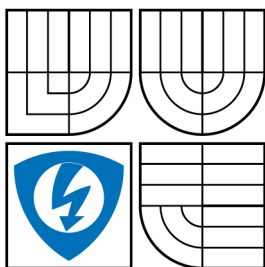


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF

NEGATIVNÍ VLIVY VIBRACÍ VŘETENA

TITLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

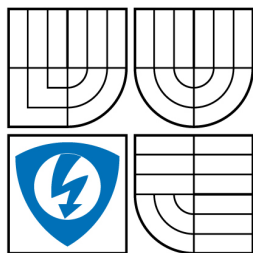
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Pavel Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Marie Havlíková, PhD.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Pavel Dvořák

ID: 78154

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Negativní vlivy vibrací vřetena

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analýza a vyhodnocování nepříznivých vlivů vibrací vřetena obráběcího stroje na kvalitu výrobků.
2. Sestavení a popis měřicího postupu, volba měřících metod, sestavení obecného modelu vibrodiagnostického systému, vytipování vhodného snímače pro měření vibrací vřetena.
3. Na základě analýz a návrhů měřících postupů a v návaznosti na semestrální projekt realizujte zkušební měření vibrací vřetena.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucí projektu a konzultanta z firmy BOSCH Jihlava

Termín zadání: 22.9.2008

Termín odevzdání: 19.12.2008

Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav automatizace a měřicí techniky

Negativní vlivy vibrací vřetena

Bakalářská práce

Student: Pavel Dvořák
Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková, PhD.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o měření vibrací vřetene č.1 obráběcího stroje STRATOS. Vzniklé vibrace mají zásadní vliv na obráběcí proces a dodržení předepsaných tolerancí. V této práci jsou také principy funkce akcelerometrů, především piezoelektrických a piezorezistivních. Cílem je získání potřebných dat pro návrh vhodného sledovacího zařízení, které bude sledovat stav obráběcího vřetene. Součástí této práce je také vypracovaný vzorový protokol o měření s jeho dosaženými výsledky a grafy. Úkolem této práce je udělat rozbor problematiky tak, aby byl později použitelný při realizaci sledovacího zařízení, které bude součástí procesu a bude ukazovat aktuální stav a kondici sledovaného vřetene.

Klíčová slova: Měření,
vibrace,
akcelerometr.

Brno University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Control, Measurement and Instrumentation

Negative Influences of Spindle Vibrations

Bachelor's thesis

Student: Pavel Dvořák
Supervisor: Ing. Marie Havlíková, PhD.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the vibration measuring of the spindle no.1 of the machine tool STRATOS. The vibrations have a fundamental impact both on the machining process and on the observance of a prescribed tolerance. This thesis also treats the accelerometers function principles, namely of the piezoelectric and piezoresistive ones. The aim of the research is to collect the data needed for the proposition of a suitable monitoring mechanism which will monitor the condition of the machining spindle. The thesis also includes a prototypal protocol about the measuring procedure, its achieved results, and graphs. The issue analysis is conceived to the effect that it is applicable for the realization of the monitoring mechanism which will be part of the process and will show the actual state and the condition of the spindle.

Keywords: Measurement,
vibration,
accelerometer.

Bibliografická citace:

DVOŘÁK, P. *Negativní vlivy vibrací vřetena*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Negativní vlivy vibrací vřetena* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, konzultantů z firmy BOSCH Diesel v Jihlavě a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **1. června 2009**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marii Havlíkové, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ladislavu Břečkovi ze společnosti BOSCH Diesel Jihlava za odborné konzultace v problematice vibrodiagnostiky.

V Brně dne: **1. června 2009**

.....

podpis autora

Obsah:

1. SEZNAM OBRÁZKŮ	10
2. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A NÁZVŮ.....	11
3. NORMY A PŘEDPISY	12
4. OBSAH PŘILOŽENÉHO CD/DVD.....	13
5. ÚVOD	14
6. ANALÝZA NEGATIVNÍCH PROJEVŮ VIBRACÍ.....	15
6.1 Historický vývoj měření [1].....	15
6.2 Vibrodiagnostika a její předmět zájmu [1]	15
6.3 Diagnóza poruchy [1][2].....	16
6.4 Systém detekce poruchy[1][2]	16
6.4.1 Systém údržby [1][2]	17
6.5 Nejčastější negativní projevy vibrací [1][2].....	18
6.6 Výskyt poruch během technického života výrobku[12]	18
6.7 Rychlá Fourierova transformace FFT [1]	20
7. AKCELEROMETRY	21
7.1 Akcelerometry s piezo technologií	22
7.2 Akcelerometry se seismickou hmotou	23
7.2.1 Piezoelektrické akcelerometry[10]	23
7.2.2 Piezorezistivní akcelerometry[11]	25
7.3 Akcelerometry s proměnnou kapacitou	26
8. PŘIPEVNĚNÍ AKCELEROMETRU	27
8.1 Konstrukce uchycení snímače vibrací [1].....	27
8.2 Analýza uchycení akcelerometru	28
9. POPIS PRACOVNÍ SESTAVY	29
9.1 Popis stroje STRATOS	29
9.2 Pracovní operace	31
10. MĚŘENÍ VIBRACÍ VŘETENE	32
10.1Současný režim měření	32

10.2Měřicí postup	32
10.3Měřicí přístroj VIBSCANNER [3]	33
10.4Protokol firmy Bosch	34
10.5Posunutí časové osy	36
10.6Zhodnocení protokolu brusky STRATOS č.16	38
10.7Limitní hodnoty vibrací	38
10.8Stanovení Mezních hodnot	39
11. NÁVRH KONTINUÁNÍHO TRENDOVÉHO MĚŘENÍ VIBRACÍ	40
11.1Analýza uchycení čidla[1]	40
11.2Kritéria pro výběr snímače vibrací.....	42
11.3Snímače vibrací od různých výrobců.....	43
11.4Monitorovací a měřicí technika	44
12. ZKUŠEBNÍ MĚŘENÍ VIBRACÍ VŘETENA	45
12.1Příprava měření	45
12.2Umístění čidla při měření.....	45
12.3Porovnání dosažených výsledků	46
9. ZÁVĚR.....	53
13. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	54

1. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 : Vanová křivka s třemi oblastmi četnosti poruch	19
Obr. 2 : Frekvenční závislost akcelerometru na jeho citlivosti [10]	21
Obr. 3 : Rozdělení akcelerometrů podle počtu citlivých os	22
Obr. 4: Fyzikální princip piezoelektrického akcelerometru.....	24
Obr. 5: Obrázek funkce piezorezistivního akcelerometru s technologií MEMS	25
Obr. 6 : Princip akcelerometru s proměnnou kapacitou.....	26
Obr. 7 : Obráběcí vřeteno brusky STRATOS s uchyceným snímačem vibrací.....	30
Obr. 8 : Ovládací obslužný panel brusky STRATOS	30
Obr. 9 : Čidlo vibrací s magnetickým uchycením připevněné k obráběcímu vřetenu	34
Obr. 10 : Ruční měřicí přístroj VIBSCANNER [7]	34
Obr. 11 : Posunutí časové osy o konstantu dBa.....	36
Obr. 12 : Protokol BOSCH, měření vibrací, bruska STRATOS č.16.....	37
Obr. 13 : Měřicí body na vřetenu brusky STRATOS	41
Obr. 14 : Hodnota rychlosti vibrace v_{RMS} vyhovujícího vřetene, 1H2, bruska č.06...	47
Obr. 15 : Hodnota rychlosti vibrace v_{RMS} nevyhovujícího vřetene, 1H2, bruska č.1448	
Obr. 16 : Spektrum rychlosti vibrací v_{FFT} , vyhovující vřeteno, 1H2, bruska č.06....	49
Obr. 17 : Spektrum rychlost vibrací v_{FFT} , nevyhovující vřeteno, 1H2, bruska č.14..	50
Obr. 18 : Ložisková metoda SPM, vyhovující vřeteno, 1H2, bruska č.06.....	51
Obr. 19 : Ložisková metoda SPM, nevyhovující vřeteno, 1H2, bruska č.14.....	52

2. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A NÁZVŮ

MEMS	Mikro Elektro Mechanický Systém
Shock Survival	Rázy
CNC	Computer Numerical Control
VIBSCANNER	Měřicí přístroj od firmy LAMI KAPPA
RMS	Root Mean Square (Efektivní hodnota)
SPM	Shock pulse Method (Šoková Pulsní Metoda)
FFT	Fast Fourier Transformation (Rychlá Fourierova Transformace)
1V	Vertikální umístění akcelerometru
1H1	Axiální umístění akcelerometru
1H2	Horizontální umístění akcelerometru
PC	Personal Computer (Osobní počítač)

3. NORMY A PŘEDPISY

ČSN EN ISO 9000-01 Systémy managementu jakosti – Základy, zásady a slovník.

ČSN EN ISO 9001-01 Systémy managementu jakosti – Požadavky.

ČSN EN ISO 9001-01 Systémy managementu jakosti – Směrnice pro zlepšování výkonnosti.

ČSN ISO 1925:95 Vibrace – Vyvažování – Slovník.

ČSN 010105:93 Názvosloví technické diagnostiky.

ČSN 010611:83 Spolehlivost v technice. Pravidla pro stanovení bodových a intervalových odhadů ukazatelů spolehlivosti. Parametrické metody.

ČSN ISO 5348:99 Vibrace a rázy: Mechanické připevnění akcelerometrů.

ČSN ISO 10816-1:98 Vibrace: Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech.

Část 1 Všeobecné směrnice.

ČSN ISO 10816-3:99 Vibrace: Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech.

Část 3 Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 1/min a 15 000 1/min při měření *in situ*.

ČSN ISO 31-0:94 Veličiny a jednotky Část 0: Všeobecné zásady.

ČSN ISO 31-0:94 Veličiny a jednotky Část 2: Periodické a příbuzné jevy.

ČSN ISO 31-0:94 Veličiny a jednotky Část 3: Mechanika.

ČSN ISO 2041:97 Vibrace a rázy. Slovník.

ČSN ISO 5348:99 Vibrace a rázy: Mechanické připevnění akcelerometrů.

4. OBSAH PŘILOŽENÉHO CD/DVD

/Použité obrázky	Obrázky použité v Bakalářské práci
/Použité tabulky	Tabulky použité v Bakalářské práci
/Katalogové listy	Katalogové listy výrobců akcelerometrů
BP_Dvorak	Samotná Bakalářská práce

5. ÚVOD

Úvodem bych chtěl shrnout výběr tohoto tématu. Oslovil jsem firmu BOSCH Diesel v Jihlavě s žádostí o poskytnutí tématu pro mou Bakalářskou práci. Obratem mi zaslali seznam možných prací. Po konzultaci s mojí vedoucí paní Ing. Marii Havlíkovou, PhD. jsem vybral velice zajímavou práci, která je metrologického charakteru. Jde o detekci a vliv vibrací, které vznikají při opotřebení ložisek prvního. vřetene brusky STRATOS. V této práci jde nejen o teoretický rozbor problému, ale také o jeho praktické měření a jeho zpracování. Téma práce bylo původně určeno pro diplomovou práci. Po vzájemné domluvě s konzultantem z firmy BOSCH, byla náplň této práce redukována o praktickou konstrukci a připojení sledovacího zařízení. Tato Bakalářská práce popisuje především postup, jakým se měření provádí, popis měřeného procesu, výběr vhodného měřicího čidla, popis jeho funkce a protokol o zpracování naměřených hodnot. Porovnávají se zde dvě měření, ve kterých je ukázáno, jak vypadá vibrační projev více a méně opotřebeného vřetene.

6. ANALÝZA NEGATIVNÍCH PROJEVŮ VIBRACÍ

6.1 HISTORICKÝ VÝVOJ MĚŘENÍ [1]

Vývoj vibrodiagnostiky prakticky kopíruje vývoj metod technické diagnostiky. Od pocitových a vizuálních vjemů pracovníků, přes snahy zesílit vibrační (hlukový) signál, až po moderní měřicí techniky, které dokáží velice přesně interpretovat aktuální technický stav sledovaného objektu.

Za revoluční změnu je považováno zapojení informačních (výpočetních) technologií do procesu měření. To mělo za následek zpřesnění měření a interpretace výsledků v reálném čase, což se z praktického hlediska ukázalo jako neocenitelný přínos jak po technické, tak po ekonomické stránce.

