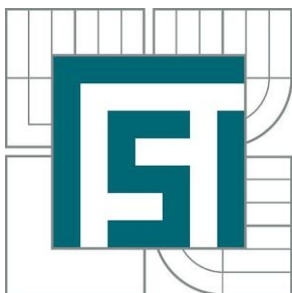




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A
DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MĚŘENÍ VIBRACÍ NA OBRÁBĚCÍCH STROJÍCH

MEASUREMENT OF VIBRATION IN MACHINE TOOLS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ HUSAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN VETIŠKA, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního
inženýrství Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Husar

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

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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:

Měření vibrací na obráběcích strojích

v anglickém jazyce:

Measurement of vibration in machine tools

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kmitání obráběcích strojů je stále studováno mnoha výzkumnými týmy, protože výrazným způsobem ovlivňuje produktivitu těchto zařízení.

Tato práce se bude zabývat kmitáním obráběcích strojů a možnostmi měření těchto kmitů.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše kmitání obráběcích strojů
- rešerše možnosti měření kmitání obráběcích strojů
- sestavení měřicí aparatury a měření na stroji

Seznam odborné literatury:

1. Marek J, Novotný L, Smolík J, Blecha P, Březina T, Mrkvica I, Sulitka M, et al. (2010). Konstrukce CNC obráběcích strojů (MM Speciál., p. 420). Praha: MM publishing, s.r.o.
2. J. Tlustý, Manufacturing processes and equipment. Prentice-Hall, Inc., 1999, p. 928.
3. Weck Manfred, & Brecher Christian. (2006). Werkzeugmaschinen onstruktion und Berechnung (p. 585). Berlin: Springer-Verlag Berlin.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Vetiška, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 24.11.2014

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na měření kmitání obráběcích strojů. Popisuje základní druhy kmitání, které se vyskytují během obráběcího procesu. Blíže seznamuje s přístroji, jež slouží k získávání a analýze vibrací.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on measurement of vibrations in machine tools. It describes basic types of oscillation, which can be found during machining process. Inform about devices which are used for acquisition and analyzation vibration.

KLÍČOVÉ SLOVA

Měření vibrací, kmitání, akcelerometr

KEY WORDS

Measurement of vibration, vibration, accelerometer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HUSAR, T. *Měření vibrací na obráběcích strojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Vetiška, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce Ing. Jana Vetišky, Ph.D. a to s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na konci práce v seznamu použité literatury.

27. 5. 2015


.....
Tomáš Husar

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří mému vedoucímu práce Ing. Janu Vetiškovi, Ph.D. za pohodový a přátelský přístup. Také bych rád poděkoval svým spolubydlícím studentům, kteří po dobu vypracovávání práce zachovali klidnou studijní atmosféru.

OBSAH

ÚVOD	10
1 KMITÁNÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	11
1.1 MECHANICKÉ KMITÁNÍ	11
1.2 DRUHY KMITÁNÍ	11
1.2.1 KMITÁNÍ VLASTNÍ VOLNÉ	11
1.2.2 KMITÁNÍ BUZENÉ	13
1.2.3 KMITÁNÍ SAMOBUZENÉ	15
1.2.4 TRHAVÉ POHYBY (SLIP STICK)	17
2 SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ KMITÁNÍ	18
2.1 TYPY SNÍMAČŮ VIBRACÍ	18
2.1.1 SNÍMAČE VÝCHYLKY	19
2.1.2 SNÍMAČE RYCHLOSTI	20
2.1.3 SNÍMAČE ZRYCHLENÍ	21
2.2 PIEZOELEKTRICKÝ AKCELEROMETR	21
2.3 PIEZOREZISTIVNÍ AKCELEROMETR	22
2.4 KAPACITNÍ AKCELEROMETR	22
2.5 UCHYCENÍ SNÍMAČŮ	24
3 VYHODNOCOVÁNÍ VIBRACÍ	25
3.1 ANALÝZA SIGNÁLU	25
3.2 ČASOVÁ ANALÝZA	25
3.3 FREKVENČNÍ ANALÝZA	25
3.3.1 <i>Fourierova transformace (FT)</i>	26
3.3.2 <i>Diskrétní Fourierova transformace (DFT)</i>	26
3.3.3 <i>Rychlá Fourierova transformace (FFT)</i>	28
3.4 PŘÍSTROJE PRO ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU	28
3.4.1 MĚŘÍCÍ KARTA NI 9234	29
3.4.2 SYSTÉM PULSE firmy B&K	29
4 PRAKTICKÁ ČÁST (MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ)	30
4.1 MĚŘÍCÍ APARATURA	30
4.1.1 <i>Akcelerometr KISTLER 8630C10</i>	31
4.1.2 <i>Měřicí karta NI 9234</i>	31
4.1.3 <i>Zásuvný modul NI cDAQ-9171</i>	32
4.1.4 <i>LabVIEW SignalExpress software</i>	33
4.2 MĚŘENÍ VIBRACÍ	33
4.2.1 <i>První měření</i>	34
4.2.2 <i>Druhé měření</i>	36
ZÁVĚR	38
POUŽITÁ LITERATURA	39
SEZNAM OBRÁZKŮ	41
PŘÍLOHA – FOTODOKUMENTACE	42


	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 10
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

ÚVOD

Během procesu obrábění dochází ke vzniku vibrací. Ty nepříznivě působí na jakost obrobku, ale také na životnost nástroje a tím celého stroje. Snahou výrobců je zamezit či alespoň snížit kmitání zvyšováním dynamické stability rámu stroje.

Analýzou kmitání obráběcích strojů se zabývá vibrodiagnostika. Jedná se o nedestruktivní metodu v monitorování technického stavu obráběcího stroje, nebo jiného technického zařízení. Umožňuje detekovat a lokalizovat možné vznikající poruchy. Lze pak provádět patřičné opravy a údržbu v dostatečném časovém předstihu a předcházet tak havarijnímu stavu. To vše přispívá k efektivitě výroby, hlavně po ekonomické stránce, na níž je v dnešní době kladen velký důraz.

V Bakalářské práci jsou uvedeny základní typy kmitání, které se objevují na obráběcích strojích. Dále rozdělení snímačů s možností jejich uchycení, analýza signálu v časové a frekvenční oblasti. Praktická část blíže seznámí čtenáře s průběhem měření vibrací v praxi.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 11
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

1 KMITÁNÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

1.1 MECHANICKÉ KMITÁNÍ

S mechanickým kmitáním se setkáváme někdy jako s jevem nechtěným, jenž má negativní dopad na obráběcí stroj a obrobek z hlediska životnosti stroje či kvality obrobku, jindy jako s jevem užitečným, kdy je zapotřebí vybudit toto kmitání. Užitečnost kmitání nacházíme u vibračních podavačů, dávkovačů, sbíječek a beranidel. Mechanické kmitání můžeme analyzovat jako samostatný jev, avšak technicky je vhodné uvažovat o něm i ve spojení se soustavami tuhých těles, na něž nebo v nichž působí. Mechanické kmitání určují vedle frekvence společně také výchylka u , rychlost \dot{u} a zrychlení \ddot{u} , které jsou navzájem závislé [2, 4].

$$m\ddot{u} + b\dot{u} + ku = F(t) \quad (1)$$

1.2 DRUHY KMITÁNÍ

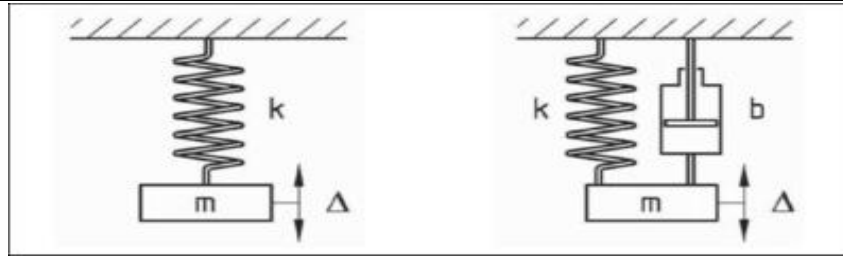
Popsat kmitání v obráběcích strojích je velmi složité, neboť se jedná o soustavu vzájemně se ovlivňujících hmotných a pružných těles, která jsou spolu spojena. Proto se tato složitá kmitání zjednodušují na čtyři základní druhy: kmitání vlastní (volné), kmitání buzené (vynucené), kmitání samobuzené a trhavé pohyby (Slip Stick). Dále se jimi budeme zabývat [1].

1.2.1 KMITÁNÍ VLASTNÍ VOLNÉ

Vlastní volné kmitání může být popsáno jako vychýlení tuhé, pružně uložené hmoty z klidové polohy účinkem síly s jejich následujícím zánikem. Velikost síly je přímo úměrná výchylce z klidové polohy, ale vyznačuje se opačným znaménkem. Vlastní volné kmitání může mít teoreticky dvě formy, a to kmitání vlastní netlumené či kmitání vlastní s tlumením [1].



