 6.1.
Citlivost snímače vibrací v závislosti na teplotě [6]

Ve snímačích vibrací je osazena elektronika, která mimo jiné i kompenzuje vliv teploty. Je nutno tedy počítat s tím, že snímače od jiných výrobců se budou chovat odlišně.

7. Provozní podmínky strojů a zařízení

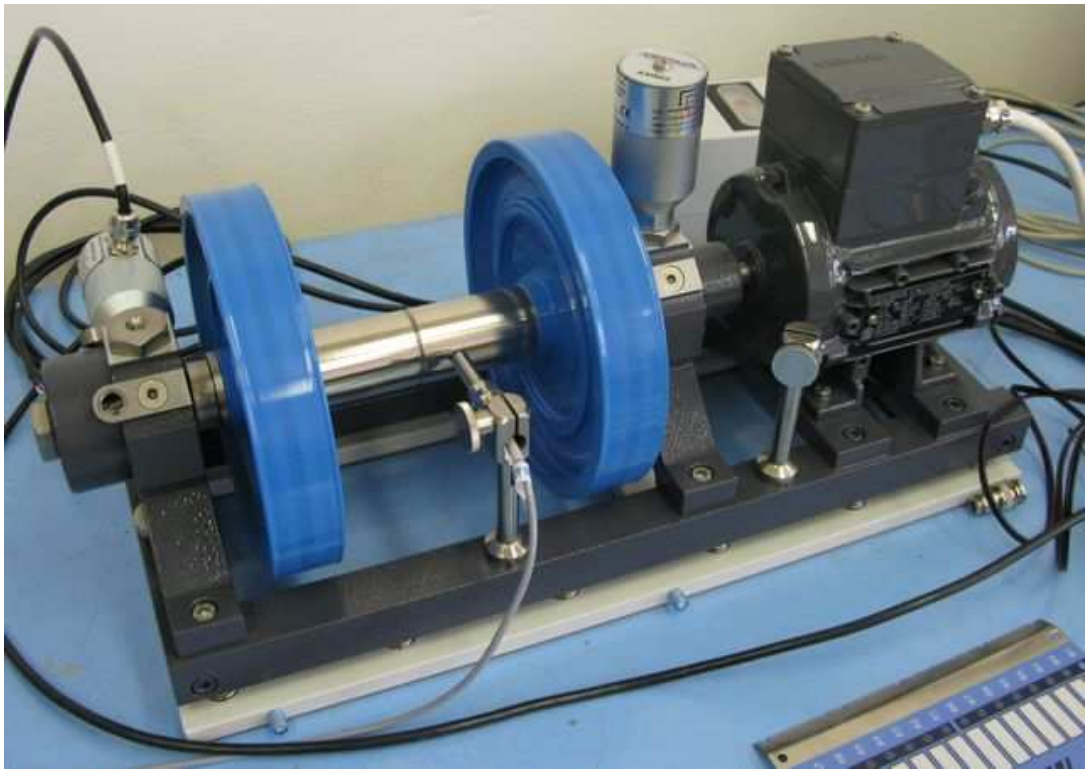
Při provozu strojů a zařízení dochází vlivem mechanických pohybů k jejich zahřívání. Teplota by neměla ve většině případů přesahovat 50 °C, neboť při vyšších teplotách dochází nejen ke zkreslování hodnot při snímání vibrací, čímž se zabývá tato práce, ale je zde i nebezpečí, poruch jednotlivých komponentů stroje, např. vytečení vazelíny z ložisek a tím k možným poruchám.

Abychom zajistili co možná nejpřesnější funkci snímačů vibrací, je nutno při osazování zařízení zvolit místo, které je méně teplotně namáháno.

Pokud osazujeme zařízení, jenž pracuje při vyšších teplotách, je nutno zvolit takové snímače vibrací, které jsou dimenzovány pro vyšší teploty.

8. Praktický test

Zažízení, které jsem použil pro testy, se skládá ze základního rámu, motoru Siemens 0,09 kW, frekvenčního měniče Siemens Sinamics G110, hřídele uloženého ve dvou ložiscích a dvojice kotoučů osazených na této hřídeli.



Zařízení koná konstantní rotační pohyb. K dosažení rovnoměrných vibrací jsem použil plastickou hmotu, kterou jsem připevnil na kotouč a tím dosáhl nevyvážení celé soustavy. Při rotaci pak tato nevyváženost způsobovala lineární (harmonické) kmitání, popsané v kapitole 2.4, které jsem sledoval.

Měnič Sinamics G110 zajišťoval konstantní otáčky. Pro správnost a přesnost celého testu bylo nutné zajistit, aby po celou dobu měření byly vibrace konstantní. Konstantní vibrace jsou pro celý test klíčové. Bez této jistoty by měření bylo naprosto neprůkazné a zbytečné. Nebylo by pak možno sledovat, jak se mění hodnota vibrací snímané snímačem při zahřátí.

8.1. Použité vybavení – test č. 1

Snímač - Viditech ASW02

Jedná se o akcelerační snímač vibrací s měřením teploty v místě připojení. Teplota je měřena elementem od firmy Wilcoxon.

