

Vysoká škola strojní a textilní  
Liberec

Fakulta strojní

katedra výrobních systémů

23 - 20 - 8

Stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu  
Jednoučelové obráběcí a montážní stroje

Analýza mechanického chvění v procesu broušení

KVS - OS - 201

Vladimír Jermář

vedoucí práce: Ing. Karel Vála

KVS - VŠST Liberec

Počet stran.....61  
Počet příloh.....5  
Počet tabulek.....4  
Počet obrázků.....15

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA  
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146076757

Vysoká škola: strojní a textilní      Fakulta: strojní

Katedra: obrábění a montáže      Školní rok: 1989/90

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Vladimíra J e r m á ř e

obor 23-20-8 stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Analýza mechanického chvění v procesu broušení.

Zásady pro vypracování:

1. Cíl práce a analýza zkoumané problematiky.
2. Popis metod měření chvění a vyhodnocování.
3. Provedení experimentálních měření chvění v procesu broušení. Volba podmínek měření a metodika hodnocení výsledků.
4. Hodnocení naměřených výsledků a analýza mechanického chvění v procesu broušení.
5. Závěry a doporučení pro další sledování a výzkum problematiky.

1 107/40 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5  
PSČ 461 17

LVS/OS

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

Rozsah průvodní zprávy: **45 stran**

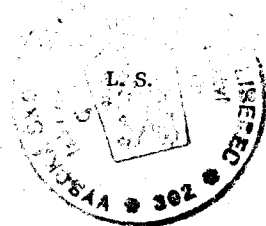
Seznam odborné literatury:

- 1/ JANOUŠEK, I. - KOZÁK, J. - TARABA, O. aj.: Technická diagnostika. SNTL, Praha 1988
- 2/ PÍČ, J. - BRENÍK, P.: Obráběcí stroje (základy konstrukce a výpočtů). SNTL/ALFA, Praha 1970
- 3/ NAVRÁTIL, M. - PLUHAŘ, O.: Měření a analýza mechanického kmitání. SNTL Praha 1986
- 4/ Firemní literatura B + K: Permanent VIBRATION-MONITORING. 1988
- 5/ ANGELO, M.: Vibration monitoring of machines. In Technical Review 1-1987
- 6/ BÉKÉS, J.: Inžinierska technológia obrábania kovov. ALFA, Bratislava 1981

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Karel Vála**

Datum zadání diplomové práce: **10. 10. 1989**

Termín odevzdání diplomové práce: ~~1. 6. 1990~~



*Gazda*  
**Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.**  
Vedoucí katedry

*Prášil*  
**Prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc.**  
Děkan

v Liberci dne 10.10. 10 89

Místopřísežné prohlášení.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 18.7.1990

.....*Vladimír Jemau*.....

Obsah:

---

Seznam použitých značek.....	6
1. Úvod.....	9
2. Technologie broušení.....	11
2.1. Podstata broušení.....	11
2.2. Varianty broušení.....	12
2.3. Jakost a přesnost broušených ploch.....	13
3. Údržba strojů.....	14
3.1. Metody údržby.....	14
3.1.1. Chod do poruchy.....	14
3.1.2. Časově určená preventivní údržba.....	15
3.1.3. Údržba podle stavu (on condition).....	15
3.2. Shrnutí.....	17
4. Diagnostické signály a metody jejich měření.....	18
4.1. Klasifikace signálů.....	18
4.2. Stacionární signály.....	19
4.3. Nestacionární signály.....	25
5. Charakteristika a měření chvění.....	26
5.1. Veličiny charakterizující chvění a způsoby jejich měření.....	26
5.2. Kvantitativní hodnocení chvění.....	27
5.3. Metody snímání chvění.....	29
5.4. Snímače zrychlení.....	30
5.4.1. Obecná charakteristika a jejich konstrukce.....	30
5.4.2. Citlivost snímače a jeho dynamický rozsah.....	31

5.4.3.	Kmitočtový rozsah snímačů zrychlení.....	33
5.4.4.	Směrová citlivost snímače zrychlení.....	34
5.4.5.	Upevnění snímače.....	34
5.4.6.	Vlivy prostředí.....	36
6.	Popis měření kmitání při procesu broušení.....	38
6.1.	Měřicí a přístrojové vybavení.....	38
6.2.	Příprava k měření.....	38
6.3.	Popis měření.....	41
7.	Vyhodnocení měření.....	43
7.1.	Teoretická příprava k vyhodnocení.....	43
7.2.	Vyhodnocení mohutnosti kmitání při měření naprázdno.....	44
7.3.	Vyhodnocení časové závislosti kmitání.....	47
7.4.	Vyhodnocení frekvenční analýzy.....	50
8.	Zhodnocení měření.....	53
8.1.	Závěry experimentálního měření.....	53
8.2.	Návrhy pro další sledování.....	54
9.	Závěr.....	56
	Seznam příloh.....	59
	Literatura.....	60

Seznam použitých značek:

$a$	zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ]
$a_o$	amplituda zrychlení
$A$	amplituda (obecná)
$A_e$	efektivní hodnota amplitudy
$A_s$	střední hodnota amplitudy
$A_v$	vrcholová hodnota amplitudy
$\alpha$	úhel čela nástroje
BV	brusný vřeteník
BVL	buzení od ložisek brusného vřeteníku
BVR	buzení od rotoru brusného vřeteníku
$C_a$	kapacita snímače [pF]
$C_c$	kapacita kabelu [pF]
$C_H$	citlivost ve směru hlavní osy snímače
$C_n$ $C_o$	koeficienty Fourierovy řady
$C_p$	příčná citlivost snímače
$d_o$	průměr kuličky ložiska [mm]
$d_s$	střední průměr ložiska [mm]
$D$	dolní mez užitečného dynamického rozsahu snímače
$D_f$	dolní limitní kmitočet [Hz]
DZ	dozvuk
$D_1$ $D_2$	průměry řemenic [mm]
$\delta$	stykový úhel
$G_y(t)$	spektrální hustota
$\gamma$	úhel čela nástroje
$f_K$	budící frekvence od řemenů [Hz]
$f_L$	budící frekvence od ložiska [Hz]
$f_o$	základní frekvence [Hz]
$f_r$	rezonanční kmitočet [Hz]
$f_R$	budící rotorová frekvence [Hz]
$\varphi$	úhel pootočení

h	harmonická
H	horní mez užitečného dynamického rozsahu snímače
$H_f$	horní limitní kmitočet [Hz]
I	intenzita signálu [ $Wm^{-2}$ ]
K	skupina strojů, která svým výkonem nepřesahuje 15 kW
L	délka řemene [m]
L(a)	hladina zrychlení vibrací [dB]
L(v)	hladina rychlosti vibrací [dB]
L(w)	zvukový výkon [dB]
L(y)	hladina výchylky vibrací [dB]
MB	motor brusného vřeteníku
MBK	buzení od klínových řemenů motoru brusného vřeteníku
MBR	buzení od rotoru motoru brusného vřeteníku
MP	motor pracovního vřeteníku
MPR	buzení od rotoru motoru pracovního vřeteníku
n	otáčky [ $min^{-1}, s^{-1}$ ]
$n_o$	otáčky vnějšího kroužku ložiska [ $s^{-1}$ ]
$n_i$	otáčky vnitřního kroužku ložiska [ $s^{-1}$ ]
NL	nábal
$\omega$	kruhová frekvence [ $rad^{-1}$ ]
p(y)	hustota pravděpodobnosti
PP	předlokový hřídel
PV	pracovní vřeteník
PVR	rotorové buzení od pracovního vřeteníku
$\psi_y^2$	střední kvadratická odchylka
Q	el. náboj [C]
R	užitečný rozsah snímače
$R_y(\tau)$	autokorelační funkce
$S_q$	nábojová citlivost snímače [ $pC/ms^{-2}$ ]
$S_v$	napěťová citlivost snímače [ $mV/ms^{-2}$ ]
t, $\tau$	čas [s]
$t_s$	doba samoostření kotouče [s]



$t_z$	doba zanášení kotouče [s]
T	doba trvání periody [s]
U	napětí [V]
v	rychlost [ $\text{ms}^{-1}$ ]
$v_0$	amplituda rychlosti
VT8	velmi špatně obrobitelná titanová slitina
y	výchylka [m]
$y_0$	amplituda výchylky
$y_t$	časová funkce harmonického kmitočtu
$y(t)$	periodická funkce Fourierovy řady
$Y_e$	efektivní hodnota z absolutně braných hodnot časového průběhu chvění
$Y_s$	střední hodnota z absolutně braných hodnot časového průběhu chvění

Většina uvedených označení je blíže specifikována dále v textu.

## 1. Úvod.

---

Rozvoj našeho národního hospodářství a veškeré výrobní činnosti v nových ekonomických podmínkách má za úkol snížit živou práci, zlepšit pracovní a životní prostředí, odstranit namáhavost a zajistit ekonomičnost výroby. Na celkovém ekonomickém výsledku i celkovém jmění podniku se velmi významně podílí oblast, zajišťující kvalitu výroby - úsek kontroly.

S rozvojem moderní výroby se nutně rozvíjejí i měřicí a kontrolní metody, s cílem zvyšovat nejen výrobu, ale i dodržovat resp. zvyšovat její jakost. Stále vyšší nároky kladené na přesnost a funkci strojního zařízení lze splnit jen s vyšší přesností a objektivností měření a hodnocení strojního parku.

Významnou úlohu zde hraje ekonomická stránka. Vysoká kvalita kontroly výroby pomáhá odstranit zmetkovitost již v probíhajících výrobních operacích a tím i snižuje celkové náklady potřebné na výrobu.

Hodnocení strojů a jejich stavu musí být pokud možno objektivní a rychlé. Není však lhostejné jak a jakými prostředky se měření provádí. Proto existuje vztah mezi požadovanou přesností výroby a měřicí metodou, která je schopná zajistit požadovanou kontrolu. Nelze proto zapomínat, že se zvětšující se přesností stoupají také náklady na měření. Často se vyskytuje i případ, kdy samotné měření a kontrola jsou nákladnější než vlastní výroba a tedy není účelné ani ekonomické volit daleko přesnější a tím i nákladnější metody měření než je nezbytně nutné.

V celé diplomové práci se budu zabývat měřením chvění, jako jednoho z aspektů ovlivňujících kvalitu obráběné plochy

při broušení. Snažím se tedy o provedení rozboru obrábění, analyzuji a vyhodnotím vlivy vytvářející odchylky od požadované přesnosti a pak na základě těchto výsledků mohu zvolit vhodná opatření, která by paralyzovala a eliminovala zdroje nežádoucích vibrací a tím by tedy došlo i k zajištění kvality obrábění a zvýšení jakosti obráběné plochy.

## 2. Technologie broušení.

---

Historický vývoj broušení sahá až do počátků lidské civilizace. Broušení bylo, kromě sekání, prvním způsobem obrábění, které člověk použil ke zpracování svého nářadí. Zpočátku se k broušení používalo pískovce, křemene, lávového kamene, apod. Ve starověku se k nim také přidal smírek.

Vývoj metod broušení příliš nepokročil až do 19. stol., kdy byl vynalezen první umělý brusný materiál s podstatně lepší brusivostí než dosud užívaná brusiva - karbid křemíku (karborundum - 1892). Teprve koncem 19. stol. byl objeven další materiál, tavený kysličník hlinitý - elektrokorund. Tyto brusné materiály umožnily podstatně zvýšit produktivitu i kvalitu broušení.

### 2.1. Podstata broušení.

Nástroje dělíme podle geometrie na nástroje:

- s definovanou geometrií,
- s nedefinovanou geometrií.

Brousící nástroje patří mezi ty druhé. Jeho podstata je v zásadě shodná s frézováním. Zrna jsou vlastně, z technologického hlediska, malé zuby, které jsou nepravidelně rozloženy s různým převýšením po celém obvodu brusného kotouče. Jejich velikost je v rozsahu od 0.003 do 3 mm. Zásadní rozdíl mezi broušením a frézováním je však ve velikosti odebírané třísky, která je při broušení velmi malá, od 0.0001 mm až do 0.002 mm.

Břit brusných zrn je vytvořen dvěma plochami zrna ve směru pohybu brusného kotouče. Tvar brusných zrn je nepravidelný - mečovitý nebo nepravidelný mnohostran. Tvar břítu a řezné úhly závisí na uložení zrna v brusném kotouči. Ve všech případech mají zrna úhel  $\gamma$  větší než  $90^\circ$  a poměrně velký úhel  $\alpha$ .

Proti ostatním klasickým metodám obrábění jsou řezné rychlosti používané při broušení značné - 10 až 80 m/s. Velkou řeznou rychlostí do jisté míry také vyloučíme nepříznivý vliv velkého úhlu  $\gamma$  brusných zrn.

Velká řezná rychlost je příčinou velkého vývinu tepla a vysoké teploty odřezávaných třísek. Ty se zahřívají na teplotu červeného až bílého žáru, tedy 800 až 1200°C.

## 2.2. Varianty broušení.

Broušením lze prakticky obrábět veškeré plochy. Z hlediska tvaru broušené plochy rozeznáváme:

- broušení vnějších válcových ploch,
- broušení vnitřních válcových ploch,
- broušení rovinných ploch,
- broušení tvarových ploch.

Vnější válcové plochy se brousí mezi hroty, nebo bez hrotů, a to tak, že se obrobek otáčí malou obvodovou rychlostí a brusný kotouč v opačném smyslu rychlostí asi stonásobně vyšší.

Díry se nejčastěji brousí kotoučem o průměru 0.7 až 0.9 průměru broušené díry. Pracovní pohyb konají jak obrobek, tak i brusný kotouč. Obvodová rychlost brusného kotouče je 50 až 80 krát vyšší než rychlost obrobku.

Rovinné plochy se brousí obvodem brusného kotouče nebo jeho čelem. Při broušení obvodem kotouče vykonává stůl přímočarý vratný pohyb nebo pohyb kruhový. Broušení čelem je sice výkonější, ale málo přesné. Stůl vykonává pouze vratný pohyb.

Tvarové plochy se brousí tvarovými kotouči, rovným kotoučem pomocí hrotového přístroje nebo úzkým kotoučem pomocí pantografu a šablon.

### 2.3. Jakost a přesnost broušených ploch.

Jakost a přesnost broušené plochy závisí na velikosti zrn brusného kotouče, na jeho struktuře, na použitých řezných podmínkách, na chvění stroje a také na technickém stavu stroje. Dosahovaná jakost povrchu je:

- při hrubování 10 až 2  $\mu\text{m}$ ,
- při broušení na čisto 2 až 0.32  $\mu\text{m}$ ,
- při jemném broušení 0.4 až 0.05  $\mu\text{m}$ .

Při normálním broušení se zpravidla dosahuje přesnosti rozměru 10 až 20  $\mu\text{m}$ .

Celkově se dá říci, že šíře uplatnění broušení je vysoká. Vzniká tedy nutnost sledování celého procesu, aby byly zjištěny vlivy, které na něj negativně působí. Odstraněním těchto vlivů by mělo za následek zvýšení kvality procesu broušení, a z toho plynoucí větší ekonomická rentabilita. Do té samozřejmě také patří včasná údržba stroje.

### 3. Údržba strojů.

---

Včasná a kvalitní údržba strojů má nejpodstatnější vliv jak na kvalitu, tak na produktivitu práce. Její zanedbání by mohlo mít za následek nejen zhoršení kvality výroby, ale i zastavení výroby v důsledku havárie.

#### 3.1. Metody údržby.

Různé metody údržby strojů, tak jak jsou známy, můžeme zhruba rozdělit do tří kategorií:

1. chod stroje až do poruchy,
2. časově určená preventivní údržba,
3. údržba podle stavu stroje.

##### 3.1.1. Chod do poruchy.

Ve výrobě, kde pracuje mnoho levných strojů a kde je každý důležitý proces zdvojený, mohou být stroje využívány až do poruchy. Zde ztráty ve výrobě nejsou podstatné, protože náhradní stroj může převzít práci za porouchaný a není většinou výhodné ani po stránce ekonomické ani bezpečnostní použít složitějších údržbářských metod.