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Obr. 1 základní model netlumeného vlastního kmitání, vpravo tlumené vlastní kmitání [1]

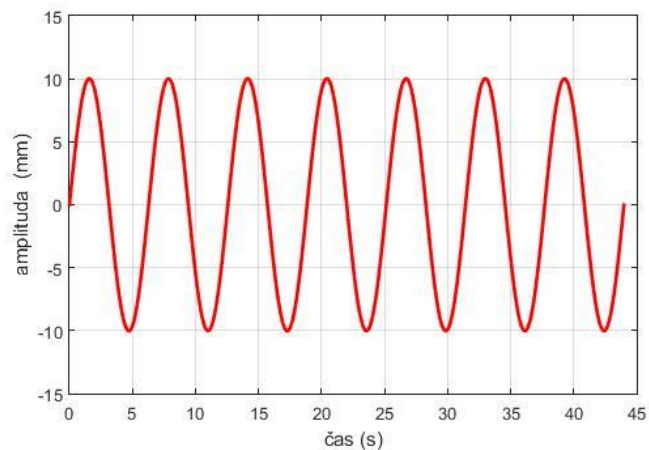
Pohybová rovnice netlumeného kmitání pro výchylku u má tvar

$$m\ddot{u} + ku = 0, \quad (2)$$

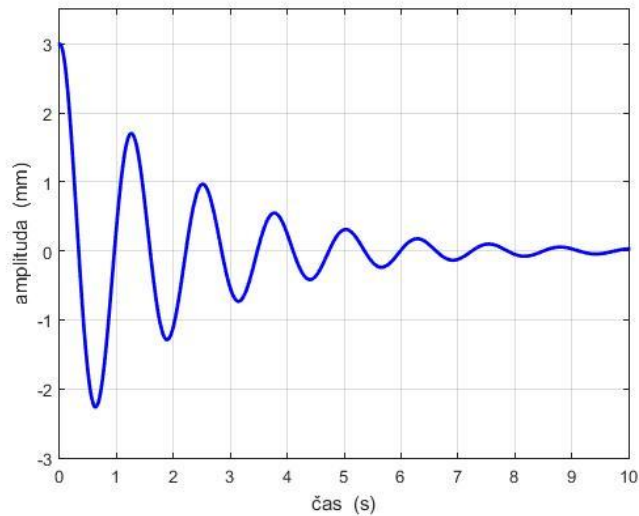
kde m je hmotnost tělesa (kg), \ddot{u} je jeho zrychlení ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), u udává polohu (m), a k vyjadřuje tuhost pružiny ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$).

Pro tlumené kmitání přibude v pohybové rovnici tlumící člen b ($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)

$$m\ddot{u} + b\dot{u} + ku = 0. \quad (3)$$



Obr. 2 Periodický průběh netlumeného kmitání



Obr. 3 Průběh tlumeného kmitání

1.2.2 KMITÁNÍ BUZENÉ

Pro vynucené (buzené) kmitání je charakteristická shodující se budící frekvence s frekvencí tohoto kmitání. Příčinou vzniku mohou být jak vlastnosti stroje tak vlastní řezný proces při obrábění [1].

Mezi vlastnosti stroje vyvolávající toto kmitání (Marek 2014) patří tyto:

- nevyváženost rotujících součástí nástroje, hřídelí, spojky, rotoru elektromotoru apod.
- setrvačné síly prvků konajících přímočarý nebo kruhový vratný pohyb
- nepřesnosti převodových mechanismů (házení ozubených kol, ložisek apod.)
- nesymetričnost rotujících částí (drážkované hřídele)

Procesy řezné, které stojí za příčinou vzniku vynuceného kmitání, jsou tyto (Marek 2014):

- změna průřezu třísky
- proměnlivý řezný odpor, např. při frézování
- házení obrobku nebo brusného kotouče při broušení
- hrubování



Pro vynucené kmitání platí tato pohybová rovnice

$$m\ddot{u} + b\dot{u} + ku = F(t). \quad (4)$$

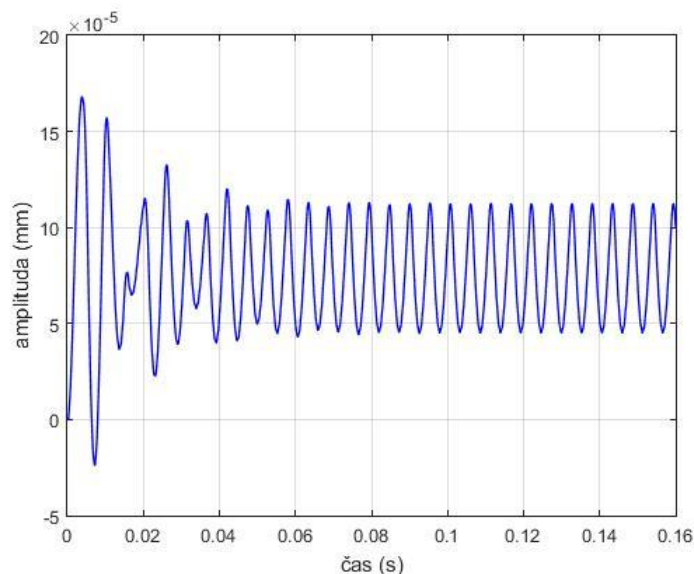
Budící sílu $F(t)$ uvažujeme v tomto tvaru

$$F(t) = F_0 \cos(\omega t) = F_0 \cos(2\pi f t). \quad (5)$$


Vznik vynuceného kmitání je možno vyloučit dodržováním těchto zásad (Marek 2014):

- dokonalé dynamické vyvážení rotujících součástí
- použití torzních tlumičů, např. u frézování
- správné uložení obráběcího stroje
- zmenšení hloubky třísky
- zvýšení tuhosti částí obráběcího stroje

Obvykle je také vynucené kmitání výrazné v případě rezonance. Řešením jak zamezit, aby nedošlo k rezonanci, může být změna vlastní frekvence [6].



Obr. 4 Průběh buzeného kmitání

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 15
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

1.2.3 KMITÁNÍ SAMOBUZENÉ

Při procesu obrábění vzniká samobuzené kmitání mezi nástrojem a obrobkem, kdy je tato soustava vychýlena z rovnovážné polohy prvním impulzem, a to bez vnějšího budícího účinku. Proměnlivost kmitání soustavy je v závislosti pouze na vlastním kmitavém procesu. Frekvence této soustavy je blízká vlastní frekvenci některého z členů soustavy. Na výskyt tohoto kmitání upozorňuje zvýšená hlučnost a nežádoucí stopy na obráběném povrchu [1].

Nejnámější teorie (principy), které stojí za vznikem samobuzeného kmitání během řezného procesu, jsou podle (Marek 2014) tyto:

- Reprodukční princip - vlnitost obrobeného povrchu
- Princip polohové vazby – nesouhlasné směry řezné síly a maximální vazby

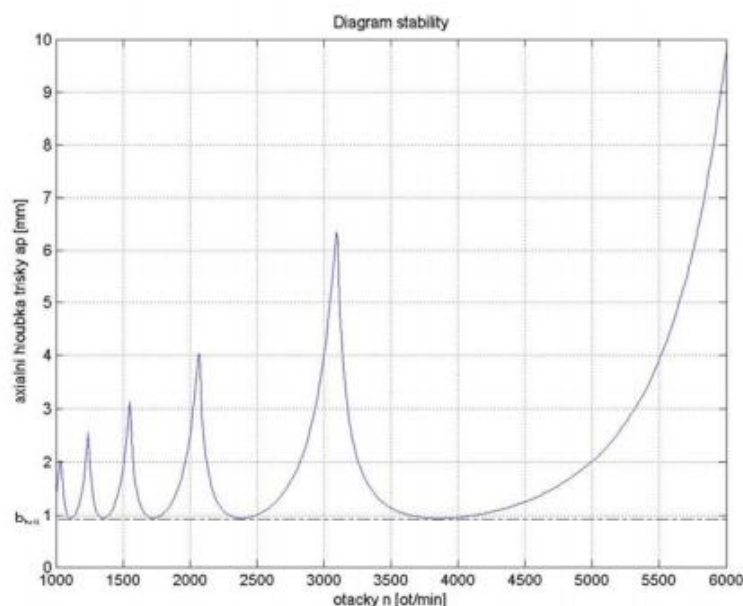
Reprodukční princip spočívá v předpokladu, že obráběná plocha je zvlňená. Při obrábění této plochy se mění průřez třísky, což zapříčiní periodicky se měnící řeznou sílu, která vyvolává samobuzené kmitání [1].

Princip polohové vazby předpokládá pohyb nástroje ve dvou směrech se špičkou opisující elipsu. V první části pohybu po elipse působí řezný odpor proti pohybu nástroje, kmitavému pohybu se odebírá energie, v druhé části působí řezný odpor ve směru pohybu nástroje a energie kmitání se akumuluje. Převýší-li hodnota získané energie hodnotu energie odebírané, dojde ke vzniku samobuzeného kmitání [1].


Snížení výskytu samobuzeného kmitání na obráběcích strojích lze dosáhnout těmito způsoby (Marek 2014):

- Zvýšením řezné rychlosti nástroje a posuvu se projeví snížením radiálního kmitání (Snížením řezné rychlosti rychlořezného nástroje vede ke stabilizaci řezání)
- Zmenšením hloubky třísky nebo snížením počtu zabírajících zubů (u frézování se demontuje každý druhý nůž)
- Snížením tření mezi nástrojem a obrobkem (např. řeznou kapalinou)
- Zvýšením tuhosti uložení nástroje
- Změnou orientace řezné síly vůči obrobku (změna smyslu otáčení, či polohy nástroje)

Pro snadné určení, jak se vyhnout samobuzenému kmitání při řezném procesu obráběcího stroje, slouží diagram stability (Obr. 5). Tento diagram vyjadřuje závislost šířky odebírané třísky na otáčkách vřetene, je tvořen mezními křivkami stability, tzv. lobby, které dělí graf na oblasti stabilních a nestabilních řezných podmínek. V oblasti nad křivkami (nestabilní oblast) se proces obrábění stane nestabilním. Dochází tak k rozkmitání, které vede k poškození řezného nástroje, v horších případech i stroje [1].