Vlastnosti snímače

- Citlivost 100mV/g
- Rozsah měřených teplot 0-130°C +-1%

Software - VDTControl center (Viditech spol. s r.o.**)**

Software VDTControl center slouží, jako monitorovací prostředek přístrojů a zároveň umožňuje s přístroji manipulovat a vyhodnocovat výsledky jejich měření.
Software je postaven na modelu klient-server, tudíž poskytuje možnost vzdáleného přístupu odkudkoli, kde je k dispozici síťové připojení.

Analyzátor - Viditech VDT 02-A

Akcelerační snímač dodává v čase elektrický signál odpovídající zrychlení vibrací. Přístroj Viditech VDT 02-A tento signál digitalizuje a dále zpracovává v digitální podobě. Kromě jiného provádí itegrace, filtrace a výpočet efektivní hodnoty. Jedním z výpočtů, prováděným přístrojem VDT, je také efektivní hodnota rychlosti chvění [mm/s] v určitém frekvenčním pásmu.

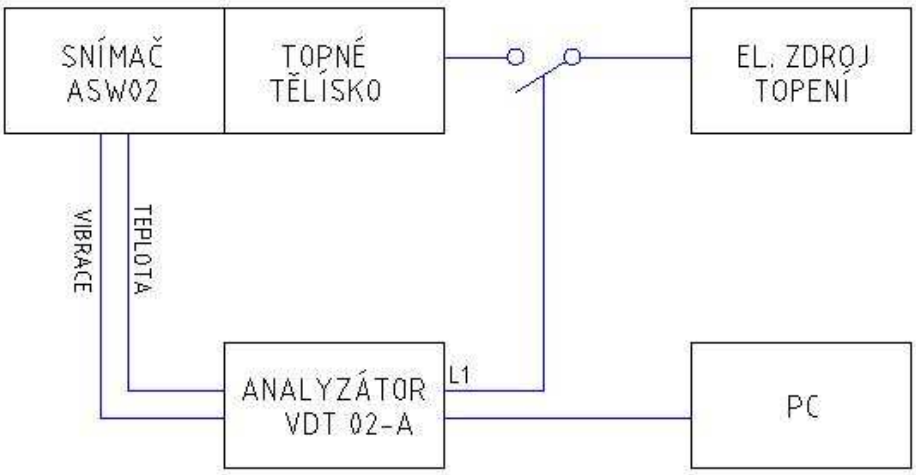
Vlastnosti přístroje

- Měření vibrací ve dvou kanálech
- Měření teplot ve dvou kanálech
- Měření kondice ložiska ve dvou kanálech
- Dlouhodobý záznam trendů vibrací, teplot a kondice ložiska v přístroji
- Dlouhodobý záznam trendů vibrací, teplot a kondice ložiska v přístroji
- Provádí analýzy vibrací a kondice ložiska
- Možnost nastavení mezí hlídání připojeného stroje pro vibrace, teplotu a kondici ložiska
- Možnost nastavení mezí hlídání připojeného stroje pro vibrace, teplotu a kondici ložiska
- Záznam před a po poruchového stavu stroje

8.2. Popis testu č. 1

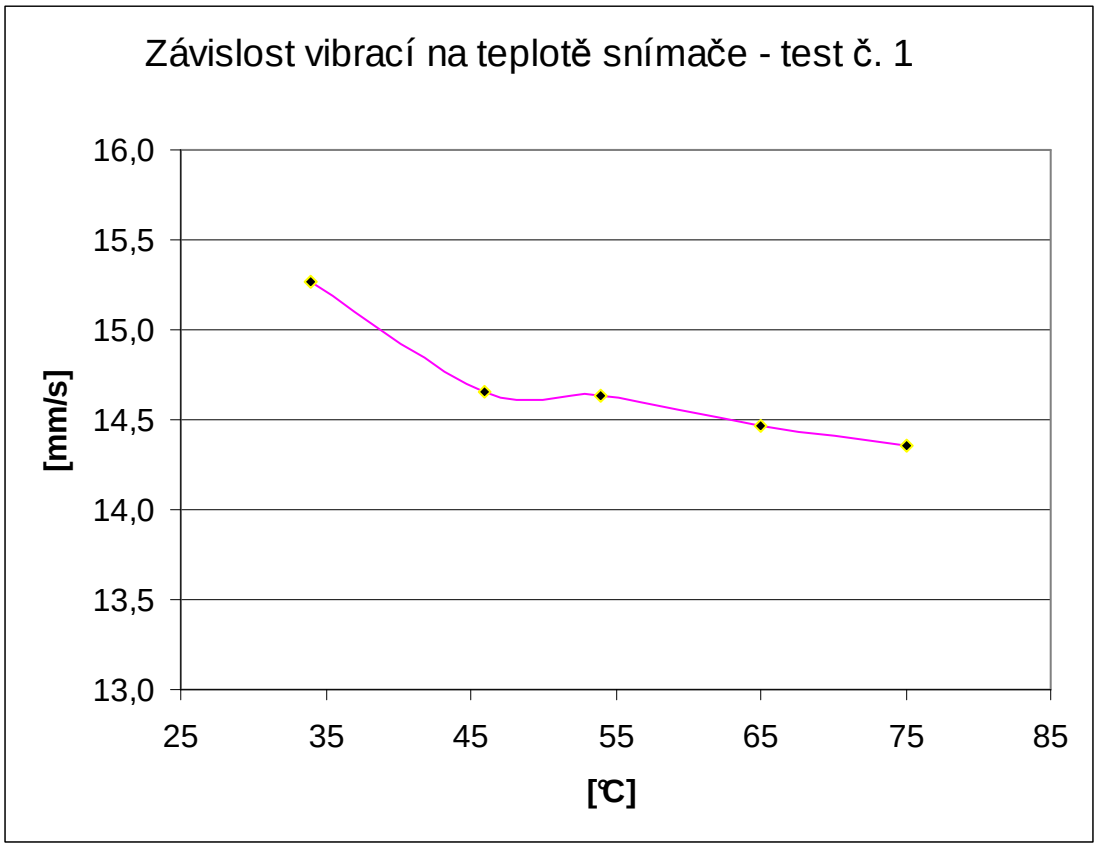
Na výše popsaném zařízení, které provádělo konstantní rotační pohyb, zajištěný frekvenčním měničem, jsem osadil snímač vibrací Viditech ASW02. Pomocí analyzátoru Viditech VDT 02-A jsem naměřené hodnoty ukládal do PC. Data jsem zpracovával pomocí software VDTControl center. Topným tělískem Omegalux KH 103/10 jsem snímač vibrací zahříval a sledoval, jak se s rostoucí teplotou mění hodnota vibrací. Orientační schéma celé soustavy je znázorněno na obr. 8.1.