U obráběcích strojů, kde ve velké míře záleží na přesnosti se tato metoda téměř nepoužívá.

### 3.1.2. Časově určená preventivní údržba.

Tam, kde důležité stroje nejsou zálohovány, nebo tam, kde by neplánované výpadky ve výrobě či nekvalitní výroba způsobená opotřebením stroje měli za následek velké ztráty, jsou údržbářské práce často prováděny v pevně stanovených časových intervalech. Odtud název metody.

Intervaly údržby jsou většinou určeny statisticky jako doba měřená od okamžiku, kdy jsou všechny stroje nové, do doby, kdy výrobce očekává 2% poruch strojů, resp. kdy výrobce očekává takové opotřebením stroje, které by mělo za následek nekvalitní výrobu z hlediska přesnosti a to zejména u obráběcích strojů. Zkušenost však ukazuje, že ve většině případů je tato údržba neekonomická. Závažným faktem je, že místo toho, aby se výskyt poruch, resp. opotřebením výměnou vadných součástí snižoval, opak bývá pravdou a spolehlivost nově provozovaných strojů je dočasně snížena. Jelikož skutečný diagram poruch je pro každý stroj jiný, nemůže být časově preventivní údržba účinně použita. Je tedy třeba individuálního přístupu a to je možnost, kterou nám nabízí údržba dle stavu.

### 3.1.3. Údržba podle stavu (on condition).

Podle této metody se u každého stroje provádí pravidelné měření stavu, abychom zjistili objektivní kvantitativní "zdraví" stroje. V tomto případě se oprava provádí pouze v okamžiku, kdy dojde k naměření hodnot signalizující špatný stav stroje.

Použití této metody může být uvažováno ve dvou směrech:



- a) zkoušení stavu pomocí rutinního měření a porovnání s max. přípustnými hodnotami, nebo
- b) sledování trendu, který zahrnuje extrapolaci měření, aby se předpovědělo, kdy bude dosažena neúnosná úroveň a tedy kdy se stroj musí opravit. Použitím této metody je pravděpodobnostní prvek v předvídání poruchy zcela vyloučen a životnost stroje se značně prodlouží. Úměrně s tím se také rychleji vrátí vložené investice výrobce.

Shrneme-li si tento moderní přístup k metodě, vyplynou nám z něho tyto výhody:

- dává výstrahu o měnících se podmínkách, udává zbývající čas do katastrofálního opotřebení (až několik měsíců předem) a téměř vylučuje nekvalitní výrobu nebo snad i totální selhání s následným sekundárním poškozením,
- dává výstrahu před blížící se poruchou. Upozorňuje na případy, které by mohly zapříčinit katastrofální poruchu a mohly by být nebezpečné pro obsluhu nebo i sousední zařízení,
- zvyšuje užitečnost stroje. Umožňuje zvýšenou produktivitu při větší investiční návratnosti,
- identifikuje a specifikuje jednotlivé složky chvění, které jsou příčinou neblahých aspektů na jakost a tím zvyšuje kvalitu výroby. Zajišťuje práci stroje v mezích daných konstrukcí,
- měřit a zkoušet je možné při dálkovém ovládání. Umožňuje centrální sledování z jednoho místa.

### 3.2. Shrnutí.

Po objektivním posouzení všech výhod a nedostatků dojdeme k závěru, že metoda údržby podle stavu stroje (on condition) je velmi progresivní a má, i při vysoké pořizovací ceně měřicí a vyhodnovací techniky, naději že bude nadále rozvíjena tak aby kladla co nejmenší nároky na uživatele.

Jednou z možností jak zjistit vliv stavu stroje, a jeho podíl na kvalitě obrábění, je měření chvění. Jedná se zejména, u dlouhodobějšího sledování, o nalezení závislosti mezi chvěním a procesem broušení. Tímto problémem se budu zabývat dále a podrobněji.

#### 4. Diagnostické signály a metody jejich měření.

---

Technická diagnostika využívá různých fyzikálních zákonitostí při měření a vyhodnocování fyzikálních procesů, které probíhají v různých strojích. Měření signálů na stroji, nebo průběh emise ultrazvukového signálu ve vztahu k dynamickému namáhání kluzného ložiska, podchycuje informaci o vznikající poruše příslušného stroje.

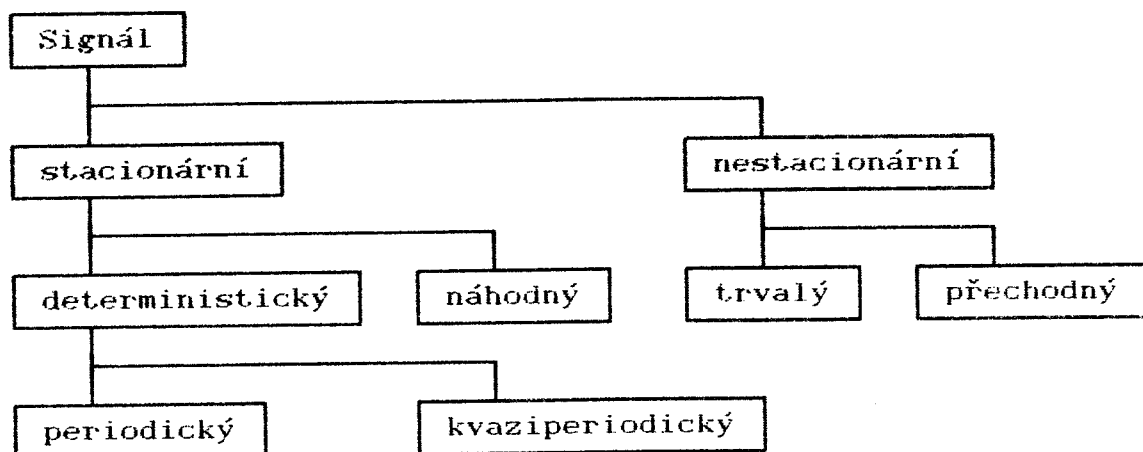
Bezdemontážní technická diagnostika má podle signálů v praxi rozhodnout a posoudit, splňuje-li měřený stroj z hlediska spolehlivosti a funkce, určitá kritéria. Proto výběr snímačů (čidel, senzorů, atd.), měřicí techniky a postupu měření, jsou důležité pro získání neskreslených informací o stavu stroje. Spojitá změna chování je zobrazena spojitou veličinou, např. el. napětím. Elektrický signál lze pak přenést k dalšímu zpracování příslušnou technikou. Souborem snímačů a měřicí techniky převádíme sledovanou veličinu měřeného objektu, na veličinu přímo úměrnou měřené fyzikální veličině, např. zrychlení, teplota, proudění, aj.

##### 4.1. Klasifikace signálů.

Signál lze třídit podle různých hledisek, většinou však sledujeme jejich časový průběh a proto je nejdůležitější základní dělení na stacionární a nestacionární signály (obr.1).

Stacionární funkce je ta, jejíž veličiny, definované středními hodnotami, jsou proměnné s časem a jsou nezávislé

na části vzorku, použitého k jejich měření. Toto kritérium vyhovuje jak určitým (deterministickým) signálům, tak i náhodným.



obr.1. Základní dělení signálů

Deterministické signály jsou ty, u kterých okamžitá hodnota v následujícím čase je předem známá, tzn. že je určena přesně definovanou časovou funkcí.

Náhodné signály jsou popsány statistickými veličinami, jako střední hodnoty rozptylu.

Trvalé nestacionární signály se dají analyzovat v krátkých "sekcích", které můžeme považovat za kvazistacionární.

#### 4.2. Stacionární signály.

Časový průběh stacionárního deterministického signálu lze exaktně matematicky vyjádřit. Základem všech znázornění periodických procesů je Fourierova řada. Periodickou funkci

lze definovat vztahem:

$$y(t) = y(t+T), \quad /1/$$

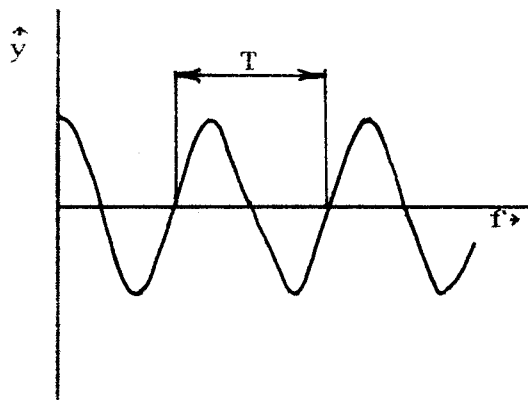
kde  $T$  je doba periody. Každý periodický děj lze znázornit pomocí Fourierovy řady takto:

$$y(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega t - \varphi_n). \quad /2/$$

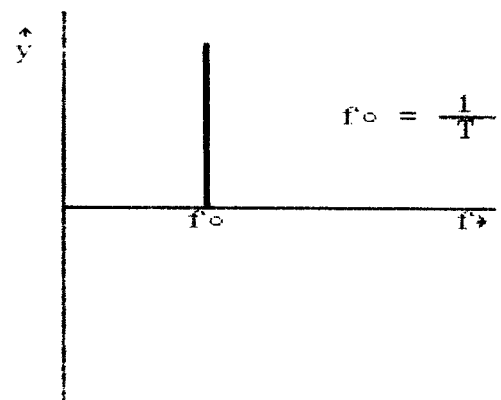
Kmitočtové spektrum takového děje je diskrétní, obsahuje základní kmitočet rovný převrácené hodnotě periody a dalších kmitočtů, jež jsou celými násobky základního kmitočtu. Jejich amplitudy jsou koeficienty  $C_n$  Fourierovy řady. Harmonický kmitočet, jehož časový průběh je dán vztahem:

$$y = A \sin \omega t, \quad /3/$$

má diskrétní kmitočtové spektrum, sestávající z jediného kmitočtu, rovného převrácené hodnotě periody o amplitudě  $A$  (obr. 2a). Kmitočet obdélníkového tvaru má kmitočtové spektrum, diskrétní kmitočty rostou nade všechny meze a amplituda monotonně ubývá (obr. 2c).

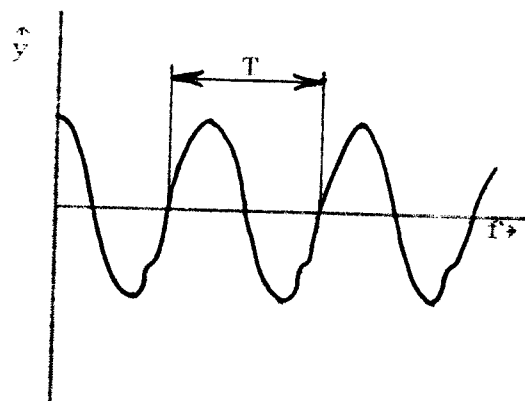


časový průběh signálu

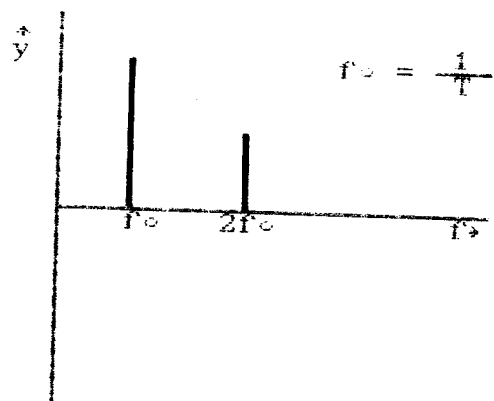


kmitočtové spektrum

obr. 2a Harmonický signál, jednoduchý

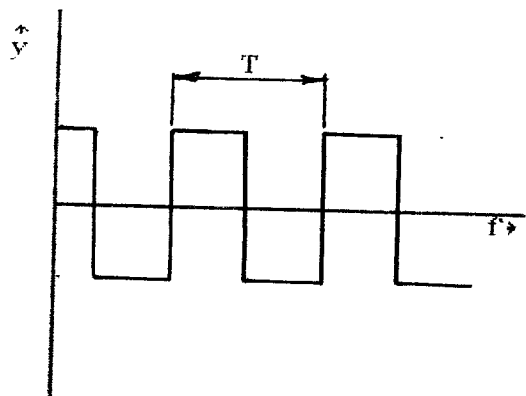


časový průběh signálu

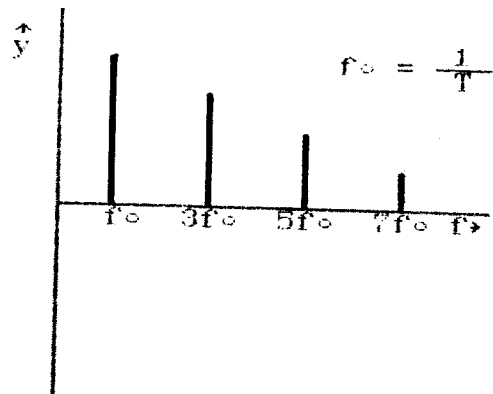


kmitočtové spektrum

obr.2b Harmonický signál, složený



časový průběh signálu



kmitočtové spektrum

obr.2c Harmonický signál, obdélníkový

Kdybychom skládali dva nebo více harmonických průběhů, pak výsledný průběh bude periodický, podaří-li se nám najít periodu, jež by byla společným násobkem period jednotlivých kmitání. Obecně lze říci, že poměr jejich period musí být dán poměrem celých čísel.

Náhodné procesy jsou klasifikovány časově proměnnými vlastnostmi. Za stacionární je považujeme tehdy, když střední hodnoty autokorelační funkce jsou stále v čase. Proti

deterministickým signálům mají náhodné signály spojité kmitočtové spektrum. K popisu náhodných signálů slouží čtyři typy statistických funkcí:

1. střední kvadratická hodnota - dává informaci o intenzitě sledovaného děje:

$$\psi_y^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt, \quad /4/$$

2. hustota pravděpodobnosti - dává informaci o amplitudovém rozložení signálu (obr.3):

$$p(y) = \lim_{y \rightarrow \infty} \frac{P(y+\Delta y) - P(y)}{\Delta y}, \quad /5/$$

3. autokorelační funkce - dává informaci o časovém rozložení děje (obr.4):

$$R_y(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T y(t) y(t+\tau) dt, \quad /6/$$

4. spektrální hustota - dává informaci o kmitočtovém rozložení signálu:

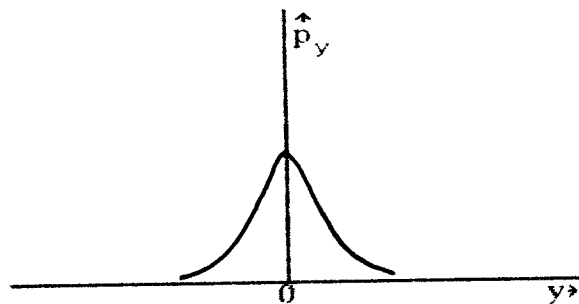
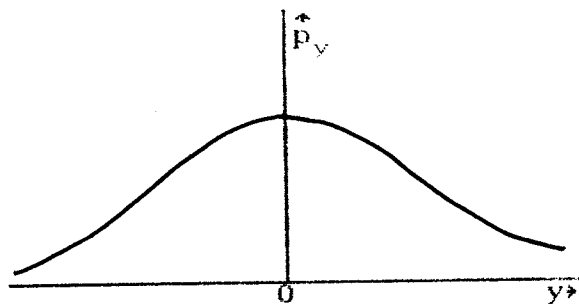
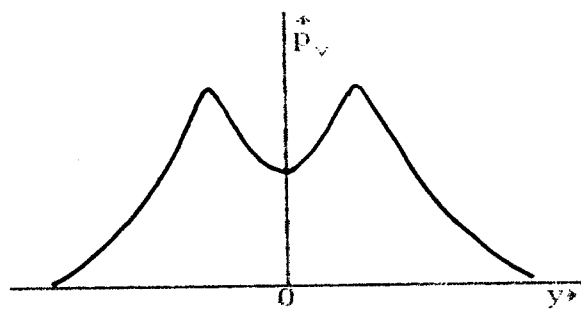
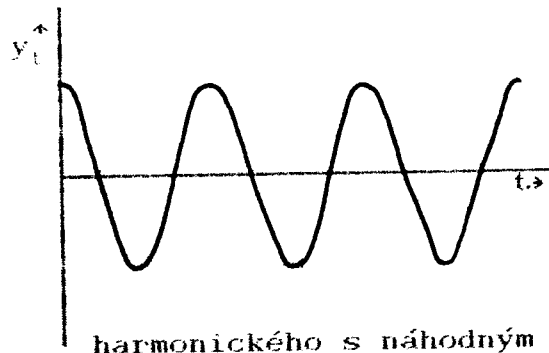
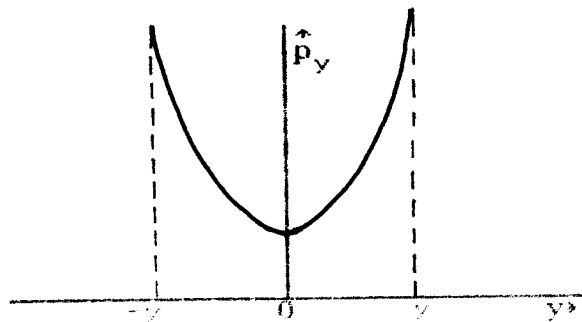
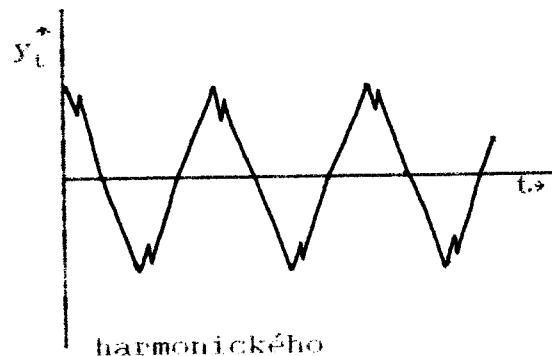
$$G_y(f) = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} R_y(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) dt, \quad /7/$$

Autokorelogramy rozliší úzkopásmový a širokopásmový náhodný signál. Deterministické signály se vyznačují diskrétním spektrem, náhodné signály mají spektrum spojité. U signálu složeného harmonického a náhodného jsou obě složky zastoupeny v kmitočtovém spektru. Z obrázků 3 a 4 je vidět rozdíl mezi spektrem náhodného signálu širokopásmového a úzkopásmového, kde je vyznačená oblast jeho maxima.