Obr. 5 Diagram stability [1]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 17
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

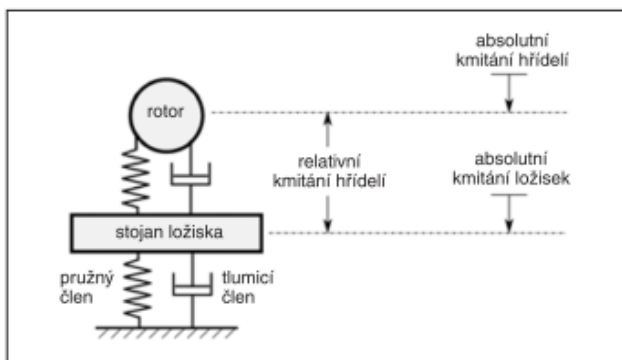
1.2.4 TRHAVÉ POHYBY (SLIP STICK)

Přerušované a Trhavé pohyby, tzv. Slip Stick, vznikají při velmi malých rychlostech posuvu suportů, stolů, stojanů obráběcích strojů. Dochází tak k poklesu kvality obrobeneé plochy, na níž se během soustružení objevují lesklé proužky. U vyvrtávaček znemožňují přesné nastavení stolu, stojanu a vřeteníku. Při broušení nedochází k dodržení přesného rozměru broušené plochy. Vznik trhavých pohybů lze vysvětlit jako důsledek nelineárního průběhu závislosti mezi rychlostí posouvané části po vedení a třecí silou ve vedení. V dnešní době se trhavé pohyby vyskytují jen zřídka, díky dostatečnému mazání nebo využitím obložení kluzných ploch umělými hmotami. Ve větší míře můžeme předcházet trhavým pohybům zvýšenou tuhostí konstrukce posuvného systému [1].

2 SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ KMITÁNÍ

2.1 TYPY SNÍMAČŮ VIBRACÍ

Výběr příslušného typu snímače vibrací je ovlivněn druhem vibrací, které chceme měřit. Jedná se o absolutní nebo relativní vibrace. Při Absolutním měření vibrací zkoumáme pohyb tělesa (stroje) vzhledem k Zemi neboli k pevnému, ale fixnímu bodu. U relativního měření jde o pohyb vzhledem k uměle vytvořené, resp. vhodně zvolené základně. Takovou základnou je často rám pracovního stroje, který sám ještě může kmitat vzhledem k zemskému souřadnému systému (obr. 4). V současné době se pro relativní měření vibrací používají bezdotykové senzory [4, 7].

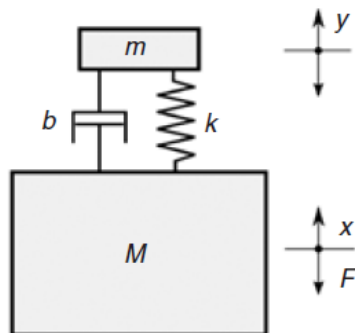


Obr. 6 Absolutní a relativní kmitání [4]

Pro snímače vibrací je hlavní pohyb seizmické hmoty s hmotností m vzhledem k objektu o hmotnosti M , jehož vibrace se měří. Dle modelu pohybové rovnice

$$m\ddot{u} + b\dot{u} + ku = F(t) = M\ddot{x}, \quad (6)$$

Ize vhodnou volbou hodnot parametrů m, b, k vytvořit snímač kterékoliv z charakteristických veličin kmitavého pohybu, tedy snímač výchylky, rychlosti a zrychlení [4].



Obr. 7 Model snímače vibrací [4]

Pomocí moderních elektronických obvodů lze snadno provádět derivace a integrace veličin kmitavého pohybu. Proto je možné použít typ snímače citlivý na jednu veličinu a ostatní veličiny získat pomocí integračních, nebo derivačních elektronických obvodů. Jelikož mezi veličinami, které určují mechanické kmitání, platí jednoduchý vztah [2]

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (7)$$

2.1.1 SNÍMAČE VÝCHYLKY

Snímače výchylky mají výrazně velkou hodnotu m při zanedbatelném tlumení b a tuhosti k , čímž se změří rovnice na:

$$b\dot{u} = M\ddot{x} \rightarrow u \approx x. \quad (8)$$

Ve vibrodiagnostice jsou nejpoužívanějším typem snímačů výchylky snímače indukčnostní, využívající indukčnost cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu jde o snímače citlivé na parazitní vlivy, jako např. délka kabelu k měřicím obvodům, vnější elektromagnetická pole, atd. Vyrábějí se jako integrované, kdy je cívka i základní část elektroniky uložena v kovovém stínícím krytu. Tyto snímače mají obvykle kmitočtový rozsah od 0 Hz do 10000 Hz. V dnešní době jsou snímače výchylky častěji koncipovány jako bezdotykové optické zařízení. Výhodou tohoto relativního snímače je, že měří

vzdálenost dvou povrchů, aniž by nějakým způsobem ovlivňoval měřený objekt. Avšak i přes tuto přednost nadále způsobují několik jiných zdrojů nejistot [4, 5].

2.1.2 SNÍMAČE RYCHLOSTI

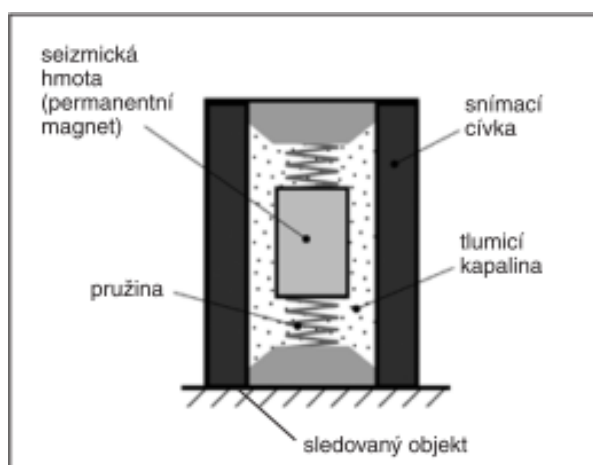
Při dominantním tlumení b a zanedbatelných hodnotách m a k lze upravit rovnici (6) na

$$b\dot{u} = M\ddot{x} \rightarrow u \approx \dot{x}. \quad (9)$$

Princip elektrodynamického snímače rychlosti kmitavého pohybu spočívá v měřicí cívce pohybující se v magnetickém poli permanentního magnetu tvořícího seizmickou hmotu snímače. V cívce se při kmitavém pohybu přenášeném na ni indukuje elektromotorická síla U podle vztahu


$$U = B \cdot l \cdot v \quad (10)$$

kde B je indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře snímače, l délka vodiče cívky, v rychlost kmitání pouzdra snímače. Rychlost kmitání pouzdra je vyhodnocována přímo z mechanicko-elektrické transformace signálu.



Obr. 8 Uspořádání elektrodynamického snímače rychlosti [4]

Výhodou absolutních elektrodynamických snímačů rychlosti je vysoká úroveň výstupního signálu a malý vnitřní odpor. Snímač je možno používat bez zdroje

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 21
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

napájení a napětí lze měřit přímo libovolným multimetrem bez speciálních zesilovačů signálu.

Nevýhodou je omezení horní hranice použitelnosti a to maximálně do frekvence 3,5 kHz spolu s velkou citlivostí na okolní magnetická pole, které představují výrazný zdroj nejistot. V současnosti se s použitím těchto snímačů moc neseťkáme, jelikož rychlost kmitavého pohybu se určuje integrací signálu z výkonnějších akcelerometrů [4, 5].

2.1.3 SNÍMAČE ZRYCHLENÍ

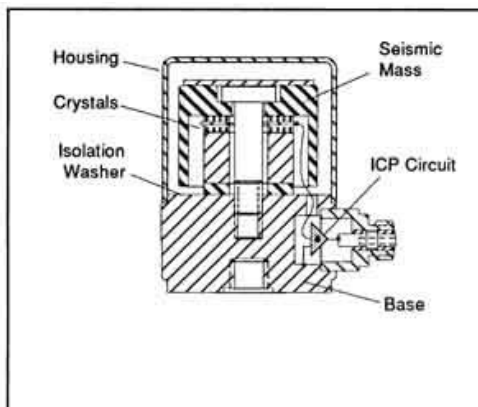
Velkou tuhostí k a malou hodnotou seizmické hmotnosti m při zanedbatelném tlumení b lze u absolutních senzorů zrychlení dosáhnout velké hodnoty frekvencí vlastních kmitů

$$ku = M\ddot{x} \rightarrow u \approx \ddot{x}. \quad (11)$$

Při realizaci akcelerometrů pro diagnostické účely se využívá mnoha fyzikálních principů např.: piezoelektrický, piezorezistivní, kapacitní aj. [4, 7].

2.2 PIEZOELEKTRICKÝ AKCELEROMETR

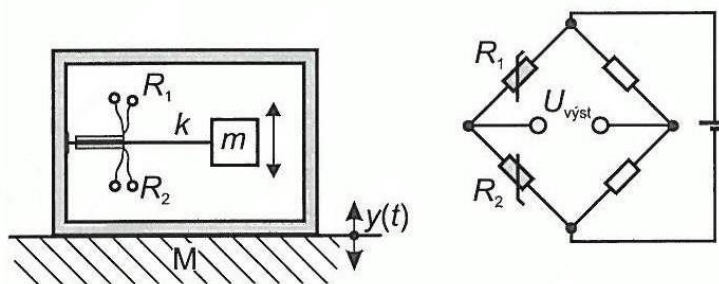
Jedná se o nejpoužívanější absolutní senzor vibrací. Tyto senzory pracují na principu přímého piezoelektrického jevu. Při tomto jevu dochází ke vzniku dipólového elektrického momentu při deformaci krystalických nebo polykrystalických látek. Ve výsledném efektu dipólový moment způsobí elektrickou polarizaci čidla. Podle směru působení deformace vůči osám krystalické mřížky se piezoelektrický jev rozděluje na jev podélný, příčný a stříhový. Piezoelektrické akcelerometry jsou nejčastěji řešeny se stříhovým, neboli smykovým namáháním piezokrystalu [4, 7].



Obr. 9 Schéma piezoelektrického akcelerometru [19]

2.3 PIEZOREZISTIVNÍ AKCELEROMETR

Tento akcelerometr (Obr. 10) prostřednictvím piezorezistivního materiálu převádí sílu vzniklou urychlovanou hmotou na změnu odporu. Při namáhání ohybem se mění rezistivita piezorezistivního křemíkového polovodiče a ta je dále vyhodnocována. Díky vysokému poměru citlivosti vůči hmotnosti a vzhledem ke stabilitě napěťové citlivosti jsou tyto akcelerometry vhodné k dlouhodobým testům, ale jsou teplotně závislé. Frekvenční rozsah se pohybuje v rozmezích od 0 Hz do 7 kHz [7, 8].