Analyzátor Viditech VDT 02-A je schopen provádět dvoustavovou regulaci, využitím spínacích svorek L1 . Celá soustava byla zapojena tak, že topné tělísko ohřívalo snímač do té doby, než bylo dosaženo žádané teploty. Po dosažení žádané teploty došlo k rozepnutí svorky L1 a tím topné tělísko přestalo zahřívat snímač. Zahřívání se znovu spustilo jakmile teplota poklesla. Takto jsem reguloval teplotu vždy 2 min. Pomoci software VDTControl center jsem získával údaje o vibracích každou sekundu. Po dokončení měření na jednotlivých teplotách jsem data exportoval do tabulkového editoru, kde jsem z nich vypočetl průměrnou hodnotu a tuto jsem použil pro další zpracování.



Obr. 8.1. Schéma zapojení soustavy

Test ukázal, že s rostoucí teplotou dochází ke změně hodnoty vibrací (graf 8.1). Při počáteční teplotě 34°C byly vibrace na hodnotě 15,27 mm/s. Při konečné teplotě 75°C poklesly vibrace 14,35. Tzn., že při teplotním rozdílu 36°C došlo ke zkreslení hodnoty vibrací o 6,3%.



Graf 8.1.

Snímač s rostoucí teplotou vykazoval klesají hodnoty vibrací. Křivka poklesu se dá vyjádřit rovnicí **$y = -0{,}00003x^3 + 0{,}0063x^2 - 0{,}3802x + 22{,}314$.**

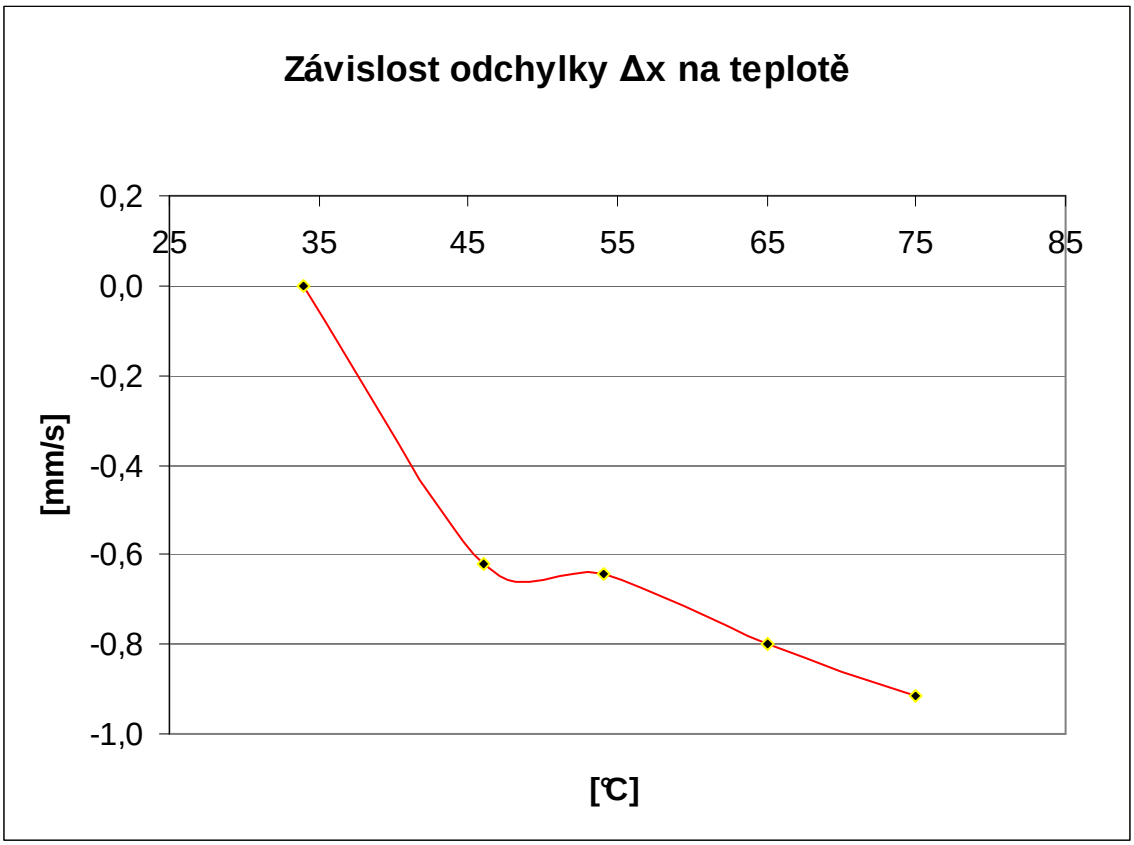
Přestože jsem použil akcelerační snímač vibrací, pracoval jsem s rychlostí vibrací. Přepočet zajistil přístroj Viditech VDT 02, který dokáže zrychlení integrovat a tím vykázat hodnoty rychlosti vibrací.