6.2 VIBRODIAGNOSTIKA A JEJÍ PŘEDMĚT ZÁJMU [1]

Vibrodiagnostika je jedním ze stěžejních měřicích odvětví, které se využívají převážně tam, kde jsou rotující stroje. Tyto stroje jsou převážně ve strojním a automobilovém průmyslu. Jde zde totiž o problematiku přesnosti strojů při nepříznivých vlivech vibrací, způsobených nadměrným opotřebením jeho částí. Tyto stroje, především rotační, mají tolerance v řádech desítek, nebo dokonce jednotek mikrometrů. To klade vysoké nároky na údržbu a plánování odstávek. Vysoce náchylné jsou především vysokootáčkové stroje, kde působí značné odstředivé síly.

Cílem sledování vibrací strojů je poskytnout uživateli přehled o tom, v jakém stavu se nachází měřený objekt a jeho část. Tato skutečnost má příznivý dopad především na kvalitu výrobků, protože díky plánování se dá předejít neplánovaným odstávkám.

6.3 DIAGNÓZA PORUCHY [1][2]

Diagnóza poruchy je postup, kterým se provádí analýza okamžitého stavu objektu a jeho provozuschopnost za daných podmínek. Hlavní části této diagnózy jsou:

- **detekce** – odhalení existence vznikající poruchy,
- **lokalizace** – určení míst, kde se porucha vyskytla,
- **specifikace** – stanovení příčiny vznikající poruchy vyhodnocením diagnostického signálu,
- **predikace** – určení prognózy zbytkového času do výměny vadného kusu za účelem plánování a údržby,

Toto jsou čtyři hlavní fáze detekce vibrací, podle kterých se rozhoduje další postup údržby. Na základě zkušeností se zvolí nejlepší možný postup, jakým se bude postupovat při údržbě. Při měření poruch na části zařízení, kde se sleduje pouze určitá část, je Lokalizace poruch zbytečná. Tyto čtyř fáze jsou univerzálně použitelné pro detekci nastalé poruchy.

6.4 SYSTÉM DETEKCE PORUCHY[1][2]

V dnešní době se ve firmě BOSCH spoléhá především na detekci poruchy prostřednictvím nespojitých měření, která jsou prováděna nepravidelně s různě dlouhými časovými rozestupy. Tato Bakalářská práce je koncipována tak, aby se ukázaly výhody a nevýhody realizaci měření v pravidelných intervalech. Po zavedení měření v pravidelných intervalech se očekává včasná detekce nastávajícího problému a s tím související plánování údržby a menší ekonomická zatížení pro firmu.

Technický vývoj a schopnost obstát na trhu si žádá zlepšení a zpřesnění výrobních postupů. Tímto jsou kladeny i větší nároky na údržbářské technologie a metody, ale také na použitou strategii při plánování výměny a rozdělení práce. Údržbu musíme chápat jako nedílnou součást výrobního procesu. Provozní spolehlivost je určena především bezporuchovostí, udržovatelností a zajištěností údržby.

6.4.1 Systém údržby [1][2]

Pravidelné sledování technického stavu zařízení, má příznivý vliv na jeho provozuschopnost. Nejen literatura, ale především provozní zkušenosti uvádí, že nasazení správného systému údržby se projeví na celkové úspoře. Především technické, technologické a ekonomické.

Výhody nasazení systému údržby:

technická a technologická úspora

- výrazné snížení neplánovaných výpadků výroby a neplánovaných oprav,
- snížení spotřeby náhradních dílů,
- zvýšení životnosti strojů a nástrojů,
- zvýšení výrobní kapacity a kvality výroby,
- zvýšení bezpečnosti práce.

ekonomická úspora

- snížení nákladů na údržbu až o 30%,
- snížení prostojů u odstavených strojů o 40 - 50% a adekvátní zvýšení produkce,
- úspora za výrobu kusů mimo toleranci.

Nevýhody nasazení systému údržby:

- první přínosy po zavedení do výroby se projeví zhruba za 8-12 měsíců,
- připravované období realizace po zpracování trvá minimálně 6 měsíců,
- nutná počáteční investice do technologie (Zařazené mezi nevýhody, protože návratnost je v řádově v měsících. Jedná se tedy o dlouhodobou investici, která je ovšem nutná pro obstání na trhu).

6.5 NEJČASTĚJŠÍ NEGATIVNÍ PROJEVY VIBRACÍ [1][2]

Vibrace se negativně projevují na celkovém stavu systému. Jejich působením se zvyšuje riziko poškození důležitých částí a s tím související neplánované odstávky a prostoje zaměstnanců.

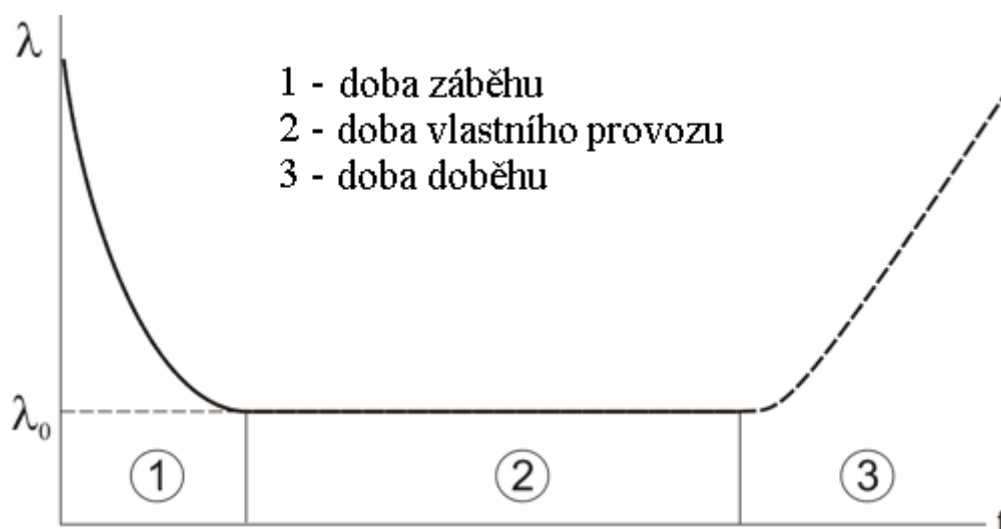
- **nadměrné opotřebení** stěžejních částí, především ložisek a uložení,
- **zvýšení hlučnosti** celého systému,
- **zhoršení schopnosti dodržení předepsaných tolerancí** při obrábění,
- **nucené prostoje** při neplánované odstávce a z toho plynoucí i vyšší ekonomické zatížení.

6.6 VÝSKYT PORUCH BĚHEM TECHNICKÉHO ŽIVOTA VÝROBKU[12]

Vznik poruchy výrobku během jeho technického života lze považovat za náhodný jev. Spolehlivostí součástky se rozumí schopnost zachovávat požadované vlastnosti ve stanovených mezích za definovaných provozních podmínek během technického života. Skutečná spolehlivost součástky závisí na konstrukčním řešení, vlastnostech použitých materiálů a použitých technologií a rovněž i na podmínkách provozu, skladování i přepravy.

Spolehlivost součástky se udává číselnou hodnotou některého z normovaných ukazatelů spolehlivosti. Metodika určení ukazatelů spolehlivosti vychází z teorie počtu pravděpodobnosti a matematické statistiky. Význačnou charakteristikou používanou k popisu spolehlivosti elektronických součástek je ukazatel intenzity poruch $\lambda(t)$. Například hodnota $\lambda(t) = 0.001 h^{-1}$ udává, že během jedné hodiny provozu dojde k poruše prvku s pravděpodobností jedné tisícin.

Obecně se za typický průběh intenzity poruch v závislosti na čase života výrobku považuje tzv. Vanová křivka viz Obr. 1. Z obrázku je patrné, že křivka je dělena na tři úseky.



Obr. 1 : Vanová křivka s třemi oblastmi četnosti poruch

- 1 Doba záběhu, jinak také úsek častých poruch a vad** - Je to oblast, ve které dochází k výskytu častých vad v nedokonalostech materiálu, nedokonalostech konstrukce atd.
- 2 Doba vlastního provozu, jinak také úsek ustáleného množství poruch** - V této části charakteristiky se výrobek dostává do časového úseku (není předem známa jeho velikost), kdy je výskyt možných poruch snížen na běžnou hladinu λ_0
- 3 Doba doběhu, jinak také úsek dožití a únavy** - V této části charakteristiky se začínají projevovat vady vzniklé opotřebením a výrobek je třeba vyměnit, nebo naplánovat další postup

6.7 RYCHLÁ FOURIEROVA TRANSFORMACE FFT [1]

Průběh signálu se obvykle nezorňuje v časové oblasti. Posuzování časového průběhu signálu vhodně doplňují i jeho vlastnosti prezentované rozkladem na soubor elementárních funkcí. Nejpřirozenějším způsobem pro technické účely je rozklad na soubor harmonických funkcí, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Rozklad periodické funkce se spojeným časem na kombinaci harmonických signálů se nazývá Fourierova řada. Pro neperiodické funkce se používá rychlá Fourierova transformace tzv. FFT (Fast Fourier Transformation).

Rozklad na Fourierova řadu se týká hlavně periodických a kvasiperiodických signálů. Přesto že počet složek rozkladu je obecně nekonečný, obsahuje tento rozklad jen složky s frekvencemi, které jsou násobky harmonické, základní frekvence opakování signálu (vyšší harmonické a subharmonické).

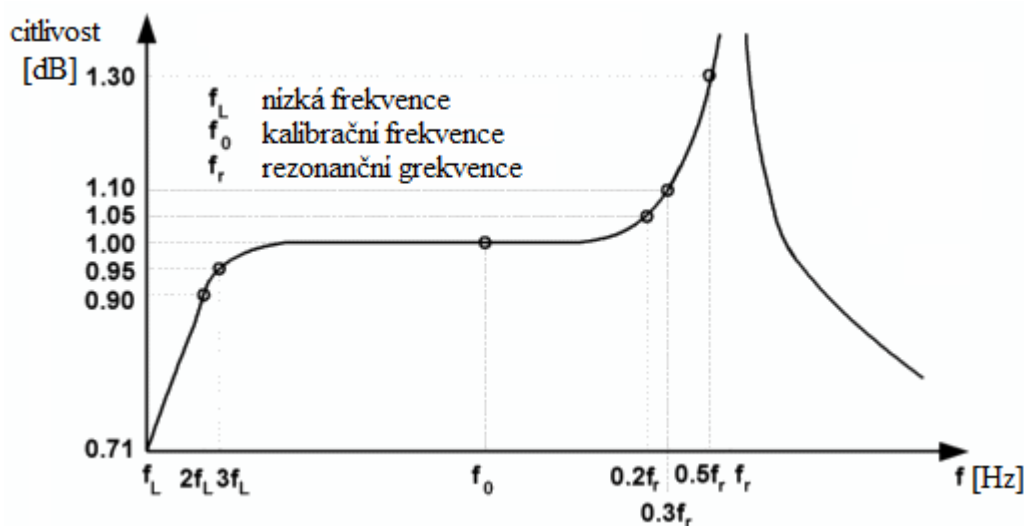
Podstatou FFT je volba zvláštní délky záznamu a vychází ze značného urychlení výpočtu (autoři Cooley a Tukey) Fourierovy transformace vycházející z Fourierovy řady.

7. AKCELEROMETRY

Rozdělení čidel vibrací (akcelerometrů) podle fyzikálního hlediska [4]:

- Piezo technologie,
 - piezoelektrické,
 - piezorezistivné,
- odporové,
 - potenciometry,
 - tenzometry,
- indukčnostní,
- magnetoelastické,
- kapacitní,
- fotoelektrické,
- ostatní (světlovodné, fluidikové a další).

Čidla zrychlení se vyrábějí pro široký rozsah zrychlení od zlomků m.s^{-2} do 10^6 m.s^{-2} . Frekvenční rozsah je od 10^{-1} do 10^5 Hz , dobře patrné z Obr. 2.