časový průběh signálů

Rozložení hustoty pravděpodob.

signálů

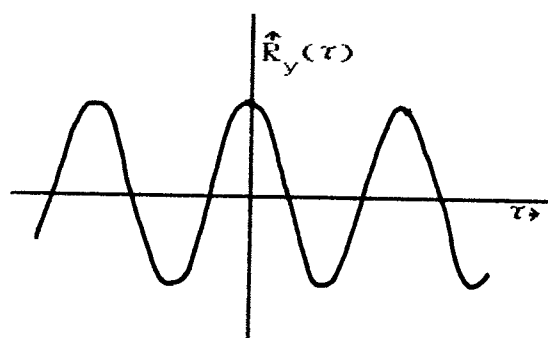


obr.3. Hustota pravděpodobnosti

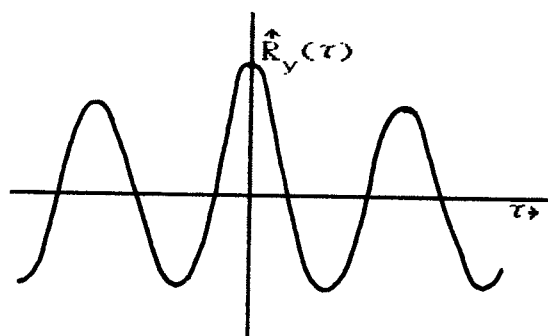
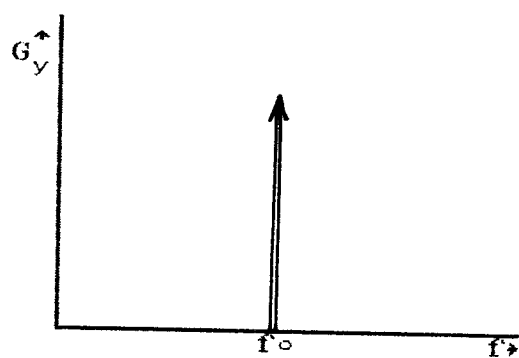


Autokorelogramy signálů

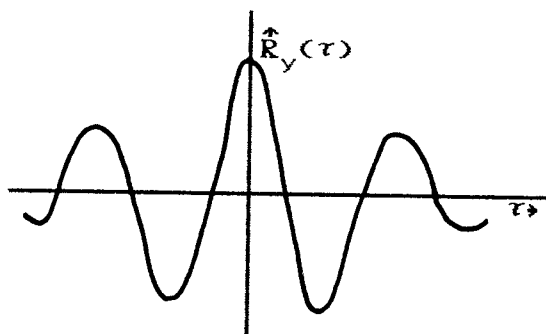
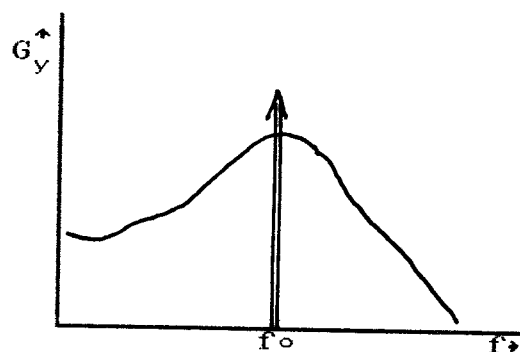
Kmitočtové spektrum signálů



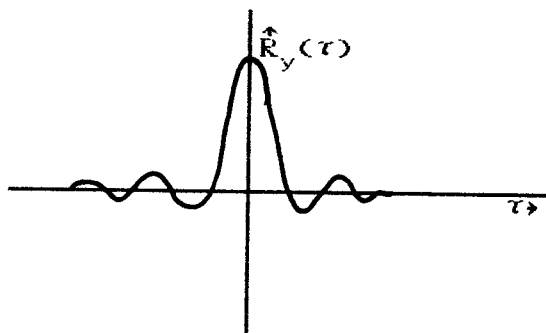
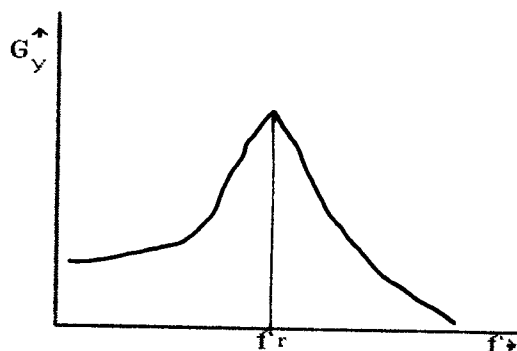
harmonického



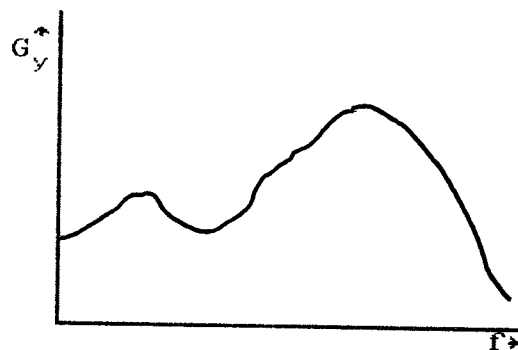
harmonického složeného



úzkopásmového



širokopásmového



obr. 4. Autokorelační funkce

### 4.3. Nestacionární signály.

Impulzy patří většinou mezi nestacionární signály. U trvalého signálu není hranice mezi stacionárním a nestacionárním signálem pevná. Záleží na tom, jak budeme formulovat podmínky pro časovou stálost signálu, a jak velké časové změny sledovaných veličin připustíme. Některé druhy trvalých nestacionárních signálů, které svou povahou připouštějí rozdělit je v řadu časových úseků, můžeme považovat za stacionární. Kmitočtové spektrum takového kvaziperiodického signálu, resp. jeho jednotlivých časových úseků, má převážně spojitý časový průběh, ve kterém se mohou vyskytnout v určitých kmitočtových oblastech vyšší hodnoty spektrální hustoty, což ukazuje na přítomnost úzkopásmových signálů.

Na přechodový signál lze aplikovat Fourierovu transformaci, jejíž výsledkem je kmitočtový průběh spektrální hustoty sledovaného signálu. Fourierovu transformaci lze aplikovat jak na spojitý průběh přechodového signálu, tak na průběh sejmутý bod po bodu, ať již elektricky provedeným vzorkováním, nebo pomocí hodnot odečtených z oscilogramu.

Vhodná je také metoda, která z impulsu vytvoří periodický signál tím způsobem, že se záznam tohoto signálu neustále opakuje. Má čárové spektrum. Kmitočtový průběh tohoto spektra odpovídá spektrálnímu složení původního signálu. Se signálem pak lze pracovat jako s periodickým a pro jeho analýzu se používají běžné metody.

## 5. Charakteristika a měření mechanického chvění.

---

### 5.1. Veličiny charakterizující chvění a způsoby jejich měření.

Měříme-li chvění stroje, může nás zajímat buď výchylka, rychlost nebo zrychlení. Všechny je lze měřit třemi principiálně různými snímači, jejichž výstupní napětí je v relaci k jedné ze zmíněných veličin. Výchylku lze měřit kapacitním snímačem, protože kapacita je závislá na vzdálenosti elektrod snímače, rychlost lze měřit elektrodynamickým snímačem, v němž se indukuje napětí úměrné rychlosti pohybu, zrychlení lze měřit piezoelektrickým snímačem, jehož náboj je úměrný deformující síle. Pokud by šlo o chvění s harmonickým průběhem nebo o jednu kmitočtovou složku určitého spektra, stačí stanovit jednu z pohybových veličin a ostatní vypočítat dle vztahu:

$$a_0 = \omega v_0 = \omega^2 y_0, \quad /8/$$

kde  $a_0$ ....amplituda zrychlení,

$v_0$ ....amplituda rychlosti,

$y_0$ ....amplituda výchylky,

$\omega$ ....kruhová frekvence.

V praxi měříme libovolné mechanické veličiny jedním snímačem, což umožňují elektrické obvody, které elektrický signál vhodným způsobem zpracují. Když si zvolíme za měřenou veličinu výchylku, budou zvýrazněny složky s nízkým kmitočtem, při měření zrychlení naopak.

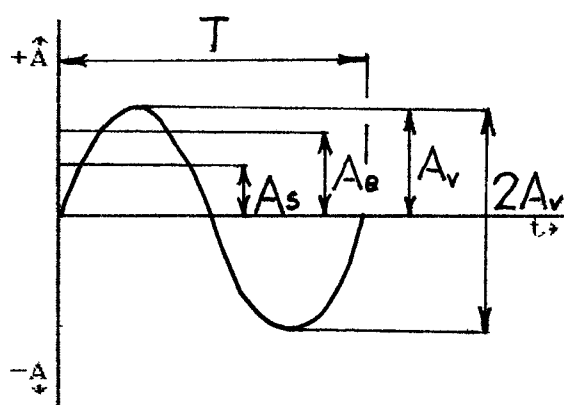
Měření v oblasti mechanického kmitání, kdy efektivní hodnoty rychlosti chvění budeme sledovat v pásmu 10-1000 Hz, podává základní informace o kritických hodnotách kmitání. Energie kritického pohybu souvisí s rychlostí, takže z ener-

getického hlediska se stejný důraz klade na složky chvění s nízkými i vysokými kmitočty.

Větší výchylky chvění se vyskytují převážně v oblasti nízkých kmitočtů. Výchylky jsou však důležitou veličinou tam, kde je nutné sledovat malé vůle a tolerance strojních dílů. Jsou často základními veličinami, které charakterizují nevyváženost součástí a dílů točivých strojů, protože na kmitočtech odpovídajících otáčkám, nebo jejich násobkům jsou relativně velké výchylky chvění.

## 5.2. Kvantitativní hodnocení chvění.

Chvění je kvantitativně charakterizováno těmito veličinami: maximálním rozkmitem, střední hodnotou, vrcholovou hodnotou (amplitudou) a efektivní hodnotou sinusových kmitů (obr.5). Je při tom patrný vztah mezi nimi.



- $T$  - doba kmitu
- $A_v$  - vrcholová hodnota
- $A_s$  - střední hodnota
- $A_e$  - efektivní hodnota
- $2A_v$  - max. rozkmit

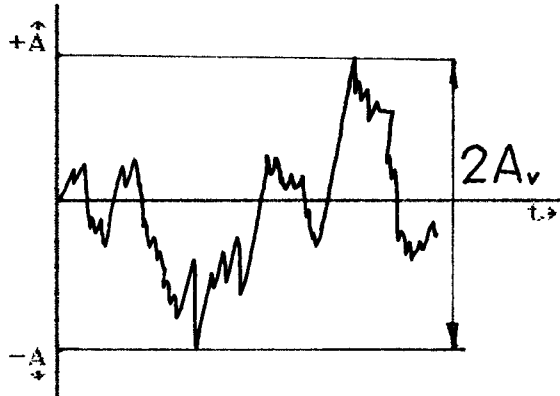
obr.5. Veličiny charakterizující chvění

Maximální rozkmit bývá také označen jako dvojitá amplituda. Udává maximální rozkmit časového průběhu. Vrcholová hodnota popisuje amplitudy krátkodobých jevů, indikuje pouze přítomnost špičky (obr.6). Střední hodnota

z absolutně bráných hodnot časového průběhu je definována vztahem:

$$Y_{\text{e}} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt, \quad /9/$$

a vztahuje se k časovému hodnocení chvění.



obr. 6.  
Maximální rozkmit

Efektivní (nejdůležitější) hodnota je dána vztahem:

$$Y_{\text{e}} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt \right)^{0.5}, \quad /10/$$

Protože má vztah k časovému průběhu i energetickému obsahu kmitání, je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti mechanického chvění.

Veličiny mechanického chvění - výchylka, rychlost, zrychlení se udávají v jednotkách soustavy SI - [m], [m/s], [m/s<sup>2</sup>]. Při vyhodnocování lze zrychlení vyjádřit jako násobek tíhového zrychlení.

Výchylku, rychlost i zrychlení lze také vyjádřit v decibelech, jako veličiny charakterizující hluk. Hladina zrychlení vibrací L(a) je dána vztahem:

$$L(a) = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad [\text{dB}], \quad \text{kde } a_0 = 10^{-6} \text{ms}^{-2}. \quad /11/$$

Hladina rychlosti vibrací L(v) je dána vztahem:

$$L(v) = 20 \log \frac{v}{v_0} \quad [\text{dB}], \quad \text{kde } v_0 = 10^{-9} \text{ms}^{-1}. \quad /12/$$

Hladina výchylky chvění  $L(y)$  je dána vztahem:

$$L(y) = 20 \log \frac{y}{y_0} \quad [\text{dB}], \quad \text{kde } y_0 = 10^{-12} \text{ ms.} \quad /13/$$

Z rovnic vyplývá, že počítáme-li s akustickou rychlostí, výchylkou a zrychlením, je faktor v rovnicích na pravé straně rovný 20, protože energie je úměrná druhé mocnině veličiny. Budeme-li hodnotit intenzitu signálu, zvukový výkon, apod. bude platit:

$$L(w) = 20 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}], \quad \text{kde } I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}. \quad /14/$$

### 5.3. Metody snímání chvění.

Pro měření všech tří veličin (výchylka, rychlost, zrychlení) lze použít jeden druh snímačů. Nejprve změříme jednu veličinu a pak elektrický signál je veden na integrační či derivační obvody. Musíme však dbát na hmotnost snímače, aby neovlivňovala amplitudu výchylky měřeného objektu.

V současnosti jsou nejpoužívanější piezoelektrické snímače, jejichž napětí je úměrné zrychlení kmitavého pohybu. Jestliže pak zařadíme za tento snímač jeden integrační obvod, dostaneme signál úměrný výchylce kmitavého pohybu. Piezoelektrické snímače mají na rozdíl od např. elektrodynamických snímačů obrovskou výhodu - malou hmotnost, od několika gramů do několika desítek gramů, což je zanedbatelné zatížení proti hmotnosti měřeného objektu.

