

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

VLIV VIBRACÍ BROUSICÍHO NÁSTROJE NA STRUKTURU  
BROUŠENÉHO POVRCHU

DIZERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. PETR LUKOVICS



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A  
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND  
ROBOTICS

## VLIV VIBRACÍ BROUSICÍHO NÁSTROJE NA STRUKTURU BROUŠENÉHO POVRCHU

INFLUENCE OF GRINDING TOOL VIBRATION ON THE GROUND SURFACE TEXTURE

DIZERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. PETR LUKOVICS

ŠKOLITEL  
SUPERVISOR

Doc. Ing. JIŘÍ PERNIKÁŘ, CSc.

BRNO 2013



## **ABSTRAKT**

Zajištění vysoké jakosti výrobků vyžaduje moderní a přesné výrobní stroje, technologie a kvalitní zařízení průmyslové metrologie. Dizertační práce řeší problematiku vlivu změny technologických podmínek při broušení na parametry struktury povrchu, uvádí přesnost měřících metod, hodnotí pomocí laserinterferometrické a piezoelektrické měřící metody kmitání technologické soustavy a s použitím statistických metod zpracovává korelační vztahy mezi amplitudou kmitání a parametry struktury povrchu. Dále provádí predikci vlivu vstupních parametrů na výstupní parametry pro delší časové období.

## **ABSTRACT**

Ensuring high quality products requires advanced and precise production equipment, technology and high quality of industrial metrology equipment. Thesis solves the problem of influence of variable process conditions during grinding on surface texture parameters, provides precision of measurement methods, assessed by laser interferometry measurement methods and piezoelectric measurement of vibration of technological equipment and processes using statistical methods the correlation between the amplitude of oscillation and on surface texture parameters. Further it provides the prediction of the impact of input parameters to the output parameters of the technological process for a long-term perspective.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vibrace, Laserinterferometrie, struktura povrchu, broušení

## **KEY WORDS**

Vibration, Laserinterferometrie, Surface texture, Grinding

LUKOVICS, P. Vliv vibrací broušicího nástroje na strukturu broušeného povrchu:  
Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta  
strojního inženýrství, 2013. 127 p.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně, pod odborným vedením pana Doc. Ing. Jiřího Pernikáře, CSc.

Zlín 2013

---

Ing. Petr Lukovics

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Doc. Ing. Jiřímu Pernikářovi, CSc. za cenné rady, připomínky a vstřícné poskytnutí potřebných informací při vypracování dizertační práce. Též bych chtěl poděkovat firmě VOJUS a.s. Považská Bystrica a zaměstnancům Ústavu výrobního inženýrství fakulty technologické, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně za poskytnutí technologického zázemí při zpracování experimentální části práce.

## OBSAH

ÚVOD .....	9
1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE .....	10
2 KMITÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH SOUSTAV [8,13,15, 22].....	11
2.1 Laserové měřicí systémy [8, 31, 37, 46] _____	14
2.1.1 <i>Laserová interferometrie</i> _____	14
2.1.2 <i>Princip Michelsonova interferometru</i> _____	15
2.2 Úvod do vibrační analýzy _____	16
2.2.1 <i>Základní veličiny mechanického kmitání</i> _____	18
2.3 Metody hodnocení vibrací _____	19
2.3.1 <i>Analýza signálu v časové oblasti</i> _____	19
2.3.2 <i>Frekvenční analýza signálu</i> _____	20
2.4 Signály a jejich rozdělení _____	22
2.4.1 <i>Digitalizace signálů</i> _____	24
2.4.2 <i>Aliasing</i> _____	24
2.4.3 <i>Amplitudové popisy signálů</i> _____	26
2.4.4 <i>Spektrální analýza pomocí fourierovy transformace</i> _____	28
2.4.5 <i>Hodnocení kmitání technologických soustav</i> _____	30
2.5 Regresní analýza [5,11,14,16,27, 38, 44] _____	31
2.5.1 <i>Cíle regresní analýzy</i> _____	31
2.5.2 <i>Volba regresní funkce</i> _____	32
2.5.3 <i>Lineární regrese</i> _____	33
2.5.4 <i>Metoda nejmenších čtverců</i> _____	34
2.5.5 <i>Regresní koeficient</i> _____	35
2.5.6 <i>Index determinace</i> _____	35
2.5.7 <i>Nelineární regrese</i> _____	36
2.5.8 <i>Intervaly spolehlivosti pro parametry regresní funkce a         regresní odhady</i> _____	40
2.5.9 <i>Aplikace regresní analýzy v rámci řešení</i> _____	42
3 METODY HODNOCENÍ JAKOSTI [4, 9, 12, 17, 28, 30, 34, 36]44	

3.1	Pravidla pro hodnocení struktury povrchu_____	53
3.2	Postup pro kontrolu a měření parametrů profilu drsnosti dotykovými přístroji_____	55
4	PODMÍNKY EXPERIMENTÁLNÍHO ZKOUMÁNÍ TECHNOLOGICKÉHO PROCESU.....	57
4.1	Použité výrobní stroje _____	57
4.2	Brousicí kotouče [10, 24, 45]_____	58
	4.2.1 <i>Elektrokorund</i> _____	58
	4.2.2 <i>Diamant</i> _____	59
	4.2.3 <i>Kubický nitrid bóru</i> _____	60
	4.2.4 <i>Vyvažování brousicích kotoučů [1, 19, 26, 45]</i> _____	61
4.3	Použité měřicí zařízení_____	62
4.4	Materiály vzorků _____	63
	4.4.1 <i>Materiál 100Cr6+QW (ČSN 4 14109.4)</i> _____	63
	4.4.2 <i>Materiál X210Cr12 (ČSN 4 19436.4)</i> _____	64
4.5	Laser [37, 46]_____	65
	4.5.1 <i>Kompenzační jednotka XC-80</i> _____	65
	4.5.2 <i>Měřicí optika s montáží</i> _____	66
	4.5.3 <i>Technické příslušenství laserového systému</i> _____	66
5	HODNOCENÍ JAKOSTI MĚŘICÍCH SYSTÉMŮ VIBRACÍ.....	67
5.1	Statistické hodnocení výsledků experimentů_____	70
6	VLIV VIBRACÍ NA JAKOST OBROBENÝCH PLOCH .....	77
6.1	Analýza dat získaných při experimentech _____	78
6.2	Vliv změny hloubky úběru_____	79
	6.2.1 <i>Závislost průměrné aritmetické úchylnosti profilu (Ra) na hloubce úběru</i> _____	79
	6.2.2 <i>Závislost největší výšky profilu (Rz) na hloubce úběru</i> _____	81
	6.2.3 <i>Závislost hloubky úběru na amplitudě 1. harmonické frekvence</i> _____	83
	6.2.4 <i>Stanovení Pearsonova koeficientu korelace</i> _____	85

6.3	Vliv změny posuvové rychlosti .....	86
6.3.1	Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu ( $R_a$ ) na posuvové rychlosti .....	86
6.3.2	Závislost největší hloubky profilu ( $R_z$ ) na posuvové rychlosti .....	88
6.3.3	Závislost materiálového podílu ( $R_{mr}$ ) na rychlosti posuvu .....	90
6.3.4	Závislost posuvové rychlosti na amplitudě 1. harmonické frekvence .....	91
6.3.5	Stanovení Pearsonova koeficientu korelace .....	93
7	MĚŘENÍ TECHNOLOGICKÝCH CHARAKTERISTIK V ČASOVÉM SLEDU .....	95
7.1.1	Závislost $R_a$ , $R_z$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $v_f$ a proměnné $a_p$ v časovém sledu .....	96
7.1.2	Závislost $R_a$ , $R_z$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $a_p$ a proměnné $v_f$ v časovém sledu .....	99
7.2	časové hodnocení naměřených dat .....	102
7.2.1	Závislost $R_a$ a $R_z$ na hloubce úběru v čase tří let .....	103
7.2.2	Závislost $R_a$ a $R_z$ na posuvové rychlosti v čase tří let .....	104
7.3	Predikce technologických charakteristik čtvrtého a pátého roku .....	106
7.3.1	Hodnocení parametru $R_a$ .....	107
7.3.2	Hodnocení největší výšky profilu .....	108
7.3.3	Hodnocení amplitudy 1. harmonické frekvence .....	109
7.3.4	Predikce průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu .....	111
7.3.5	Predikce největší výšky profilu drsnosti .....	112
7.3.6	Predikce amplitudy 1. harmonické frekvence .....	113
8	ZÁVĚR .....	115
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	117
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	121
	SEZNAM TABULEK .....	126

## ÚVOD

Poslední dobou se klade stále větší důraz na životní a pracovní prostředí, které nás obklopuje. Mnoho států směřuje své úsilí ke snížení mechanického kmitání působícího na člověka. Nežádoucí mechanické kmitání však působí nejen na člověka, ale i na stroje a nepříznivě ovlivňuje jejich životnost a spolehlivost. Pro provádění účinných opatření ke zvýšení životnosti, spolehlivosti či snížení škodlivosti kmitání je nutné mechanické kmitání popsat, změřit a následně měření vyhodnotit a zanalyzovat.

Moderní průmyslová výroba klade veliký důraz na jakost výrobků. Zajištění vysoké kvality vyžaduje moderní a přesné výrobní stroje, kvalitní zařízení průmyslové metrologie a diagnostických zařízení. Na trhu existuje široká nabídka odměřovacích a kalibrovacích systémů. Jedná se například o různé sondy a snímače, které kontrolují a zlepšují statickou a dynamickou přesnost výrobních strojů, souřadnicových měřicích strojů a dalších pohybových systémů s nároky na přesné polohování. Výrobci těchto zařízení mnohdy dodávají kompletní měřicí systémy dle požadavků zákazníka.

Technická diagnostika je velmi významným oborem nejen v technických aplikacích. Jednou z nejvýznamnějších částí technické diagnostiky je vibrodiagnostika. Nachází uplatnění při hodnocení nejrůznějších rotačních a jiných pohybujících se uzlů strojů, vyznačujících se mechanickým chvěním.

Vibrodiagnostika se zabývá zjišťováním technického stavu strojů, zařízení, přístrojů, převážně bezdemontážními a nedestruktivními postupy. Dokáže odhalit skutečný stav zařízení a tím umožnit operativní plánování údržby, minimalizovat preventivní opravy a předcházet havarijním odstávkám, a to vše při plném provozu bez omezení výroby. Dobrý technický stav zařízení je totiž důležitý pro správné vykonávání funkce a plnění stanovených podmínek, pro které je výrobní zařízení určeno.

Je proto nutné zaměřit se na hodnocení možnosti použití dotykové a bezdotykové vibrační diagnostiky při predikci jakosti výrobků vyráběných technologií broušení. Technologie broušení je jemná dokončovací metoda obrábění s velkým počtem vstupních parametrů, výrazně ovlivňujících jakost a spolehlivost výrobku. Proto je nutné určit korelační vztahy mezi technologickými podmínkami broušícího procesu a charakteristikami jakosti broušených ploch. Z metod bezdotykové vibrodiagnostiky se jeví technicky zajímavé laserinterferometrie, z dotykových způsobů snímání kmitání jsou použitelné levnější piezoelektrické snímače kmitání. V současné době vyžadují tyto metody vibrodiagnostiky vysoký stupeň automatizace, složité statistické softwary a použití výpočetní techniky.