Obr. 2 : Frekvenční závislost akcelerometru na jeho citlivosti [10]

7.1 AKCELEROMETRY S PIEZO TECHNOLOGIÍ

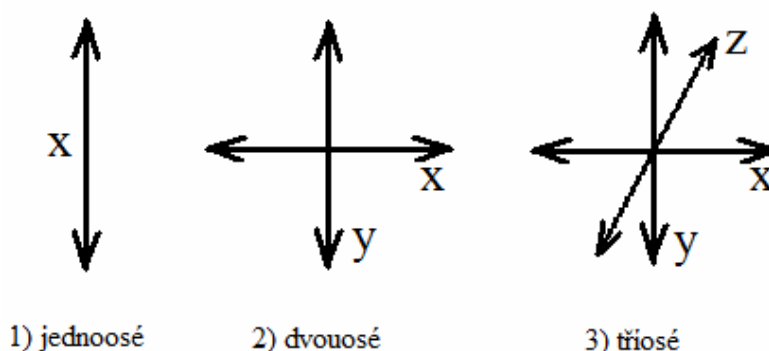
Akcelerometry jsou v dnešní době velmi rozšířené a využívají se v různých odvětvích nejenom průmyslu, ale také ve věcech pro běžné používání. V dnešní době je velkým hitem použití v mobilních telefonech. Primární veličinou, kterou akcelerometry snímají je zrychlení, které převádějí na měřitelný elektrický signál. Akcelerometry jsou schopny měřit *dynamické* (síly působící na snímač v pohybu) a *gravitační* zrychlení.

Základní rozdělení akcelerometrů je:

- **Akcelerometry se seismickou hmotou** využívají hmoty, která působí na piezosnímač, využívá se technologie MEMS (Mikro Elektro Mechanický Systém)
- **Akcelerometry s proměnnou kapacitou** využívají změny kapacity při akceleraci, využívají především technologie MEMS.

Druhé rozdělení akcelerometrů podle počtu citlivých os:

- jednoosé,
- dvouosé,
- tříosé.



Obr. 3 : Rozdělení akcelerometrů podle počtu citlivých os

Všechny tyto senzory mohou měřit od velmi nízkých hodnot gravitačního zrychlení a díky robustní pouzdrům dokáží odolávat obrovským rázům (Shock Survival). Napájecí napětí se pohybuje většinou od 3 do 24 V.

Rozdělení akcelometrů se seismickou hmotou:

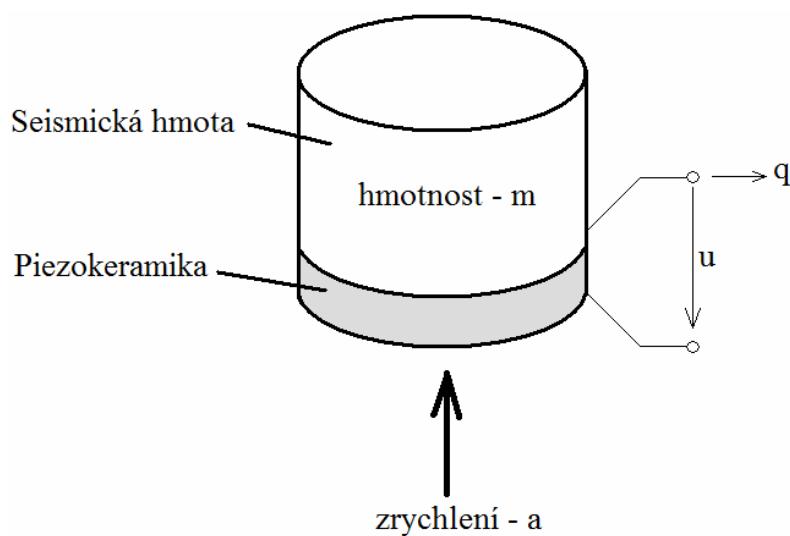
- **piezoelektrické** akcelerometry využívají piezoelektrický krystal, který generuje náboj úměrný působící síle,
- **piezorezistivní** akcelerometry využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu.

7.2 AKCELEROMETRY SE SEISMICKOU HMOTOU

7.2.1 Piezoelektrické akcelerometry[10]

Piezoelektrické akcelerometry využívají piezoelektrický materiál (krystal), který generuje náboj úměrný mechanickému namáhání. Velikost působící síly je dána velikostí zrychlení a hmotností seismické hmoty podle Newtonova zákona. Vnitřní elektronika senzoru poté převádí náboj na napěťový výstup s nízkou impedancí. Jednoduchá konstrukce umožňuje připojit akcelometr na jednoduchý vyhodnocovací obvod. Tyto snímače nemohou být použity pro měření konstantního zrychlení, protože nedokáží měřit frekvence nižší než 0.1 Hz.

Princip spočívá v tom, že jedna strana piezoelektrického krystalu je pevně připevněna k základně senzoru a k protilehlé straně krystalu je připevněna seismická hmota. Pokud akcelometr vystaven zrychlení (vibracím, akceleraci, otřesům) $a[s^{-2}]$, potom působí seismická hmota na krystal silou $F[m.s^{-2}]$. Síla, která působí na krystal, způsobuje generování elektrického náboje na výstupu senzoru. Protože seismická hmota je konstantní, potom výstupní signál v podobě náboje je úměrný akceleraci senzoru. Pokud je akcelometr řádně upevněn k testovanému objektu, měří i jeho zrychlení. Akcelometr charakterizuje nábojová citlivost a napěťová citlivost.



Obr. 4: Fyzikální princip piezoelektrického akcelerometru

Základní výpočty vztahující se k Obr. 4:

Druhý Newtonův zákon – zákon síly je dán vztahem:

$$F = m \cdot a \quad [\text{N}] \quad (3.1)$$

Nábojová citlivost B_{qa} :

$$B_{qa} = \frac{q}{a} \quad [\text{C} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3.2)$$

Napěťová citlivost B_{ua} :

$$B_{ua} = \frac{u}{a} \quad [\text{V} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3.3)$$

Piezoelektrické akcelerometry, které se používají pro měření vibrací, nárazů a nepřímé měření rychlostí, mají mírně rozličné konstrukce. Tyto konstrukce zlepšují různé vlastnosti:

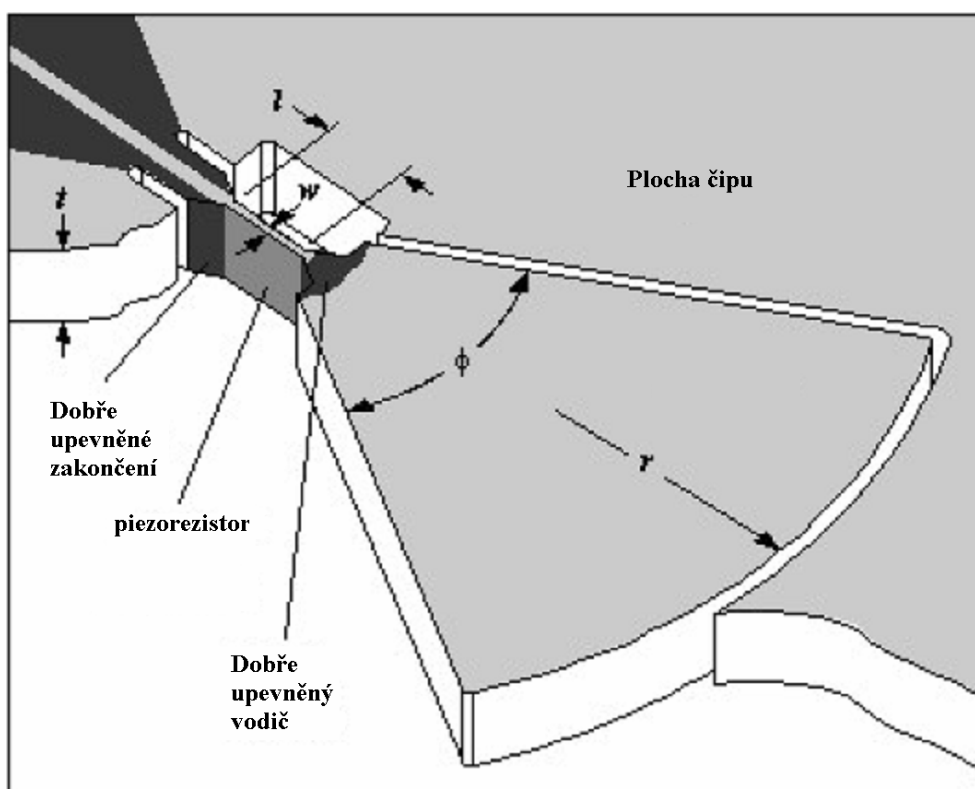
- **smykový mód**, který je pro senzory se zvýšenou odolností na vliv teploty a parazitní vibrace pouzdra,
- **ohybový mód**, který je vhodný pro měření seismické aktivity,

- **kompresní mód**, který má základní provedením pro průmyslové akcelerometry.

7.2.2 Piezorezistivní akcelerometry[11]

Piezorezistivní akcelerometr využívá piezorezistivní materiál na místo piezoelektrického a jeho prostřednictvím převádí sílu od seismické hmoty na změnu odporu viz Obr. 5. V integrovaných piezorezistivních akcelerometrech se využívá sítě leptaných měřicích piezorezistivních snímačů zapojených do Wheatstoneova můstku. Piezorezistivní akcelerometry mají výhodu proti piezoelektrickým v tom, že mohou měřit i konstantní zrychlení, to znamená frekvenci změn od 0Hz.

Je to dnes jeden z nejpoužívanější principů využívaných v integrovaných akcelerometrech, především s technologií MEMS. Tento princip byl objeven v roce 1979 a je založen na ohybu nosníku z piezorezistivního křemíkového materiálu vlivem působícího zrychlení. Ohybem se mění odpor, který je měřen a pomocí Wheatstoneova můstku je hodnota odporu převedena na změnu napětí.



Obr. 5: Obrázek funkce piezorezistivního akcelerometru s technologií MEMS

7.3 AKCELEROMETRY S PROMĚNNOU KAPACITOU

Tyto akcelerometry využívají změny kapacity mezi pohyblivou a pevnou částí snímače zrychlení. V dnešní době hojně využívaný princip využívaný v integrovaných akcelerometrech s technologií MEMS. Používají se především tam, kde nejsou příliš velké nároky na velikost zrychlení. Zrychlení, které působí na akcelerometr, vyvolá posunutí prostřední desky a tím dojde ke změně obou kapacit v nepřímé úměře (čím větší bude kapacita prvního kondenzátoru, tím menší bude kapacita druhého kondenzátoru). Na výstupu se objeví obdélníkový signál o amplitudě úměrné hodnotě zrychlení.

Výpočet kapacity deskového kondenzátoru:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad , \text{kde} \quad [F] \quad (3.4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

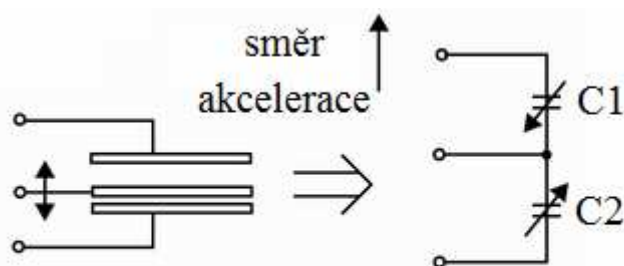
ε_0permitivita vakua = $8,854187817 \cdot 10^{-12}$ [F.m⁻¹]

ε_rrelativní permitivita, liší se druhem dielektrika

S.....plocha desek kondenzátoru [m²]

d.....vzdálenost desek kondenzátoru [m]

Na následujícím Obr. 6 je zakreslen princip fungování akcelerometru s proměnnou kapacitou. Podle směru působení zrychlení se kapacita jednoho kondenzátoru zvětšuje a druhého zmenšuje. Z tohoto plyne, že se dá rozeznat jak velikost zrychlení, tak i směr jejího působení.



Obr. 6 : Princip akcelerometru s proměnnou kapacitou

8. PŘIPEVNĚNÍ AKCELEROMETRU

8.1 KONSTRUKCE UCHYCENÍ SNÍMAČE VIBRACÍ [1]

Vhodné měření vibrací je v rozhodující míře závislé na správném přenosu pohybu od místa vzniku vibrací až do snímače. Rozhodující je proto správný typ připevnění akcelerometru. Danou problematikou se podrobně zabývá norma ČSN ISO 5348:99, která podrobně popisuje vliv způsobu uchycení akcelerometru k měřenému objektu.