Hodně rozšířené jsou také elektrodynamické snímače, jejichž signál je úměrný rychlosti chvění. Chceme-li pak od tohoto snímače získat signál úměrný zrychlení, resp.

výchylce, musíme zařadit do obvodu derivační člen, resp. integrační člen. Vlastní rezonance těchto systémů je v oblasti velmi nízkých kmitočtů a snímač pracuje v nadrezonanční oblasti mechanického systému. Výhodou je, že s použitím převodního transformátoru snímače dávají dostatečné napětí na nízké impedance. V praxi to znamená, že není třeba konstruovat zvláště citlivé zesilovače. Nevýhodou je značná hmotnost, takže jej nelze použít pro měření chvění lehkých předmětů.

V současné době se také vyvíjejí snímače chvění na bázi laseru. Aplikace je podrobněji popsána v [10] a [11].

Všechny snímače musí udávat měřenou veličinu vzhledem k nějakému pevnému souřadnicovému systému, např. ke klidnému okolonímu prostředí.

Vzhledem k tomu, že měření bylo prováděno pomocí piezoelektrického snímače zrychlení, budu se dále zabývat jen jím.

#### 5.4. Snímače zrychlení.

##### 5.4.1. Obecná charakteristika a jejich konstrukce.

Mezi výhody piezoelektrických snímačů patří: malá hmotnost (2 - 500g), velký kmitočtový rozsah (0.2 - 25 000 Hz), velký dynamický rozsah, linearita, velká nábojová citlivost (0.004 - 1000 pC/ms<sup>-2</sup>), práce za vysokých teplot (až 450°C), atd.

Nevýhodou - velkou vstupní impedanci, odstraňujeme pomocí speciálních předzesilovačů. Pak se tedy mohou používat i dlouhé přívodní kabely bez obav ztráty signálu.

Základem konstrukce je piezoelektrický prvek namáhaný buď tahem, tlakem nebo stříhem. Prvek je vyrobený z piezokeramiky, jehož výstupní napětí je úměrné zrychlení, kterému je snímač vystaven.

Ve speciálních případech lze také konstruovat zvláštní typy snímačů, které jsou v podstatě shodné s běžnými snímači, ale mají menší rozměry, což nám umožňuje měřit extrémně velká zrychlení, např. při mechanických rázech nebo při měření chvění lehkých předmětů. Zde platí pravidlo, že hmotnost snímače nemá být vyšší než 1/10 dynamické hmotnosti měřeného stroje.

#### 5.4.2. Citlivost snímače a jeho dynamický rozsah.

Cílem při konstrukci snímače je získat vysokou citlivost, tj. co největší elektrický signál při malých zrychleních.

Citlivostí tedy rozumíme poměr mezi elektrickým signálem výstupu snímače a zrychlením, které tento signál vyvolalo. Rozeznáváme dvojí citlivost snímačů:

- a. napěťová - je dána poměrem vstupního napětí ke zrychlení. Číselně je rovna napětí, které se na snímači naměří při jednotkovém zrychlení. Je určena vztahem:

$$S_v = \frac{U}{a} \quad [\text{mV/ms}^{-2}]. \quad /15/$$

- b. nábojová - což je poměr mezi nábojem a zrychlením, které náboj produkuje.

$$S_q = \frac{Q}{a} \quad [\text{pC/ms}^{-2}]. \quad /16/$$



Mezi nábojem a napětím na snímači také platí:

$$Q = C_a U \quad [pCl], \quad /17/$$

kde  $C_a$  je kapacita snímače. Vzhledem k vysoké výstupní impedanci snímače je nutno také respektovat jeho zatížení i kapacitu kabelu. Pak vztah mezi napětím a nábojem je:

$$Q = (C_a + C_c) U \quad [pCl], \quad /18/$$

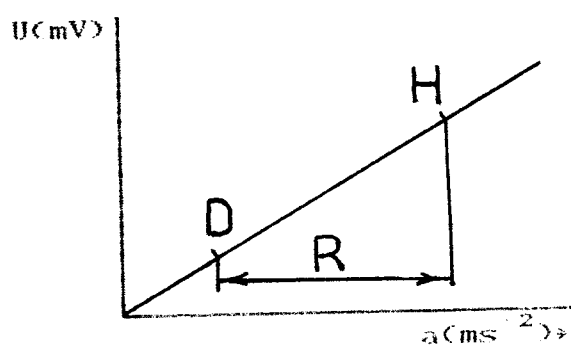
kde  $C_c$  je kapacita kabelu. Náboj snímače je pro dané zrychlení konstantní, proto se projeví zvětšení celkové kapacity kabelu snížením výstupního napětí se snímače. Pak mezi nábojovou a napěťovou citlivostí platí:

$$S_q = S_v (C_a + C_c). \quad /19/$$

Napěťová citlivost snímače klesá s rostoucí kapacitou kabelu, tzn. že se musí používat krátké kabely, nebo použít speciálních zesilovačů.

Hodnoty napěťové citlivosti běžných snímačů zrychlení se pohybují od 1 - 10 mV/ms<sup>2</sup>. Miniaturní snímače mají citlivost o jeden až dva řády nižší a kapacita snímače včetně standardního kabelu bývá cca 1000 pF. Nábojová citlivost  $S_q$  se pohybuje od 1 - 10 mC/ms<sup>2</sup>.

Snímač je konstruován tak, aby výstupní napětí bylo přímo úměrné zrychlení, kterému je snímač vystaven (obr.7).



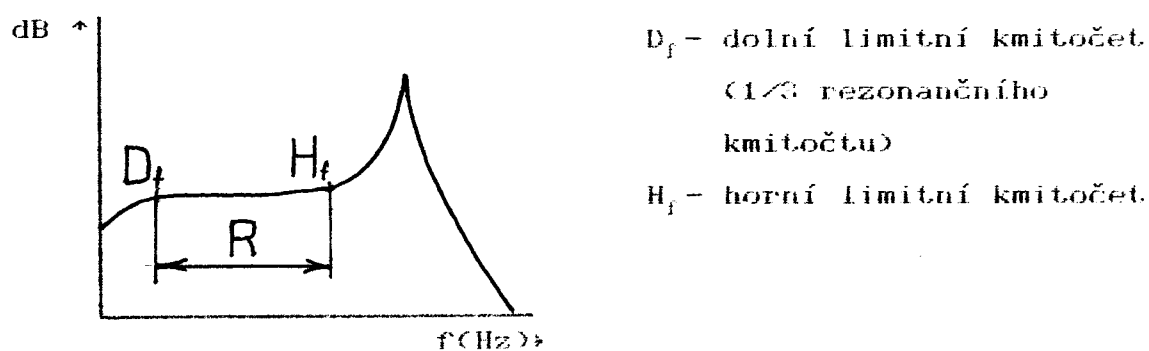
- D - dolní mez užitečného dynamického rozsahu, je dána el. šumem
- H - horní mez, je dána pevností snímače
- R - užitečný rozsah

obr.7. Závislost napětí na zrychlení

Běžné snímače jsou schopné pracovat ještě při zrychleních až  $10^5 \text{ ms}^{-2}$ , speciální snímače ještě o řád výš.

#### 5.4.3. Kmitočtový rozsah snímačů zrychlení.

Kmitočtový rozsah v němž snímač pracuje jako lineární měnič je na nízkých kmitočtech omezen dolním mezním kmitočtem užitého předzesilovače (u špičkových zesilovačů méně než 1Hz). Omezení v nízkých kmitočtech je způsobeno změnami teploty prostředí, na což jsou piezoelektrické snímače, pracující v těchto oblastech nízkých kmitočtů, obzvláště citlivé. Malou citlivost na teplotu mají snímače namáhané stříhem.



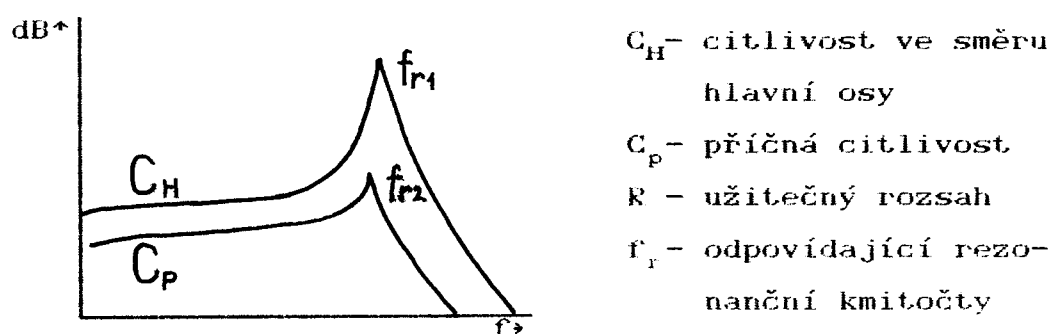
obr.8. Kmitočtový průběh snímače zrychlení

Omezení v horních kmitočtech je způsobeno vlastní rezonancí snímače. Rezonanční kmitočet není stálý a závisí jak na hmotnosti snímače, tak na jeho upevnění, viz kapitola 5.4.5.

#### 5.4.4. Směrová citlivost snímače zrychlení.

Zrychlení měřené snímačem je vektorová fyzikální veličina u níž nás zajímá směr a její velikost. Snímač je totiž také citlivý na směr působících mechanických kmitů.

Hlavní osa snímače bývá obvykle osou symetrie. Ve směru kolmém vykazuje také určitou citlivost, ta však bývá ve srovnání s citlivostí ve směru hlavní osy menší o 30 - 40dB.



obr.9. Směrová citlivost snímače zrychlení

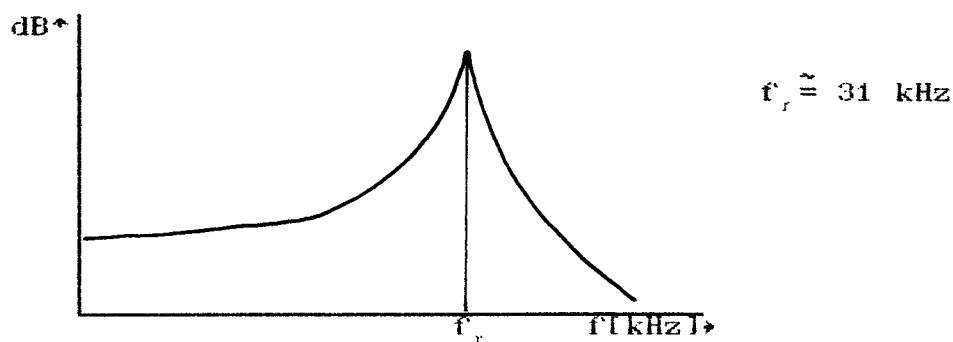
#### 5.4.5. Upevnění snímače.

Upevnění snímače ovlivňuje přesnost měření chvění. Rezananční kmitočet se snižuje tím více, čím volněji nebo měkčeji je snímač upevněn. Nejvhodnější je pevné přišroubování snímače k měřenému objektu. Ne vždy je to možné s ohledem na měřený objekt.

Nejčastěji se vyskytují uchycení pomocí šroubu pro dlouhodobé sledování, nebo pomocí magnetu, či ručním držením při zjišťování momentálního stavu stroje. Méně často se pak

vyskytují uchycení snímače lepením ať už se jedná o lepidla, o oboustraně samolepící pásku, nebo i o včelí vosk.

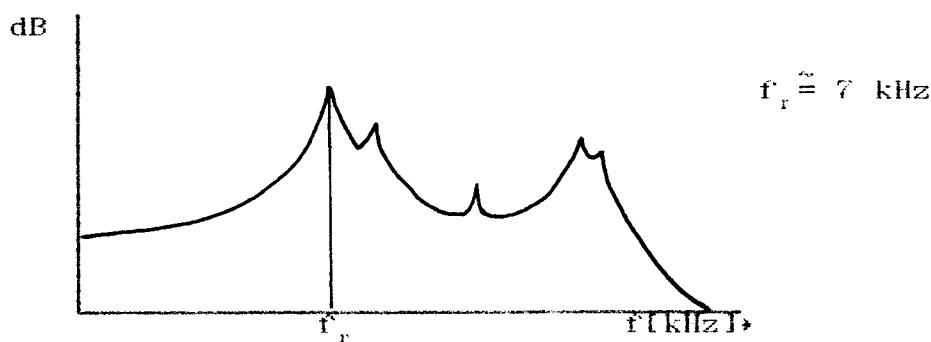
Při uchycení snímače závrtným šroubem nesmí styčná plocha mezi ním a měřeným objektem vykazovat nerovnosti, takže snímač dosedá celou plochou (obr.10).



obr.10. Uchycení závrtným šroubem

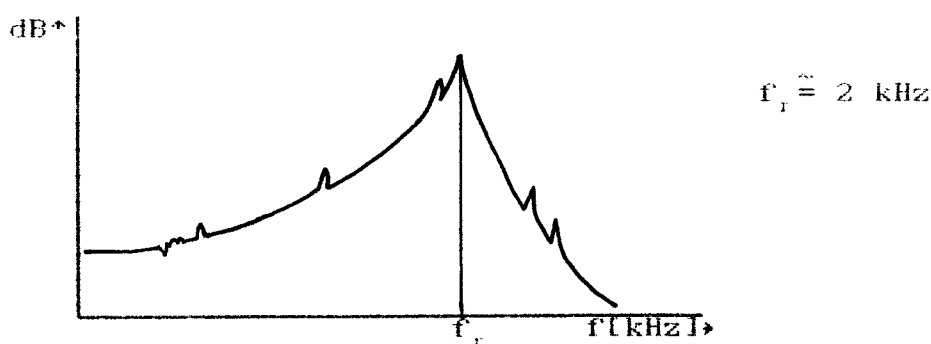
Jelikož při dotažení snímače vzniká nežádoucí rušivé napětí, používá se izolovaný šroub se slídovou podložkou.

Pro operativní sledování několika míst pomocí jednoho snímače se s úspěchem používá k uchycení magnet (obr.11). Vyhovuje pro měření zrychlení i přes  $100 \text{ ms}^{-2}$ , avšak dá se měřit pouze na magnetických objektech a nedá se použít pro měření chvění drobnějších předmětů. Rezonanční kmitočet klesá až na 7 kHz.



obr.11. Uchycení snímače magnetem

V těžko přístupných místech, kde se nedostaneme s magnetickým držákem snímače se používá ruční držení (obr.12). Přenos vibrací se děje prostřednictvím tyčky s hrotem, nebo zaobleným koncem, která je zašroubována do snímače. U tohoto způsobu držení však vzniká mnoho velkých chyb. Rezonanční kmitočet se zde pohybuje, v závislosti na přítlaku, okolo hranice 2 kHz.



obr.12. Ruční držení snímače

U našeho měření byly použity dva posledně jmenovaná uchycení snímačů. Oba obsahuje příslušenství měřícího přístroje Vibroport 30 [27] od firmy Schenck, který byl k dispozici.

#### 5.4.6. Vlivy prostředí.

Snímače mohou pracovat až do teploty 250°C. Vyšší teploty způsobují nevratné změny v piezoelektrickém elementu, v němž dochází k depolarizaci, což se na venek projeví změnou citlivosti snímače. Ten se pak musí přecejchovat. Pro práci při teplotách okolo 400°C existují speciální snímače.

Důležitou roli mají také někdy zemnicí smyčky. Při měření, kde jsou uzeměny měřicí přístroje a snímač odděleně se mohou v takto vzniklé smyčce indukovat proudy, které pak protékají stíněním kabelů. Zde se musí snímač odizolovat podložkou a tím přerušit smyčku.

Dalším rušivým jevem je tzv. turboelektrický šum. Bývá vyvolán lokálními změnami kapacity a tím i náboji způsobenými stlačováním a roztahováním koaxiálního kabelu, který je vystaven intenzivním vybracím. Zabránit se tomu dá pouze použitím speciálních kabelů a zamezením pohybu kabelu, který se musí upevnit v bezprostřední blízkosti snímače.