## 1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

V technické praxi jsou kladeny vysoké nároky na jakost výrobků. Je proto nutné věnovat zvýšenou pozornost měřicím metodám a technologiím, které hodnotí a významně ovlivňují jakost a spolehlivost výrobků. Pro splnění těchto požadavků si předložená doktorská dizertační práce klade za cíl zaměřit se na tyto oblasti výzkumu:

1. Základy teorie kmitání technologických soustav. Možnosti použití matematické teorie snímání vibrací a regresní analýzy při hodnocení experimentů.
2. Hodnocení parametrů struktury povrchu – návrh metodiky hodnocení jakosti funkčních ploch při experimentech.
3. Studium možnosti použití a porovnání přesnosti laserových měřicích systémů (laserové interferometrie) a piezoelektrických systémů při snímání kmitání technologických zařízení.
4. Kvantifikace a statistické hodnocení vlivu technologických podmínek na jakost funkčních ploch hodnocených pomocí vybraných parametrů struktury povrchu dle ČSN EN ISO 4287 a 4288. Intenzifikace technologických podmínek udává produktivitu procesu broušení. Na základě výsledků experimentů lze stanovit mezní hodnoty parametrů struktury povrchu. Tyto výsledky dále umožní stanovit optimální technologické podmínky procesu broušení.
5. Určení, matematický a statistický popis vlivu vibrací na jakost funkčních ploch hodnocených pomocí vybraných parametrů struktury povrchu dle ČSN EN ISO 4287 a 4288. Hloubka úběru, posuvová a řezná rychlost jsou parametry, které určují výkonnost broušení. Změnou těchto technologických podmínek se mění amplituda kmitání technologických zařízení. Na základě výsledků tohoto výzkumu je možné optimalizovat technologické podmínky s cílem zajištění nejvyšší produktivity, při co nejmenších parametrech vibrací.
6. Predikce stavu výrobních zařízení z hlediska změn parametrů kmitání a dosažitelné jakosti funkčních ploch. Určení vlivu dlouhodobého používání strojů a tím souvisejícího opotřebení na jakost funkčních ploch při hrubovacím a dokončovacím broušení. Experimenty jsou prováděny na stroji ve výrobním podniku v dvousměnném provozu postupně během tří let a umožní optimalizaci technologického procesu.

## 2 KMITÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH SOUSTAV [8,13,15, 22]

Technologická soustava, tj. soustava stroj-nástroj-obrobek-upínač, a tuhost této soustavy do značné míry ovlivňuje přesnost výrobků. V procesu obrábění vyniká chvění, které má při intenzivním stupni (veliké amplitudě kmitání) tyto negativní účinky:

- na obrobeném povrchu se objeví vlnitost, zvětšují se tvarové odchylky, zhoršuje se struktura povrchu
- řezné nástroje se rychleji otupují a zvláště břity z křehkých řezných materiálů (keramické nástroje, broušící zrna), se vylamují
- opotřebení součástí stroje se urychluje, spojení součástí se porušuje a někdy dojde k předčasnému porušení dílů následkem únavy materiálu
- vysoký tón nebo silný hluk zhoršují pracovní prostředí, existenci chvění lze identifikovat podle hluku, hmatem, měřením a zrakem na obrobeném povrchu

Tyto nepříznivé jevy je třeba měřit, hodnotit a v neposlední řadě omezit jejich vliv.

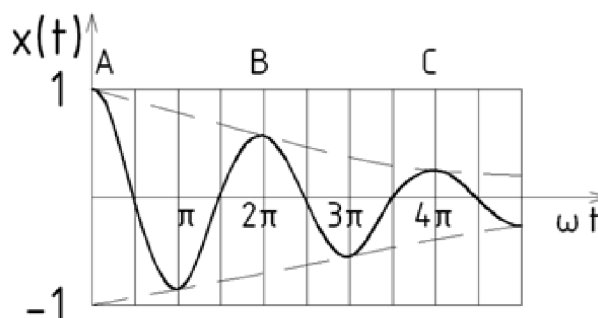
V technologické soustavě mohou vzniknout tyto druhy kmitání:

- vlastní kmitání
- vynucené kmitání
- samobuzené kmitání

### Vlastní kmitání

Technologická soustava je tvořena skupinou hmotných a pružných těles, různým způsobem spolu spojených a při kmitání navzájem na sebe působících. Mluvíme-li o vlastních kmitech v technologické soustavě, máme na mysli kmitání některé části, nebo několika částí soustavy vlastními kmity určenými vlastní frekvencí. Takové kmitání může být vyvoláno rázem, např. záběrem nástroje nebo zapnutím spojky, změnou směru otáček i směru pohybů.

Vlastní kmity se udržují působením pružných sil a vlivem odporů se utlumí (viz Obr. 2.1.), proto lze obvykle zanedbat jejich vliv na obrábění.



Obr. 2.1. Časový průběh vlastních kmitů

Značný vliv na tlumení vlastních kmitů má materiál dílů technologických zařízení.

### Vynucené kmitání

Vynucené kmitání vznikne, působí-li na kmitající soustavu periodicky proměnlivá síla. Charakteristickým znakem je to, že se frekvence vynuceného kmitání shoduje s frekvencí budící síly. Pohybovou rovnici vynuceného kmitání pak lze uvést ve tvaru:

$$mx'' + kx' + cx = F(t) \quad (1)$$

kde  $F(t)$  značí periodicky proměnlivou budící sílu.

Fyzikální model translační kmitové soustavy vynuceně kmitají o jednom stupni volnosti s tlumením a časový průběh vynuceného kmitání je znázorněn na obr. 1. 2.

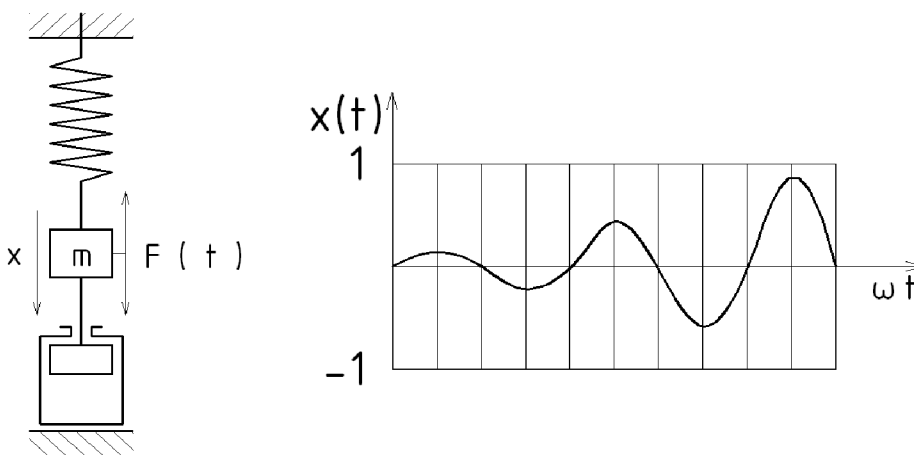
Při bezprostředním působení rušivé síly kosinusového průběhu pravou stranu pohybové rovnice píšeme ve tvaru:

$$F(t) = F_0 \cos \omega t, \quad (2)$$

kde  $F_0$  je maximální velikost síly  $F$ , tj. její amplituda a  $\omega$  je kruhová frekvence síly  $F$ .

V komplexní formě vyjádříme pravou stranu pohybové rovnice:

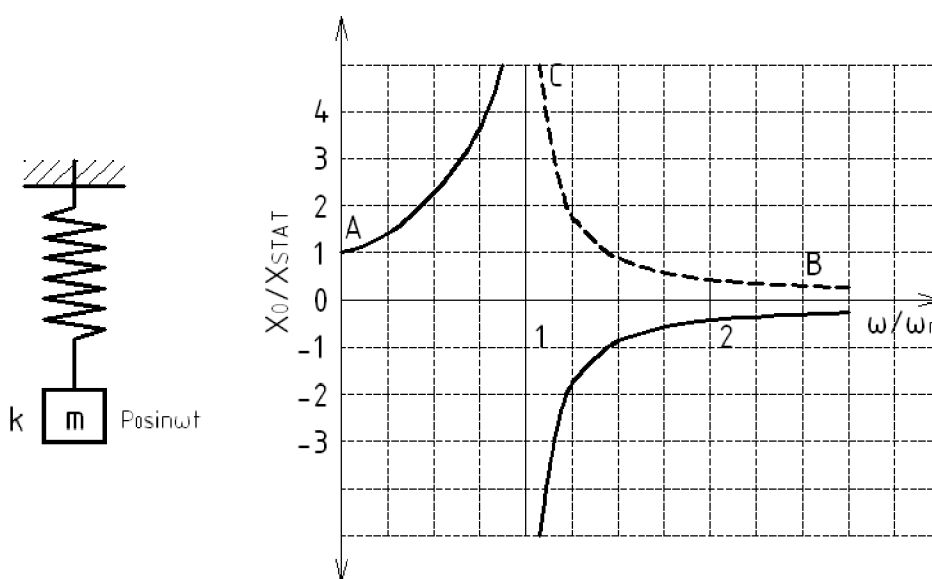
$$F(t) = F e^{i\omega t} \quad (3)$$



Obr. 2.2. Fyzikální model a časový průběh vynuceného kmitání

Klidné těleso, na které začne působit budící síla, se rozkmitá (Obr. 2.2.) a amplituda kmitání se ustálí na určité hodnotě, úměrné amplitudě budící síly. Při

konstantní hodnotě frekvence vlastních kmitů  $f$  se mění amplituda vynucených kmitů, mění-li se frekvence budící síly. Při rezonanci, kdy frekvence budící síly je rovna frekvenci vlastních kmitů, je teoreticky amplituda vynucených kmitů nekonečně velká (rezonanční jev), je-li soustava bez tlumení (Obr. 2.3). Jelikož každá kmitající soustava má tlumení, bude mít rezonanční amplituda konečnou hodnotu. Budící síla nemusí mít kosinusový nebo sinusový průběh, aby vyvolala periodické kmitání, ale musí mít periodický charakter.



Obr. 2.3. Rezonanční jev

Vynucené kmitání technologických soustav může mít různé příčiny. V odborné literatuře se uvádí [8, 22, 40]:

- vynucené kmitání pramenící z nedokonalosti technologické soustavy, kterou je nevyváženost rotujícího nástroje, obrobku, vřetene, ozubených kol, spojky, rotoru elektromotoru, vratných nebo přímočarých pohybů a podobně
- vynucené kmitání vyvolané oddělováním třísky, příčina kmitání je ve vlastním řezném procesu, při kterém se periodicky přerušuje nebo mění řezná síla, při broušení vzniká vynucené kmitání vlivem periodického házení obrobku, broušícího kotouče a statisticky rozložených broušících zrn; lze konstatovat, že vynucené kmity, vyvolané technologickým procesem, nepříznivě ovlivní jakost obrobeného povrchu. Ukazuje se, že kmity vyvolané vlastním řezáním mají značnou amplitudu, která se zákonitě kopíruje na povrch výrobků, a tím výrazně ovlivňuje i integritu povrchu
- vynucené kmitání přenášené z okolí technologické soustavy, jsou to kmity přenášené na obráběcí stroj z okolí základen výrobního stroje nebo od manipulačních, transportních či jiných zařízení.

### **Samobuzené kmitání**

Samobuzené kmity vznikají mezi obrobkem a nástrojem bez periodického vnějšího budicího účinku a projevují se hlukem (drnčení) a stopami chvění na obrobeném povrchu. Technologická soustava je uvedena do samobuzeného kmitání prvním impulsem, který vyvolá výchylku z rovnovážné polohy nástroje a obrobku a vyvolané samobuzené kmitání bude probíhat bez přívodu energie z vnějšku a jeho periodická proměnlivost bude závislá pouze na vlastním kmitavém procesu. Podle nepotvrzených názorů lze první impuls spatřovat v periodickém uvolňování nárůstku, v periodické tvorbě třísky, v nárazu nástroje do tvrdšího materiálového zrna, ve změně směru řezné síly, změně součinitele tření v závislosti na rychlosti pohybu apod. Energie, převáděná na kmitající systém, nahrazuje ztráty vzniklé tlumením. Frekvence kmitání je určena vlastnostmi kmitajícího systému a je velmi blízká vlastní frekvenci některého rozhodujícího členu systému.