Tab. 1 : Vliv metody uchycení snímače vibrací

Metoda uchycení	Vliv na výkonnost snímače (např. snímače s rezonancí 30 kHz)
Pevný šroubový spoj	Žádné snížení rezonanční frekvence akcelerometru v důsledku připevnění
Izolovaný šroubový spoj	Pokud je pro zabránění vzniku zemních smyček a jiných vlivů použit tuhý nevodivý materiál, jako je podložka ze slídy, montážní rezonanční frekvence je mírně snížena asi na 28 kHz
Přilepení tuhým lepidlem	Rezonance je snížena asi na 28 kHz
Přilepení měkkým epoxidem	Rezonance je snížena asi na 8 kHz
Připevnění permanentním magnetem	Rezonance je snížena asi na 7 kHz
Ruční sonda se snímačem	Rezonance je snížena asi na 2 kHz, ale tato metoda není doporučena pro měření nad 1 kHz

8.2 ANALÝZA UCHYCENÍ AKCELEROMETRU

Z Tab. 1 je patrné, že uchycení akcelerometru pomocí šroubového spoje je ideální pro využití celého jeho frekvenčního rozsahu. Tento způsob uchycení snímače je vhodný i z hlediska stacionárního umístění a je odolný proti náhodnému přemístění. Proškolení technici z firmy Bosch se rozhodli zvolit tento druh upevnění na vřetenu brusky STRATOS.

Doposud používaný akcelerometr s magnetickým uchycením, který slouží pro kontrolní měření, však není vhodný pro trendové měření. Ostatní možnosti uchycení akcelerometru, kromě ruční sondy se snímačem, by se daly použít, protože v tomto případě je maximální frekvence 5 kHz a posun rezonanční frekvence by neměla zásadní vliv. Záleží především na konkrétním typu akcelerometru a jeho frekvenčním rozsahu, abychom se nedostali do oblasti s nižší přesností. Podrobný rozbor uchycení akcelerometru je rozebrán v kapitole 11.1.

9. POPIS PRACOVNÍ SESTAVY

Pracovní sestava, která je předmětem této práce, je CNC (Computer Numerical Control) obráběcí bruska STRATOS, u které je kladen značný důraz na přesnost finální úpravy vnitřního uložení ložisek pro dieselová čerpadla. Přesnost je stěžejní pro pozdější funkčnost těchto čerpadel a jejich bezporuchovost.

9.1 POPIS STROJE STRATOS

Jedná se o CNC brusku, která je umístěna na pevné desce a slouží k finální úpravě částí čerpadel, konkrétně na broušení vnitřního uložení ložisek. Uvnitř tohoto stroje se nachází držák, do kterého se upíná obrobek, jehož polohu řídí předem naprogramovaný počítač.

Pracovní výbava brusky STRATOS:

- upínací systém,
- 3 stacionárně umístěná vřetena, která finálně upravují vnitřní uložení (předmětem této práce je sledování pouze jednoho z nich viz Obr. 7)
- chladicí systém, který má za úkol rozprašovat olejovou lázeň a zároveň se využívá pro odvod materiálu vzniklého po broušení.

Rychlost rotace sledovaného vřetene:

- sledované vřeteno rotuje rychlostí 45 tisíc ot/min a je poháněno 9 kW dvoupólovým motorem.

Chladicí médium:

Proces broušení je chlazen speciálním olejem, který je aplikován v dávkách a je rozprašován na obráběnou plochu vřetena a obrobku. Tento mazací olej zároveň slouží i pro odvod materiálu vzniklého po broušení.

Ovládací panel brusky STRATOS:

- je umístěný z vnější strany brusky STRATOS viz Obr. 8,
- umožňuje práci v manuálním a automatickém režimu.



Obr. 7 : Obráběcí vřeteno brusky STRATOS s uchyceným snímačem vibrací



Obr. 8 : Ovládací obslužný panel brusky STRATOS

9.2 PRACOVNÍ OPERACE

Volba pracovní operace se provádí pomocí externího ovládacího panelu, který je umístěn na vnější straně brusky STRATOS.

Upevnění obrobku do držáku provede pracovník ručně, podle předepsaného postupu, podle kterého byl řádně proškolen.

Vlastní broušení má několik fází, během nichž se po broušení zarovnává obráběcí plocha vřetena na zarovnávacím přístroji, který je součástí pohyblivého mechanismu a je zcela automatizovaný v procesu. Celý proces broušení a začišťování trvá několik minut.

Vyjmutí obrobku je prováděno, stejně jako upevňování, pracovníkem, který opracovaný polotovar umístí do přepravního boxu a obrobek míří na další stanoviště v procesu. Příprava před vložením dalšího polotovaru spočívá v očištění příslušného upínacího ústrojí a celého mechanismu.

10. MĚŘENÍ VIBRACÍ VŘETENE

10.1 SOUČASNÝ REŽIM MĚŘENÍ

Vibrodiagnostické měření provádí pouze pracovník, který je způsobilý a řádně proškolený. Měření se neprovádí trendově¹, ale spíše nahodile a s delšími časovými rozestupy. Měření je dále provedeno po upozornění obsluhujícího pracovníka brusky STRATOS, který již není schopen dodržet předepsané tolerance obrábění. Důležité je, aby měřicí proběhlo co možná nejrychleji, aby nedocházelo ke zbytečným prostojům.

Samotné měření se provádí po vyjmutí obrobku z upínacího ústrojí stroje STRATOS a je důležité, aby všechna provedená měření měla srovnatelné podmínky u všech měřených vřeten, proto se samotné měření provádí ve fázích mimo proces obrábění.

10.2 MĚŘICÍ POSTUP

Proškolený pracovník z firmy BOSCH, si vezme přístroj VIBSCANNER, který je určen pro měření vibrací. Měřicí přístroj se napojí na počítač a nahraje se do něj naplánované měření pro předem zvolenou brusku. Pracovník potom musí jít přímo k určené brusce, kde externí akcelerometr přístroje VIBSCANNER připevní k nepohyblivému tělu vřetene pomocí magnetického uchycení viz Obr. 7 a poté se musí zavřít bezpečnostní ochranné dveře. Pracovník pomocí ovládacího panelu roztočí vřeteno na 45 tisíc ot/min a poté je prováděn samotný sběr dat, který si měřicí přístroj řídí sám. Měření se provádí celkem třikrát – horizontálně(1H2), vertikálně(1V) a axiálně(1H1), názorně zobrazené na Obr. 1. Vibrace se v tomto prostředí nešíří všemi směry rovnoměrně, protože jsou tu přechody mezi různými materiály, které jsou podrobně rozebrány v kapitole 11.1. V každém místě je jiný počet přechodů a to má za následek jiná výstupní data.

¹ Výsledek trendového měření je tzv. VANOVA KŘIVKA s fázemi záběhu, vlastního provozu a doběhu, viz Obr. 1

10.3 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ VIBSCANNER [3]

Pro měření vibrací používá firma BOSCH ruční měřicí přístroj VIBSCANNER od firmy LAMI KAPPA, spol. s r.o., která sídlí v Teplicích. Tento přístroj zvládá měření vibrací, otáček, teploty atd., to vše pomocí zabudovaných čidel. Pro měření uvnitř CNC stroje jsou ovšem zabudovaná čidla přístroje nedostačující, proto se využívá externí vibrační čidlo (akcelerometr) s magnetickým uchycením. Čidlo má na svém hrotu magnet, kterým se připevňuje na měřený objekt. Měřicí přístroj má vlastní paměť, ve které si uchovává nashromážděná data z měření, která se dají pomocí propojovacího kabelu přenést do počítače a dále vyhodnocovat. Na Obr. 9 je vyfotografován akcelerometr s magnetickým uchycením, který je konkrétně použit při měření. Na dalším Obr. 10 je již zmíněný měřicí přístroj VIBSCANNER, který má velice široké spektrum využití, který měří²:

- vibrace podle normy ISO 10816-3:
 - o výchylka,
 - o rychlost,
 - o zrychlení,
- stav ložisek,
- teplotu,
- otáčky,
- procesní parametry,
- spektrum FFT (Frekvenční Fourierova Transformace),
- analýzu signálu,
- vyvažování.

² Výpis z rejstříku funkcí přístroje VIBSCANER od firmy LAMI KAPPA [3]



Obr. 9 : Čidlo vibrací s magnetickým uchycením připevněné k obráběcímu vřetenu



Obr. 10 : Ruční měřicí přístroj VIBSCANNER [7]

10.4 PROTOKOL FIRMY BOSCH

Naměřená data z měřicího přístroje VIBSCANNER se přenesou do počítače. Speciální software, který je od stejného výrobce jako přístroj, zpracuje data a vytvoří z nich protokol. Vzorový protokol je uveden na Obr. 12.

V záhlaví protokolu o měření brusky STRATOS je uvedeno:

- Číslo stroje, na kterém bylo měření prováděno: Bruska STRATOS č.16,
- měřené místo: vřeteno 1,
- podmínky, za kterých bylo měření provedeno:
 - o teplota vřetena: 33°C,
 - o rychlost otáčení vřetena: 45 000 ot/min,
 - o průměr ložiska: 30 mm,
 - o posun nulové osy dBa: -5, vysvětlení viz 10.5,
- datum uskutečnění měření: 26.8.2008,
- technický stav měřeného objektu – kategorizace,
 - o III. nepřípustný stav (nadlimitní hodnota „alarm“),
 - o II. časově omezený provoz (uspokojivý stav),
 - o I. časově neomezený provoz (dobrý stav),
- popis závady nebo cíle měření.

Vlastní protokol o měření obsahuje:

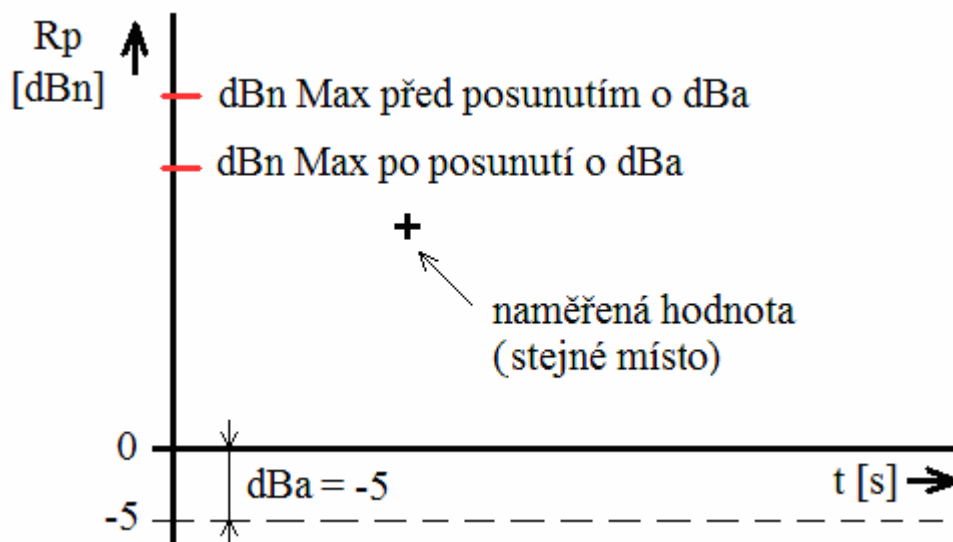
- výběr konkrétního stroje STRATOS a číslo vřetene,
- efektivní hodnotu RMS zrychlení akcelerometru připevněného k vřetenu,
- spektrum signálu pomocí FFT,
- šoková pulsní metoda SPM (kobercové vibrace a maximální pulsy),
- vyhodnocení naměřených hodnot,

Z těchto hodnot, které jsou uvedeny v protokolu, se vyhodnocuje aktuální stav obráběcího vřetene. Pro lepší viditelnost je v protokolu uvedeno vyhodnocení naměřených hodnot a návrh opatření. Tyto podmínky jsou stěžejní pro další postup při údržbě brusky.