V tabulce 8.1. jsou zaznamenány hodnoty vibrací, které byly naměřeny při různých teplotách. Jako skutečnou hodnotu jsem použil hodnotu počáteční, tedy hodnotu při 34°C. Předpokládal jsem, že snímač je kalibrován na teplotu 20 °C a tato teplota je jí nejbližší.

teplota [℃]	vibrace [mm/s]	odchylka Δx [mm/s]	relativní chyba δx [%]
34	15,27	0,00	0,0
46	14,65	-0,62	-4,2
54	14,63	-0,64	-4,4
65	14,47	-0,80	-5,5
75	14,35	-0,92	-6,4

tab 8.1

V grafu 8.2. Je znárodněno, jak se s vzrůstající teplotou měnila odchylka Δx.



Graf 8.2.

Směrodatnou odchylku celého měření s(x) vypočítáme podle vztahu

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

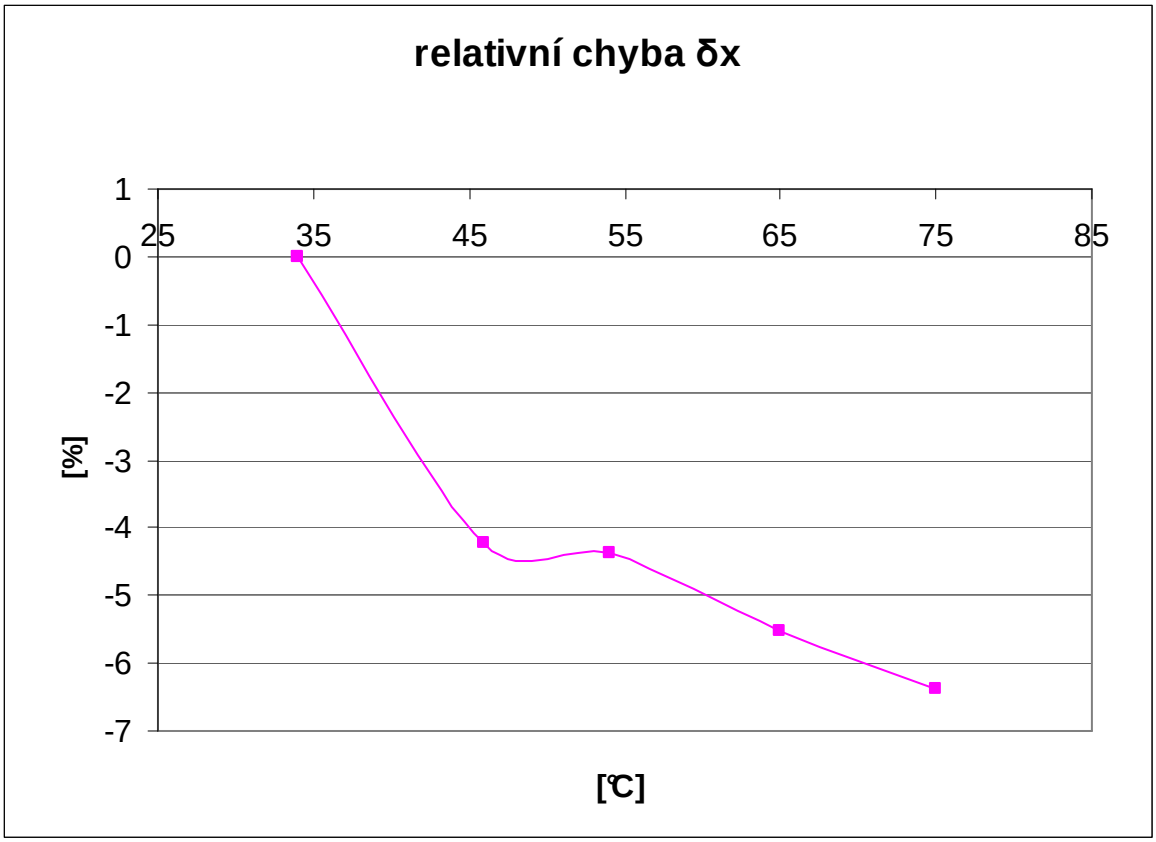
$$s(x)^2 = \frac{(0{,}38 + 0{,}41 + 0{,}64 + 0{,}84) + 0{,}46^2}{4}$$