Samobuzené kmitání při obrábění může být vyvoláno činiteli, kteří nesouvisí s procesem řezání, anebo činiteli, kteří s ním přímo souvisí. Z hlediska technologie výroby součástí má značný význam samobuzené kmitání vyvolané řezným procesem. Toto kmitání se objevuje jen v určitém rozmezí technologických podmínek a změnou těchto podmínek lze stabilizovat proces řezání. Nebezpečí vzniku kmitání klesá se zvyšováním tuhosti částí technologické soustavy. Tyto problémy jsou řešeny v rámci konstrukce výrobních strojů.

V práci se zaměříme na hodnocení vlivu technologických podmínek na kmitání technologické soustavy a na otázky určení vlivu amplitudy kmitání na nedokonalost povrchu výrobků.

## **2.1 LASEROVÉ MĚŘÍCÍ SYSTÉMY [8, 31, 37, 46]**

Lasery nacházejí v metrologii velmi široké uplatnění. Objekty mohou být vzdálené od měřicího přístroje řádově stovky metrů při zachování vysoké přesnosti měření. Využívají fyzikální principy optických měřidel vzdálenosti, liší se tím, že jako zdroj světla používají frekvenčně stabilizovaný laser. V praxi se prosadily dvě základní řešení:

- snímání vlastností optického signálu,
- interference dvou koherentních paprsků

### **2.1.1 Laserová interferometrie**

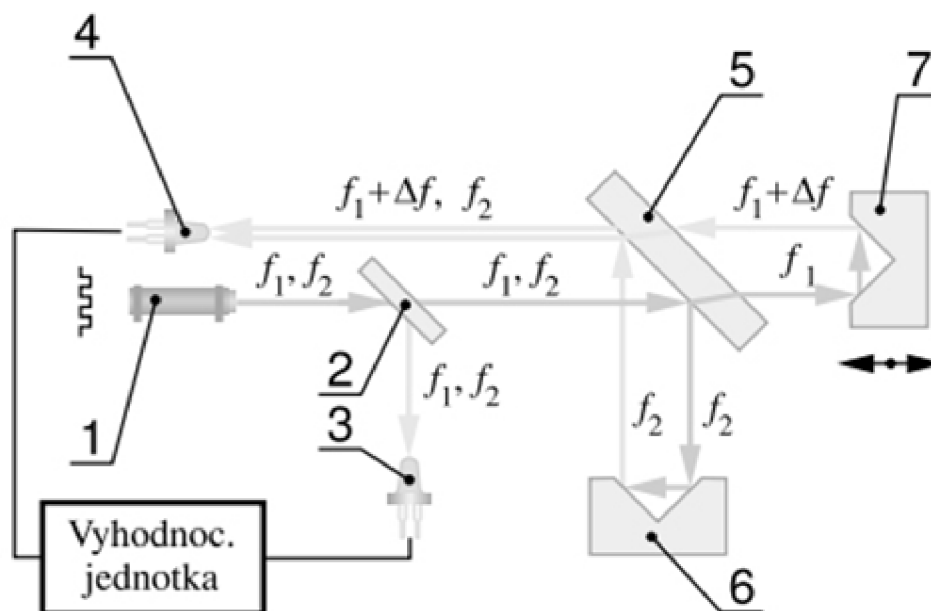
Princip laserové interferometrie je založen na interferenci světla. Interferometry, které se používají k měření délek, se nazývají interferenční komparátory. K měření indexů lomu u plynů a kapalin se pak nazývají interferenční refraktometry. Interferenční spektroskopy se zase používají k určení jemné struktury spektrálních

čar. Z interferenčních komparátorů je pro většinu měření nejvhodnější Michelsonův komparátor. Jeho princip popsal poprvé roku 1881 americký vědec Albert Abraham Michelson (1852-1931).

## 2.1.2 Princip Michelsonova interferometru

Zdrojem světla bývá většinou dvoufrekvenční plynový helium-neonový laser. Ten emituje světelné paprsky na dvou velmi blízkých frekvencích. Tyto dva paprsky jsou navzájem ortogonálně polarizované, což umožňuje jejich rozdělení pomocí polarizačního filtru. Tím dostaneme referenční a měřicí paprsek, svírající spolu pravý úhel. Referenční paprsky  $f_1$  a  $f_2$  dopadají na fotocitlivý prvek 3, měřicí paprsky pokračují na polopropustné zrcadlo 5. Zde se měřicí paprsky dělí na dvě části. Jedna část s frekvencí  $f_2$  se odráží od koutového odražeče 6 a po odraze od polopropustného zrcadla 5 se vrací na fotocitlivý prvek 4. Druhá část s frekvencí  $f_1$  prochází přes polopropustné zrcadlo a dopadá na koutový odražeč 7, který je upevněn na měřeném objektu. [8, 20, 31]

Přitom dochází k frekvenčnímu posuvu tohoto paprsku na hodnotu  $f_1 + \Delta f$  a i tento paprsek dopadá na fotocitlivý prvek 4. Na výstupu vyhodnocovací jednotky vzniká výstupní signál, který je přímo úměrný změně frekvence  $\Delta f$ . [18]



Obr. 2.4. Schéma laserového interferometru

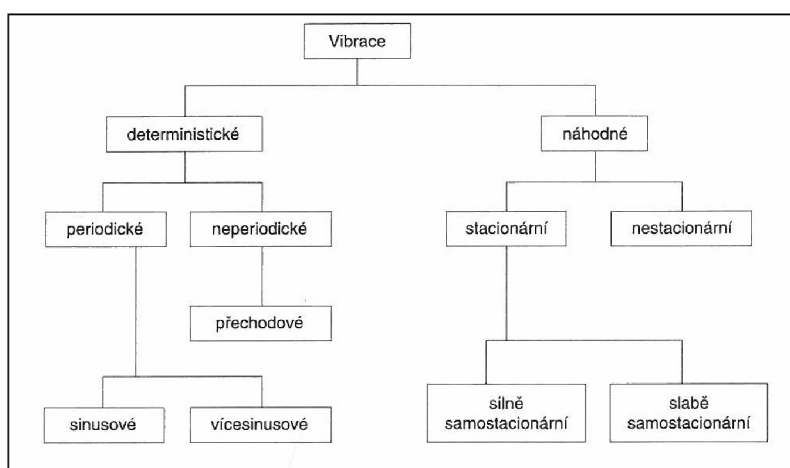
## 2.2 ÚVOD DO VIBRAČNÍ ANALÝZY

Každé strojní zařízení v technické praxi je tvořeno soustavou těles, která jsou charakterizována fyzikálními vlastnostmi. Jednou z takových vlastností je pružnost. Působení zdrojů energie na pružná tělesa v nich může vyvolat kmitání.

Mechanické kmitání je dynamický jev, při němž hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy. Rovnovážná poloha tělesa je podmíněna nulovou hodnotou působících sil a naopak kmitání tělesa je vždy způsobeno budící silou, která může působit jak externě tak interně. Termín kmitání je ekvivalentní pojmu vibrace (dle ČSN ISO 2041 „Vibrace a rázy – Slovník”).

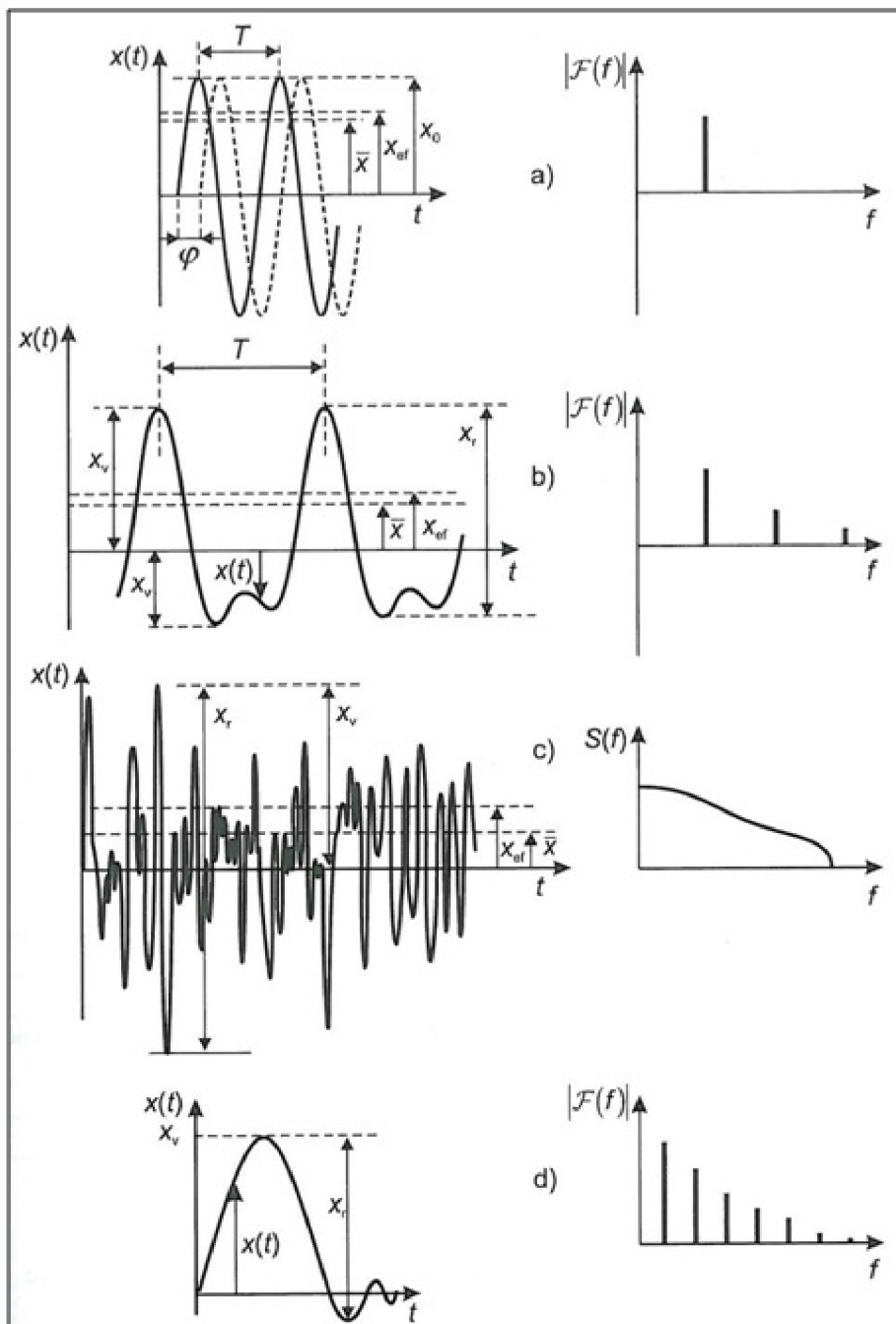
Vibrace stroje jsou úzce vázány s dynamickým namáháním stroje a technickým stavem hřídelů, ložisek, převodovek, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, nevyváženosti rotujících dílů, vůlemi v kluzných ložiscích, opotřebením, únavou materiálů, vznikajícími trhlinami, korozí a jiné. Vibrace jsou buzeny jak rotujícími tak přímočaře se pohybujícími tělesy (včetně pohybu kapalin a plynů). Mechanické vibrace jsou také způsobeny rázy, při nichž střetem dvou navzájem se pohybujících těles (například pohybem poškozené strojní části, kuličkou v ložisku apod.) dochází k náhlé změně gradientu určující veličiny vibrací. Ráz působí přechodový kmitavý jev generující v tělese postupnou rázovou vlnu. V technické diagnostice se používá uměle generovaný ráz například diagnostickým kladívkem se zabudovaným senzorem síly.

Dle časových změn veličin mají vibrace charakter jevu periodického, neperiodického nebo náhodného a rozdělují se do dvou hlavních kategorií, znázorněných na *Obr. 2.5*.



*Obr. 2.5. Rozdělení vibrací dle kategorií*

Některé kategorie vibrací jsou znázorněny (Obr. 2.6.). Vlevo se nacházejí časové průběhy veličin vibrací a vpravo k nim odpovídající spektrální veličiny.