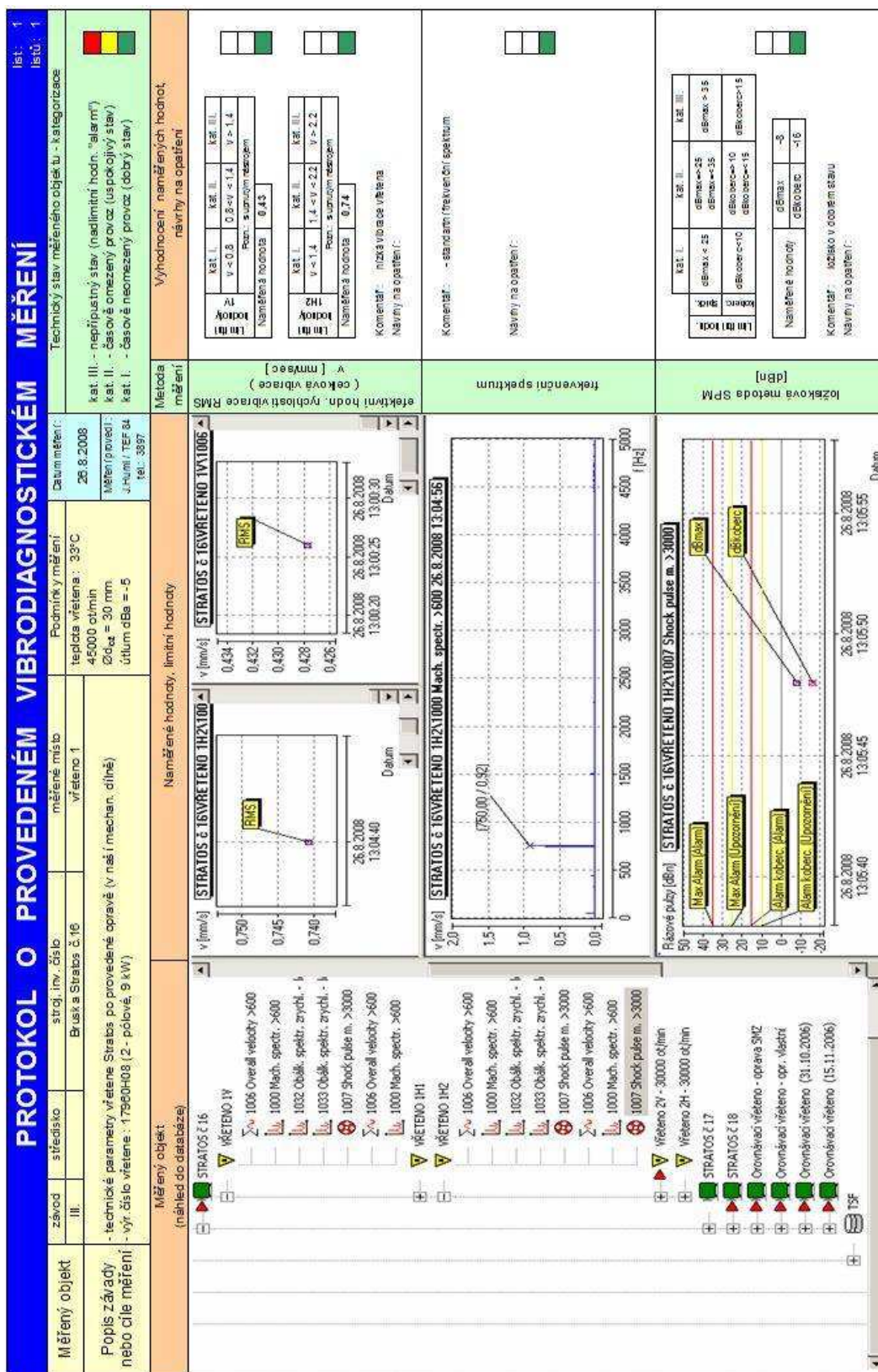
10.5 POSUNUTÍ ČASOVÉ OSY

Posunutí dBa časové osy x ve vertikálním směru po ose y , na které jsou vynášeny hodnoty rázových pulsů R_p v jednotkách $[dBn]$. Jedná se pouze o pomocný rozměr udávající posun časové osy, viz Obr. 11.

Posunutí časové dBa dosahuje hodnoty $-5 dBn$. Toto úmyslné zhoršení naměřených hodnot bylo provedeno proto, aby se v reálném prostředí nepřekročila maximální dovolená hranice $dBnMax$, kdy vřetenno nebude splňovat předepsanou přesnost obrábění, jde v podstatě o kompenzaci netrendového měření.



Obr. 11 : Posunutí časové osy o konstantu dBa



Obr. 12 : Protokol BOSCH, měření vibrací, bruska STRATOS č.16

10.6 ZHODNOCENÍ PROTOKOLU BRUSKY STRATOS Č.16

Výsledkem měření jsou celkem tři grafy, které jsou vytvořené pro umístění akcelerometru v poloze 1H2 viz Obr. 13 a z nichž se dá vyčíst aktuální stav obráběcího vřetene. Jak je patrné, hodnotí se schopnost dodržet předepsanou hladinu vibrací. Tato hladina vibrací má stěžejní vliv na přesnost a kvalitu obrábění.

Grafy z ukázkového protokolu brusky STRATOS č.16:

- efektivní hodnota vibrací RMS,
- spektrum signálu pomocí FFT,
- šoková pulsní metoda SPM.

Hodnoty povolených mezí, jsou stanoveny interně z ohledem na doposud získaná data. Dosažené výsledky jsou prezentovány tak, aby bylo na první pohled patrné, zda splnily předepsané tolerance či nikoli.

10.7 LIMITNÍ HODNOTY VIBRACÍ

Použité výrazy z následujících tabulek:

I.kat. časově neomezený provoz vřetena - **dobrý stav**

II.kat. časově omezený provoz vřetena - **uspokojivý stav**

III.kat. nepřijatelný stav vřetena - **nadlimitní hodnota „alarm“**

rychlost vibrace $v[\text{mm.s}^{-1}]$ platí pro rychlosti $v_{\text{RMS}}[\text{mm.s}^{-1}]$ a $v_{\text{FFT}}[\text{mm.s}^{-1}]$

Tab. 2 : Efektivní hodnota rychlosti vibrace v vřetene, poloha 1V

Místo uchycení 1V $v[\text{mm.s}^{-1}]$	I.kat.	II.kat.	III.kat.
	$v < 0,8$	$0,8 < v < 1,4$	$v > 1,4$
Pozn.: s upnutým nástrojem			

Tab. 3 : Efektivní hodnota rychlosti vibrace v vřetene, poloha 1H2

Místo uchycení 1H2 $v[\text{mm.s}^{-1}]$	I.kat.	II.kat.	III.kat.
	$v < 1,4$	$1,4 < v < 2,2$	$v > 2,2$
Pozn.: s upnutým nástrojem			

Tab. 4 : Limitní hodnoty rázových pulzů R_p ložiskové metody SPM

	I.kat.	II.kat	III.kat.
Maximální puls R_p[dBn]	$dB_{\max} < 25$	$25 \leq dB_{\max} \leq 35$	$dB_{\max} > 35$
Kobercové vibrace R_p[dBn]	$dB_{\text{koberc}} < 10$	$10 \leq dB_{\text{koberc}} \leq 35$	$dB_{\text{koberc}} > 15$

10.8 STANOVENÍ MEZNÍCH HODNOT

Firma si tyto mezní hodnoty vibrací $dB_{\max}$, dB_{koberc} a v vytvořila sama na základě interního výzkumu a porovnání již dosažených výsledů přesností. Dosažené hodnoty jsou zjištěny pomocí metody porovnávání rozměrů obráběných částí s předepsanými tolerancemi. Rychlost vibrace v [mm.s⁻¹] platí pro v_{RMS} [mm.s⁻¹] a v_{FFT} [mm.s⁻¹].

Tab. 2 obsahuje limitní hodnoty efektivní rychlosti vibrace v v poloze 1V.

Tab. 3 obsahuje limitní hodnoty efektivní rychlosti vibrace v v poloze 1H2.

Tab. 4 obsahuje limitní hodnoty rázových pulzů R_p ložiskové metody SPM.

Takto získané hodnoty se však použitím čidla, které bude pevně uchyceno na stacionární místo, mohou mírně změnit viz 11.1. Předpokládá se, že změny hodnot nebudou příliš zásadní, a tudíž se provedou pouze jejich menší korekce.

11. NÁVRH KONTINUÁNÍHO TRENDOVÉHO MĚŘENÍ VIBRACÍ

V současné době je měření prováděno netrendově, což má za následek menší přesnost a především efektivnost oproti trendovému měření. Po zavedení trendového monitorování obráběcího vřetene brusky STRATOS, se zlepší včasné informování o stavu stroje a vznikající poruše. Tím bude více času a možností efektivně naplánovat další postup při odstávce stroje a včasná výměna vřetene bude mít pozitivní vliv na kondici celé brusky.

Nevýhody trendového měření jsou bohužel v tom, že se musí měření provádět na nezatíženém vřetenu. Je zde tudíž nutnost určitého časového úseku, který je nutný pro změření vibrací. Bohužel by nebylo možné provádět měření během jiné části procesu, kdy sice měřené vřeteno není zatížené, ale vzniklé vibrace v jiných částech brusky by mohly ovlivnit výsledné hodnoty. Bude se muset najít mezi procesy určitý časový úsek, kdy se provedou potřebná měření pro úspěšné dosažitelní potřebných výsledků.

Nevýhody netrendového měření:

- zdlouhavé zjištění aktuálního stavu vřetene,
- po zjištění nepřijatelné hodnoty vibrací je potřebná odstávka stroje s nucenými prostoji,
- větší pravděpodobnost výroby vadných kusů mimo toleranci,
- větší zátěž celého zařízení v důsledku nevčasného odhalení závady.

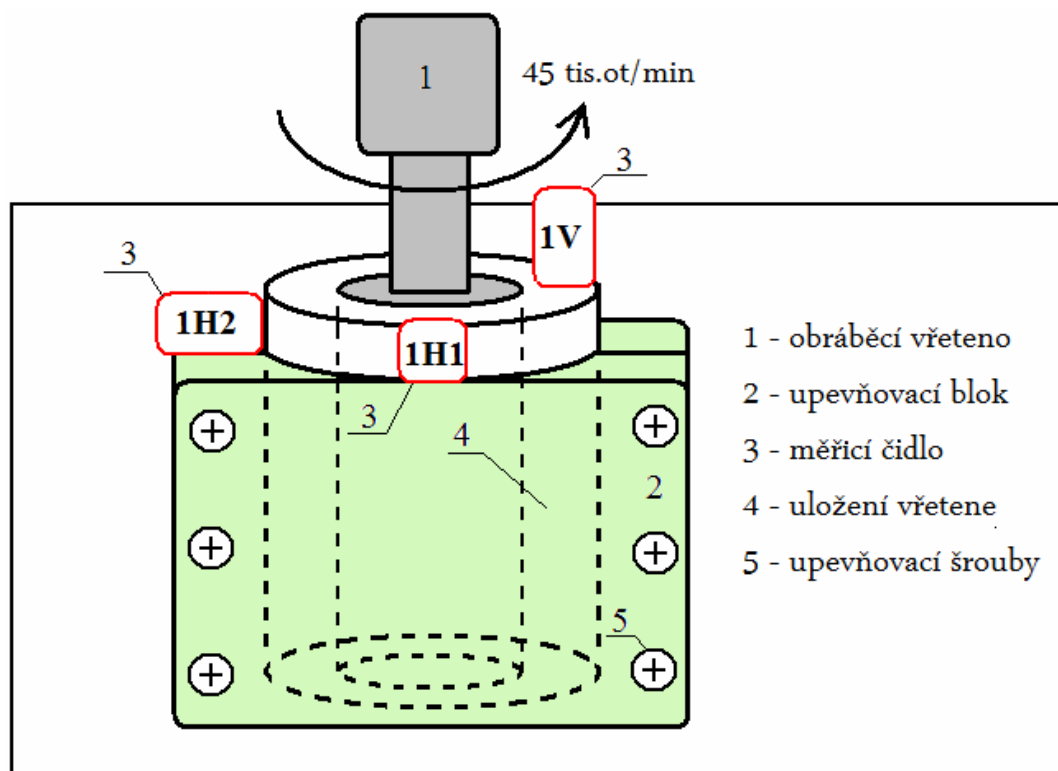
11.1 ANALÝZA UCHYCENÍ ČIDLA[1]

Systém magnetického upevnění čidla, který je doposud používány, je sice velice rychlý při instalaci, ale je zatížen chybami, které vznikají na přechodech materiálů. Každý přechod, který musí daný signál překonat, má za následek útlum tohoto signálu. Představme si, že na ložisku se vyskytne vada nebo se projeví jeho asymetrie. Potom signál, který chceme detekovat čidlem, bude muset překonat spoustu přechodů mezi vrstvami různých materiálů. Signál musí projít samotným měřeným uložením ložisek od centra zdroje, vrstvou litiny, která tvoří tělo celého

stroje, dále ochranným nátěrem a magnetem až k samotnému čidlu. Všechny tyto vrstvy prakticky tlumí vzniklé vibrace a tím se posouvá i rezonanční frekvence vybraného snímače, viz Tab. 1.