$$s(x)^2 = \frac{2{,}483}{4}$$

$$s(x)^2 = 0{,}621$$

$$s(x) = 0{,}788$$

V grafu 8.3. Je znárodněno, jak se s vzrůstající teplotou měnila relativní chyba δx.



Graf 8.3

8.3. Použité vybavení – test č. 2

Pro druhý test jsem použil stejné zařízení pro zdroj vibrací, i pro ohřev snímače, rozdíl byl pouze v typu snímače, ve způsobu záznamu dat a ve způsobu měření teploty. Hodnotu vibrací jsem odečítal na přístroji Adash 4900, teplotu jsem měřil pomocí multimetru Metex M-3850. Termočlánek multimetru jsem umístnil v místě spojení snímače a magnetu, kterým byl snímač připevněn ke konstrukci zařízení.

Snímač - CTC 100 mV/g

- Citlivost 100 mV/g
- Dynamický rozsah + - 80 g,
- Teplotní rozsah -50 to 121°C
- Připojení 2 Pin MIL-C-5015
- Maximální teplota 121°C

Měřící přístroj- Adash 4900

- Vstupy	- 1x IPC (připojení akcelerometru)
- Výstupy	- 1x mono AC, 8 ohm /0,5 W (připojení sluchátek)
- Měřící 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
- Měřící rozsah	- automatický, max. 80g peak pro snímač 100 mV/g, +/-12V peak AC

Multimetr - Metex M-3850

Základní vlastnosti

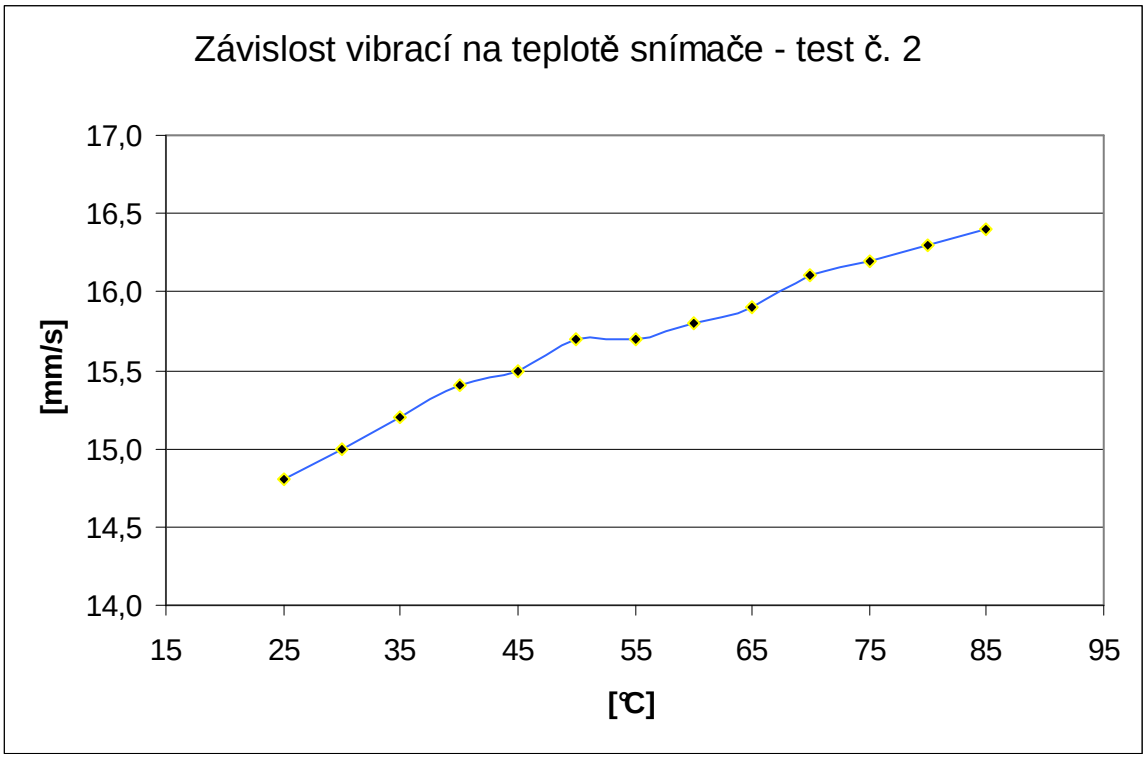
- měření stejnosměrného a střídavého napětí a proudu (do 20 A)
- měření odporu, kmitočtu, kapacity a indukčnosti
- optický a akustický test propojení a test tranzistorů
- simulace logické sondy
- možnost měření útlumu (v dB)
- měření teploty