Obr. 2.6. Časové průběhy vibrací a odpovídající spektrální veličiny  
 a) harmonický, b) složený, c) náhodný, d) přechodový



## 2.2.1 Základní veličiny mechanického kmitání

Určujícími veličinami při měření vibrací jsou výchylka, rychlost a zrychlení hmotného bodu v čase. Ucelený přehled vybraných veličin a vztahů mechanických vibrací je znázorněn (Tab. 1.).

Tab. 1. Přehled vybraných veličin a vztahů ve vibrodiagnostice

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

## 2.3 METODY HODNOCENÍ VIBRACÍ

Kmitání (vibrace, chvění) stroje je velmi citlivým ukazatelem namáhání, technického stavu stroje a jeho funkce. Týká se to zejména ložisek, hřídelů, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, nevyvážených rotačních součástí, vřtí rotačních součástí a jiné. Tato skutečnost je masivně využívána pro monitorování stavu strojů a jejich diagnostiku. Nejjednodušší formou je realizace širokopásmových měření celkových úrovní vibrací. Většinou v definovaném rozsahu podle platných norem, či doporučení výrobců a uživatelů pro dané konkrétní zařízení. Více informací můžeme získat na základě tzv. kmitočtové analýzy. Zde se využívají složitější metodiky a přístrojové vybavení pro získání charakteristického kmitočtového spektra vibrací stroje. Měření se provádí systematicky, cíleně, obvykle nejprve na stroji v bezvadném technickém stavu s dalšími opakováními s časovou periodou danou konkrétním typem stroje a druhem jeho provozu. Jak se postupně mění (zhoršuje) technický stav stroje, mění se i charakteristické kmitočtové spektrum, resp. Především jeho jednotlivé složky mající vztah k jeho jednotlivým částem (ozubená kola, soukolí, hřídele, ložiska, rotory, setrvačníky, klouby a jiné). Na základě sledování a analýzy těchto změn spekter lze bezdemontážním způsobem velmi účinně diagnostikovat, detekovat, identifikovat, lokalizovat a popř. prognózovat vznikající poruchu [31, 40, 41].

### 2.3.1 Analýza signálu v časové oblasti

Je založena na vyhodnocení parametrů časových průběhů signálů určujících veličin (výchyly, rychlosti, zrychlení). Někdy se také označuje časová analýza jako „časová historie“. V časové oblasti lze snadno vyhodnotit okamžité střední a efektivní hodnoty signálu nebo obálky signálu. V případě převládající náhodné složky signálu (tzv. náhodné vibrace) lze pro analýzu aplikovat vybrané statistické výpočty deskriptorů jako je směrodatné odchylna, koeficient špičatosti, koeficient šikmosti, činitel výkmitu a řada dalších. Analýza signálu v časové oblasti je dále vhodná pro přechodové jevy, jako jsou např. rozběhy a doběhy motorů, rázové odezvy, nestacionární signály s proměnnou frekvencí, při nelineárních parametrech systému, při proměnné tuhosti kmitajícího objektu nebo proměnném tlumení systému během časové periody signálu. Pokročilé metody časové analýzy využívající číslicovou filtraci, integrální nebo vlnkovou transformaci umožňují lokalizovat místo závady nebo animovat módy kmitů.

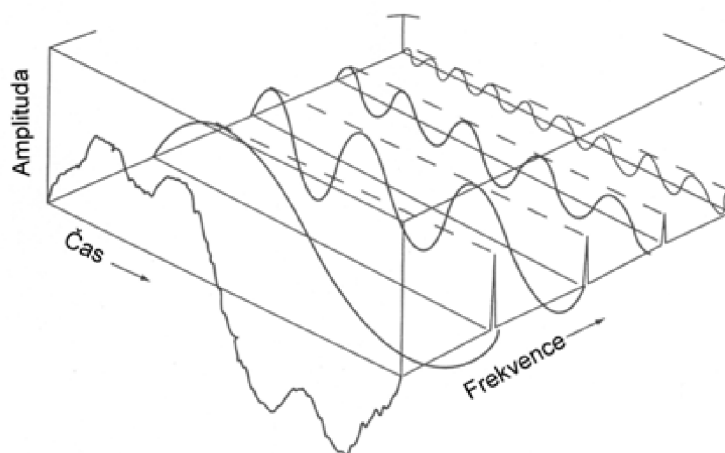
Analýza v čase je vhodná tehdy, existuje-li jediný nebo alespoň dominantní zdroj vibrací, neboť jinak dochází ke ztrátě diagnostické informace v šumu signálu způsobeném přenosem vibrací z různých oblastí strojího komplexu a možnost lokalizace příčiny vibrací stroje je pak velmi omezena [20, 31, 40, 41].

## Veličiny popisující časový signál

- Vrcholová hodnota (PeakLevel –  $X_{\text{peak}}$ , popř.  $\text{speak}$ ) udává maximální amplitudu a obvykle se využívá pro popis mechanických rázů, resp. Dalších relativně krátkodobých jevů.  $X_{\text{peak}}$  však pouze indikuje přítomnost špičky, ale nese informace o časovém průběhu ani o kmitočtovém složení hodnocených vibrací.
- Maximální rozkmit (peak to peak –  $X_{\text{peak-to-peak}}$  popř.  $\text{speak-to-peak}$ ), tzv. i dvojitá amplituda, která se využívá pro posouzení maximálně přípustného mechanického namáhání a vůlí dané konstrukce.
- Střední hodnota (AverageLevel –  $X_{\text{rectifiedaverage}}$  popř.  $\text{srectifiedaverage}$ ), která popisuje časový průběh sledovaných vibrací – tato hodnota má omezený význam, protože nepopisuje žádné důležité fyzikální procesy.
- Efektivní hodnota (RootMean Square –  $X_{\text{RMS}}$  popř.  $\text{sRMS}$ ) je často užívanou hodnotou, protože nese informace o časovém průběhu vibrací a je v přímém vztahu k energetickému obsahu měřených vibrací.
- CrestFactor, který definuje poměr mezi vrcholovou a efektivní hodnotou. Pro harmonické kmitání (sinusový průběh) je CrestFactor roven odmocnině z 2. Pro náhodné signály CrestFactor roste v souvislosti s opotřebením, pittingem, lomy, trhlinami aj. což se v diagnostice s výhodou využívá [ 20].

### 2.3.2 Frekvenční analýza signálu

Časový průběh kmitání je vhodné transformovat do frekvenční oblasti, tj. vibrace nahradit posloupaností jeho kmitočtových složek. Vhodnou představu o účelnosti frekvenční analýzy získáme, když si uvědomíme rozdíl mezi informací obsaženou v časovém signálu a kmitočtovém spektru.



Obr. 2.7. Princip časové a frekvenční analýzy

Lze konstatovat, že časový signál obsahuje informaci o tom, kdy se daný jev stal, ale kmitočtové spektrum obsahuje informaci o tom, jak často se tentýž jev objevuje ve sledovaném signálu. Obecný zjednodušený princip časové a frekvenční analýzy je na *Obr. 2.7*.

Operace, která komplexní signály rozkládá na jejich kmitočtové složky, se nazývá frekvenční analýzou, která využívá buď selektivních pásmových propustí (analogově nebo digitálně) nebo častěji rychlou Fourierovu transformaci (FFT).

Periodický signál má diskrétní kmitočtové spektrum obsahující základní kmitočet a jeho celistvé násobky ( $n$  – vyšších harmonických), na něž lze průběh rozložit

$$x(t) = x_0 + x_1 \sin(\omega \cdot t + \varphi_1) + x_2 \sin(2\omega \cdot t + \varphi_2) + x_3 \sin(3\omega \cdot t + \varphi_3) + \dots + x_n \sin(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n) \quad (4)$$

Kde

$x_0$  stejnosměrná složka,  
 $x_1$  první harmonická,  
 $x_2$  až  $x_n$  druhá až  $n$ -tá harmonická.  
resp.

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (5)$$

kde

$i$  statistická složka amplitudy signálu  $y(t)$ ,  
 $c_n$  koeficienty Fourierovy řady.

Náhodné signály mají časový průběh takový, že okamžitou hodnotu v čase  $t$  lze stanovit jen s jistou pravděpodobností. Frekvenční spektrum mají tyto signály spojité. Náhodný signál je popsán svými statistickými charakteristikami, např. střední kvadratickou hodnotou, informující o intenzitě děje definovanou vztahem

$$\Psi_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (6)$$

hustotou pravděpodobnosti, informující o amplitudovém rozložení signálu, definovanou vztahem

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x + \Delta x) - P(x)}{\Delta x} \quad (7)$$

autokorelační funkcí  $R(\tau)$ , která popisuje souvislost mezi okamžitými hodnotami náhodné proměnné, která leží v odstupu  $\tau$  na časové ose. Autokorelační funkce

umožňuje rozlišit náhodné procesy a periodické procesy a zjistit periodickou složku ve směsi s náhodnou složkou. Pro stacionární ergodické stochastické procesy platí

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau)dt \quad (8)$$

a spektrální hustotou informující o kmitočtovém rozložení danou vztahem

$$S_x(f) = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (9)$$

Pro praktické využití náhodných signálů v diagnostice přibývá k požadavku stacionarity ještě požadavek ergodičnosti. Za ergodický považujeme signál, u něhož lze pravděpodobnostní charakteristiky, např. autokorelační funkci, stanovit z jednoho měření dostatečné délky. Většinou podmínky ergodičnosti diagnostického signálu odpovídají stabilnímu režimu práce objektu diagnostiky. U nestacionárních signálů se setkáváme převážně se signály transientními. Často se zpracování tohoto signálu převádí na zpracování signálu periodického s periodou  $T$  tak, že signál pro zpracování neustále opakuje s opakovací dobou  $T$ . [20]

## 2.4 SIGNÁLY A JEJICH ROZDĚLENÍ

Signály lze podle různých hledisek orientačně dělit do skupin. Podle náhodnosti jejich průběhů je lze rozdělit do několika následujících kategorií na:

- signály deterministické, jejichž časový vývoj odpovídá určitému funkčnímu předpisu a které lze dále rozdělit na
  - periodické signály – jsou složeny z harmonických signálů o frekvencích, které jsou celistvým násobkem jedné základní frekvence,
  - kvaziperiodické signály – jsou složeny z harmonických signálů o frekvencích, které jsou násobky nejméně dvou základních frekvencí a současně jsou v poměru určeném iracionálním číslem,
  - přechodné signály – jejich nenulová část je na rozdíl od předchozích kategorií časově omezena; typicky jde o přechodné děje, odezvy na impulsní vybuzení apod.,
  - pseudonáhodné – periodické signály, které jsou vytvářeny tak, aby se svými statistickými vlastnostmi podobaly signálům náhodným; perioda musí být tak velká, aby se z pohledu konkrétní délky signálu jevíly jako stochastické,

- náhodné (stochastické) signály
  - stacionární signály – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se nemění s časem. Velkou podskupinou, jsou signály stacionární v širším smyslu nebo také slabě stacionární (wide-sense stationary), u kterých nezávisí na čase střední hodnota a disperze a u kterých autokorelační funkce nezávisí na počátku záznamu signálu. Druhou podskupinou jsou signály stacionární v užším smyslu nebo také silně stacionární, u kterých kromě předchozích podmínek nezávisí na čase také hustoty pravděpodobnosti všech řádů. Jinou skupinou jsou signály ergodické, u kterých se statistické parametry vypočtené z jednoho úseku signálu rovnají parametrům vypočteným ze souboru mnoha úseků,
  - nestacionární – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se průběhu času mění. Hranice mezi nestacionárními a stacionárními signály je nutno určovat s přihlédnutím ke zkoumané délce signálu, při čemž původně nestacionární signál může být z pohledu několikanásobně delší doby stacionární,
  - cyklostacionární – jsou signály, jejichž statistické vlastnosti se v průběhu času cyklicky mění (např. náhodné signály vibrací motorů).

Pro popis náhodných signálů se používají buď číselné charakteristiky jako jsou obecné a centrované statistické momenty (např. střední hodnota a rozptyl) nebo funkční závislosti jako je hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce z pohledu rozdělení amplitud, korelační a kovariační funkce z pohledu časového průběhu nebo výkonová spektrální hustota z pohledu frekvenčního.