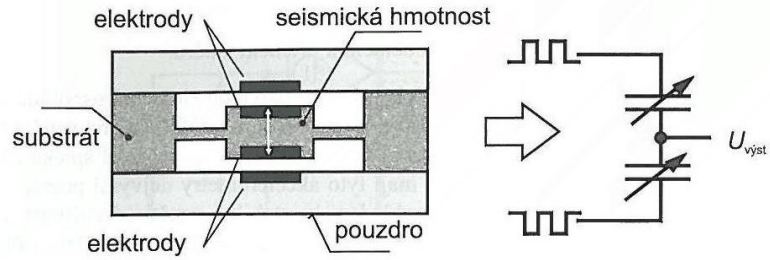
Obr. 10 Příklad uspořádání piezorezistivního akcelerometru [7]

2.4 KAPACITNÍ AKCELEROMETR

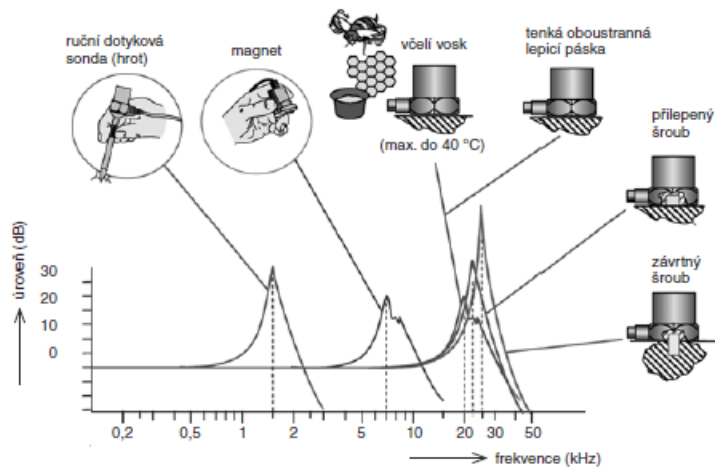
Kapacitní akcelerometry (Obr. 11) se nejčastěji používají ve vibrodiagnostice, kdy jsou rozsahy dynamického zrychlení velmi nízké. Frekvenční rozsah se pohybuje od 0 Hz do 6 kHz. Při pohybu seizmické hmotnosti se jedna kapacita zvětšuje a druhá se zmenšuje. Velikost vibrací se vyhodnocuje diferencí hodnot kapacit [7].




BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Obr. 11 Uspořádání kapacitního akcelerometru [7]



Obr. 12 Vliv způsobu uchycení snímače na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku [4]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 24
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

2.5 UCHYCENÍ SNÍMAČŮ

Pro přesné měření vibrací, je třeba zajistit, aby frekvenční a dynamický rozsah nebyl omezen špatnou montáží akcelerometru k povrchu měřeného objektu. Jedním z hlavních požadavků pro správné uchycení akcelerometru je pevný a těsný kontakt senzoru s povrchem [9]. Vliv způsobu uchycení snímače na amplitudo-frekvenční charakteristiku je zobrazen na Obr. 12.

Ruční sonda:

Ruční dotyková sonda s akcelerometrem umístěným na konci je velice praktická a slouží k rychlé kontrole a kontrole těžko dostupných míst. Používá se také pro hledání vhodného měřicího místa. Použitím této metody musí být brána v potaz velká pravděpodobnost výskytu zdrojů nejistot [4].

Uchycení pomocí magnetu:


Měřicí senzor může být snadno a rychle přemístěn z jednoho místa na druhé, proto je tato metoda vhodná pro větší množství měřicích bodů v krátkém časovém intervalu. Dynamický rozsah je omezen silou magnetu [9].

Uchycení pomocí včelího vosku nebo lepicí pásky:

Podmínkou tohoto uchycení je, aby adhezní síly spolehlivě držely snímač na měřené ploše, a současně musí být možné snímač bez poškození sejmut [4]. Při vysokých teplotách dochází ke ztrátě adhezních sil, proto se uchycení včelím voskem používá do teplot 40°C [9].

Uchycení pomocí závrtného šroubu:

Tímto uchycením získáme maximálního využití frekvenčního rozsahu a neovlivníme frekvenční charakteristiku. Proto je tato metoda aplikována kdykoli je to možné. Uchycení je možno vylepšit tenkou vrstvou silikonové vazelíny [4, 9].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 25
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

3 VYHODNOCOVÁNÍ VIBRACÍ

3.1 ANALÝZA SIGNÁLU

Průběh signálu se nejčastěji znázorňuje v čase, případně můžeme říct v časové oblasti. Nejvhodnější metodou pro analýzu kmitání je jeho rozklad na soubor harmonických funkcí, které se odlišují amplitudou, úhlovou frekvencí a počáteční fází, tato metoda se nazývá Fourierova transformace[10].

Harmonický signál můžeme obecně definovat jako funkci v čase v této podobě

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi),$$

Kde A je amplituda, ω úhlová rychlost a počáteční fáze φ .

3.2 Časová analýza

Tato metoda je založena na vyhodnocení veličin (výchylka, rychlost, zrychlení) určujících časový průběh signálu. Pokud se při měření vyskytují náhodné vibrace, lze pro analýzu signálu aplikovat statistické výpočty např. směrodatnou odchylku, koeficienty šikmosti/špičatosti, nebo činitele výkmitu. Tato analýza najde uplatnění především také v přechodových jevech např. rozběhy motorů. Vhodnost metody uplatníme, existuje-li jediný nebo dominantní zdroj vibrací, pokud se vyskytuje zdrojů více, dojde ke ztrátě informace v šumu signálu a možnost lokalizace příčiny vibrací je omezená [7].

3.3 Frekvenční analýza

Touto analýzou lze získat informace o signálu a to jeho amplitudové i fázové spektrum. Základ této analýzy tvoří diskrétní Fourierova transformace (DFT) a rychlá Fourierova transformace (FFT). Grafickým výstupem získáme frekvenční spektrum, které poskytuje detailní informace o zdrojích získaného signálu, proto je tato metoda

výhodnější než časová analýza, neboť je možno lokalizovat místa vznikajících poruch na měřeném objektu [4].

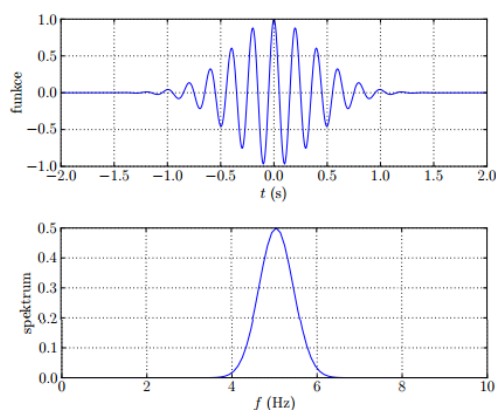
3.3.1 Fourierova transformace (FT)

Pomocí FT můžeme převést spojitou funkci z oblasti časové $f(t)$ do oblasti frekvenční $F(f)$. Původní funkce je nahrazena posloupností harmonických funkcí s odlišnými parametry (frekvence, fáze) a to tak, aby součet harmonických funkcí dal zpátky funkci původní. Používá se při analogovém zpracování signálu [2,11].

Matematicky lze FT vyjádřit vztahem

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt,$$


který časovou funkci $f(t)$ převádí na frekvenční $F(f)$.



Obr. 13 Převod signálu z časové do frekvenční oblasti pomocí FT [11]

3.3.2 Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

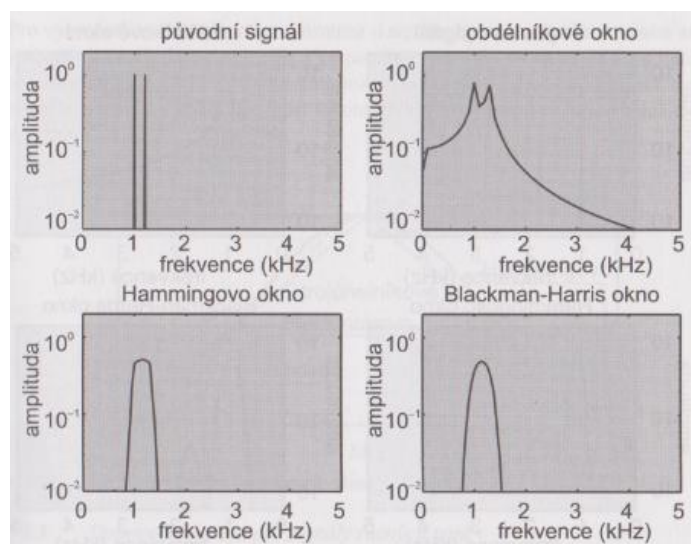
V dnešní době převažuje číslicové zpracování signálu, a proto byla vyvinuta DFT. Přesnost této metody závisí na časovém průběhu (tvaru) původní funkce, vlivem omezování a vzorkování, které je prováděno při DFT. Při vzorkování pro N naměřených hodnot, stačí vypočítat jen $N/2$ hodnot amplitudového spektra, jelikož se jedná o dvoustranné spektrum hodnot, zbylé hodnoty získáme vynásobením dvěma.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 27
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Při DFT dochází k rozmazání spektra, což je chyba, která nastává, pokud N naměřených hodnot netvoří celou periodu signálu. Ve výsledném spektru pak dochází k rozmazání hlavní spektrální čáry a k poklesu amplitud. Pro zmírnění tohoto negativního jevu je třeba před samotným výpočtem DFT provést úpravu signálu. Úprava spočívá ve vynásobení signálu vhodnou funkcí, tzv. **oknem**, která utlumí amplitudu signálu do vhodné podoby. Existuje několik druhů oken, které jsou výhodné v různých aplikacích. Mezi vlastnosti oken patří šířka hlavního laloku, výška postranních laloků a rychlost jejich poklesu [2, 7, 11].