Při mikrodeformační poruše měřeného objektu, k němuž je snímač připevněn, může vzniknout ve snímači signál, který není způsoben chvěním, ale případným přenosem prutí na snímač.

Je-li kabel mezi snímačem a zesilovačem umístěn v blízkosti elektrických strojů, může být do kabelu indukováno rušivé napětí. To odstraníme pouze použitím kabelu s dvojitým stíněním, nebo zvolením jiného místa upevnění snímače a jinou cestu vedení kabelu.

Nezanedbatelný je také vliv chvění od okolních objektů, pokud pracují. Zde zejména starší stroje, pokud nejsou dostatečně vibračně odizolovány, mají za následek přenos vibrací do snímače měřeného objektu.

Hluk nemá na měření podstatný vliv.

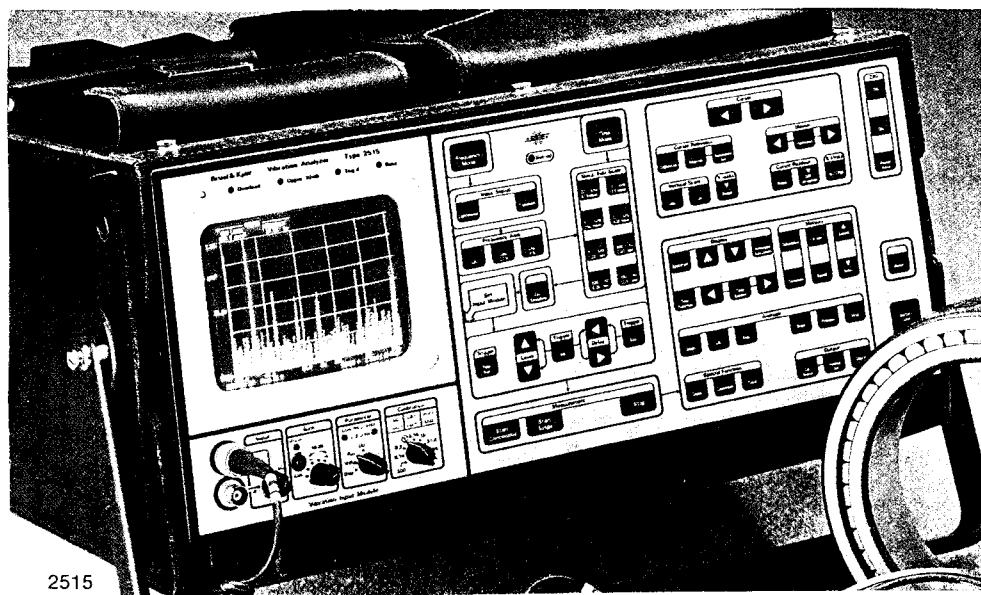
## 6. Popis měření kmitání při procesu broušení.

---

### 6.1. Měřicí a přístrojové vybavení.

Objektivní hodnocení dynamických poměrů je možné pouze pomocí nejmodernější měřicí a vyhodnocovací techniky, která nám umožňuje vyvodit správné závěry a tím dosáhnout požadovaného efektu s minimálními časovými ztrátami.

VŠST měla možnost si zapůjčit od ČVUT Praha velmi moderní přístroj dánské firmy Brüel & Kjaer typového označení 2515 (obr.13).



obr.13. Analyzátor Brüel & Kjaer, typ 2515

Je to přenosný analyzátor, principiálně založený na rychlé Fourierově transformaci a určený k měření a analýze mechanického chvění, sledování provozního stavu strojních a jiných zařízení a k diagnostickému použití i ve velmi nepříznivých pracovních prostředích. Přístroj umožňuje širokou škálu zpracování dat a manipulace s nimi, včetně

pozdějšího zpracování na osobním počítači, kompatibilním s IBM PC/AT vybaveným příslušným firemním softwarem. Celé dlouhodobé měření, které bylo původně v plánu, bylo koncipováno na něj. Přestože zapůjčení předcházelo několik jednání, nepodařilo se nám přístroj ve stanoveném termínu ani později získat.

Měření bylo provedeno náhradním, velmi moderním, i když ne ve všech směrech vyhovujícím, přístrojem západoněmecké firmy Schenck - Vibroport 30 (obr.14), ochotně zapůjčený AZNP Mladá Boleslav, přestože přístroj obdrželi od firmy Schenck dva dny před tím. Přístroj byl zapůjčen pouze na jeden den, takže měření nemohla být provedena v takové šíři, jak jsem původně předpokládal.



obr.14. Analyzátor firmy Schenck Vibroport 30

Přístroj Vibroport 30 [27] umožňuje: určení součtových kmitů, určení charakteristických veličin stavu valivých ložisek, provedení frekvenční analýzy, resp. Fourierovy transformace a také umožňuje provozní vyvažování.



K přístroji byl připojen piezoelektrický snímač zrychlení kmitů AS-011 s integrovaným zesilovačem náboje a přichytným magnetem, resp. snímacím hrotem.

Přístroj je určen zejména pro trvalé sledování a vyhodnocování, resp. k měření dlouhodobě běžících strojů. Tím je také dána minimální časová základna 1s, což neumožňuje při rychlých přechodových dějích, které broušení bezesporu obsahuje, podchytit všechny změny zejména u nižších kmitočtů. S tím také souvisí to, že celá frekvenční analýza trvá cca 60s a délka jednoho brousícího cyklu trvala cca 25 - 35 s. V tomto případě by plně vyhovoval přístroj firmy Brüel & Kjaer 2515 nebo přístroj firmy Schenck Vibrocontrol 2000. Nicméně jisté výsledky lze získat a stanovit podle nich metodiku dalšího měření a způsobu jeho provedení, aby mohla být stanovena závislost vlivu kmitání na kvalitu obráběné plochy.

## 6.2. Příprava k měření.

Měření bylo prováděno na universální hrotové brusce BUA 16A. Kinematické schéma je v příloze A. Zde jsou také vyznačeny měřící body, ve kterých mělo být měření provedeno. Byly vybírány na základě kinematického schématu v místech, kde se dá předpokládat minimální útlum kmitání na povrchu měřené soustavy a zároveň tak, aby byla přístupná použitému snímači.

Před měřením i během něho jsem se snažil vymezit všechny negativní jevy, které by mohly nepříznivě ovlivnit měření. Jednalo se zde zejména o kontrolu řemenů náhonů, výměna řezné kapaliny za novou, před každou sérií měření o rovňávání brousícího kotouče. Aby se eliminovaly vlivy

způsobené kluznými ložisky pomocného pohonu, bylo broušení prováděno v nově zbroušených pevných hrotech pomocí snímače (viz příloha A).

Některé neblahé vlivy se však vyloučit nedaly, např.: indukce rušivých el. napětí od el. motorů pohonů do kabelu od snímače, chvění od sousedního pracujícího soustruhu, z časových důvodů dynamicky nevyvážený kolouč, při měření sondou chyby způsobené právě tímto způsobem měření (viz kap. 5.4.5) a konečně i chyba přístroje. Měření bylo totiž prováděno v rozsahu kmitočtů 10 - 1000 Hz (DIN 45 666, ISO 2954 [30]) s chybou +3% resp. -1%.

### 6.3. Popis měření.

Z původního dlouhodobého sledování jsem navrhl zkrácené jednodenní sledování (19.7.1990) obsahující celkově 35 měření. Zjišťoval jsem jimi následující:

Měření 1-9 - zjišťování mohutnosti kmitání, zjištění celkového stavu stroje a ověření optimálnosti navržené měřících míst (obr.15). Zde jsem vybral a posoudil měřící místa s největší mohutností kmitání, v těch jsem pak zamýšlel pokračovat v měřeních. Zjišťování stavu jsem prováděl na stroji bez zatížení (naprázdno), při zapnutých všech pohonech. Měření probíhalo postupně v těchto měřících místech: 1,2,3,4,5,6, pomocí snímače se snímacím hrotem, dále pak 4,5,7, pomocí snímače s přichytným magnetem.

Měření 10-15 - stanovení závislosti mohutnosti kmitání na čase (příloha B a-f). Na broušení jsem použil vzorek oceli 12 060.1. Celá série měření měla objasnit jednak závislost zanášení kotouče na velikosti kmitání a tím na

kvalitě obráběné plochy, jednak vhodnost broušeného vzorku. Jelikož však docházelo k tzv. "samoostření" kotouče, což je uvolnění a očištění zanesené vrstvy kotouče, vybral jsem jiný vzorek. Celá tato série měření byla provedena v měřicím bodě 7, kde je největší předpoklad zachycení změn.

Měření 16 - zkušební měření v němž se zjišťovala reakce stroje a kotouče na nový broušený vzorek - jednalo se zde o špatně obrobitelnou titanovou slitinu VT8. Byl změněn také rozsah a tím zlepšena rozlišovací schopnost přístroje. Měření není v příloze uvedeno, neboť nemá na výsledky žádný vliv.

Měření 17-19 - měřena časová závislost (příloha B). Byla provedena se vzorkem titanové slitiny VT8 v měřicím bodě 7, pomocí snímače s mag. příchýtkou. V této sérii měření jsem zjišťoval závislost mohutnosti kmitání na čase, resp. v závislosti na zanášení kotouče. V této fázi jsem již "samoostření" nezjistil, a proto jsem s tímto vzorkem pokračoval v měření dál.

Měření 20 - opětné provedení zkušebního měření. Zde jsem měl za cíl ověřit vhodnost měřicího rozsahu při provádění frekvenční analýzy.

Měření 21-25 - provedení frekvenční analýzy v měřicím bodě 7 pomocí snímače s mag. příchýtkou. V příloze C jsou uvedeny pouze reprezentativní vzorky měření, resp. 1., 3., a 5. nájezd kotouče do materiálu.

Měření 26-30 - provedení frekvenční analýzy v měřicím bodě 5 pomocí snímače s mag. příchýtkou. Výsledky měření jsou řazeny obdobně jako v předcházející sérii měření v příloze D.

Měření 31-35 - provedení frekvenční analýzy v měřicím bodě 2 pomocí snímače se snímacím hrotem. Výsledky viz příloha E.

## 7. Vyhodnocení experimentálního měření.

---

### 7.1. Teoretická příprava k vyhodnocení.

Abych byl s to analyzovat a posléze vyhodnotit naměřené výsledky, musela předcházet teoretická příprava. Ta spočívala především v praktickém seznámení se s bruskou a její obsluhou, dále pak ve stanovení základních budících frekvencí od rotorů, řemenů a ložisek (tab.1), a také stanovení a umístění měřících bodů (kap. 6.2).

Základní hodnoty otáček jsem odečetl z [12]. Jedná se o tyto hodnoty:

otáčky brusného vřetene (BV).....	2420 min <sup>-1</sup> ,
otáčky pracovního vřetene (PV).....	250 min <sup>-1</sup> ,
otáčky pohonu k BV (MB).....	2780 min <sup>-1</sup> ,
otáčky pohonu k PV (MP).....	910 min <sup>-1</sup> ,
otáčky předlohového hřídele (PP).....	448 min <sup>-1</sup> .

Vzorce k výpočtu budících frekvencí jsou obsaženy v [1] a [2]. Jedná se zde o výpočet budící frekvence od ložiska:

$$f_L = z \left( 0.5 \ln_e \left( 1 + \frac{d_o}{d_s} \cos \delta \right) + n_l \left( 1 - \frac{d_o}{d_s} \cos \delta \right) \right), \quad /20/$$

budící frekvence od řemenů:

$$f_K = n_1 \frac{\pi D_1}{L} = n_2 \frac{\pi D_2}{L}, \quad /21/$$

a budící frekvence od rotorů:

$$f_R = n, \quad /22/$$

budící frekven. [Hz]	MB	MP	PV	BV	PP
ložiska	161.8	52.96	31.21	342.8	26.10
rotory	46.36	15.63	4.139	40.39	7.475
řemeny	14.55	3.835	2.257	14.55	2.275
					3.835

tab.1. Základní budící frekvence

Je zde však na místě připomenout, že se jedná o vypočtené hodnoty - teoretické, a tedy se nemusí přesně shodovat s naměřenými hodnotami. V mnohých případech se tyto hodnoty vyskytují pouze s tolerancí, nebo při velkém utlumení pružnými deformacemi se nemusí vyskytovat vůbec. Naopak se zde mohou objevit tzv. sekundární budící frekvence, vznikající rezonancí některých nepružných dílů od základních budících frekvencí a jejich harmonických. Dochází k tzv. nábalu okolo budící frekvence v rozmezí až několika Hz. Velmi názorně se to projevilo při měření frekvenční analýzy (kap.7.4).

### 7.2. Vyhodnocení mohutnosti kmitání při měření naprázdno.

Průběh a výsledky měření jsou uvedeny v obr.15 v tomto sledu:

Měření č.1 - bylo provedeno v měřicím bodě 1 nad oboustranným axiálním ložiskem 52106A (příloha A dole), pomocí snímače se snímacím hrotem, s ručním držením. Dosažená hodnota 0.1 mm/s dokazuje, že měřicí místo je pro

další sledování nevhodné.

**SCHENCK**

VIBROPORT 30  
Schwingstärke

Num: 90-07-19

Objekt:

Uchycení: BUA 16 A, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 4, 5, 7

Měřič: 1-6 - tyčkovou 7-9 magnetem

Podstata: Naprázdno - bez zatížení

10 - 1000 Hz (150)

číslo m.	otáčky / frekvence	frekvence
1		0,1 mm/s rms
2		1,2 mm/s rms
3		1,0 mm/s rms
4		0,0 mm/s rms
5		0,1 mm/s rms
6		0,2 mm/s rms
7		0,0 mm/s rms
8		1,0 mm/s rms
9		1,1 mm/s rms

obr.15. Hodnoty kmitání při měření naprázdno

Měření č.2 - bylo provedeno v měřicím bodě 2, tj. kolmo na měřicí bod 1 ve směru podélné osy klínových řemenů pomocí snímače se snímacím hrotem, s ručním držením (příloha A dole). Z dosažené hodnoty 1.2 mm/s vyplývá vhodnost měřicího bodu pro další měření (měření č.31-35, příloha E, kap.7.4). Na obr.20 je hodnota zvýrazněna podtržením.

Měření č.3 - bylo provedeno v měřicím bodě 3, tj. nad předním ložiskem 6204 motoru, ve směru podélné osy klínových řemenů, pomocí snímače se snímacím hrotem, s ručním držením (příloha A dole). Dosažená hodnota 1.0 mm/s dokazuje přenos méně utlumených kmitů od brusného vřeteníku. Na obr.20 je hodnota zvýrazněna podtržením. K dalšímu zkoumání nedošlo, jednak vzhledem k časové tísni, jednak k nevelké pravděpodobnosti odlišnosti hodnot od měřicího bodu 2, kromě utlumení.

Měření č.4 - bylo provedeno v měřicím bodě 4, tj. v horizontále s kuličkovým ložiskem 6007 umístěného na hřídeli pracovního vřeteníku, pomocí snímače se snímacím hrotem, s ručním držením (příloha A nahoře). Dosažená hodnota 0 mm/s nám dává informaci o tom, že převod nevykazuje opotřebení či poškození. Lze však předpokládat, že při plném broušení v hrotech se zde bude projevovat kmitání od kotouče. Přesto jsem tento měřicí bod k dalšímu zkoumání nezvolil, vzhledem k nevhodnosti umístění snímače.

Měření č.5 - bylo provedeno v měřicím bodě 5, tj. kolmo na předcházející měřicí bod, pomocí snímače se snímacím hrotem, s ručním držením (příloha A nahoře). V podstatě lze konstatovat to samé, co u předcházejícího měřicího bodu, s tím rozdílem, že zde je umístění snímače vhodnější, a tedy jsem v tomto měřicím bodě provedl frekvenční analýzu (měření 26-30, příloha D, kap. 7.4).

Měření č.6 - bylo provedeno v měřicím bodě 6, tj. nad předním ložiskem 6204 motoru, ve směru podélné osy klínových řemenů pomocí snímače se snímacím hrotem, s ručním držením (příloha A nahoře). Dosažená hodnota 0.2 mm/s potvrdila, že pohon pracovního vřeteníku nevykazuje výraznější chvění a tedy není předpoklad, že by vážněji ovlivnil kvalitu obráběné plochy. Proto v dalším měření s ním nepočítám.