Vznik mezních hodnot, kdy se už nedá dosáhnout potřebné přesnosti broušení, si udělala firma BOSCH sama na základě interních zkušeností s výrobou. V současné době je měření prováděno vždy třikrát na různých místech (1V - vertikální, 1H1 - axiální a 1H2 - horizontální). Po konzultaci s odborníkem na měření vibrací z firmy BOSCH, bylo rozhodnuto, jakým způsobem a kam přesně se umístí čidlo vibrací. Z praktického hlediska, by se mělo upevnit stacionárně pomocí pevného šroubového spoje na místo 1H2, nebo v jeho blízkosti, kde nebude překážet ani samotnému procesu, obsluze a ani servisním pracovníkům při výměně vřetena.

Místo upevnění 1H2 vibračního čidla je znázorněno na Obr. 13. Toto místo bylo vybráno na základě zkušeností a výsledků dosavadních měření.



Obr. 13 : Měřicí body na vřetenu brusky STRATOS

11.2 KRITÉRIA PRO VÝBĚR SNÍMAČE VIBRACÍ

Výrobci čidel uvádějí citlivosti svých snímačů v různých jednotkách. Především v napěťové citlivosti B_{ua} [mV/ms⁻²], proudové citlivosti B_{ia} [mA/ms⁻²] a nábojové citlivosti B_{qa} [pC/ms⁻²]. Konkrétní typ akcelerometru, který bude použit při praktické realizaci trendového měření, záleží na výběru vedení firmy BOSCH. Je důležité, aby vybraný akcelerometr splňoval určité specifické parametry, např.:

- **dostatečná citlivost**, která umožní efektivně měřit nastalé nežádoucí vibrace,
- **vhodný frekvenční rozsah**, který zajistí snímání vibrací na stroji v širokém rozsahu měřených hodnot,
- **funkčnost v agresivním prostředí** obráběcího stroje, kde působí na čidlo spousta negativních faktorů (např. chladicí olej, ve kterém je obsažen obrobený materiál),
- **způsob uchycení**, aby bylo zajištěno pevné spojení s měřeným objektem,
- **robustnost** proti rušivým vlivům, které by mohly zkreslovat vyhodnocovaná data,
- **cenové rozmezí**, do kterého se čidlo musí vejít atd..

11.3 SNÍMAČE VIBRACÍ OD RŮZNÝCH VÝROBCŮ

Příklady možných akcelerometrů, které by byly vhodné pro realizaci trendového měření, jsem uvedl v této části práce. Výběr byl proveden podle aktuální nabídky výrobců americké, evropské a tuzemské produkce viz Tab. 5. Jsou zde uvedeny pouze akcelerometry, které se dají použít pro tuto aplikaci a jsou vhodné pro trendové měření na brusce STRATOS. Další typy akcelerometrů lze nalézt na internetových stránkách uvedených výrobců.

Konkrétní výběr akcelerometru, který bude vhodný pro trendové měření jsem provedl na základě srovnání s dosud používaným akcelerometrem od společnosti PRÜFTECHNIK.

Tab. 5 : Výrobci akcelerometrů a parametry jejich produktů

Produkce	Výrobce	Model	Typ výstupu	Citlivost	Měřicí rozsah	Rezonance
USA	GE Energy	330400	piezoelektrický s napěťovým výstupem	10.2 mV/ms ⁻² (±5%)	10 Hz do 15 kHz	30 kHz
		330425		10.2 mV/ms ⁻² (±5%)	10 Hz do 15 kHz	30 kHz
		200157		10.2 mV/ms ⁻² (±12%)	10 Hz do 10 kHz	30 kHz
	Dytran Instruments	3214A3	piezoelektrický s napěťovým výstupem	50 mV/ms ⁻² (± 5%)	10 Hz do 10 kHz	30 kHz
SRN	Prüftechnik	VIB 6.140	piezoelektrický s proudovým výstupem	1.0 μA/ms ⁻² (±3%)	2 Hz do 8 kHz ±5%	36 kHz
		VIB 6.142		1.0 μA/ms ⁻² (±3%)	1 Hz do 20 kHz ±10% 0,3 Hz do 20 kHz ±3dB	
CZ	Aura	SV 128	kapacitní s nábojovým výstupem	3,1 pC/ ms ⁻²	1Hz do 4kHz	22 kHz
		SV 129		3,1 pC/ ms ⁻²	1Hz do 4kHz	22 kHz
		SV 156		3,1 pC/ ms ⁻²	1Hz do 4kHz	22 kHz

11.4 MONITOROVACÍ A MĚŘICÍ TECHNIKA

Monitorovací zařízení by bylo možné realizovat pomocí již existujících měřicí systémů od různých firem. Tyto firmy mají s měřením vibrací značné zkušenosti a poznatky, které se mohou hodit při realizaci trendového měření. Mezi nejznámější firmy zabývajícími se měřicí technikou patří například:

ADVANTECH <www.advantech.com> ,

Keithley Instruments Inc. <www.keithley.com> ,

Burr-Brown <www.burr-brown.com> ,

HEWLETT-PACKARD (Agilent Technologies) <www.agilent.com> ,

Willtek - Wavetek <www.willtek.com> ,

National Instruments <www.ni.com> .

Z české a slovenské produkce jsou to firmy:

Moravské přístroje <www.mii.cz> ,

Merlin s.r.o. <www.merlin-sro.sk> ,

IPP Measure s.r.o. <www.ippmeasure.com> .

12. ZKUŠEBNÍ MĚŘENÍ VIBRACÍ VŘETENA

12.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Při návštěvě firmy BOSCH bylo spolu s proškoleným pracovníkem firmy provedeno zkušební měření na bruskách STRATOS. Proškolený pracovník z firmy BOSCH dohlížel na správné provedení měřicích algoritmů. Předem byly vytipovány dvě brusky, na kterých bylo provedeno toto kontrolní měření. Zcela záměrně byla vybrána bruska, na které bylo obráběcí vřetenem v dobrém stavu, konkrétně se jednalo o brusku STRATOS č.14 v.č.8600068. Druhá bruska disponovala vřetenem, které bylo těsně před výměnou, konkrétně se jednalo o brusku STRATOS č.06 v.č.8600048. Zajímavé je porovnání dosažených výsledků na obou bruskách, které je zhodnoceno v kapitole 12.3. Pro měření byl použit velice přesný přístroj VIBSCANNER.

12.2 UMÍSTĚNÍ ČIDLA PŘI MĚŘENÍ

Na Obr. 13 jsou znázorněna různá umístění akcelerometru při jednotlivých měřeních ve všech třech osách, konkrétně se jedná o polohy:

1V – vertikální,

1H1 – axiální,

1H2 – horizontální.

Po zavedení trendového sledování se měření zredukuje pouze na polohu v jedné ose a to konkrétně na polohu 1H2, proto jsem se při vyhodnocování naměřených hodnot soustředil na dosažená data z tohoto místa. Vzniklé vibrace se podle dosavadních zjištění projevují nejvýrazněji v umístění v poloze 1V, ovšem z praktického hlediska by se nedala tato poloha pro trendové měření použít, protože takto umístěný akcelerometr by vadil při samotném provozu brusky.

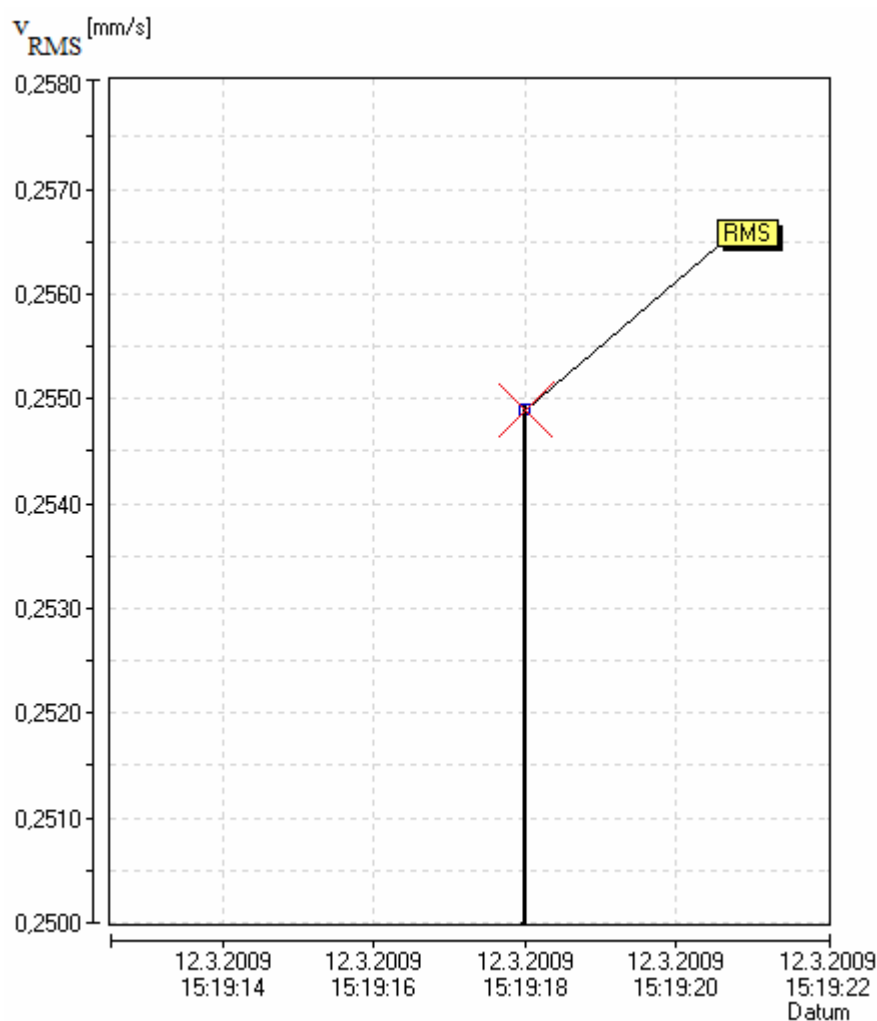
12.3 POROVNÁNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Pro každou zvolenou metodu měření vibrací včetně pomocí měřicího přístroje VIBSCANNER byly hodnoty všech sledovaných parametrů zaznamenány do Tab. 6. Pro grafické zpracování byla tyto hodnoty přeneseny do PC, který má již nainstalovaný vyhodnocovací software, pomocí něhož se dají vykreslit jednotlivé grafické závislosti sledovaných parametrů dB_{max} , $dB_{koberec}$. Dosažené výsledky splnily předpoklady o větším poškození včetně brusky č.14 oproti včetně brusky č.06. Dosažené výsledky jsou shrnuty v Tab. 6.

Z Tab. 6 je patrné, že naměřené hodnoty v_{RMS} a v_{FFT} nepřesahují povolené limitní hodnoty a přesto je včetně brusky č. 14 určeno k výměně. Tento závěr je zapříčiněn tvarem Vanové křivky viz 6.6, na které se včetně dostává do oblasti *Doby doběhu*, kde se množství poruch s časem výrazně zvyšuje. Po zavedení trendového měření se čas využití včetně zvýší na maximum a tím budou ušetřeny náklady na výměnu ještě použitelného včetně.