Typy oken a jejich vlastnosti [7, 13] :

- **Obdélníkové okno** – je vhodné pro analýzu kmitočtově blízkých spektrálních složek s malým rozdílem amplitud. Jedná se o nejjednodušší typ okna, ponechává signál v původním stavu.
- **Blackman-Harris okno** – najde uplatnění v analýze spektra s rozdílnými amplitudami s dostatečnou frekvenční vzdáleností. Umožňuje maximální potlačení postranních laloků, čímž zvyšuje potlačení falešných frekvencí.
- **Hannovo okno** – často používané univerzální okno především pro stacionární vibrace. Typickým znakem charakterizujícím toto okno je nulový první postranní lalok.
- **Hammingovo okno** – pro analýzu blízkých frekvencí s rozdílnou amplitudou složek. Potlačuje výšku postranních laloků, kde první lalok je nulový.
- **Flat-top okno** – okno pro maximální přesnost odečtu amplitudy na úkor rozmazání spektrálních čar.



Obr. 14 Analýza frekvenčních složek kmitání pomocí různých oken [7]

3.3.3 Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Jedná se o způsob výpočtu DFT, kterým lze docílit stejných výsledků a to za zřetelně kratší dobu. Existuje mnoho algoritmů, které umožňují provést rychlou transformaci pro libovolný počet N hodnot. Klasicky jde o rozdělení těchto hodnot na dvě transformace o hodnotě vzorku $N/2$, které se dále dělí, až nakonec zůstanou pro konečné transformace dva prvky pro snadné a rychlé vyhodnocení [11].

3.4 PŘÍSTROJE PRO ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

Existuje nespočet zařízení a přístrojů, jež se dají použít k zaznamenávání vibrací, jejich analýze a následnému grafickému zobrazení. V této práci bude uvedeno pár zařízení předních světových výrobců, které tyto požadavky splňují. Jedná se především o měřicí karty neboli sběrné moduly.

3.4.1 MĚŘÍCÍ KARTA NI 9234

Čtyř kanálový sběrný modul signálu z akcelerometrů od firmy National Instruments (Obr. 15). Karta je použita při měření vibrací v praktické části závěrečné práce. Bližší popis a technické parametry jsou uvedeny níže v kapitole (4.1.2).



Obr. 15 Měřicí karta NI 9234 od firmy National Instruments [12]

3.4.2 SYSTÉM PULSE firmy B&K


Jinou alternativu pro vyhodnocování vibrací poskytuje firma Brüel & Kjaer se svým multifunkčním systémem PULSE. Tato platforma slouží k analýze a následnému vyhodnocení naměřených dat. Zahrnuje počítačový software LabShop (FFT analýza pro vibrace a hluk), sběrný modul LAN-XI pro získávání dat a další.

LAN-XI typ 3056

Jedná se o, čtyř kanálový sběrný modul s frekvenčním rozsahem 0 až 51,2 kHz pro monitorování nízkofrekvenčního napětového signálu, vibrací a hluku.



Obr. 16 Měřicí karta LAN-XI typ 3056 firmy Brüel & Kjaer [18]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 30
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

4 PRAKTICKÁ ČÁST (měření a vyhodnocování)

Jako objekt pro naměření vibrací byla zvolena CNC obráběcí frézka MCV 754 QUICK (Obr. 17) od firmy Kovosvit MAS, která se nachází na fakultě strojního inženýrství v laboratořích C1. Jedná se o vertikální obráběcí centrum vhodné pro kusovou i sériovou výrobu tvarově složitých součástí. Mezi velkou výhodou výrobce uvádí vysokou tuhost konstrukce stroje [17].



Obr. 17 CNC obráběcí frézka MCV 754 QUICK [17]

4.1 MĚŘÍCÍ APARATURA

Měřicí aparatura se skládá z piezoelektrického akcelerometru, upevněném na vřetenu stroje, který je přes optický kabel připojen k sběrnému modulu NI 9234. Modul, je vložen do šasi, jež umožňuje propojení s PC přes USB kabel, a zároveň zajišťuje napájení modulu. V PC je nainstalován měřicí software NI LabVIEW SignalExpress sloužící ke grafickému zobrazení naměřených hodnot.

4.1.1 Akcelerometr KISTLER 8630C10

Pro snímání vibrací je použit jednoosý piezoelektrický akcelerometr od firmy KISTLER (Obr. 18). Díky své nízké hmotnosti (5 gramů) nijak neovlivňuje měření a díky technologii PiezoBEAM, jak výrobce uvádí, poskytuje vynikající odezvu signálu a široký frekvenční rozsah. Použitelný pro většinu FFT analyzátorů [14]. Upevnění snímače je realizováno na vřetenu stroje pomocí vosku.



Obr. 18 Piezoelektrický akcelerometr 8630C10 [14]

Technické parametry udávané výrobcem [14]:

Hmotnost:	5 g
Měřicí rozsah:	± 10 g
Citlivost:	496 mV/g
Příčná citlivost:	1%
Pracovní teplota:	0 – 65°C
Rezonanční frekvence:	22 kHz

4.1.2 Měřicí karta NI 9234

Jedná se o, čtyř kanálový sběrný modul signálu z akcelerometrů od firmy National Instruments (Obr. 19). Tento modul umožňuje digitální zpracování signálu a díky zabudovaným anti-aliasingovým filtrům zabraňuje ovlivnění fázového a amplitudového spektra signálu [12].



Obr. 19 Měřicí karta NI 9234 od firmy National Instruments [12]

Technické parametry udávané výrobcem [12]:

<i>Počet vstupních kanálů:</i>	4
<i>Rozlišení:</i>	21 bit
<i>Dynamický rozsah:</i>	102 dB
<i>Pracovní teplota:</i>	-40°C až +70°C
<i>Max. přetížení vibrací:</i>	5 g
<i>Max. přetížení rázu:</i>	50 g

4.1.3 Zásuvný modul NI cDAQ-9171

Toto šasi (Obr. 20) umožňuje propojení a komunikaci měřicí karty s PC pomocí USB, nebo Ethernet kabelu a zároveň splňuje funkci ochrany před poškozením a nečistotami [15].



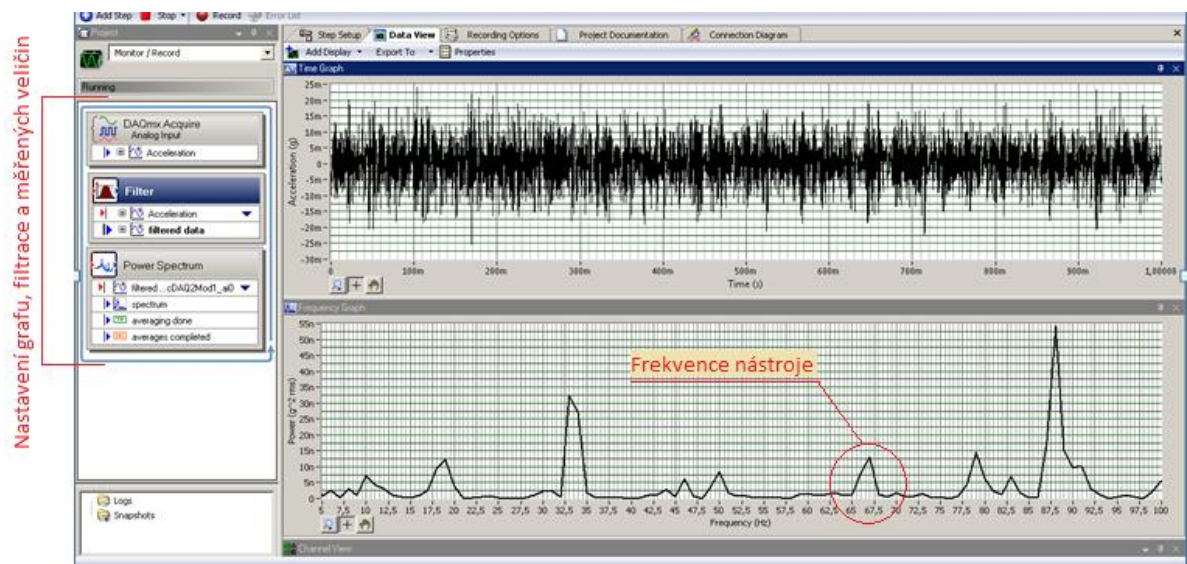
Obr. 20 Zásuvný modul (šasi) pro měřicí kartu [15]

4.1.4 LabVIEW SignalExpress software

Pro vizualizaci naměřených vibrací slouží program LabVIEW SignalExpress od firmy National Instruments. Tento sofistikovaný a zároveň jednoduchý software umožňuje zobrazit naměřená data jak numericky, tak graficky. Dovoluje úpravu zobrazeného signálu jako např.: nastavení dynamického rozsahu, filtrace, a nespočet dalších funkcí [16].

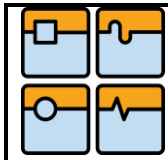
4.2 MĚŘENÍ VIBRACÍ

Ukázka měřicího prostředí v programu LabVIEW SignalExpress (Obr. 21). K zobrazení vibrací obráběcího stroje (dále jen OS) slouží dva grafy. Horní graf popisuje závislost zrychlení na čase a spodní graf vykresluje závislost velikosti zatížení na frekvenci. Při měření byly použity filtry, které potlačovaly nepříznivý šum, aby bylo výsledné spektrum lépe čitelné.