8.4. Popis testu č. 2

Druhý pokus jsem prováděl na stejném zařízení pro zdroj vibrací, jako u pokusu prvního. V tomto případě jsem však hodnoty teploty i vibrací odečítal vizuálně a zaznamenával tužkou na papír. Jelikož použitý akcelerometr nemá integrovaný snímač teploty, snímal jsem teplotu termočlánkem multimetru Metex v místě mezi snímačem a magnetem, kterým byl snímač připevněn k zařízení.

Opět jsem topným tělískem Omegalux KH 103/10 zahříval snímač vibrací a sledoval vliv rostoucí teploty na hodnoty vibrací. Test ukázal, že s rostoucí teplotou dochází ke změně hodnoty vibrací (graf 8.4). Při počáteční teplotě 25°C byly vibrace na hodnotě 14,8 mm/s. Při konečné teplotě, která byla v tomto případě 85°C, vzrostly vibrace na 16,4mm/s. Tzn., že při teplotním rozdílu 70°C došlo ke zkreslení hodnoty vibrací o 10,8%. Křivka vzestupu se dá vyjádřit rovnicí

$$\mathbf{y = 0{,}000007x^3 - 0{,}0012x^2 + 0{,}0966x + 13{,}044}$$



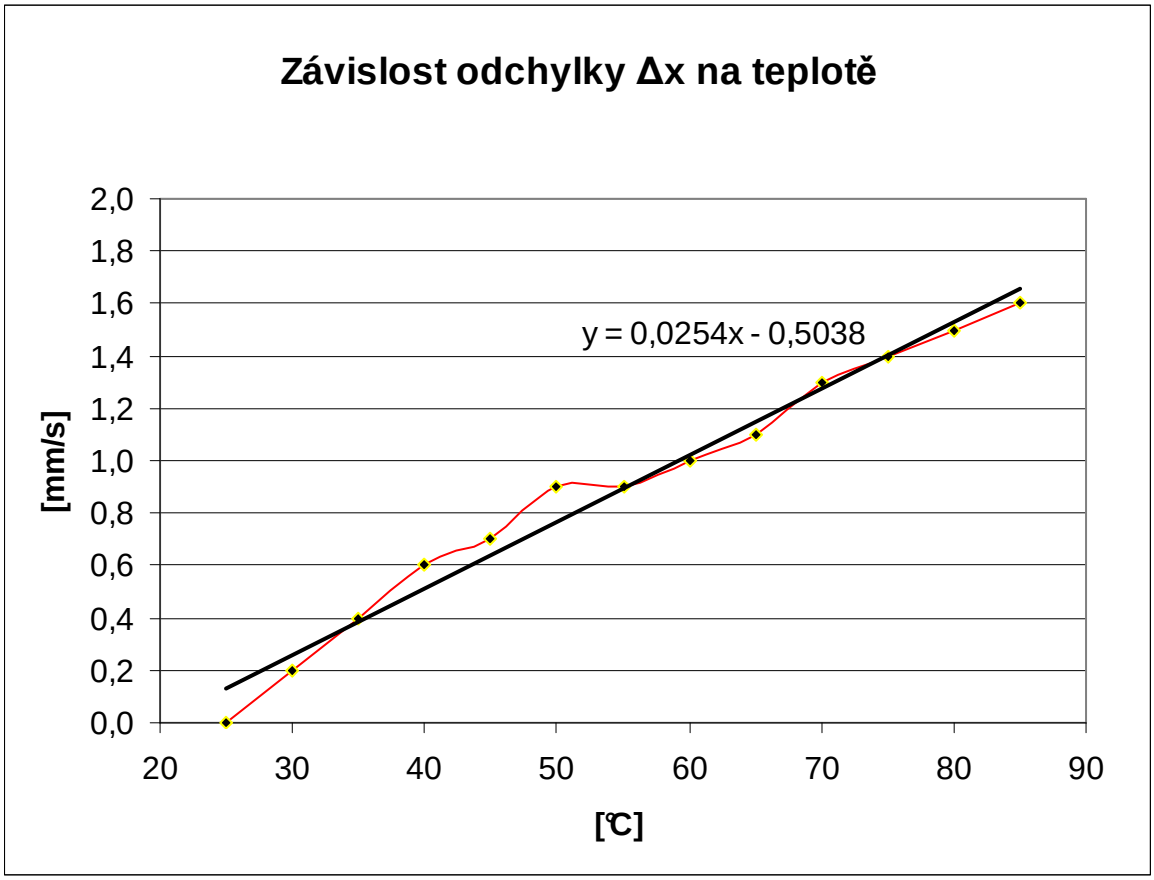
Graf 8.4.