Z pohledu energie signálu lze odlišit dvě skupiny:

- signály energetické, které mají konečnou energii a
- signály výkonové, nemají konečnou energii (např. trvají nekonečně dlouho v čase).

Metody zpracování číslicových signálů lze podle způsobu získávání výsledku v čase rozdělit na:

- metody pracující v reálném čase (on-line), kdy je další vzorek výsledku znám po obdržení vzorku zpracovávaného signálu a
- metody, kdy je před věstním provedením operace k dispozici ucelená část vzorků signálu, tzv. záznam (metody off-line); protože bývá k dispozici časová historie i budoucnost signálu, lze realizovat i nekauzální zpracování.

## 2.4.1 Digitalizace signálů

Diskrétní signály, které jsou na počátku řetězce zpracování získány digitalizací, tj. analogově-číslicovým převodem (pomocí analogově-číslicového převodníku, *Analog-to-Digital Converter*, ADC). Takto získaný signál představuje z matematického hlediska posloupnost. Přejít od analogových signálů k těmto posloupnostem se provádí operacemi nazvanými vzorkování v čase a kvantování v amplitudě [20].

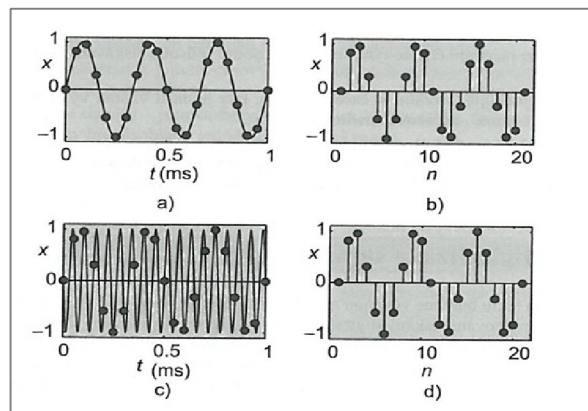
## 2.4.2 Aliasing

První operací při přechodu od spojitého signálu (např. výstupní napětí senzoru vibrací) k signálu číslicovému je vzorkování. Při vzorkování signálů v čase může dojít k nežádoucímu jevu zvanému aliasing, který vzniká v případě, kdy frekvence odebrání vzorků není dostatečně velká v porovnání s maximální frekvencí signálu. V praxi je nejčastější vzorkování s pevnou vzorkovací frekvencí nazývané také periodické nebo sekvenční. Ostatní typy jako např. vzorkování adaptivní nebo náhodné se užívají zřídka.

Podmínka, která určuje, kdy se při vzorkování signálu neztratí informace, bývá nazývána jako Shannon-Kotělnikovova vzorkovací věta. Tato věta říká, že spojitý signál obsahující pouze frekvenční složky s frekvencemi menšími než  $f_{max}$  může být ze vzorků jednoznačně rekonstruován jen tehdy, pokud je vzorkovací frekvence větší než dvojnásobek  $f_{max}$ , neboli

$$f_{vz} > 2f_{max} \quad (10)$$

Hraniční frekvence  $f_{vz}/2$  se nazývá Nyquistova frekvence. Podmínka (10) je teoretickou hranicí, v praxi je nutné pro vzorkování použít čtyř nebo vícenásobek maximální frekvence signálu.



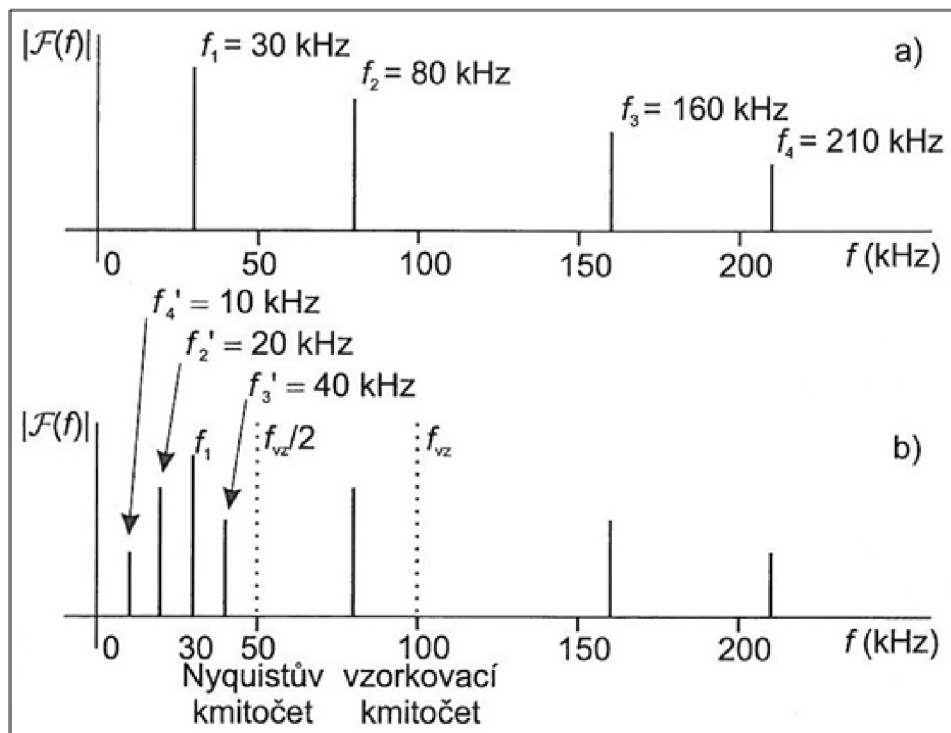
Obr. 2.8. Vznik aliasingu při vzorkování



Ilustrace vzniku aliasingu je uvedena na (Obr. 2.8., Obr. 2.9), který ukazuje, že při nesplnění podmínky lze obdržet vzorky identické se vzorky signálu s úplně jinou frekvencí.

- sinusový signál s frekvencí 3 kHz vzorkovaný kmitočtem 20 kHz,
- odebrané vzorky pro signál a),
- sinusový signál s frekvencí 17 kHz vzorkovaný kmitočtem 20 kHz,
- odebrané vzorky pro signál c

Problém aliasingu lze zkoumat i z frekvenčního pohledu, který je důležitý zejména při spektrální analýze vzorkovaných signálů. Na (Obr. 2.9) je uveden příklad signálu, který obsahuje několik sinusových složek a je chybně vzorkován frekvencí, která dovoluje korektní vzorkování pouze složky  $f_1$ . U ostatních složek dojde díky efektu, který je patrný z Obr. 2.9. *Projev aliasingu*., k tzv. překládání frekvencí, například frekvence složky  $f_2$  se překlápí kolem poloviny vzorkovací frekvence (Nyquistovy frekvence), složky  $f_3$  a  $f_4$  adekvátně projdou překlopením kolem všech odpovídajících celistvých násobků Nyquistovy frekvence.



Obr. 2.9. Projev aliasingu

- (a) původní signál obsahující čtyři harmonické složky, b) fiktivní spektrální složky  $f'$  vzniklé při vzorkování s nedostatečně vysokým kmitočtem) [20]



### 2.4.3 Amplitudové popisy signálů

Pro popis vlastností signálů z hlediska amplitudy existuje celá řada přístupů. Dále je uveden přehled vybraných metod s přihlédnutím k aplikacím v diagnostice. Protože jsou některé metody používány pro popis jak deterministických tak náhodných signálů, nebudeme jejich výklad dělit.

Mezi základní energetické veličiny řadíme výkon a energii signálu. Zjednodušeně můžeme výkon  $P$  diskrétního signálu  $x(n)$  konečné délky  $N$  definovat vztahem

$$P = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \quad (11)$$

Obdobně energie diskrétního signálu  $x(n)$  konečné délky  $N$  je definován vztahem

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \quad (12)$$

Stejně jako u spojitého signálu je výkon energie za určitý čas. Tímto časem je u periodických signálů doba periody, u signálů konečné délky je to délka signálu. Tato délka je u konečného diskrétního signálu rovna  $NT_{VZ}$ , kde  $T_{VZ}$  je vzorkovací interval.

Šumy bývají obvykle popisovány dle několika hledisek:

1. Rozložení amplitud; z tohoto pohledu bývá šum charakterizován například jako šum s normálním rozložením – tzv. Gaussovský nebo šum rovnoměrně rozložený.
2. Průběh spektrální hustoty; z tohoto pohledu bývá šum charakterizován například jako šum bílý, tj. s rovnoměrně rozloženou spektrální hustotou, šum růžový, jehož spektrální hustota je nepřímo úměrná frekvenci (tedy se stoupající frekvencí klesá velikost spektrální hustoty) nebo obecně šum barevný, tj. s nerovnoměrnou spektrální hustotou.
3. Vztah k dalšímu signálu významnému v dané úloze, např. šum korelovaný / nekorelovaný.
4. Vybrané statistické vlastnosti signálu, např. šum stacionární/ nestacionární.

Efektivní hodnota šumu s nulovou střední hodnotou je rovna druhé odmocnině rozptylu, tedy směrodatné odchylce (standardní odchylce) šumu. V případě šumu s nenulovou střední hodnotou je efektivní hodnota rovna geometrickému součtu střední hodnoty a směrodatné odchylky.

Často bývá rozložení hodnot (i náhodného) signálu charakterizováno pomocí několika hodnot, tzv. momentů prvního řádu. Obecný  $k$ -tý moment prvního řádu pro náhodnou diskrétní veličinu  $x$  je dán:

$$\mu_k = \sum_{i=1}^N x_i^k P_i \quad (13)$$

a centrální  $k$ -tý moment prvního řádu

$$\mu_k^c = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^k P_i \quad (14)$$

kde  $P_i$  je pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnot  $x_i^k$  pro obecný moment a hodnoty  $(x_i - \mu_x)^k$  pro centrální moment.

První obecný moment  $\mu_1$  je tzv. střední hodnota označována jako  $\bar{x}$ , kterou můžeme také odhadnout pomocí výpočtu

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N x(n) \quad (15)$$

Druhý obecný moment představuje střední hodnotu kvadrátu a jeho odmocnina je rovna efektivní hodnotě signálu. Druhý centrální moment je tzv. rozptyl (variance nebo disperze). Jeho druhá odmocnina představuje střední kvadratickou odchylku (nebo též směrodatnou odchylku nebo standardní odchylku).

Mezi parametry, které popisují tvar rozdělení a jsou určeny z momentových popisů, patří šikmost rozdělení (*skewness*) definovaná jako míra asymetrie rozdělení vůči průměru:

$$s = \frac{\mu_3}{\sigma_3} \quad (16)$$

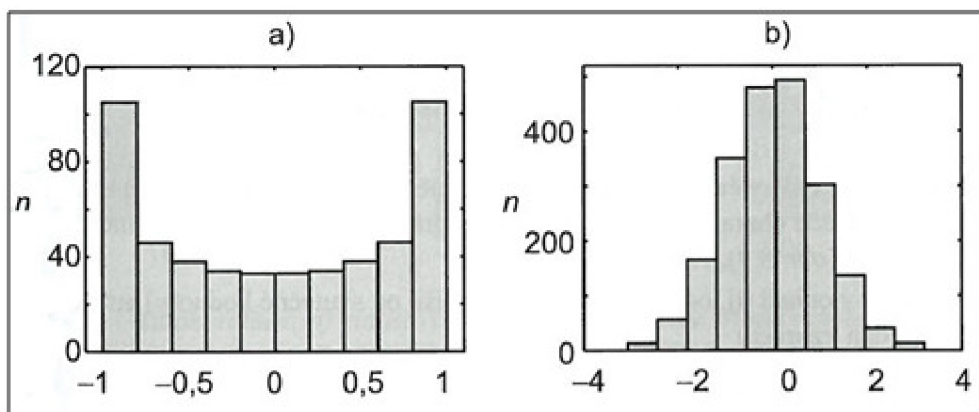
kde  $\sigma$  je směrodatná odchylka. Když je šikmost záporná, data jsou rozložena více doleva od průměru a naopak.