Obr. 21 Ukázka programového prostředí při chodu stroje naprázdno

Při chodu stroje naprázdno (Obr. 21) lze vyčíst frekvenci kmitání pracovního nástroje, který se skládá ze čtyř břitových destiček. Každá břitová destička má při daných otáčkách frekvenci 16 Hz, v součtu pak nástroj pracuje ve frekvencích pohybujících se okolo 65 Hz. Při pohledu na osu zobrazující zatížení zjistíme, že velikost působení

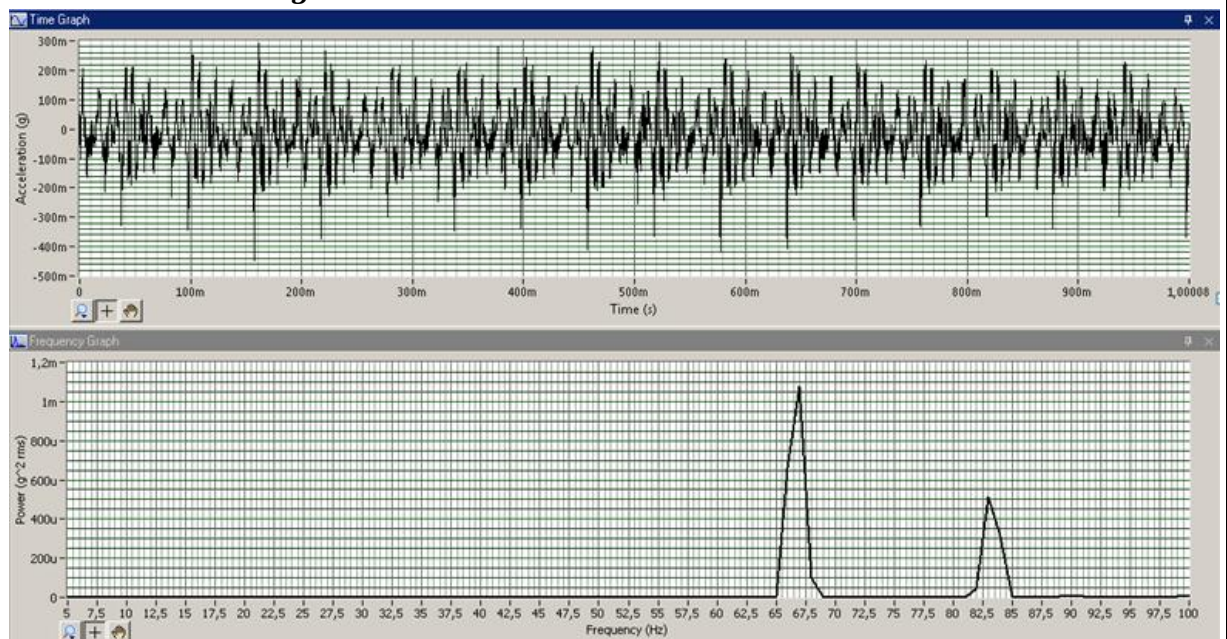


sil od nástroje i ostatních naměřených kmitání nedosahují vysokých hodnot. Lze tedy usoudit, že tyto vibrace nijak neovlivňují správný chod obráběcího stroje.

4.2.1 První měření

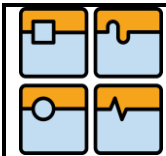
V prvním měření nastavíme OS na odebrání třísky v hodnotě 1 mm a budeme sledovat frekvenční analýzu pomocí zobrazení různých oken (Hanning, Hamming, Blackman, Flat-Top, viz kap. 3.3.2.). Jelikož je akcelerometr připevněn na vřetenu, očekáváme majoritní frekvence od nástroje.

4.2.1.1 Okno Hanning

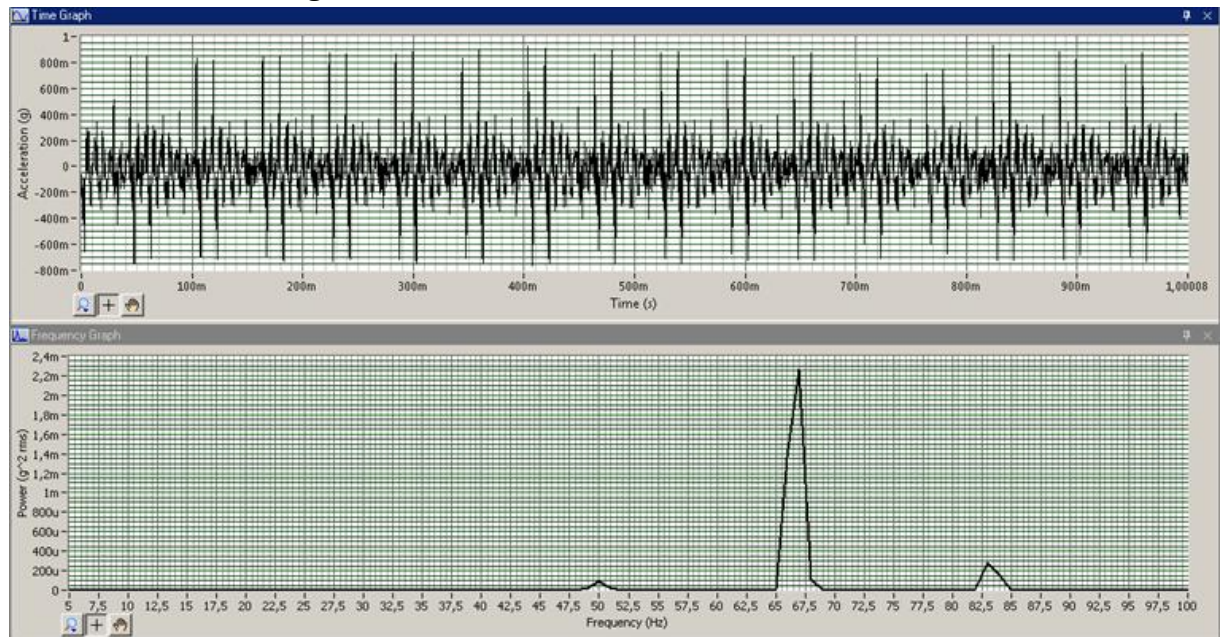


Obr. 22 Analýza použitím okna Hanning

Při použití Hannova okna je možno pozorovat převládající frekvenci nástroje, a další nepatrné frekvence, které vyvolává řezný proces.



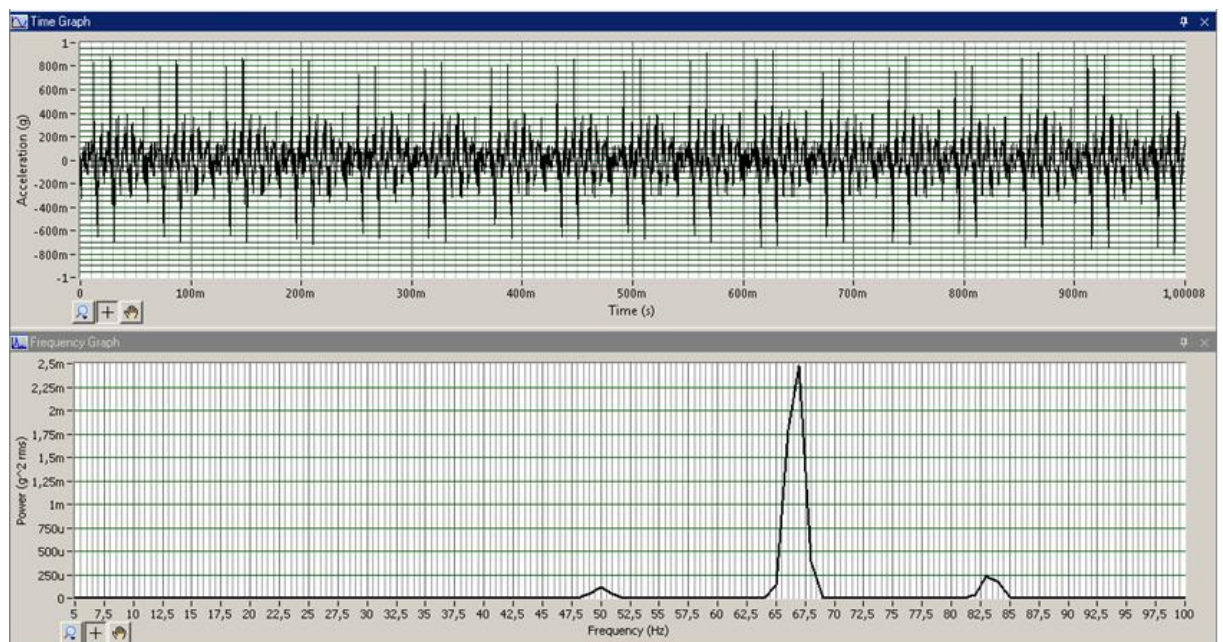
4.2.1.2 Okno Hamming



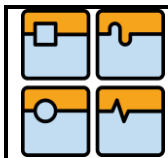
Obr. 23 Analýza použitím okna Hamming

Okno Hamming zobrazuje vyšší amplitudy frekvence nástroje, než okno Hannovo. Vykresluje i další frekvence, ale ty svou výškou amplitudy nemají velký vliv na proces obrábění. Lze si povšimnout nulové hodnoty prvního postranního laloku.

4.2.1.3 Okno Blackman

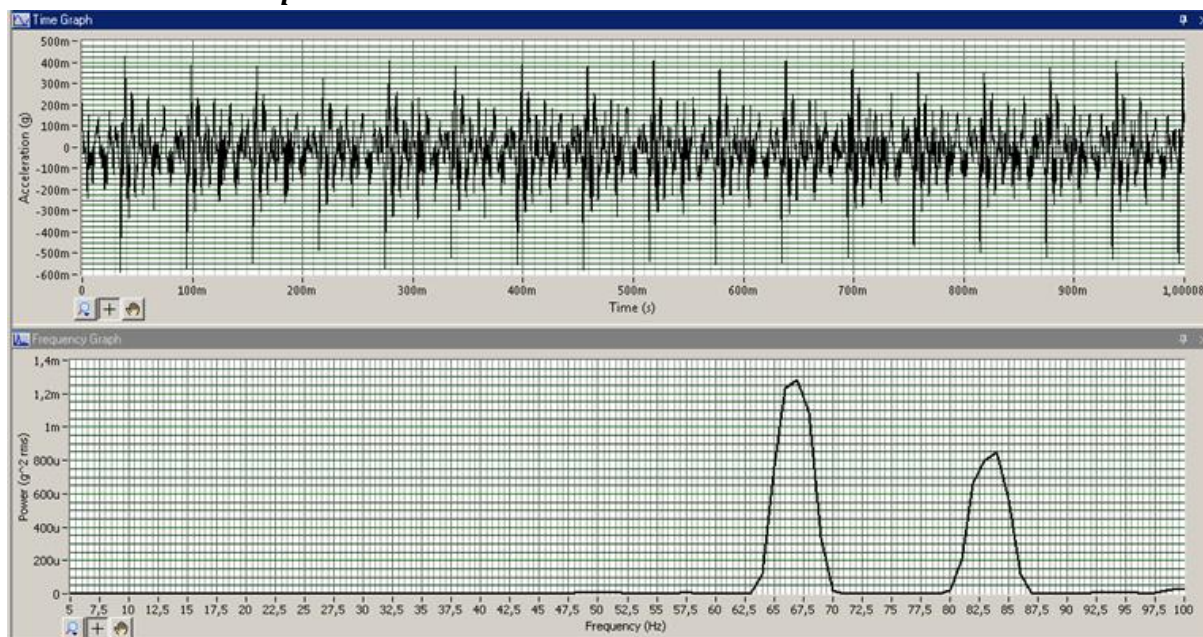


Obr. 24 Analýza použitím okna Blackman



Okno Blackman je velmi podobné oknu předešlému. Amplituda frekvence řezného nástroje dosahuje přibližně stejné velikosti. Tvar spektra se liší pouze v šířce postranních laloků.