Měření č.7 - bylo provedeno opět v měřicím bodě 4, (příloha A nahoře), ale pomocí snímače s mag. příchýtkou. Dosažená hodnota 0 mm/s potvrdila měření č.4.

Měření č.8 - bylo provedeno v měřicím bodě 5, (příloha A nahoře), pomocí snímače s mag. příchýtkou. Hodnota 0 mm/s dokazuje, že při měření č.5 vznikla chyba způsobená nedokonalostí dosedu snímacího hrotu při ručním držení. To ale z celkového hlediska nemá žádný vliv. Existuje však předpoklad, že při plném broušení se bude projevovat kmitání

od brousícího kotouče. Další zkoumání je provedeno v měření 26-30 (příloha D, kap. 7.4).

Měření č.9 - bylo provedeno v měřicím bodě 7, tj. na horizontále s předním hydrostatickým ložiskem brusného vřeteníku, pomocí snímače s mag. příchytkou, (příloha A dole). Dosazená hodnota 1.1 mm/s ukazuje na dynamickou nevyváženost kotouče (kap. 6.2), projevující se v dalších měřeních a hlavně nejvíce ovlivňující, při broušení, kvalitu obráběné plochy. Hodnota je na obr.20 zvýrazněna podtržením. Z hlediska hledané závislosti je tento měřicí bod nejzajímavější. Celé měření je právě zaměřeno na něj. Ostatní měření je jen jakousi kontrolou odezev.

Podle [29] kdy pro skupinu strojů K, mezi které bruska patří, je maximální hodnota mohutnosti kmitání pro zaručeně použitelný stav stroje, stanovena na max. hodnotu 1.8 mm/s. Pouhým srovnáním jsem zjistil, že naměřené hodnoty nikde nepřesahují stanovenou mez, a tedy že stroj je obecně v pořádku. To znamená, že další měření nebudou nijak výrazně zatížena chybami.

### 7.3. Vyhodnocení časové závislosti kmitání.

Samotné broušení probíhá v pěti samostatných fázích, viz [12]:

- a) přísuv rychloposuvem na vzdálenost cca 1mm od materiálu,
- b) přísuv mikroposuvem do záběru,
- c) vlastní broušení nastaveným přísuvem až do požadovaného rozměru,
- d) vyjiskření,
- e) odjezd rychloposuvem do základní polohy



Celý proces odobírání jedné třísky trvá cca 30s. Bohužel se však nedá přesně stanovit okamžik dotyku kotouče s obrobkem. Dá se to pouze odhadnout, buď sluchem, nebo odečítáním hodnot z měřicího nónia. Oba způsoby jsou nepřesné a připočítáme-li prodlevu při náběhu přístroje a také prodlevu způsobené reakcí obsluhy, vzniká chyba, která je při každém nájezdu jiná, a která má za následek ne vždy zachycení počátku broušení ve výsledných grafech.

Průběh a výsledky měření časové závislosti kmitání jsou uvedeny v příloze B.

Měření č.10 - (příloha Ba). Zde je jasně vidět, v čase  $t_1$  začátek zanášení kotouče po dobu  $\Delta t_2$ . V čase  $t_2$  dochází k vyjiskřování. V čase  $t_3$  dochází k návratu kotouče rychloposuvem do výchozí polohy.

Měření č.11 - (příloha Bb) zde byl přechodně zvětšen rozsah a tím snížena rozlišovací schopnost, takže je zde vidět pouze výrazný odskok kotouče z řezu v čase  $t_3$ . Není zde rozlišeno samoostření nástroje (kotouče).

Měření č.12 - (příloha Bc). Zde je vidět opět zanášení kotouče od  $t_1$  po dobu  $\Delta t_2$ . V čase  $t_2$  začíná vyjiskřování do  $t_3$ , kdy je zjištěn odskok.

Měření č.13 - (příloha Bd). Zde po nájezdu kotouče do materiálu dochází po dobu  $\Delta t_3$  do času  $t_0$  k samoostření nástroje. Zanášení kotouče v čase  $t_1$  je nepatrné. Způsobuje však v dalších nájezdech kotouče jeho výraznější zanášení.

Měření č.14 - (příloha Be). Předcházející domněnka se potvrdila. Je zde vidět výrazně delší čas  $\Delta t_2$  zanášení kotouče.

Měření č.15 - (příloha Bf). Na tomto grafu je zřetelně vidět jednotlivé fáze v procesu broušení.

S určitostí lze tvrdit, při další sérii měření by začalo docházet k prodlužování času  $\Delta t_2$ , tedy zanášení

kotouče by bylo větší a úměrně s tím by se zvětšovala i mohutnost kmitání. Jelikož tento experiment vyžaduje dlouhodobé sledování, v rámci časové úspory jsem zvolil místo mat. 12 060.1 jiný vzorek a sice velmi špatně obrobitelnou titanovou slitinu označovanou jako VT8.

Měření č.17 - (příloha Bg). Při změněném rozsahu, při vyšší rozlišovací schopnosti, je zde zřetelně vidět nájezd kotouče do materiálu - čas  $t_0$ , broušení a vzápětí v čase  $t_1$  zanášení kotouče.

Měření č.18 - (příloha Bh). Na tomto grafu je již zřetelně vidět nájezd kotouče do materiálu, ale jelikož je kotouč již zanesen, dochází k jeho dalšímu, výraznějšimu zanášení.

Měření č.19 - (příloha Bch). Zde je vidět nájezd do materiálu a posléze strmější úhel stoupání při zanášení kotouče až do času  $t_3$  - odskočení ze záběru.

Nyní již lze konstatovat, že vliv zanášení kotouče na kvalitu obráběné plochy lze zjistit. Projevuje se to zejména u špatně obrobitelných materiálů, kdy zanášením kotouče dochází k nedokonalému obrábění, tím ke zvětšení samobuzeného kmitání s utrpením na kvalitě obráběné plochy.

Přesto, že se mi z tohoto krátkého měření nepodařilo odvodit experimentální závislost kmitání vytvářející se v procesu broušení na kvalitě obráběné plochy, dá se předpokládat, že kolísání mohutnosti kmitání v rozsahu cca 0.1 mm/s se utlumí v pružných deformacích obrobku, nástroje a rámu.

#### 7.4. Vyhodnocení frekvenční analýzy.

Při měření pracuje přístroj tak, že zjišťuje jednotlivé frekvence v jednotlivých krocích, dané časovou základnou. Jelikož není velikost mohutnosti kmitání v každém okamžiku stejná, přístroj provádí průměrování. Jinak si lze všimnout, že při měření se vyskytovala většina nedostatků a chyb, popsané v kap. 5.4.5, 6.2, 7.1, 7.2 a 7.3.

Výsledky jednotlivých sérií měření s grafy a hodnotami zjištěných frekvencí jsou postupně uvedeny v přílohách C, D a E.

Aby zde byla zaručena možnost kvalitního srovnání, neboť z grafů není srovnání tak výrazné, seřadil jsem naměřené hodnoty, podle podobnosti hodnot frekvencí do tabulek (tab. 2, 3, 4).

Měření č. 21-25 (příloha C).

buzení	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s
PVR+MBK	13	0.22	-	-	19	0.22
PPL	27	0.18	27	0.19	27	0.24
NL	-	-	36.9	0.39	-	-
BVR	42.9	1.21	42.9	1.26	42.9	1.24
MPR	-	-	56.9	0.18	-	-
6h BVR	253	0.15	255	0.09	256	0.15
NL	266	0.22	266	0.13	-	-
NL	-	-	274	0.16	272	0.11
6h MBR	280	0.28	286	0.32	284	0.19
7h BVR	300	0.12	300	0.11	296	0.27

tab.2. Výsledky měření z přílohy C

Měření 26-30 (příloha D).

buzení	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s
PVR+MPK	15	0.07	-	-	13	0.20
PPL	-	-	23	0.11	23	0.03
BVR	42.9	1.13	42.9	1.10	44.9	1.03
MPR	64.9	0.12	52.9	0.31	54.9	0.24
6h MBR	230	0.13	230	0.33	234	0.13
DZ	-	-	560	0.10	-	-
NL	562	0.09	562	0.10	562	0.12
11h MPL	580	0.05	582	0.05	590	0.10
NL	-	-	596	0.10	598	0.06
DZ	-	-	618	0.12	620	0.11
NL	-	-	624	0.11	-	-
2h BVL	628	0.06	630	0.06	630	0.16
12h MPL	638	0.06	-	-	636	0.22
NL	724	0.10	-	-	-	-

tab.3. Výsledky měření z přílohy D

Měření 31-35 (příloha E).

buzení	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s
PVR+MBK	11	0.77	13	0.39	13	0.24
PPL	27	0.17	-	-	-	-
BVR	42.9	1.01	42.9	1.14	44.9	1.07
NL	-	-	-	-	50.9	0.35
MPR	62.9	0.12	-	-	56.9	0.15
2h MPL	103	0.17	109	0.07	107	0.05
6h BVR	262	0.08	262	0.05	258	0.22
6h MPR	274	0.09	270	0.06	270	0.12
NL	294	0.07	298	0.14	296	0.12
7h BVR	306	0.05	308	0.06	300	0.12

tab.4. Výsledky měření z přílohy E

Jak jsem již uvedl v kap. 7.3, mohutnost kmitání o hodnotě cca 1 mm/s se utlumí v pružných deformacích. Proto jsem při vyhodnocování tyto, většinou náhodné hodnoty, nebral do úvahy. Zabýval jsem se pouze vyhodnocením těch hodnot, které by mohly výrazně ovlivnit, jak se domnívám, kvalitu obráběné plochy při vlastním broušení.

Z uvedených tabulek je zřejmé, že nejvýraznější a také nejvíce ovlivňující měření je kmitání od brusného vřeteníku, způsobené pravěpodobně dynamickou nevyvážeností kotouče (v tabulkách zvýrazněno). To může být způsobeno několika vlivy:

- a) nedokonalým usazením kotouče při montáži - nevystředěním,
- b) konstrukční vadou kotouče - nepravidelným rozložením hmoty po obvodu, nebo i bočním házením,
- c) v [12] výrobce doporučuje několikaminutové protočení naprázdno, aby se odstředivou silou odstranila veškerá voda, vnikající do kotouče od chladicí kapaliny.

Z měření je dále vidět, i když ne výrazně, že se zvětšujícím se zanášením kotouče dochází ke zvětšování mohutnosti samobuzeného kmitání, čímž samozřejmě trpí kvalita obráběného povrchu.

Kdyby se podařilo dodatečným dynamickým vyvážením kotouče dosáhnout mohutnosti kmitání pod hranici 0,7 mm/s, dostal by se stroj, zařazený podle [29] do skupiny K, na kvalitu "dobrý", což by, myslím, výrazně ovlivnilo kvalitu obrábění. Pak by se dalo provést i dlouhodobé měření zjišťující další negativní vlivy na kvalitu obrábění, zejména vliv zanášení kotouče při různých řezných podmínkách.

## 8. Zhodnocení měření.

---

### 8.1. Závěry experimentálního měření.

Z tohoto krátkodobého jednodenního měření lze usoudit, že v první řadě kvalita obráběné plochy v procesu broušení závisí zejména na 100% stavu stroje. Včasná údržba stroje dle metody "on condition" a dobré nastřívání stroje dává maximální záruku kvality výroby.

V neposlední řadě to jsou i vlivy odborné obsluhy stroje. Mám zde na mysli zejména správnou volbu optimálních řezných podmínek, volba a uložení kotouče, obrabku apod.

Mohl bych však tvrdit, že potlačení mohutnosti kmitání pod hranici 0,7 mm/s, jak stanovuje I291, se nedá již nic ovlivnit. Naopak. Existuje totiž hypotéza, že pokud by se podařilo dalším měřením experimentálně stanovit vztah mezi mohutností kmitání a kvalitou obráběné plochy, objasnila by se jednak hranice mohutnosti kmitání, která by ještě neměla vliv na kvalitu obráběné plochy, resp. které by pohltily pružné deformace obrabku, nástroje a rámu, jednak vlivy způsobující překračování této hranice, včetně vlivu zanášení brusného kotouče na kvalitu obráběné plochy.

Jsem si však vědom toho, že stanovení výše popsané závislosti by bylo specifické pouze pro tento typ stroje. S největší pravděpodobností by se nedal aplikovat na jiné stroje.

## 9.2. Návrhy pro další sledování.

Pro další sledování doporučuji:

- a) Zajistit si k měření vhodný přístroj s odpovídající časovou základnou, aby mohl podchytit změny v co nejmenším časovém úseku, a s možností zpracování naměřených dat na počítači řady PC, neboť v případě manuálního vyhodnocování dlouhodobého sledování by docházelo k velkým časovým ztrátám. Doporučuji buď západoněmecký přístroj od firmy Schenck Vibrocontrol 2000 [25], nebo od dánské firmy Brüel & Kjaer přístroj typu 2515 [23], který bude mít VŠST v dohledné době k dispozici, případně jiný stejných či vyšších kvalit a možností, např. [26], [28], aj.
- b) Zajistit si pro vyhodnocování drsnosti obráběné plochy kvalitní drsnoměr.
- c) Řádně se seznámit s činností a obsluhou stroje a před měřením pokud možno odstranit všechny neblahé aspekty způsobující rušivé jevy při měření, včetně dynamického vyvážení kotouče, seřízení kluzných ložisek pracovního vřeteníku, přebroušení hrotů a zajištění jejich centráže.
- d) Zajistit při měření vyloučení všech negativních vlivů od okolních strojů a okolí vůbec.
- e) Pokud by to bylo možné zajistit externí spouštění přístroje v závislosti na poloze brousícího kotouče a to buď v přímé závislosti na ovládacím obvodu stroje, nebo méně přesné spouštění přes časově zpožděné relé, nastavené na stejnou hodnotu, jako je nastaven přísuv stroje.
- f) Zajistit průběžné vyhodnocování naměřených hodnot, aby se daly stanovit další směry měření.
- g) Pro jednotlivé série měření měnit řezné podmínky (řezná rychlost, rychost přísuvu, velikost odebírané třísky

- apod.) tak, aby se dal zjistit vliv jejich nastavení na rychlosti zanášení kotouče, včetně broušení bez chlazení.
- h) Neomezovat se pouze na jeden druh kotouče, ale provést měření i s jinými druhy.
  - i) měření provádět na několika materiálových vzorcích, odlišující se od sebe různou obrobitelností.

Výsledkem by měla být již zmíněná závislost mohutnosti kmitání na kvalitě obráběné plochy. Pak by se mohla tato závislost srovnat se závislostmi naměřenými na jiných strojích (stejného typu), stanovit obecná závislost a experimentálně ji aplikovat v praxi, jestli by se osvědčila. To by však vyžadovalo dlouhodobé sledování na několika strojích najednou, což už však není v podmínkách VŠST možné.



## 9. Závěr

---

Úkolem mé diplomové práce byla analýza mechanického chvění v procesu broušení.

V její teoretické části jsem se zabýval krátkým seznámením se s brousícím procesem, dále pak údržbou strojů a nakonec diagnostickými signály, jejich popisem a způsoby měření. Vše toto je potřeba k objasnění analýzy experimentálního měření, které jsem provedl, i když jen v kratší podobě, než jsem původně zamýšlel.

Dále je v práci uveden postup při měření, rozbor a vyhodnocení výsledků. Na jejich základě jsou pak vytyčeny další cíle pro další sledování a experimentální stanovení závislosti mohutnosti kmitání na kvalitě obráběné plochy. To je však možné pouze po kvalitním vybavením se odpovídajícím přístrojem, který bohužel nebyl k dispozici, ale který by měl být v budoucnosti ve vlastnictví VŠST.

Celkově lze říci, že měřením bylo objasněno, jaký vliv na kvalitu obrábění a na jakosti a přesnosti broušených ploch, má celkový stav stroje, zanášení kotouče, jeho volba a uložení, broušený materiál a volba optimálních řezných podmínek, a že je možné tento vliv sledovat měřením mechanického chvění.