Šikmost (*kurtosis*) popisuje „šířku“ rozdělení vůči normálnímu rozdělení. Definována bývá jako

$$k = \frac{\mu_4}{\sigma_4} - 3 \quad (17)$$

Je-li špičatost větší než nula, je hustota na koncích větší než hustota. Je-li špičatost větší než nula, je hustota na koncích větší než hustota normálního rozdělení se stejnou střední hodnotou a stejným rozptylem. Pro normální rozdělení je špičatost nulová. Někdy bývá použita alternativní definici bez odečtení 3, pro normální rozdělení je pak  $k=3$ . Mezi momenty druhého řádu patří korelační a kovariační funkce, které jsou popsány dále. Mezi další veličiny charakterizující signál z amplitudového pohledu patří efektivní hodnota (RMS, *RootMean Square*),

absolutní špičková hodnota, kladná (příp. záporná) špičková hodnota, rozkmit signálu (*peak-to-peakvalue*), činitel tvaru (*formfactor*) jako poměr efektivní ku střední hodnotě a činitel výkyvu nebo výkmitu (*crestfactor*) jako poměr špičkové ku efektivní hodnotě. Vizuální posouzení rozložení amplitud signálu dovoluje histogram, který udává průběh četnosti výskytu amplitud v jednotlivých amplitudových pásmech (Obr. 2.10.).



Obr. 2.10. Histogram

a) sinusový signál      b) šum s normálním rozložením

SNR (*Signal-to-Noise-Ratio*) je veličina charakterizující odstup signálu od šumu. Vyjadřuje, kolikrát je výkon užitečného signálu ( $P_s$ ) větší než výkon šumu ( $P_n$ ), kterým je signál zkreslen. Často se vyjadřuje v decibelech (dB). Činný výkon se v teorii signálů obvykle vyjadřuje jako výkon na odporu  $1 \Omega$ , proto je možné ho vyjádřit jako kvadrát efektivní hodnoty signálu, pak

$$SNR = 10 \log \frac{P_s}{P_n} = 20 \log \frac{U_{efs}}{U_{efn}} \quad (18)$$

#### 2.4.4 Spektrální analýza pomocí fourierovy transformace

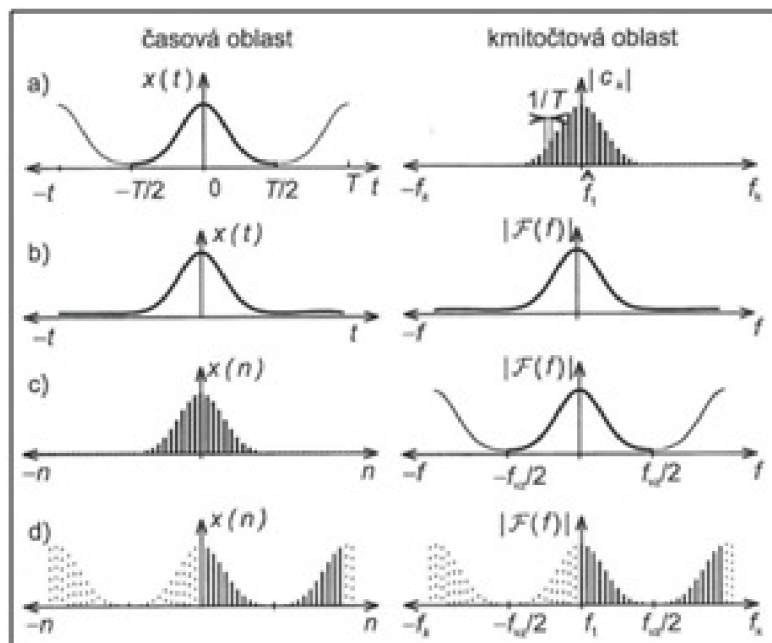
Cílem spektrální analýzy je popsat rozložení složek signálu ve frekvenční oblasti, tedy vyjádřit analyzovaný signál pomocí ortogonální (navzájem kolmých) bázevých funkcí. V případě fourierovy transformace je bázevou funkcí komplexní exponenciála ve tvaru  $e^{j2\pi ft}$ . Kromě fourierovy transformace lze pro vyjádření signálu pomocí ortogonálních bázevých funkcí použít například vlnkovou (wavelet), kosinovou nebo Walsh-Hadamardovu transformaci. Fourierovy transformace spojitého signálu  $x(t)$  je definována jako:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (19)$$

zpětná transformace pak jako

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)e^{j2\pi ft} df \quad (20)$$

kde  $f$  odpovídá frekvenci,  $j$  je imaginární jednotka. Vzorce bývají také uváděny s úhlovou frekvencí  $\omega = 2\pi f$  místo  $f$ . Tato transformace je vhodná pro neperiodické spojité signály a poskytuje spojité neperiodické spektrum  $F(f)$  (Obr. 2.11.), které bývá obvykle komplexní [20].



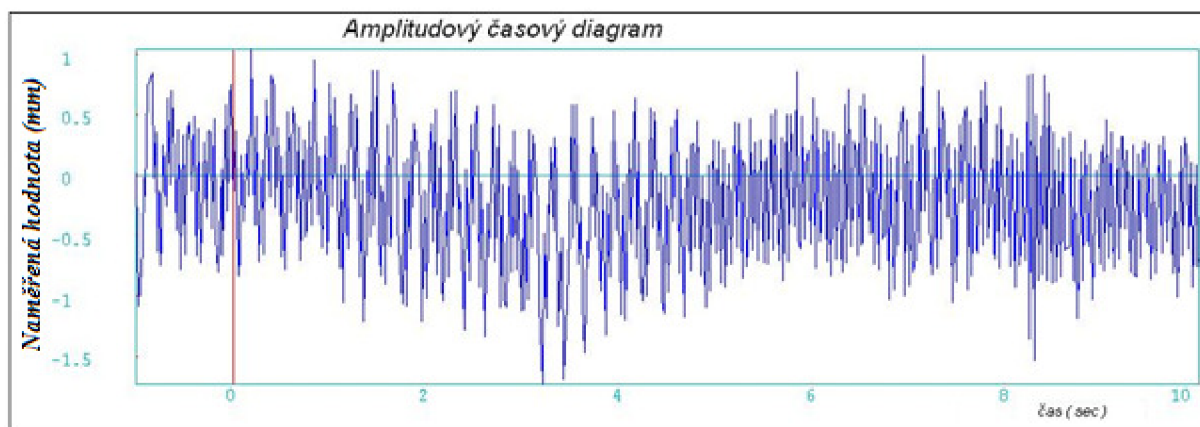
Obr. 2.11. Vztahy mezi časovou a kmitočtovou oblastí

- a) Fourierovy řada periodického signálu, b) Fourierova transformace spojitého signálu (FT), c) Fourierovy transformace diskrétního signálu (DTFT), d) Diskrétní Fourierova transformace (DFT) [20]  
 signálu (FT), c) Fourierovy transformace diskrétního signálu (DTFT),  
 d) Diskrétní Fourierova transformace (DFT) [20]

## 2.4.5 Hodnocení kmitání technologických soustav

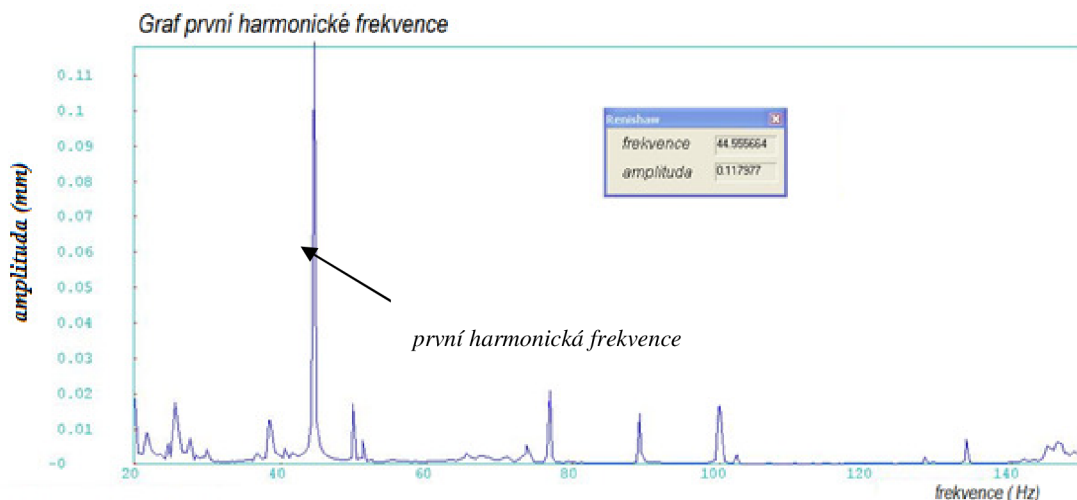
Pro hodnocení charakteristik kmitání výrobního stroje v této dizertační práci byl použit bezdotykový laserový interferometr (Reinshaw XL 80) a dotykový přístroj (Balantron 2001).

V obou případech v prvním kroku byl na základě měření a matematicko-statistického zpracování a pomocí Fourierovy transformace zaznamenán amplitudový časový diagram.



Obr. 2.12. Amplitudový časový diagram software Sieview 32 verze 2.4.0 pro hodnoty z přístroje Balantron

Vzhledem k tomu, že maximální nevyvážek (tj. hlavní příčina kmitání technologické soustavy) odpovídá první harmonické frekvenci, byl pomocí vhodného softwaru získaný graf první harmonické frekvence (maximální amplituda).



Obr. 2.13. Graf první harmonické frekvence naměřené pomocí přístroje Balantron

Charakteristické veličiny z tohoto grafu se pak posloužily pro určení korelačních vztahů mezi amplitudou první harmonické frekvence vznikající při broušení a jednotlivými technologickými podmínkami.

## 2.5 REGRESNÍ ANALÝZA [5,11,14,16,27, 38, 44]

### 2.5.1 Cíle regresní analýzy

Regresní analýza hledá matematický vztah - rovnici, jež nejlépe vyjadřuje změny proměnné (znaku)  $y$  v závislosti na změnách proměnné (znaku)  $x$ . V dalším se bude tato otázka řešit obecně pro případ, že proměnná  $y$  – tzv. *závisle proměnná* závisí na  $k$  tzv. *nezávisle proměnných*, tj. vektoru proměnných  $\vec{x}=(x_1, \dots, x_k)$ .

Tvar závislosti  $y$  na  $\vec{x}=(x_1, \dots, x_k)$  je v nejjednodušším případě vyjádřen funkcí  $y = f(\vec{x})$ . Funkční předpis  $f$  může mít nejrůznější tvar, např.  $y = \beta_1 + \beta_2 x$ ,  $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$ ,  $y = \ln(x)$  nebo jiný.

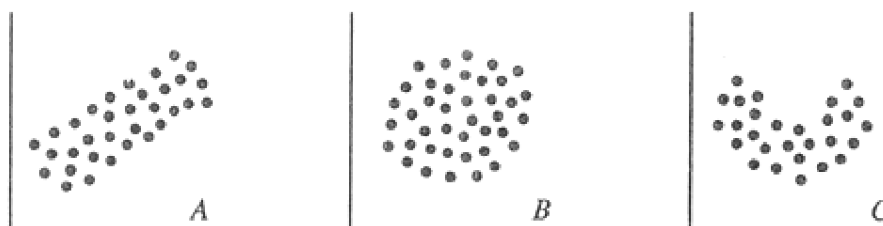
K poznání a matematickému popisu statistických závislostí, jakož i k ověřování deduktivně učiněných teorií, slouží metody regresní a korelační analýzy. Hlavním úkolem regresní a korelační analýzy je přispět k poznání příčinných vztahů mezi statistickými znaky.

Východiskem k popisu statistických závislostí jsou statistické údaje. Statistický soubor  $n$  pozorování statistických znaků můžeme získat různým způsobem.