4.2.1.4 Okno Flat-top



Obr. 25 Analýza použitím okna Flat-top

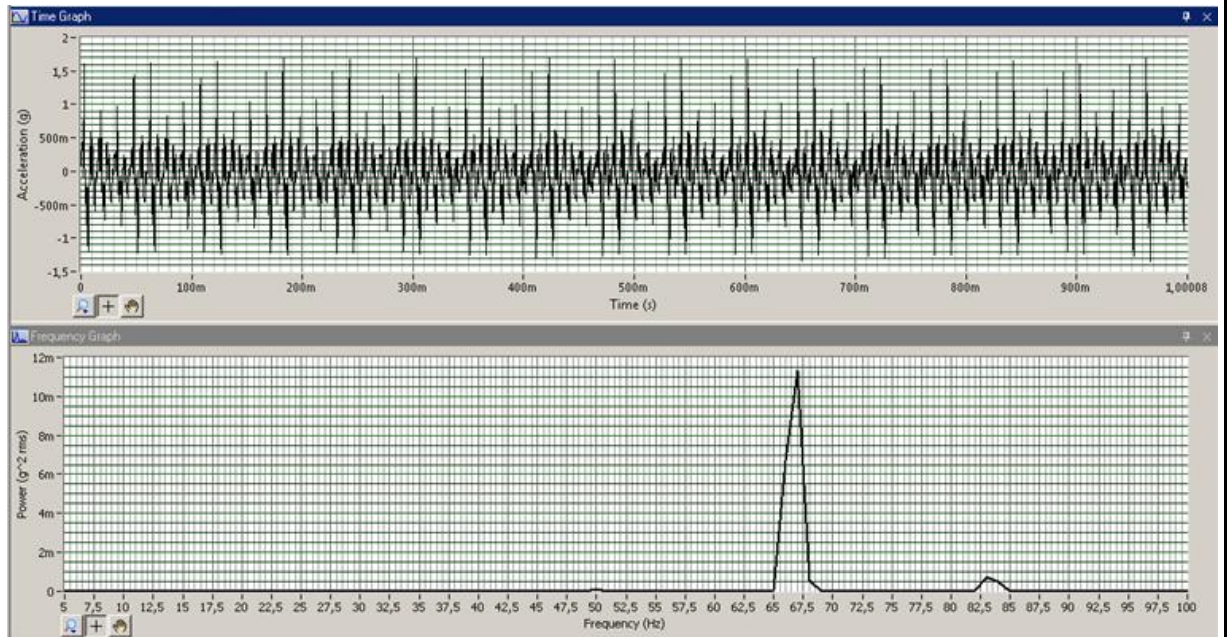
Okno Flat-top se vyznačilo nejvyšší šířkou hlavního laloku, jež způsobuje rozmazání spektra. Toto rozmazání by mělo být na úkor přesnějšího odečtu amplitudy.

4.2.2 Druhé měření

Druhé měření proběhlo za většího zatížení stroje, při velikosti odebírané třísky 3 mm. K porovnání jsme zvolili pouze okna Hamming a Blackman, neboť v prvním měření vykazovaly oba okna téměř shodné hodnoty velikosti amplitud.

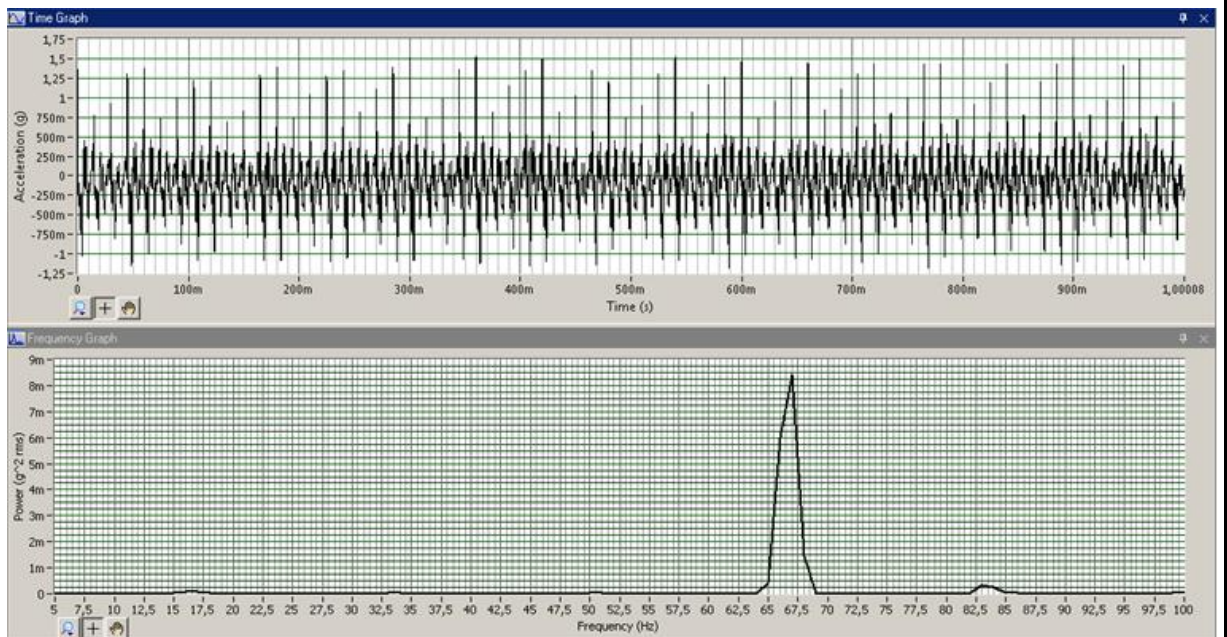


4.2.2.1 Okno Hamming




Obr. 26 Analýza použitím okna Hamming v hloubce záběru 3mm

4.2.2.2 Okno Blackman




Obr. 27 Analýza použitím okna Blackman v hloubce záběru 3mm

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 38
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

ZÁVĚR


Vypracovaná bakalářská práce v teoretické části popisuje čtyři základní druhy kmitání, které se vyskytují při obrábění na obráběcích strojích. Zejména je popsáno, jak tyto vibrace vznikají a jak jim lze předejít. Další kapitola je zaměřena na snímače k zaznamenávání těchto kmitů, a na možnosti upevnění k měřenému objektu. Pro snímání vibrací jsou dnes nejpoužívanější snímače zrychlení, tzv. akcelerometry. U frekvenční analýzy je popsáno, jak se pomocí Fourierovy transformace převádí signál z časové oblasti do oblastí frekvenční.

V praktické části byla sestavena měřicí aparatura. Pro experiment byla zvolena CNC obráběcí frézka, kde byl akcelerometr připevněn na vřetenu ve směru pohybu osy y. Provedly se dvě zatěžovací zkoušky. První zkouška při odběru třísky 1 mm a druhá v odběru třísky o velikosti 3 mm. Experiment je zaměřen na seznámení se s okny používanými při frekvenční analýze, zejména je sledován jejich tvar a přesnost odečtu amplitudy. V prvním měření se jako nejvhodnější ukázalo použití okna Blackman a okna Hammingova. V druhém zátěžovém testu tedy byly porovnány pouze tyto okna. Vyšší amplitudu kmitů zobrazovalo okno Hammingovo, můžeme tedy usoudit, že je přesnější a jeví se nejvýhodněji pro frekvenční analýzu kmitů testovaného obráběcího stroje. Avšak nesmíme opomenout, že průběhy amplitud frekvencí se během procesu obrábění různě lišily, a zachycené grafy nemusí odpovídat nejvyšším dosaženým hodnotám.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 39
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [2] NAVRÁTIL, Miroslav a Oldřich PLUHAŘ. *Měření a analýza mechanického kmitání: metody a přístroje*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986, 401 s. Redakce báňské a strojírenské literatury.
- [3] BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK. *Mechanické kmitání*. Praha: sobotáles, 1994, 592 s. ISBN 80-901684-8-5.
- [4] ZUTH, Daniel, VDOLEČEK František. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice* [online]. 2010.[cit. 2. 2. 2015] .Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [5] ŠIROKÁ, Monika. *Měření a vyhodnocení vibrací on-line bezkontaktním způsobem pomocí laserinterferometru Renishaw*. Zlín: Univerzita Tomáši Bati ve Zlíně, Fakulta technologická1 2011. s. 99. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Vladimír Pata.
- [6] TLUSTY, George. *Manufacturing Process and Equipment*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000, 928 s. ISBN 02-014-9865-0.
- [7] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [8] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů* [online]. 2007. [cit. 4. 3. 2015]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>
- [9] BRUEL AND KJAER. *Transducers and conditioning* [online]. 2013. [cit. 4. 3. 2013]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bf0236.pdf>
- [10] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získávaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997, 174 s. ISBN 80-901-9361-7.
- [11] KARBAN, Pavel. *Rychlá Fourierova transformace* [online]. 2011. [cit. 12. 3. 2014]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~panek50/TEVS/12_prednaska.pdf
- [12] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI 9234*. Dostupné z:<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/208802>
- [13] OSIČKOVÁ, K. *Analýza variability srdečního rytmu krátkodobou Fourierovou transformací: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 59 s. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68215
- [14] KISTLER. *8630C & 8636C PiezoBEAM ACCELEROMETERS* [online]. [cit. 18. 5. 2015]. Dostupné z: http://www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/Accelerometer_Model_8630C_8636C.pdf