Dalším dlouhodobým sledováním by se měla stanovit experimentální závislost mezi mohutností samostatného kmitání a kvalitou obráběné plochy. Ta by se potom mohla uplatnit při stanovování optimálních řezných podmínek pro nejrůznější materiály a nástroje.

Domnívám se, že má diplomová práce je pouze počátkem a tedy spíše metodikou pro objasnění vztahů mezi vibracemi a procesem broušení. V daných podmínkách potvrzuje, že

použitý postup při objasňování problematiky je správný.

Je třeba však připomenout, že uvedení této hypotézy do praxe bude předcházet ještě množství měření a experimentů, jejichž počáteční posloupnost jsem se snažil navrhnout. Další postup pak bude závislý na předcházejících výsledcích.

Poděkování:

Závěrem bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Válovi za cenné rady při sestavování této práce, za připomínky i za odborné posouzení.

Seznam příloh:

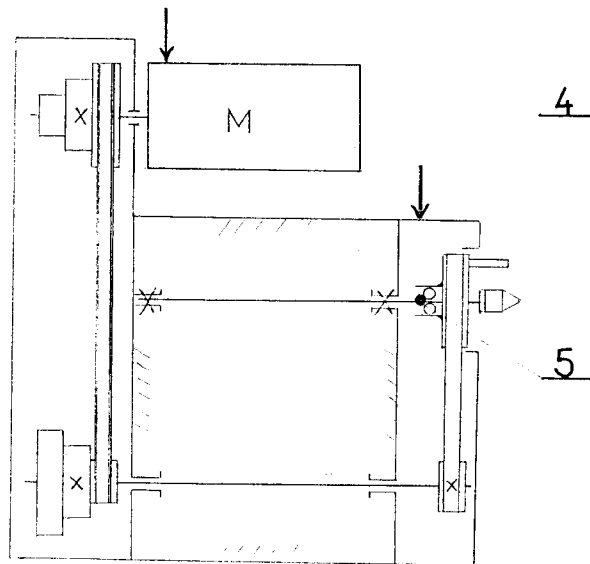
- A - kinematické schéma stroje s měřicími body.
- B - výsledky měření časové analýzy.
- C - výsledky měření frekvenční analýzy v měř. bodě 7.
- D - výsledky měření frekvenční analýzy v měř. bodě 9.
- E - výsledky měření frekvenční analýzy v měř. bodě 2.

Literatura:

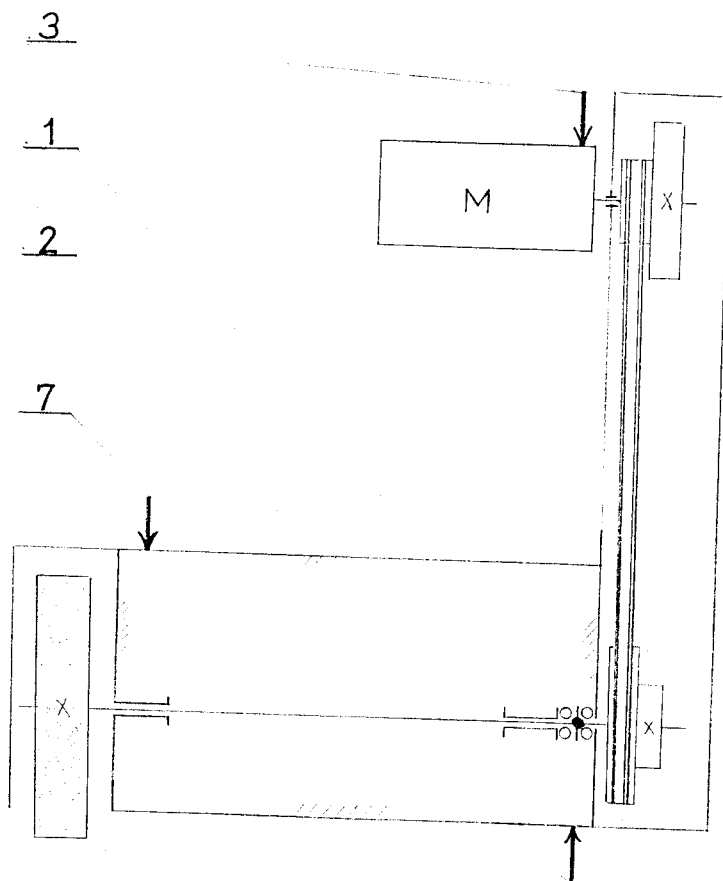
---

- [1] BENEŠ, Š.: Teorie stavby strojů. Liberec, VŠST 1986.
- [2] BENEŠ, Š. - ŠEREMENTA, L. - VÁLA, K.: Bezdemontážní diagnostika. Liberec, VŠST 1987.
- [3] NAVRÁTIL, M. - PLUHÁŘ, O.: Měření a analýza mechanického kmitání. Praha, SNTL 1986.
- [4] JANOUSEK, I., a.j.: Technická diagnostika. Praha, SNTL 1988.
- [5] JANOUSEK, I.: Metodika řízení údržby parametrickou diagnózou stavů. In: Technická diagnostika číslicovo řízených obrábacích strojov. Žilina, ČSVTS 1988. s.75-85.
- [6] BRENÍK P. - PIČ, J.: Obráběcí stroje (Základy konstrukce a výpočtů). Praha, SNTL/ALFA 1976.
- [7] DRÁB, V.: Technologie I. Liberec, VŠST 1985.
- [8] KUKLA, Pavel: Dynamická analýza pohonu obráběcího stroje na základě matematického modelování a měření mechanického kmitání. (Diplomová práce). Liberec 1983. 63s. Fakulta strojní.
- [9] ANGELO, M.: Vibration monitoring of machines. In: Technical Review 1-1987.
- [10] HALLIWELL, N.: The Laser Vibrometer - A Portable Instrument. In: Sound and Vibration journal, 1986.
- [11] Vibration Measurement using Laser Technology, ISVR/SIRA Course notes, available from SIRA Ltd. Sound Hill, Kent England, 1986.
- [12] TOS n.p., Hostivař (ČSFR): Technický pasport stroje, bruska hrotová univerzální BUA 16A. 1970.
- [13] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): The Laser Velocity Transducer - Its principles and Applications. 1984.

- [14] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): Permanent Vibration - Monitoring. 1987.
- [15] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): Measurements in Building Acoustics. 1988.
- [16] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): Vibrační zkoušení. 1984.
- [17] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): Měření chvění. 1988.
- [18] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): Delta SHEAR - Piezoelectric Accelerometers. 1984.
- [19] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): Schwingungsanalysator. 1984.
- [20] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): Machine Condition. Monitoring and analys. 1988.
- [21] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): A Versatile Paket - sized Vibration Meter Type 2513. 1988.
- [22] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): Struktural Testing using Model analysis. 1986.
- [23] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): Condition - Based Maintenance With the Vibration Analyzer Type 2515. 1988.
- [24] Brüel & Kjaer, Naerum (Dánsko): Vibration Monitoring Set. 1987.
- [25] Schenck, Darmstad (SNR): Vibrocontrol 2000 - Systém pro sledování strojů. 1988.
- [26] Schenck, Darmstad (SNR): Vibrocam 1000 - Das system zur zustandzorientierten Maschinenstandhaltung. 1988.
- [27] Schenck, Darmstad (SNR): Vibroport 30 - Universální mikroprocesorový přístroj na měření kmitů. 1988.
- [28] Prüftechnik, (SNR): Vibrospekt FFT - Maschine Analyzer. 1989.
- [29] ISO-Standard 2372 Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s. 1975.
- [30] DIN-Norm 45 566 Schwingstärkemessgerät. 1967.



Kinematické schéma pohonu pracovního vřeteníku



Kinematické schéma pohonu brusného vřeteníku

# PŘÍLOHA B



## VIBROPORT 30 Schwingstärke

Datum: 90-07-19 č.m. 10

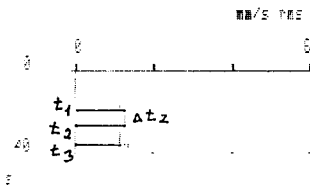
Ort: časová analýza

Maschine: BUA 16A, měř. místo 7

Měř. místo: přístroj 0009 (1)

Betriebsart: vzorek 12 060.1

10 - 1000 Hz (150)



Robruch bei: 37s

a,

## Schwingstärke

Datum: 90-07-19 č.m. 13

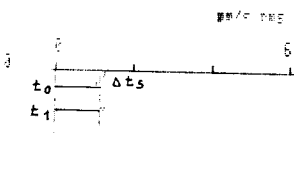
Ort: časová analýza

Maschine: BUA 16A, měř. místo 7

Měř. místo: přístroj 001 (4)

Betriebsart: vzorek 12 060.1

10 - 1000 Hz (150)



Robruch bei: 25s

d,

## Schwingstärke

Datum: 90-07-19 č.m. 14

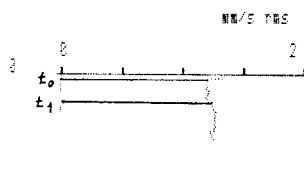
Ort: časová analýza

Maschine: BUA 16A, měř. místo 7

Měř. místo: přístroj 0009 (1)

Betriebsart: vzorek křivanová skelina VT8

10 - 1000 Hz (150)



Robruch bei: 01s

g,



## VIBROPORT 30 Schwingstärke

Datum: 90-07-19 č.m. 11

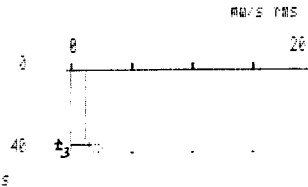
Ort: časová analýza

Maschine: BUA 16A, měř. místo 7

Měř. místo: přístroj - 0,009 (2)

Betriebsart: vzorek - 12060.1

10 - 1000 Hz (150)



Robruch bei: 36s

b,

## Schwingstärke

Datum: 90-07-19 č.m. 14

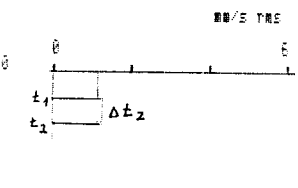
Ort: časová analýza

Maschine: BUA 16A, měř. místo 7

Měř. místo: přístroj 0,01 (5)

Betriebsart: vzorek 12 060.1

10 - 1000 Hz (150)



Robruch bei: 25s

e,

## Schwingstärke

Datum: 90-07-19 č.m. 18

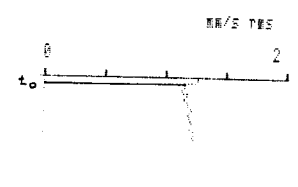
Ort: časová analýza

Maschine: BUA 16A, měř. místo 7

Měř. místo: přístroj 0009 (2)

Betriebsart: křivanová skelina VT8

10 - 1000 Hz (150)



Robruch bei: 30s

h,



## VIBROPORT 30 Schwingstärke

Datum: 90-07-19 č.m. 12

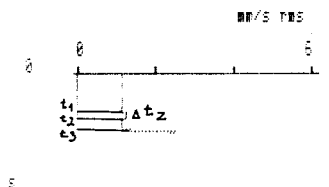
Ort: časová analýza

Maschine: BUA 16A, měř. místo 7

Měř. místo: přístroj - 0,01 (3)

Betriebsart: vzorek - 12060.1

10 - 1000 Hz (150)



Robruch bei: 29s

c,

## Schwingstärke

Datum: 90-07-19 č.m. 15

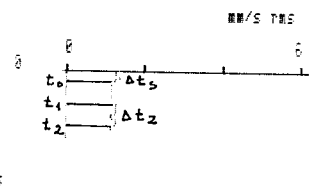
Ort: časová analýza

Maschine: BUA 16A, měř. místo 7

Měř. místo: přístroj 001 (6)

Betriebsart: vzorek 12 060.1

10 - 1000 Hz (150)



Robruch bei: 28s

f,

## Schwingstärke

Datum: 90-07-19 č.m. 13

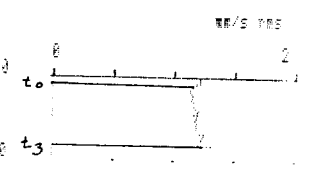
Ort: časová analýza

Maschine: BUA 16A, měř. místo 7

Měř. místo: přístroj 0009 (3)

Betriebsart: křivanová skelina VT8

10 - 1000 Hz (150)



Robruch bei: 33s

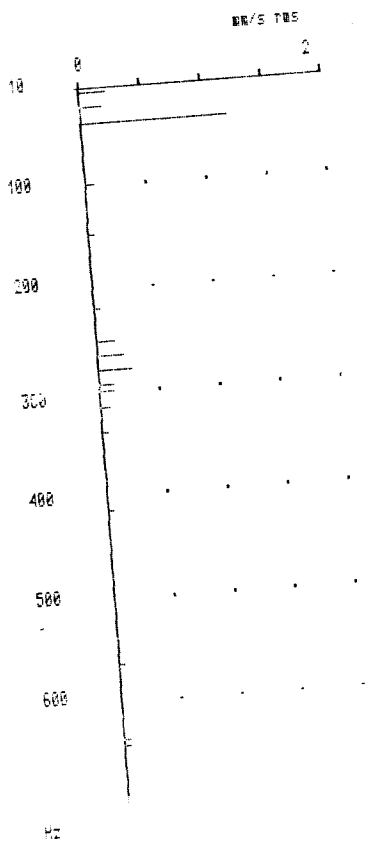
ch,



**SCHENCK**  
VIBROPORT 30  
Frequenzanalyse

Datum: 90-07-19 21  
Ort: \_\_\_\_\_  
Maschine: BUA 16A 7  
Měststelle: \_\_\_\_\_ ①  
Betriebsart: \_\_\_\_\_

Bandbreite automatisch



Abbruch bei: 692 Hz

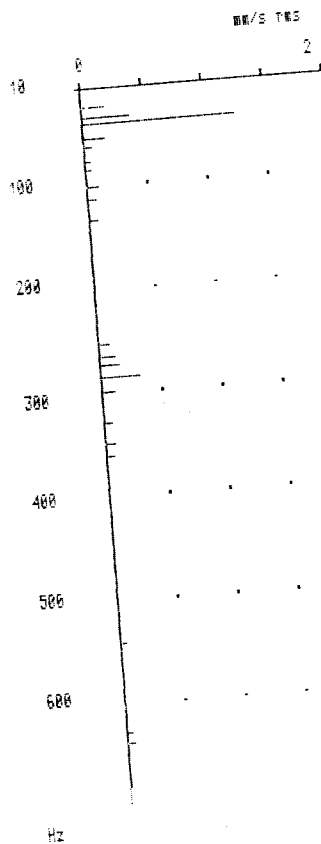
Frequenz	Meßwert
13.0 Hz	0.22 mm/s RMS
27.0 Hz	0.18 mm/s RMS
42.9 Hz	1.21 mm/s RMS
101 Hz	0.87 mm/s RMS
149 Hz	0.85 mm/s RMS
221 Hz	0.85 mm/s RMS
253 Hz	0.15 mm/s RMS
256 Hz	0.22 mm/s RMS
280 Hz	0.26 mm/s RMS
294 Hz	0.12 mm/s RMS
300 Hz	0.12 mm/s RMS
315 Hz	0.88 mm/s RMS
340 Hz	0.85 mm/s RMS
416 Hz	0.85 mm/s RMS
554 Hz	0.85 mm/s RMS
636 Hz	0.85 mm/s RMS
642 Hz	0.85 mm/s RMS

b,

**SCHENCK**  
VIBROPORT 30  
Frequenzanalyse

Datum: 90-07-19 23  
Ort: \_\_\_\_\_  
Maschine: BUA 16A 7  
Měststelle: \_\_\_\_\_ ③  
Betriebsart: \_\_\_\_\_