V tabulce 8.2. jsou zaznamenány hodnoty vibrací, které byly naměřeny při různých teplotách. Jako skutečnou hodnotu jsem použil hodnotu počáteční, tedy hodnotu při 25°C. Předpokládal jsem, že snímač je kalibrován na teplotu 20 °C.

teplota [℃]	vibrace [mm/s]	odchylka Δx [mm/s]	relativní chyba δx [%]
25	14,80	0,00	0,0
30	15,00	0,20	1,3
35	15,20	0,40	2,6
40	15,40	0,60	3,9
45	15,50	0,70	4,5
50	15,70	0,90	5,7
55	15,70	0,90	5,7
60	15,80	1,00	6,3
65	15,90	1,10	6,9
70	16,10	1,30	8,1
75	16,20	1,40	8,6
80	16,30	1,50	9,2
85	16,40	1,60	9,8

tab 8.2.

V grafu 8.5. Je znárodněno, jak se s vzrůstající teplotou měnila odchylka Δx.



Graf 8.5 (přímka znázorňuje lineární spojnici trendu, viz. závěr)

Směrodatnou odchylku celého měření s(x) vypočítáme podle vztahu

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n-1}}$$

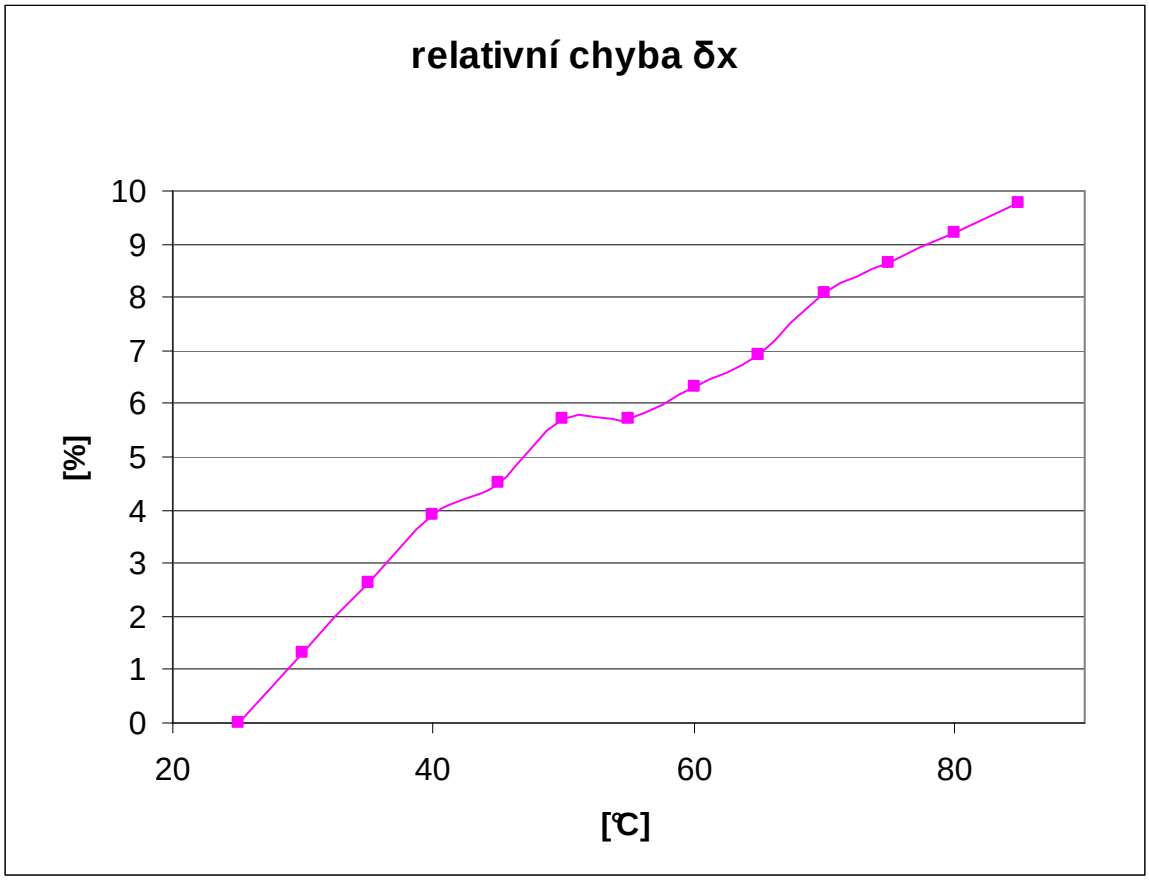
$$s(x)^2 = \frac{(0{,}04 + 0{,}16 + 0{,}36 + 0{,}49 + 0{,}81 + 0{,}81 + 1 + 1{,}21 + 1{,}69 + 1{,}96 + 2{,}25 + 2{,}56) + 1{,}03^2}{12}$$

$$s(x)^2 = \frac{14{,}39}{12}$$

$$s(x)^2 = 1{,}994$$

$$s(x) = 1{,}095$$

V grafu 8.6. Je znárodněno, jak se s vzrůstající teplotou měnila relativní chyba δx.