- Získání údajů pozorováním  $n$  statistických jednotek, přičemž statistický soubor byl prostorově, časově i věcně vymezen.
- Údaje získány pozorováním určité statistické jednotky v  $n$  časových okamžicích, či intervalech.
- Pozorování vznikla  $n$ -násobným opakováním určitého pokusu, prováděného za stejných podmínek.

Úkolem regresní a korelační analýzy je matematický popis systematických okolností, které provázejí statistické závislosti. Konkrétně se může jednat např. o zobrazení průběhu podmíněných průměrů vysvětlované proměnné v důsledku systematických změn hodnot jedné či většího počtu vysvětlujících proměnných. Ještě častěji je naší snahou nalézt „idealizující“ matematickou funkci tak, aby co nejlépe vyjadřovala charakter závislosti a co nejvěrněji zobrazovala průběh změn podmíněných průměrů závisle proměnné. Tato matematická funkce se nazývá regresní funkce. Cílem regresní analýzy je co nejlepší přiblížení empirické (vypočtené) regresní funkce k hypotetické regresní funkci. Hlavní úkoly při zkoumání statistických závislostí se týkají průběhu závislostí a jejich intenzity. Popis průběhu závislosti provádíme zpravidla tak, že vystihujeme danou závislost určitou „vyrovnávající“ funkcí. Za tyto regresní funkce volíme některé známé funkce z matematiky.

Pokud se podaří vystihnout průběh závislosti „relativně nejlepší“ regresní funkcí, je otázka kvality regresní funkce souběžná s fenoménem tzv. síly (intenzity, těsnosti) závislosti. Obr. 2.14. ukazuje příklady tří statistických závislostí mezi proměnnými  $x$  a  $y$ .



Obr. 2.14. Různé typy statistických závislostí

a) lineární-silná, b) lineární-slabá, c) nelineární-silná

## 2.5.2 Volba regresní funkce

Regresní funkce by měla být zvolena na základě věcného rozboru analýzy vztahů mezi veličinami, přičemž by základem rozhodnutí měla být nějaká existující teorie. Tato teorie by měla umožnit rozhodnutí, které nezávisle proměnné přicházejí v úvahu pro analýzu dané závisle proměnné a zároveň naznačit jaké možné typy regresních funkcí pro modelování dané závislosti přicházejí v úvahu. Při věcné analýze založené na platné teorii lze v některých případech dobře posoudit, jak dalece jde o funkci rostoucí nebo klesající, jaký je smysl zakřivení, přichází – li v úvahu inflexní bod či nikoliv nebo zda jde o funkci nekonečně rostoucí nebo naopak o funkci s růstem ke konečné limitě. Lze získat i předběžné informace o znaménkách parametrů modelu apod. Jindy lze použít při volbě regresní funkce zkušeností získaných s použitím určitého typu regresní funkce již v minulosti. Jde-li o závislost, která byla již jednou popsána, stačí ověřit, zda nedošlo k takové změně podmínek nebo zkoumaného jevu, který by měl vliv na výběr regresní funkce.

Není – li možno jednoznačně stanovit typ regresní funkce, uchylujeme se i empirickému (induktivnímu) způsobu volby, tj. na základě rozboru empirického průběhu závislosti. Základní metodou je přitom grafická metoda, kdy průběh závislosti znázorňujeme ve formě už výše zmíněného bodové diagramu, kde každá dvojice pozorování  $x$  a  $y$  tvoří jeden bod tohoto grafu. Podle charakteristického průběhu tohoto grafu se snažíme rozhodnout jaký konkrétní typ regresní funkce (přímka, parabola, logaritmická funkce) by byl pro popis sledované závislosti nejvhodnější. K tomu abychom zhodnotili kvalitu získané regresní funkce a eventuálně i posoudili oprávněnost některých předpokladů, které souvisejí



s uplatněním použitých metod odhadu, máme k dispozici různá matematicko-statistická kritéria.

Z uvedených informací vyplývá:

1. Posouzení všech dostupných informací o charakteru závislosti mezi  $y$  a  $x$  a návrh jednoho nebo více regresních modelů
2. Odhad parametrů teoretické regresní funkce a získání empirické regresní funkce.
3. Posouzení vhodnosti získaného odhadu konfrontací skutečných a vypočtených hodnot a zhodnocení užitečnosti empirické regresní funkce.
4. Návrh alternativních typů regresních funkcí v případě neuspokojivých výsledků.
5. Hledání jiných metod odhadu teoretické regresní funkce.

### 2.5.3 Lineární regrese

Je lineární vztah mezi jednou vstupní proměnnou  $x$  a jednou výstupní proměnnou  $y$ . Tento vztah může být zapsán regresní rovnicí:

$$y = b_0 + b_1x \quad (21)$$

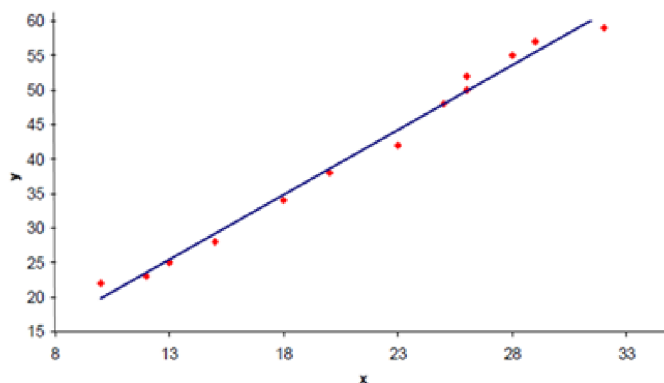
$y$ .....výstupní proměnná

$x$ .....vstupní proměnná

$b_0, b_1$ .....výběrové regresní koeficienty

Koeficienty  $b_0$  a  $b_1$  volíme tak, aby vzniklá regresní přímka co nejlépe vystihovala daný statistický soubor (*Obr. 2.15.*).

V regresním modelu bude každé pozorované hodnotě nezávislé proměnné  $x_i$  odpovídat jednak skutečná (empirická) hodnota závislé proměnné  $y_i$ , jednak teoretická (vypočtená) hodnota  $Y_i$ , která leží na regresní přímce.



*Obr. 2.15. Lineární regrese*



## 2.5.4 Metoda nejmenších čtverců

Měřením jsou pro konkrétní hodnoty veličiny  $x$  určeny odpovídající hodnoty veličiny  $y$  a výsledek zanesen do grafu. Body však neleží na jedné přímce, protože měření je vždy zatíženo nějakou chybou. Existuje tedy množina bodů v rovině, které leží přibližně v jedné přímce a je třeba najít co nejpřesnější matematický model, tj. stanovit koeficienty  $a$ ,  $b$  tak, aby přímka  $y=ax+b$  ležela co nejbližše bodům z měření.

Snažíme se vystihnout chování bodu pomocí lineární závislosti. Přímka nebude pochopitelně procházet všemi body, je tedy alespoň snaha, aby procházela co nejbližše okolo nich. Za optimální přímku lze považovat tu, která minimalizuje součet ploch čtverců.

Přímku proloženou metodou nejmenších čtverců lze hledat za použití následující věty:

Přímka  $y=ax+b$  je přímka, proložená metodou nejmenších čtverců (Obr. 2.16.) souborem bodů  $[x_1, y_1], [x_2, y_2], \dots, [x_n, y_n]$ , jestliže pro koeficienty  $a$ ,  $b$  platí:

$$a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (22)$$

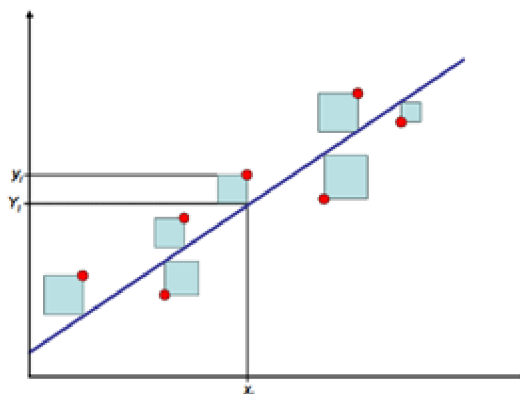
$$a \sum_{i=1}^n x_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i \quad (23)$$

$a, b$ ... koeficienty rovnice regrese [-]

$x_i$ ... vstupní proměnná [-]

$y_i$ ... výstupní proměnná [-]

$n$ ... počet měření [-]



Obr. 2.16. Zobrazení metody nejmenších čtverců

## 2.5.5 Regresní koeficient

Parametr  $b_1$  rovnice se nazývá regresní koeficient (přesněji výběrový regresní koeficient). Z interpretačního hlediska daný koeficient udává průměrnou změnu závisle proměnné při jednotkové změně nezávisle proměnné  $x$ . Je podílem kovariance obouproměnných a rozptylu nezávisle proměnné  $x$ . Regresní koeficient může nabývat libovolných záporných i kladných hodnot podle toho, zda zkoumaná závislost je přímá nebo nepřímá. V případě, že jde o lineární nezávislost, nabývá regresní koeficient hodnoty 0.

$$b_1 = \frac{n \sum y_i x_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{\frac{\sum y_i x_i}{n} - \frac{\sum y_i}{n} \frac{\sum x_i}{n}}{\frac{\sum x_i^2}{n} - \left(\frac{\sum x_i}{n}\right)^2} = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \quad (24)$$

$x_i$ ... vstupní proměnná [-]

$s_{xy}$ ... kovariance [-]

$s_x^2$ ... rozptyl nezávisle proměnné [-]

Význam regresního koeficientu je:

- směrnice regresní přímky
- průměrný přírůstek závisle proměnné  $y$ , pokud se nezávislá proměnná změní o jednotku.

## 2.5.6 Index determinace

Kvalitu dané lineární regresní funkce vyjadřuje ukazatel  $R^2$ , který se nazývá index determinace (determinační koeficient).

$$R^2 = \frac{s_Y^2}{s_y^2} \quad (25)$$

$R^2$ ... index determinace [-]

$s_Y^2$ ... teoretický rozptyl (rozptyl teoretických hodnot  $Y$ ) [-]

$s_y^2$ ... empirický rozptyl (rozptyl naměřených hodnot  $y$ ) [-]

Teoretický rozptyl spočítáme jako rozptyl hodnot  $Y$  získaných dosažením jednotlivých hodnot nezávisle proměnné  $x$  do regresní rovnice. Empirický rozptyl je pak „normální“ rozptyl hodnot závisle proměnné  $y$ . Index determinace  $R^2$  nabývá hodnoty od 0 do 1 (od 0 do 100%) a určuje, jakou část variability závisle proměnné  $y$  lze vysvětlit vlivem nezávisle proměnné  $x$ . Čím vyšší je tato hodnota, tím lépe vystihuje regresní přímka skutečnou závislost mezi  $x$  a  $y$ .

## 2.5.7 Nelineární regrese

Při odhadu parametrů těchto funkcí lze opět využít již zmíněné metody nejmenších čtverců. Aby však bylo možno tuto metodu využít i na nelineární závislosti, je třeba příslušné funkce upravit – pomocí substituce, zlogaritmováním celé funkce apod.

### Parabolická regrese

Parabolickou regresi lze použít v případě, kdy se závislá proměnná mění rychleji než lineárně nebo pokud ve sledovaném intervalu dochází ke změně průběhu funkce z rostoucí na klesající nebo naopak. Parabola je grafem kvadratické regresní funkce.