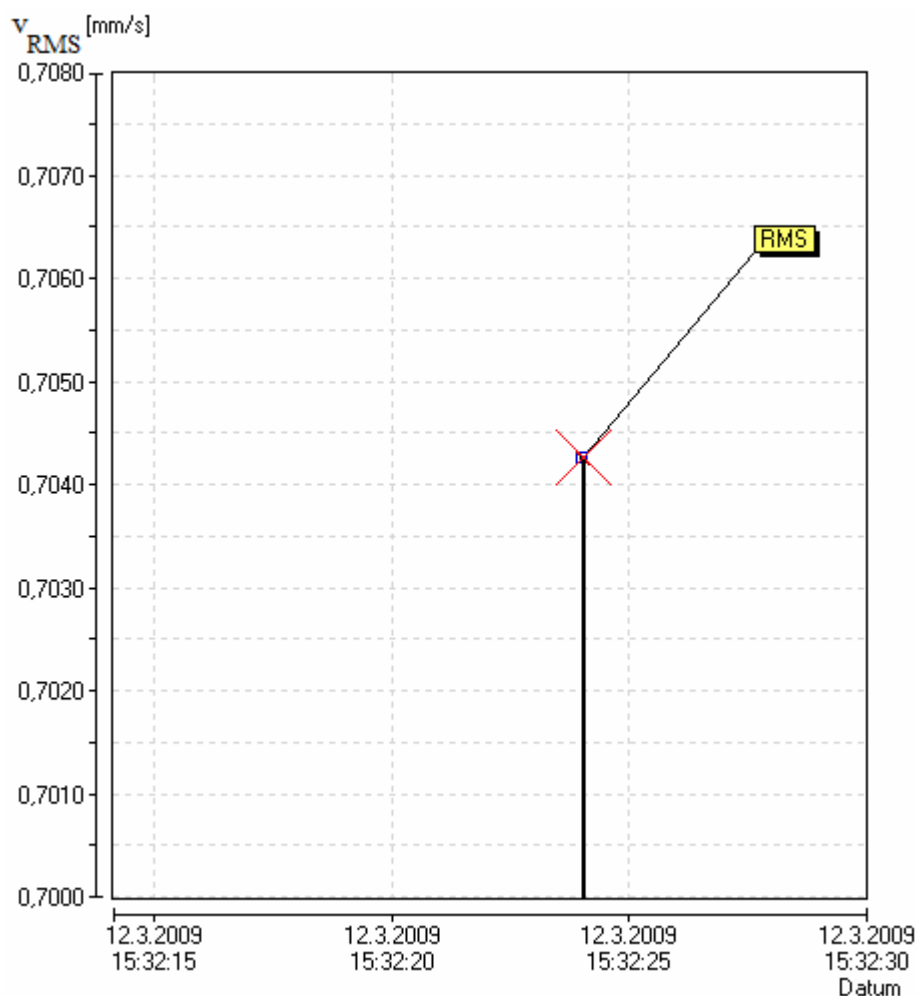
Tab. 6 : Metody, parametry a hodnoty kontrolního měření vibrací

Metoda	Vyhovující včetně	Nevyhovující včetně	Limitní hodnoty vibrace
	bruska č.6	bruska č.14	
	naměřená hodnota vibrace	naměřená hodnota vibrace	
v_{RMS} [mm.s ⁻¹]	0,2549	0,7042	0,8
FFT 1. harmonická v_{FFT} [mm.s ⁻¹]	0,04	0,72	1,4
dB_{max} Rp [dBn]	-3	-11	25
$dB_{koberec}$ Rp [dBn]	-11	-17	10



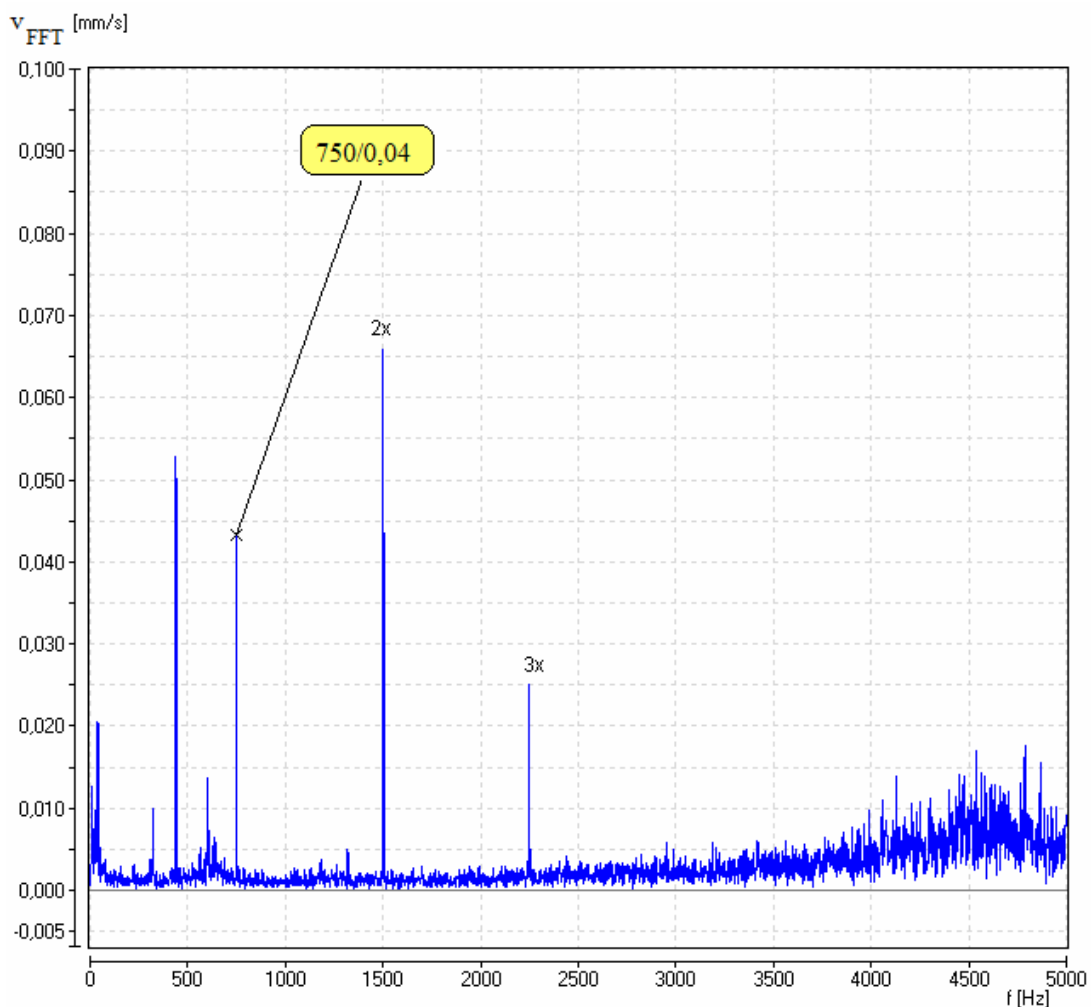
Obr. 14 : Hodnota rychlosti vibrace v_{RMS} vyhovujícího vřetene, 1H2, bruska č.06

Jak je patrné z Obr. 14 , je odečtená efektivní hodnota rychlosti vibrace v_{RMS} , měřená na nevyhovujícím vřetenu brusky STRATOS č.06 v poloze akcelerometru 1H2 dosahuje hodnoty $v_{RMS} = 0,2549 \text{ mm.s}^{-1}$



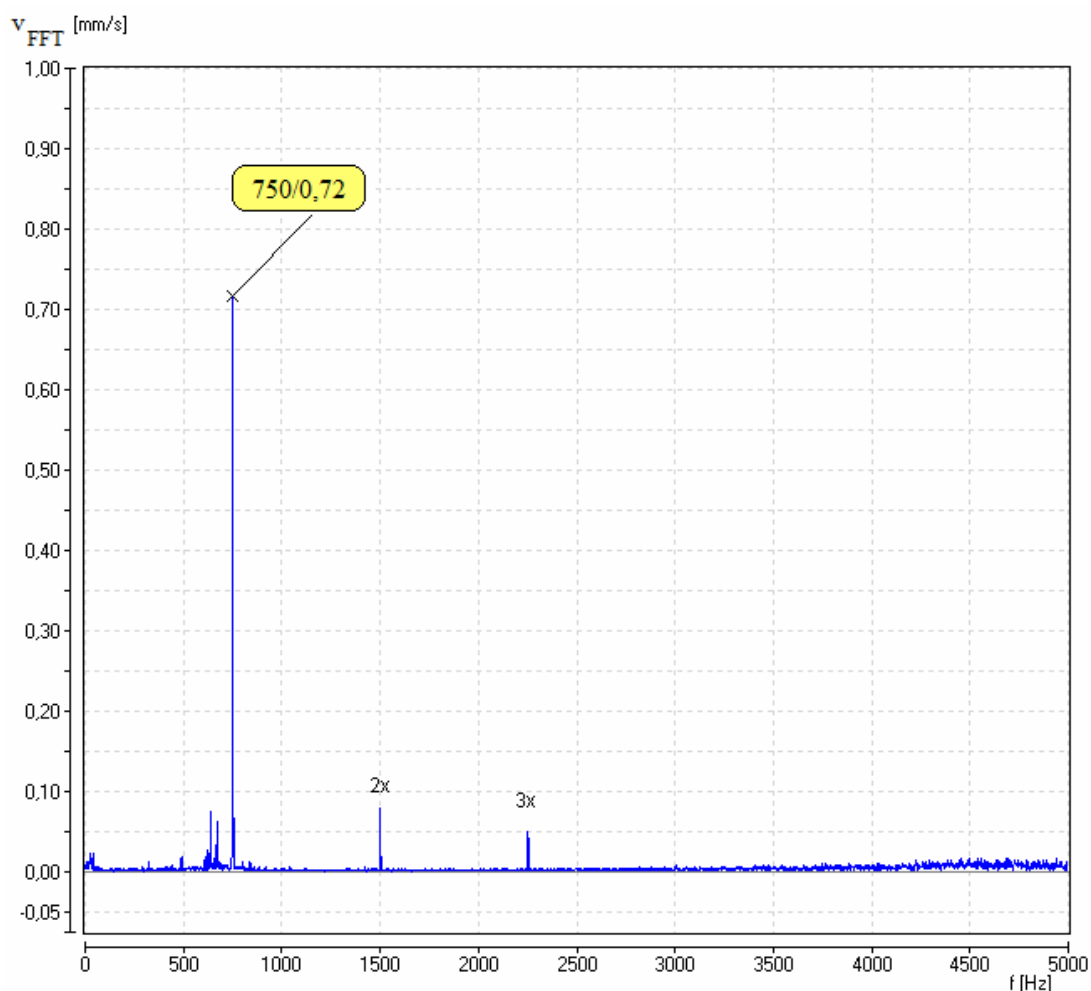
Obr. 15 : Hodnota rychlosti vibrace v_{RMS} nevyhovujícího vřetene, 1H2, bruska č.14

Jak je patrné z Obr. 15, je odečtená efektivní hodnota rychlosti vibrace v_{RMS} , měřená na vyhovujícím vřetenu brusky STRATOS č.14 v poloze akcelerometru 1H2 dosahuje hodnoty $v_{RMS} = 0,7042 \text{ mm.s}^{-1}$