Graf 8.5

9. Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval vlivem teploty na snímače vibrací. Nejprve jsem obecně popsal vibrace, jejich snímače, a zabýval se všeobecně problematikou měření a vyhodnocování výsledků. Ve druhé části jsem provedl dva experimenty s různými snímači vibrací, které jsem se pokusil zpracovat.

V obou testech se prokázalo, že teplota snímače má nezanedbatelný vliv na hodnoty vibrací, které snímač vykazuje. V testu č. 2 se dokonce hodnota vibrací změnila o 10,8%, což je již jistě ne zcela zanedbatelná hodnota.

Zajímavé je i to, že snímače, které jsem použil, reagovaly na zvyšující se teplotu opačně. Zatímco v prvním testu, kde byl použit snímač Viditech ASW02, vykazoval s nárustem teploty klesající hodnoty vibrací, v testu č. 2 , kde jsem použil snímač CTC 100 mV/g, měly se zvyšující se teplotou hodnoty vibrací vzrůstající tendenci. Toto je zřejmě způsobeno elektronikou, která je nedílnou součástí každého snímače vibrací, a která je nastavena reagovat na zvyšující se teplotu rozdílným způsobem. Výrobce počítá s tím, že snímač bude vykazovat se změnou teploty rozdíly a tyto se snaží více či méně úspěšně kompenzovat..

Při posuzování diagnostiky zařízení je nutno k těmto skutečnostem přihlédnout. Na základě testů, které jsem provedl, je možné si vytvořit jednoduchou kompenzaci, kterou vytvoříme doplněním lineárního trendu do grafu absolutní odchylky a pomocí toho naměřené hodnoty kompenzovat.

V testu č. 2 to znamená, hodnotu vibrací je nutno přepočítat rovnicí

$$y = 0{,}0254x - 0{,}5038.$$

Např. pro teplotu $t = 50°C$ jsem naměřil hodnotu vibrací $y = 15{,}7$ mm/s. Víme však, že skutečné vibrace se nezměnily a mají hodnotu $y_{skut} = 14{,}8$ mm/s.

Pokud dosadíme do rovnice, dostaneme tvar

$$y_{skut} = y - (0{,}0254* t - 0{,}5038) = 15{,}7 - (0{,}0254 * 50 - 0{,}5038) = 14{,}9$$

Původní vibrace při 25°C byly 14,8 mm/s. Malá nepřesnost je způsobena lineárním tvarem rovnice, kterou jsem v tomto jednoduchém závěru použil. Pokud bych jako rovnici trendu použil polynom vyššího řádu, přesnost celé kompenzace by byla větší. Pro názornou demonstraci však postačí lineární verze.

Je třeba si uvědomit, že tento způsob je možno použít pouze pro konkrétní typ snímače, na kterém jsem provedl testování. Jak dokazuje test č. 1, snímače jiných typů mají i jiné reakce na změnu teploty, tím pádem je nutno pro přepočet použít rovnici jinou, která je sestavena na základě podobného testu, jenž je popsán v této práci.

10. Seznam použité literatury

[1] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů*. Automatizace.hw [online]. 2007, leden [cit. 3.dubna. 2008].
Dostupné na WWW: http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401

[2] VDOLEČEK, František *Technická měření*: Brno 2002. [PDF dokument]. Vysoká škola technická v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
Dostupný na WWW: http://autnt.fme.vutbr.cz/Lab/A1-731a/ETC.pdf

[3] Webové stránky společnosti Physik Instrumente [online]. [cit. duben 2008]
Dostupné na WWW: http://www.physikinstrumente.com/en/index.php

[4] Webové stránky společnosti Wilcoxon [online]. [cit. duben 2008]
Dostupné na WWW: http://www.wilcoxon.com/

[5] Webové stránky společnosti Omega [online]. [cit. duben 2008]
Dostupné na WWW: http://www.omega.com/ , http://www.omegaeng.cz/

[6] Webové stránky společnosti PCB [online]. [cit. duben 2008]
Dostupné na WWW: http://www.pcb.com/

[7] Webové stránky společnosti Auranet [online]. [cit. květen 2008]
Dostupné na WWW: http://www.auranet.cz/

[8] Webové stránky společnosti Adash [online]. [cit. květen 2008]
Dostupné na WWW: http://www.adash.cz/

[9] Wikipedia [online]. [cit. květen 2008]
Dostupné na WWW: http://cs.wikipedia.org

[10] Seznam Encyklopedie [online]. [cit. květen 2008]
Dostupné na WWW: http://encyklopedie.seznam.cz

[11] JANČÍK, Jaroslav, VACÁTKO Jiří. *Diagnostika v řídicích systémech*. Automa [online]. [cit. 18.května. 2008].
Dostupné na WWW: http://www.odbornecasopisy.cz/

[12] Webové stránky společnosti Lammb [online]. [cit. květen 2008]
Dostupné na WWW: http://www.lammb.cz/

[13] ZUTH, Daniel, Analýza vibrací. Diplomová práce: Brno 2004 [cit. duben 2008].
Vysoká škola technická v Brně, Fakulta strojního inženýrství