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 40
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- [15] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI cDAQ-9171* [online]. [cit. 18. 5. 2015]. Dostupné z: <http://ohm.ni.com/advisors/compactdaq/pages/common/helppopup.xhtml?conversationContext=1&url=http://sine.ni.com/nips/cds/view/modelpopup/p/pcat/13254>
- [16] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI LabVIEW SignalExpress* [online]. [cit. 18. 5. 2015]. Dostupné z: <https://www.ni.com/labview/signalexpress/>
- [17] KOVOSVIT MAS. *MCV 754 QUICK* [online]. [cit. 18. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz/cz/produkty/technologie-frezovani/vertikalni-objemove-obrabeceni-centra/mcv-754-quick>
- [18] BRUEL AND KJAER. *Module-LAN-XI Type 3056* [online]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/frontends/lanxi/modules/type-3056?tab=overview>
- [19] PCB. *Introduction to Piezoelectric Accelerometers* [online]. Dostupné z: http://www.pcb.com/TechSupport/Tech_Accel.aspx

SEZNAM OBRÁZKŮ

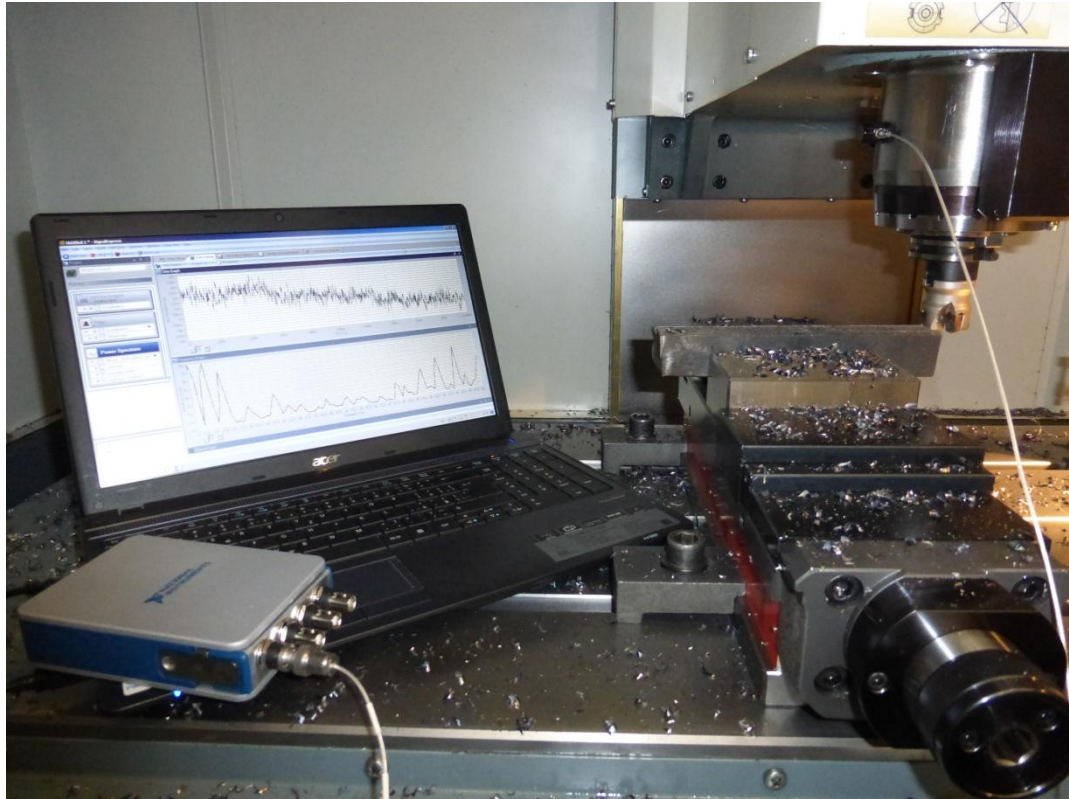
Obr. 1 základní model netlumeného vlastního kmitání, vpravo tlumené vlastní kmitání [1]...	12
Obr. 2 Periodický průběh netlumeného kmitání	12
Obr. 3 Průběh tlumeného kmitání	13
Obr. 4 Průběh buzeného kmitání	14
Obr. 5 Diagram stability [1]	16
Obr. 6 Absolutní a relativní kmitání [4]	18
Obr. 7 Model snímače vibrací [4]	19
Obr. 8 Uspořádání elektrodynamického snímače rychlosti [4]	20
Obr. 9 Schéma piezoelektrického akcelerometru [19]	22
Obr. 10 Příklad uspořádání piezorezistivního akcelerometru [7]	22
Obr. 11 Uspořádání kapacitního akcelerometru [7]	23
Obr. 12 Vliv způsobu uchycení snímače na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku [4]	23
Obr. 13 Převod signálu z časové do frekvenční oblasti pomocí FT [11]	26
Obr. 14 Analýza frekvenčních složek kmitání pomocí různých oken [7]	28
Obr. 15 Měřicí karta NI 9234 od firmy National Instruments [12]	29
Obr. 16 Měřicí karta LAN-XI typ 3056 firmy Brüel & Kjaer [18]	29
Obr. 17 CNC obráběcí frézka MCV 754 QUICK [17]	30
Obr. 18 Piezoelektrický akcelerometr 8630C10 [14]	31
Obr. 19 Měřicí karta NI 9234 od firmy National Instruments [12]	32
Obr. 20 Zásuvný modul (šasi) pro měřicí kartu [15]	32
Obr. 21 Ukázka programového prostředí při chodu stroje naprázdno	33
Obr. 22 Analýza použitím okna Hanning	34
Obr. 23 Analýza použitím okna Hamming	35
Obr. 24 Analýza použitím okna Blackman	35
Obr. 25 Analýza použitím okna Flat-top	36
Obr. 26 Analýza použitím okna Hamming v hloubce záběru 3mm	37
Obr. 27 Analýza použitím okna Blackman v hloubce záběru 3mm	37

Příloha

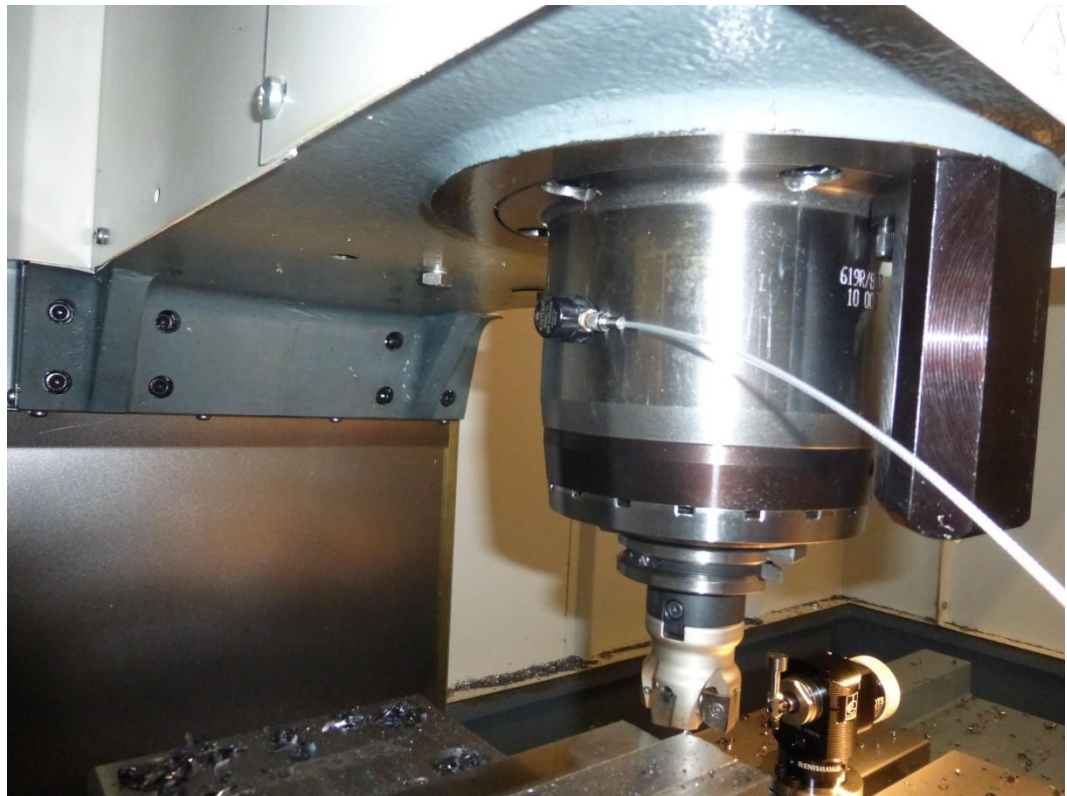
Obrázek 1 Měřicí aparatura	42
Obrázek 2 uchycení akcelerometru na vřetenu	42
Obrázek 3 Měřicí karta NI 9234	43
Obrázek 4 CNC frézka MCV 754 QUICK firmy Kovosvit MAS	43



PŘÍLOHA – FOTODOKUMENTACE



Obrázek 1 Měřící aparatura



Obrázek 2 Uchycení akcelerometru na vřetenu



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Obrázek 3 Měřicí karta NI 9234



Obrázek 4 CNC frézka MCV 754 QUICK firmy Kovosvit MAS