Bandbreite automatisch



Abbruch bei: 682 Hz

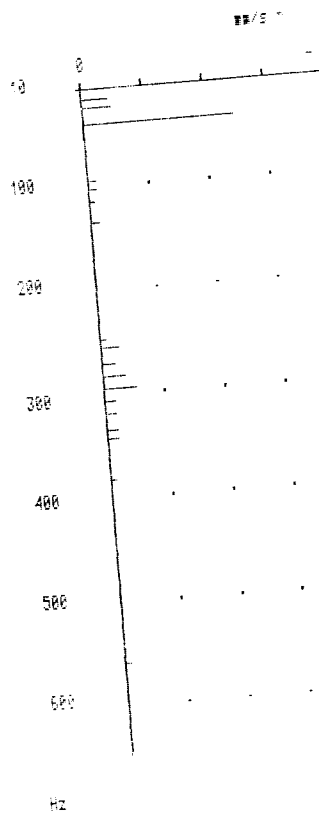
Frequenz	Meßwert
27.0 Hz	0.19 mm/s RMS
35.9 Hz	0.39 mm/s RMS
42.9 Hz	1.26 mm/s RMS
56.9 Hz	0.18 mm/s RMS
64.9 Hz	0.87 mm/s RMS
78.9 Hz	0.85 mm/s RMS
85.9 Hz	0.25 mm/s RMS
120 Hz	0.18 mm/s RMS
113 Hz	0.87 mm/s RMS
135 Hz	0.87 mm/s RMS
255 Hz	0.89 mm/s RMS
266 Hz	0.13 mm/s RMS
274 Hz	0.16 mm/s RMS
286 Hz	0.32 mm/s RMS
300 Hz	0.11 mm/s RMS
330 Hz	0.87 mm/s RMS
350 Hz	0.88 mm/s RMS
362 Hz	0.87 mm/s RMS
542 Hz	0.85 mm/s RMS
628 Hz	0.85 mm/s RMS
638 Hz	0.85 mm/s RMS

c,

**SCHENCK**  
VIBROPORT 30  
Frequenzanalyse

Datum: 90-07-19 25  
Ort: \_\_\_\_\_  
Maschine: BUA 16A 7  
Měststelle: \_\_\_\_\_ ⑤  
Betriebsart: \_\_\_\_\_

Bandbreite automatisch



Abbruch bei: 646 Hz

Frequenz	Meßwert
19.0 Hz	0.22 mm/s RMS
27.0 Hz	0.24 mm/s RMS
42.9 Hz	1.24 mm/s RMS
96.8 Hz	0.87 mm/s RMS
105 Hz	0.87 mm/s RMS
117 Hz	0.85 mm/s RMS
137 Hz	0.87 mm/s RMS
249 Hz	0.85 mm/s RMS
256 Hz	0.15 mm/s RMS
272 Hz	0.11 mm/s RMS
284 Hz	0.19 mm/s RMS
296 Hz	0.27 mm/s RMS
300 Hz	0.89 mm/s RMS
320 Hz	0.85 mm/s RMS
336 Hz	0.89 mm/s RMS
344 Hz	0.85 mm/s RMS
384 Hz	0.85 mm/s RMS
560 Hz	0.25 mm/s RMS

PŘÍLOHA D

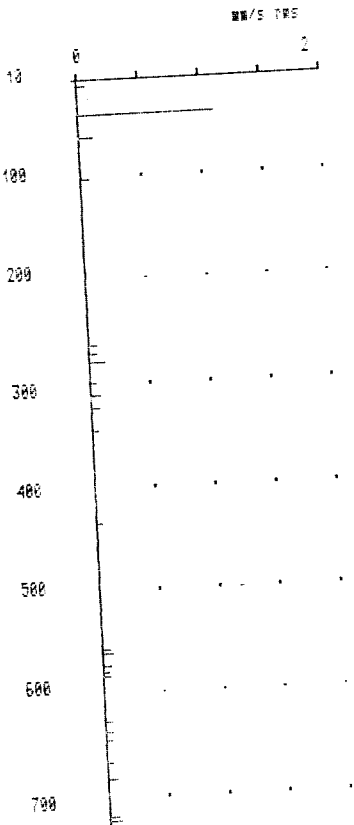
a,



VIBROPORT 30  
Frequenzanalyse

Datum: 90-07-19 26  
 Ort: \_\_\_\_\_  
 Maschine: BUA 16 A 5  
 Meßstelle: \_\_\_\_\_ ①  
 Betriebsart: \_\_\_\_\_

Bandbreite automatisch



Frequenz	Meßwert
15.0 Hz	0.07 mm/s RMS
42.9 Hz	1.12 mm/s RMS
64.9 Hz	0.12 mm/s RMS
105 Hz	0.07 mm/s RMS
254 Hz	0.07 mm/s RMS
272 Hz	0.07 mm/s RMS
280 Hz	0.13 mm/s RMS
300 Hz	0.05 mm/s RMS
312 Hz	0.08 mm/s RMS
324 Hz	0.07 mm/s RMS
346 Hz	0.05 mm/s RMS
436 Hz	0.05 mm/s RMS
558 Hz	0.07 mm/s RMS
562 Hz	0.09 mm/s RMS
574 Hz	0.07 mm/s RMS
590 Hz	0.05 mm/s RMS
584 Hz	0.05 mm/s RMS
628 Hz	0.06 mm/s RMS
636 Hz	0.06 mm/s RMS
646 Hz	0.05 mm/s RMS
660 Hz	0.05 mm/s RMS
684 Hz	0.08 mm/s RMS
720 Hz	0.08 mm/s RMS
724 Hz	0.10 mm/s RMS

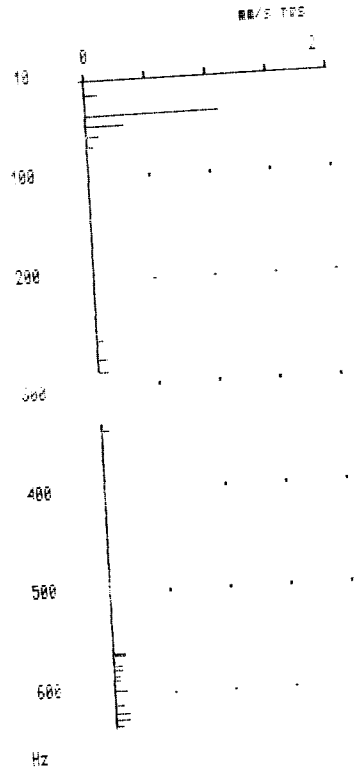
b,



VIBROPORT 30  
Frequenzanalyse

Datum: 90-07-19 28  
 Ort: \_\_\_\_\_  
 Maschine: BUA 16 A 5  
 Meßstelle: \_\_\_\_\_ ③  
 Betriebsart: \_\_\_\_\_

Bandbreite automatisch



Abbruch bei: 632 Hz

Frequenz	Meßwert
15.0 Hz	0.11 mm/s RMS
42.9 Hz	1.10 mm/s RMS
52.9 Hz	0.34 mm/s RMS
62.9 Hz	0.10 mm/s RMS
72.9 Hz	0.05 mm/s RMS
250 Hz	0.05 mm/s RMS
276 Hz	0.09 mm/s RMS
280 Hz	0.08 mm/s RMS
300 Hz	0.05 mm/s RMS
322 Hz	0.06 mm/s RMS
344 Hz	0.06 mm/s RMS
560 Hz	0.10 mm/s RMS
562 Hz	0.10 mm/s RMS
572 Hz	0.07 mm/s RMS
576 Hz	0.07 mm/s RMS
582 Hz	0.05 mm/s RMS
596 Hz	0.05 mm/s RMS
596 Hz	0.10 mm/s RMS
610 Hz	0.07 mm/s RMS
618 Hz	0.12 mm/s RMS
624 Hz	0.11 mm/s RMS
630 Hz	0.06 mm/s RMS

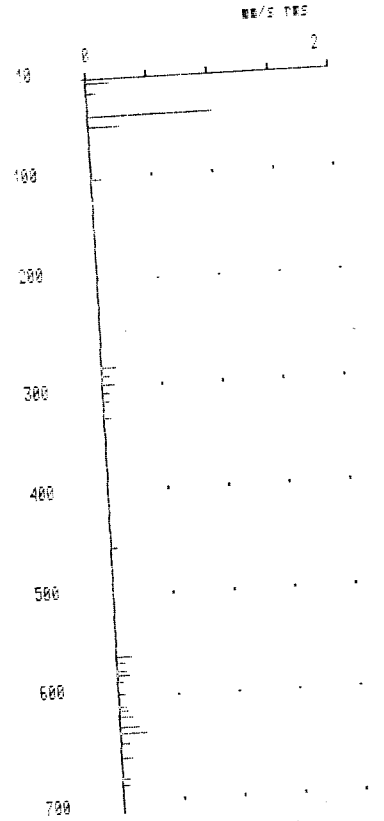
c,



VIBROPORT 30  
Frequenzanalyse

Datum: 90-07-19 30  
 Ort: \_\_\_\_\_  
 Maschine: BUA 16 A 5  
 Meßstelle: \_\_\_\_\_ ⑤  
 Betriebsart: \_\_\_\_\_

Bandbreite automatisch

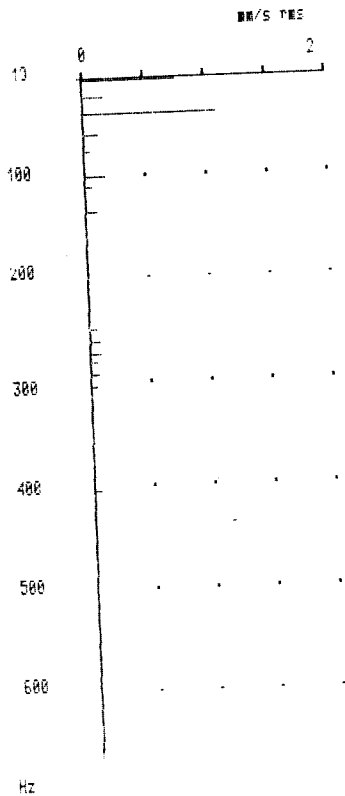


Frequenz	Meßwert
13.0 Hz	0.20 mm/s RMS
23.0 Hz	0.08 mm/s RMS
44.9 Hz	1.03 mm/s RMS
54.9 Hz	0.26 mm/s RMS
105 Hz	0.08 mm/s RMS
204 Hz	0.12 mm/s RMS
292 Hz	0.06 mm/s RMS
300 Hz	0.10 mm/s RMS
300 Hz	0.05 mm/s RMS
316 Hz	0.05 mm/s RMS
332 Hz	0.06 mm/s RMS
455 Hz	0.05 mm/s RMS
562 Hz	0.13 mm/s RMS
550 Hz	0.07 mm/s RMS
576 Hz	0.08 mm/s RMS
580 Hz	0.10 mm/s RMS
566 Hz	0.05 mm/s RMS
590 Hz	0.05 mm/s RMS
610 Hz	0.05 mm/s RMS
614 Hz	0.07 mm/s RMS
620 Hz	0.11 mm/s RMS
630 Hz	0.16 mm/s RMS
635 Hz	0.12 mm/s RMS
645 Hz	0.07 mm/s RMS
660 Hz	0.09 mm/s RMS
630 Hz	0.05 mm/s RMS
696 Hz	0.05 mm/s RMS

a, **SCHENCK**  
VIBROPORT 30  
Frequenzanalyse

Datum: 90-07-19 31  
Ort: \_\_\_\_\_  
Maschine: BUA 16A 2  
Meßstelle: \_\_\_\_\_ ①  
Betriebsart: rúčne

Bandbreite automatisch



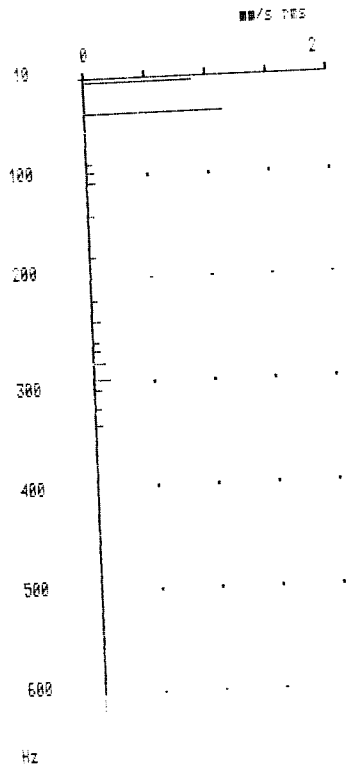
Abbruch bei: 660 Hz

Frequenz	Meßwert
11.9 Hz	0.77 mm/s RMS
27.0 Hz	0.17 mm/s RMS
42.9 Hz	1.10 mm/s RMS
62.9 Hz	0.12 mm/s RMS
79.9 Hz	0.05 mm/s RMS
103 Hz	0.17 mm/s RMS
113 Hz	0.06 mm/s RMS
137 Hz	0.09 mm/s RMS
251 Hz	0.06 mm/s RMS
252 Hz	0.00 mm/s RMS
274 Hz	0.09 mm/s RMS
282 Hz	0.06 mm/s RMS
294 Hz	0.07 mm/s RMS
306 Hz	0.05 mm/s RMS
406 Hz	0.05 mm/s RMS

b, **SCHENCK**  
VIBROPORT 30  
Frequenzanalyse

Datum: 90-07-19 33  
Ort: \_\_\_\_\_  
Maschine: BUA 16A 2  
Meßstelle: \_\_\_\_\_ ③  
Betriebsart: rúčne

Bandbreite automatisch



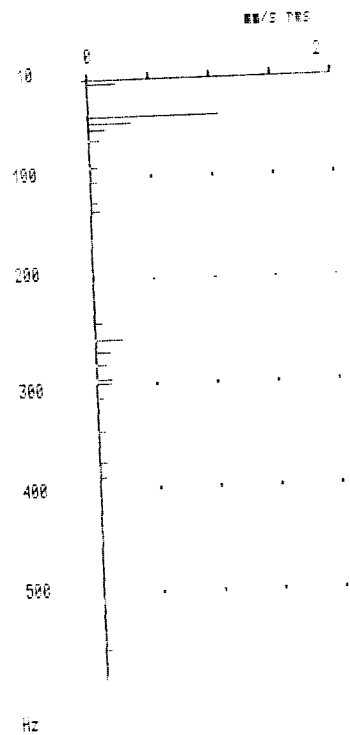
Abbruch bei: 602 Hz

Frequenz	Meßwert
13.0 Hz	0.09 mm/s RMS
42.9 Hz	1.14 mm/s RMS
90.8 Hz	0.05 mm/s RMS
98.8 Hz	0.06 mm/s RMS
109 Hz	0.07 mm/s RMS
141 Hz	0.05 mm/s RMS
181 Hz	0.05 mm/s RMS
223 Hz	0.05 mm/s RMS
243 Hz	0.07 mm/s RMS
262 Hz	0.05 mm/s RMS
270 Hz	0.06 mm/s RMS
282 Hz	0.10 mm/s RMS
299 Hz	0.14 mm/s RMS
308 Hz	0.05 mm/s RMS
326 Hz	0.05 mm/s RMS
342 Hz	0.05 mm/s RMS

c, **SCHENCK**  
VIBROPORT 30  
Frequenzanalyse

Datum: 90-7-19 35  
Ort: \_\_\_\_\_  
Maschine: BUA 16A 2  
Meßstelle: \_\_\_\_\_ ⑤  
Betriebsart: rúčne

Bandbreite automatisch



Abbruch bei: 592 Hz

Frequenz	Meßwert
13.0 Hz	0.24 mm/s RMS
44.9 Hz	1.07 mm/s RMS
50.9 Hz	0.35 mm/s RMS
56.9 Hz	0.15 mm/s RMS
56.9 Hz	0.08 mm/s RMS
92.9 Hz	0.05 mm/s RMS
107 Hz	0.05 mm/s RMS
127 Hz	0.05 mm/s RMS
135 Hz	0.07 mm/s RMS
243 Hz	0.06 mm/s RMS
258 Hz	0.02 mm/s RMS
270 Hz	0.12 mm/s RMS
282 Hz	0.03 mm/s RMS
296 Hz	0.12 mm/s RMS
308 Hz	0.12 mm/s RMS
314 Hz	0.05 mm/s RMS
346 Hz	0.05 mm/s RMS
376 Hz	0.05 mm/s RMS
396 Hz	0.05 mm/s RMS
556 Hz	0.05 mm/s RMS