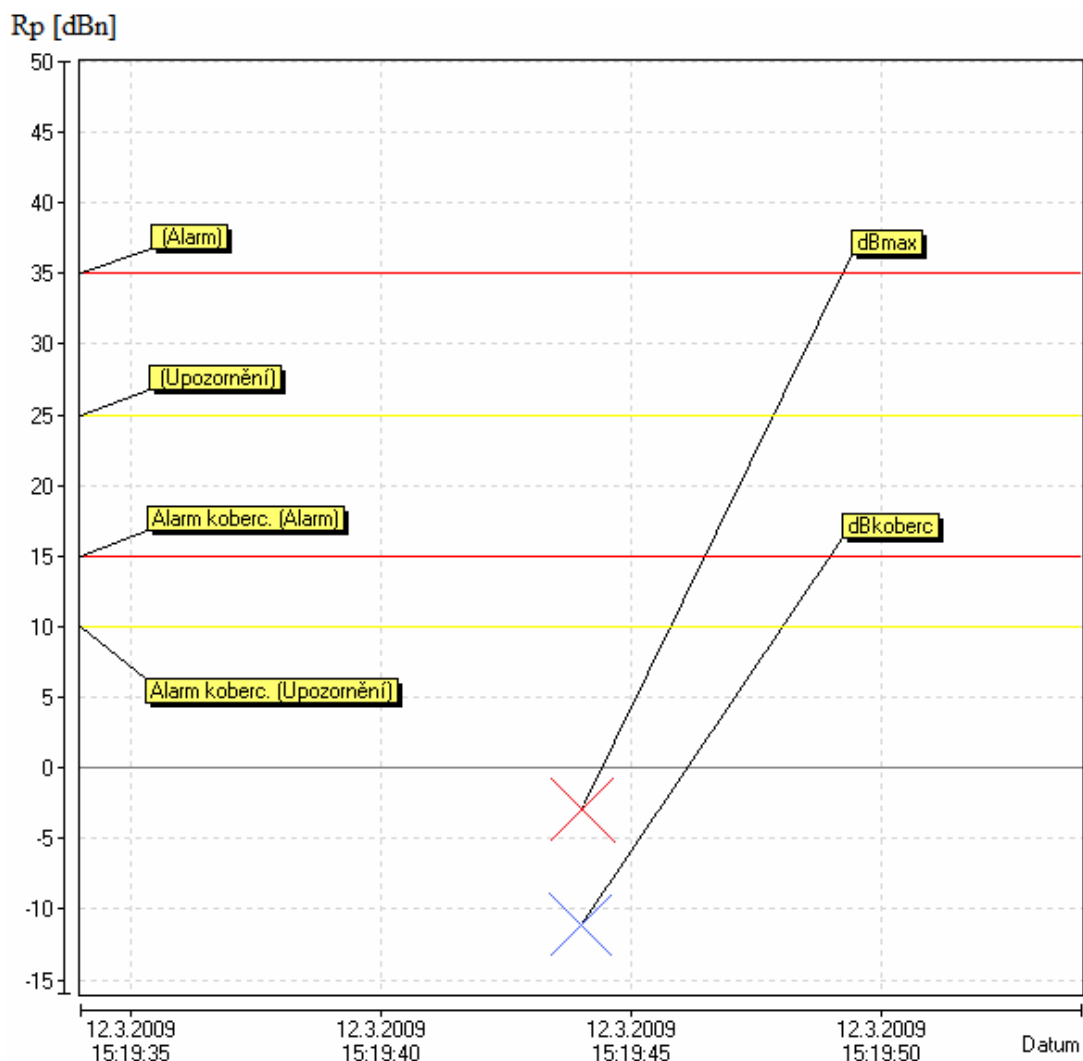
Obr. 16 : Spektrum rychlosti vibrací v_{FFT} , vyhovující vřeteno, 1H2, bruska č.06

Jak je patrné z Obr. 16, je rychlost vibrace v_{FFT} měřená pomocí frekvenčního spektra (FFT). První harmonická složka spektra rychlosti vibrace v_{FFT} pro vyhovující vřeteno brusky STRATOS č.06 a polohu 1H2 umístění akcelerometru je na frekvenci 750 Hz a dosahuje hodnoty $v_{FFT} = 0.04 \text{ mm.s}^{-1}$.



Obr. 17 : Spektrum rychlost vibrací v_{FFT} , nevyhovující vřeteno, 1H2, bruska č.14

Jak je patrné z Obr. 16, je rychlost vibrace v_{FFT} měřená pomocí frekvenčního spektra (FFT). První harmonická složka spektra rychlosti vibrace v_{FFT} pro nevyhovující vřeteno brusky STRATOS č.14 a polohu 1H2 umístění akcelerometru je na frekvenci 750 Hz a dosahuje hodnoty $v_{FFT} = 0,72 \text{ mm.s}^{-1}$.

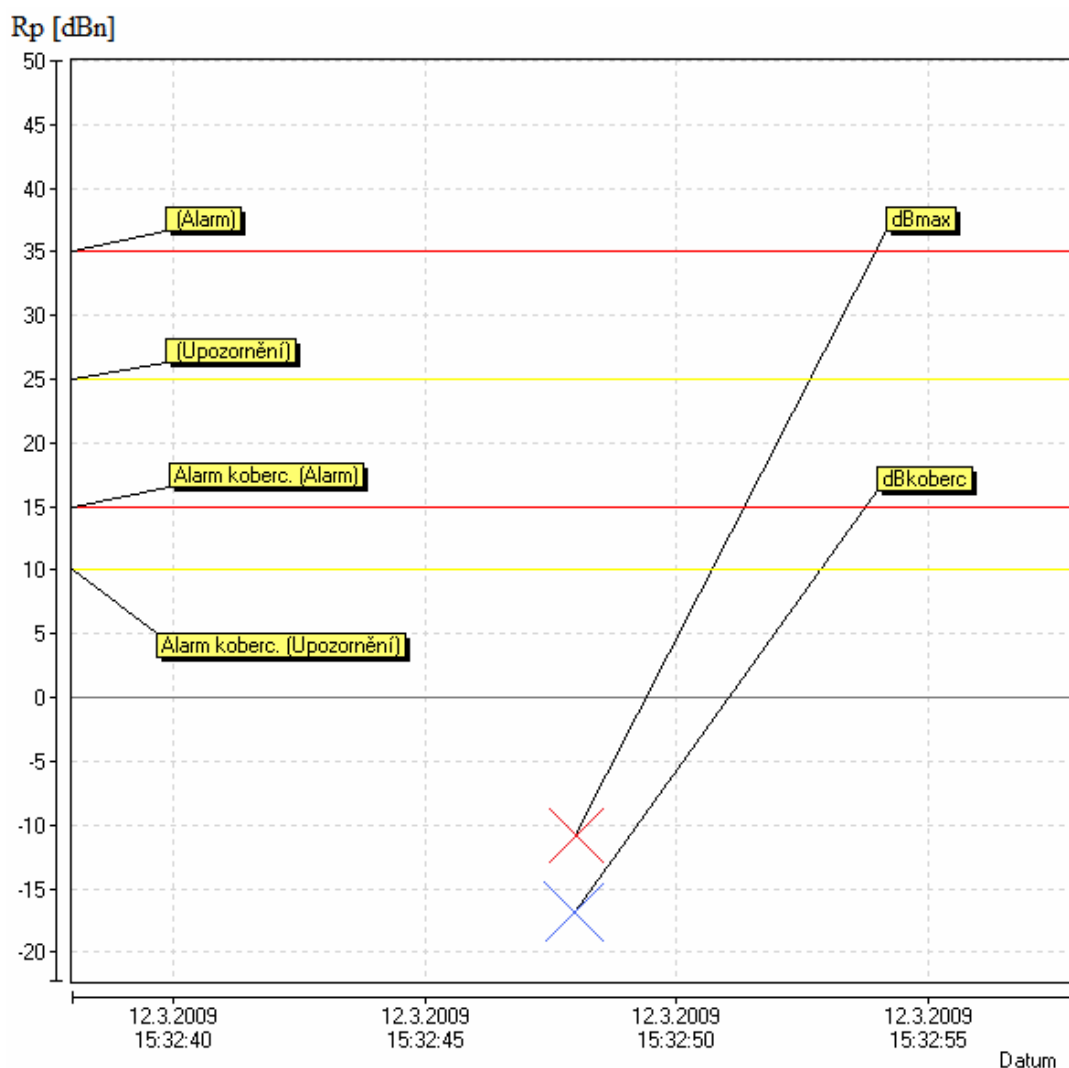


Obr. 18 : Ložisková metoda SPM, vyhovující vřeteno, 1H2, bruska č.06

Jak je patrné z Obr. 18, jsou hodnoty rázových pulzů R_p , měřené ložiskovou metodou SPM u vyhovující brusky č.06 v poloze akcelerometru 1H2. R_p dosahují hodnot:

$$dB_{max} = -3 \text{ dBn}$$

$$dB_{kobrec} = -11 \text{ dBn}$$



Obr. 19 : Ložisková metoda SPM, nevyhovující vřeteno, 1H2, bruska č.14

Jak je patrné z Obr. 19, jsou hodnoty rázových pulzů R_p , měřené ložiskovou metodou SPM u nevyhovující brusky č.14 v poloze akcelerometru 1H2. R_p dosahují hodnot:

$$dB_{max} = -11 \text{ dBn}$$

$$dB_{koberc} = -17 \text{ dB}$$

9. ZÁVĚR

Tato práce měla za úkol analyzovat a vyhodnotit problematiku vibrací, které mají nepříznivý vliv na obráběcí vřeteno stroje STRATOS. Řešením problémů bez neplánovaných odstávek je v zavedení trendového měření a systému údržby do procesu výroby. Toto zavedení systému má za následek snížení celkových nákladů na opravy a zvýšení efektivnosti výroby.

Při výběru měřicího čidla, nebo-li akcelerometru, jsem se zaměřil na popis jejich funkce a následně jsem vybral vhodná čidla, která by splňovala náročné požadavky jak na měřený rozsah, tak i na agresivitu prostředí, ve kterém budou pracovat.

Při návrhu měřicího systému jsem se zaměřil na firmy, které se zabývají problematikou sběru dat. Tyto společnosti působí na trhu již řadu let a s podobnými realizacemi mají značné zkušenosti. Především čas, po který tyto společnosti působí na trhu, ukazuje, že jejich produkty jsou oblíbené u spotřebitelů a firem využívajících jejich služby. Finanční a technická stránka bude mít zásadní vliv na výběr konkrétního měřicího systému.

Samotné rozhodnutí o tom, od jaké firmy se zařízení a čidlo pořídí, bude záležet pouze na firmě BOSCH Jihlava.

Při psaní této práce jsem postupně přicházel na to, že pro efektivní řešení daného problému musí člověk získat širší přehled o produktech, které nabízejí různé firmy. Znalosti získané během dosavadního studia mi velice pomohly při řešení této problematiky. Přesvědčil jsem se o tom, že člověk musí načerpat dostatek informací, aby mohl úspěšně pokračovat v práci.

13. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HELEBRANT, František – ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost II..Vibrodiagnostika*. VŠB – Technická Univerzita Ostrava.
- [2] VIBRODIAGNOSTIKA. *Součást moderní údržby*. BOSCH - JhP/TEF84. Jihlava. CZ. c2008
- [3] LAMI KAPPA. spol. s r.o.. Teplice. CZ. [online]. c2009 . Dostupný na WWW <www.lamikappa.cz >
- [4] BEJČEK, Ludvík. *Měření fyzikálních veličin*. Přednáškové texty kurzu BMFV. VUT – Brno. c2008
- [5] GE Energy. Výrobce elektronických zařízení a součástek. Betly Nevada USA. c2009. Dostupný na WWW <www.gepower.com>
- [6] DYTRAN Instruments, INC.. Chatsworth. USA. [online]. c2009. Dostupný na WWW <www.dytran.com>
- [7] PRÜFTECHNIK DIETER BUSCH AG. München. DE. [online]. c2009. Dostupný na WWW <www.pruftechnik.com>
- [8] AURA a.s.. Výrobce elektronických součástek [online]. Milevsko. CZ. c2009. Dostupný na WWW <www.auranet.cz>
- [9] NATIONAL INSTRUMENTS s r.o.. *Výrobce měřicích zařízení* [online]. zastoupení v CZ - Praha 7. c2009. Dostupný na WWW <www.ni.com>
- [10] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů - 1. díl – Piezoelektrické* [online], [cit. 2009-05-10]. Dostupný na WWW <<http://www.automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART303-principy-akcelerometru--1-dil--piezoelektricke.html>>
- [11] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů - 2. díl – Piezorezistivní* [online], [cit. 2009-05-10]. Dostupný na WWW <<http://www.automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART306-principy-akcelerometru--2-dil--piezorezistivni.html>>

- [12] NOVOTNÝ, Radovan. *Analýzy vad při zabezpečování spolehlivosti elektronických součástek* [online]. FEI VUT v Brně. 2001-06-29. [cit. 2009-05-10]. Dostupný na WWW
<<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01028/index.html>>
- [13] Ďaďo, Stanislav. *Sensors Based on Coriolis Force In: Snímače - Senzory - Aplikace*. Ostrava : Ostravská univerzita, 1999, p. 1-9. ISBN 80-7042-785-X. (in Czech). ČVUT: Faculty of Electrical Engineering, Department of Measurements 1999