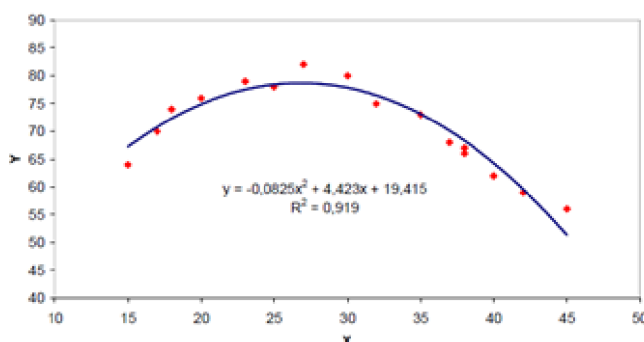
$$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad (26)$$

Koeficienty  $b_0$ ,  $b_1$  a  $b_2$  lze získat řešením soustavy tří lineárních rovnic:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i &= nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i &= b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i &= b_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{aligned} \quad (27)$$

$b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  ... výběrové regresní koeficienty [-]

Tuto soustavu dostaneme aplikací metody nejmenších čtverců na kvadratickou funkci. Použití kvadratické regresní funkce na dvourozměrný statistický soubor ukazuje Obr. 2.17. Je zřejmé, že pro daný soubor je kvadratická funkce výstižnější než lineární.



Obr. 2.17. Kvadratická regrese

## Hyperbolická regrese

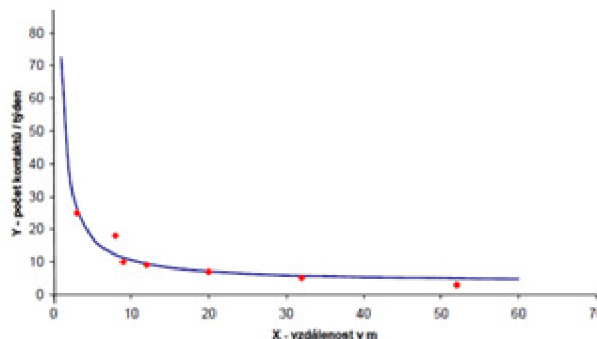
Hyperbolická regrese se využívá především k modelování nepřímé úměrnosti, tj. vztahu, kdy závisle proměnná konvexně klesá. Grafem hyperbolické regresní funkce je hyperbola (*Obr. 2.18.*).

$$Y = b_0 + \frac{b_1}{x} \quad (28)$$

Metodou nejmenších čtverců získáme soustavu normálních rovnic, jejichž řešením dostaneme pro odhad obou parametrů regresní hyperboly výpočetní vzorce.

$$b_0 = \frac{\sum y_i \sum \frac{1}{x_i^2} - \sum \frac{1}{x_i} \sum \frac{y_i}{x_i}}{n \sum \frac{1}{x_i^2} - \left(\sum \frac{1}{x_i}\right)^2} \quad (29)$$

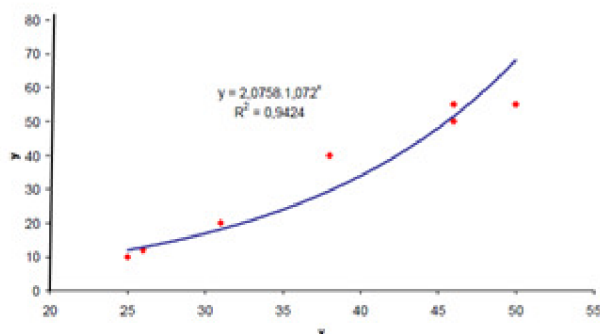
$$b_1 = \frac{n \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum y_i \sum \frac{1}{x_i^2}}{n \sum \frac{1}{x_i^2} - \left(\sum \frac{1}{x_i}\right)^2} \quad (30)$$



*Obr. 2.18. Hyperbolická regrese*

## Exponenciální regrese

Exponenciální regresní funkci (*Obr. 2.19.*) lze použít v případě, že závisle proměnná roste rychleji, než může být postiženo lineární nebo kvadratickou regresí.



Obr. 2.19. Exponenciální regrese

Typickým případem exponenciální regrese je růst bez limitujících faktorů, například populační růst. Odhad parametrů se neprovádí metodou nejmenších čtverců přímo, protože její použití vede k soustavě nelineárních rovnic, z nichž zpravidla nejde odhadnout přímo parametry ve formě vhodných výpočtových vzorců. Proto se při odhadu

parametrů nelineárních regresních funkcí většinou postupuje tak, že se najde jejich vhodný počáteční odhad a postupným zlepšováním řešení se nalezne odhad s požadovanou přesností. Používá se zde tzv. linearizující transformace, kdy určitou regresní funkci, která není lineární z hlediska parametrů lze převést na funkci lineární v parametrech.

$$Y = b_0 b_1^x \quad (31)$$

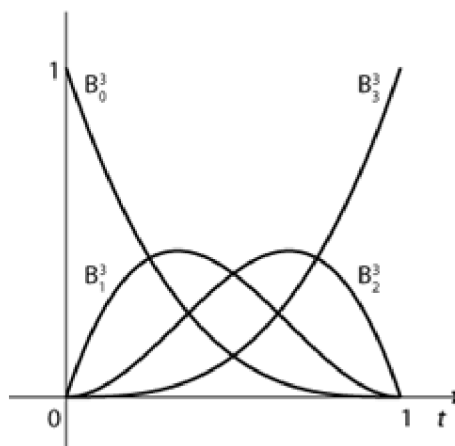
Pro získání funkce lineární v parametrech je třeba provést logaritmickou transformaci. Další postup je již založen na metodě nejmenších čtverců vedoucí k získání normálních rovnic, jejichž řešením lze dostat: [25]

$$\log b_0 = \frac{\sum \log y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \log y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (32)$$

$$\log b_1 = \frac{n \sum x_i \log y_i - \sum \log y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (33)$$

### Polynomická regrese

Jedná se o regresní model, který je lineární v parametrech, ale popisuje nelineární závislost mezi proměnnými.



Obr. 2.20. Polynomické křivky 3. stupně

V praktických aplikacích se zpravidla lze setkat nejvýše s polynomy 3. až 4. stupně (Obr. 2.20). Pro použití parabol vyšších řádů nenalezneme většinou věcné zdůvodnění ani přiměřenou interpretaci výsledků.

$$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_px^p \quad (34)$$

Po úpravě

$$\sum y_i = nb_0 + b_1 \sum x_i + \dots + b_p \sum x_i^p \quad (35)$$

$$\sum y_i x_i = b_0 \sum x_i + b_1 \sum x_i^2 + \dots + b_p \sum x_i^{p+1} \quad (36)$$

$$\sum y_i x_i^p = b_0 \sum x_i^p + b_1 \sum x_i^{p+1} + \dots + b_p \sum x_i^{2p} \quad (37)$$

$p$ ... stupeň polynomu [-]

### Logaritmická regrese

Logaritmické regresní funkce jsou vhodné k modelování závislostí parabolického typu, které však nemají maximum a u nichž při vyšších hodnotách vysvětlující proměnné  $x$  vzrůstají hodnoty závisle proměnné  $y$  pouze velmi pozvolna, eventuálně se prakticky nemění (prodlužují regresní křivku v horizontálním směru).

$$Y = x_0 + x_i \log x \quad (38)$$

## 2.5.8 Intervaly spolehlivosti pro parametry regresní funkce a regresní odhady

Výpočet konkrétní regresní funkce na základě daných pozorování není ještě zárukou správně zvolené cesty k poznání příčinných souvislostí mezi veličinami a nedovoluje ztotožnit vypočtenou (výběrovou) regresní funkci s hypotetickou regresní funkcí základního souboru. Bodové intervaly mají malou informační hodnotu, pokud se neuvede interval spolehlivosti (konfidenční interval) pro tyto náhodné veličiny. Je třeba najít odpověď na celou řadu závažných otázek, souvisejících s posouzením regresní funkce jako nástroje k analýze vnitřních souvislostí mezi veličinami a k odhadům vysvětlované proměnné při volbě libovolných kombinací vysvětlujících proměnných.

- Byl zvolen vhodný typ regresní funkce?
- Byl proveden správný výběr vysvětlujících proměnných?
- Jak lze hodnotit význam jednotlivých vysvětlujících proměnných zařazených do regresní funkce?
- Do jaké míry se ukázaly oprávněné předpoklady, za kterých je možno použít metody nejmenších čtverců v popsané podobě, nebo by bylo vhodné hledat jinou metodu odhadu parametrů?
- Jak velké jsou výběrové chyby odhadů a v jakých mezích se pohybují hodnoty neznámých parametrů a hodnoty závisle proměnné při zvolených kombinacích hodnot vysvětlujících proměnných.

Regresní funkci  $y = b_0 + b_1x$   $Y = b_0 + b_1x$  je nutno považovat za výběrovou regresní funkci pomocí které chceme odhadnout regresní přímku základního souboru (teoretickou regresní funkci)  $\eta = \beta_0 + \beta_1x$ . Výběrové parametry  $b_0$  a  $b_1$  jsou nezkreslenými odhady parametrů  $\beta_0$  a  $\beta_1$  regresní přímky základního souboru.

Výběrová regresní přímka je nezkresleným odhadem regresní přímky základního souboru. Za předpokladu, že jsou splněny určité pravděpodobnostní předpoklady o chování rušivé složky, lze dokázat, že veličiny mají rozdělení  $t$  s  $n-2$  stupni volnosti. Přitom  $s_{b_0}$  a  $s_{b_1}$  jsou směrodatné chyby odhadů regresních parametrů kde:

$$S_{b_0} = s \sqrt{\frac{\bar{x}^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (39)$$

$$S_{b_1} = s \sqrt{\frac{1}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (40)$$

s... reziduální směrodatná odchylka [-]

$s_{b_0}$   $s_{b_1}$  ... směrodatné chyby odhadů regresních parametrů[-]

$\bar{x}$  ... odhad aritmetického průměru [-]

Kde  $s$  je reziduální směrodatná odchylka. Chyba regresní přímky pro  $i$  – té pozorování je:

$$S_y = s \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (41)$$

Intervaly spolehlivosti pro  $\beta_0, \beta_1$  a  $\eta$  lze zkonstruovat ve formě

$$b_0 - t_{1-\frac{\alpha}{2}} S_{b_0} < \beta_0 < b_0 + t_{1-\frac{\alpha}{2}} S_{b_0} \quad (42)$$

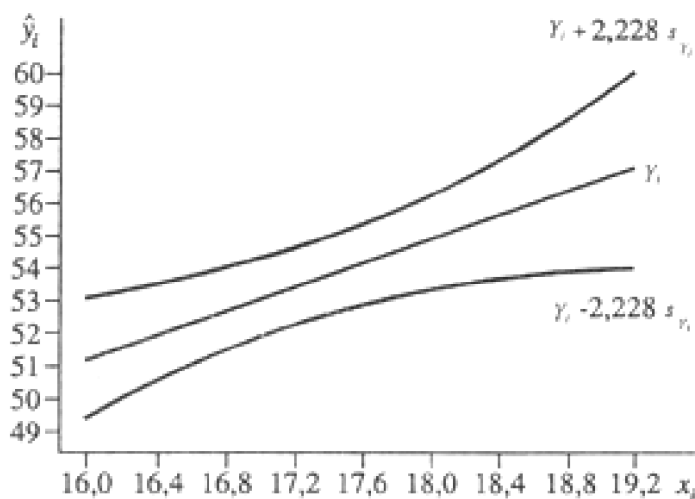
$$b_1 - t_{1-\frac{\alpha}{2}} S_{b_1} < \beta_1 < b_1 + t_{1-\frac{\alpha}{2}} S_{b_1} \quad (43)$$

$$Y_i - t_{1-\frac{\alpha}{2}} S_{y_i} < \eta_0 < Y_i + t_{1-\frac{\alpha}{2}} S_{y_i} \quad (44)$$

$s_y$  ... směrodatná chyba regresní přímky [-]

$\beta_0, \beta_1$  ... odhady parametrů regresní přímky základního souboru [-]

Interval spolehlivosti (Obr. 2.21.) bude nejužší v bodě  $x_i = \bar{x}$  a pak narůstá na obě strany s tím, jak se zvětšuje rozdíl  $|x_i - \bar{x}|$ . Jestliže bude vypočtena pro všechny existující hodnoty  $x_i$  dolní a horní mez intervalu spolehlivosti, tak po grafickém zobrazení lze získat dvě větve hyperboly tvořící tzv. pás spolehlivosti.

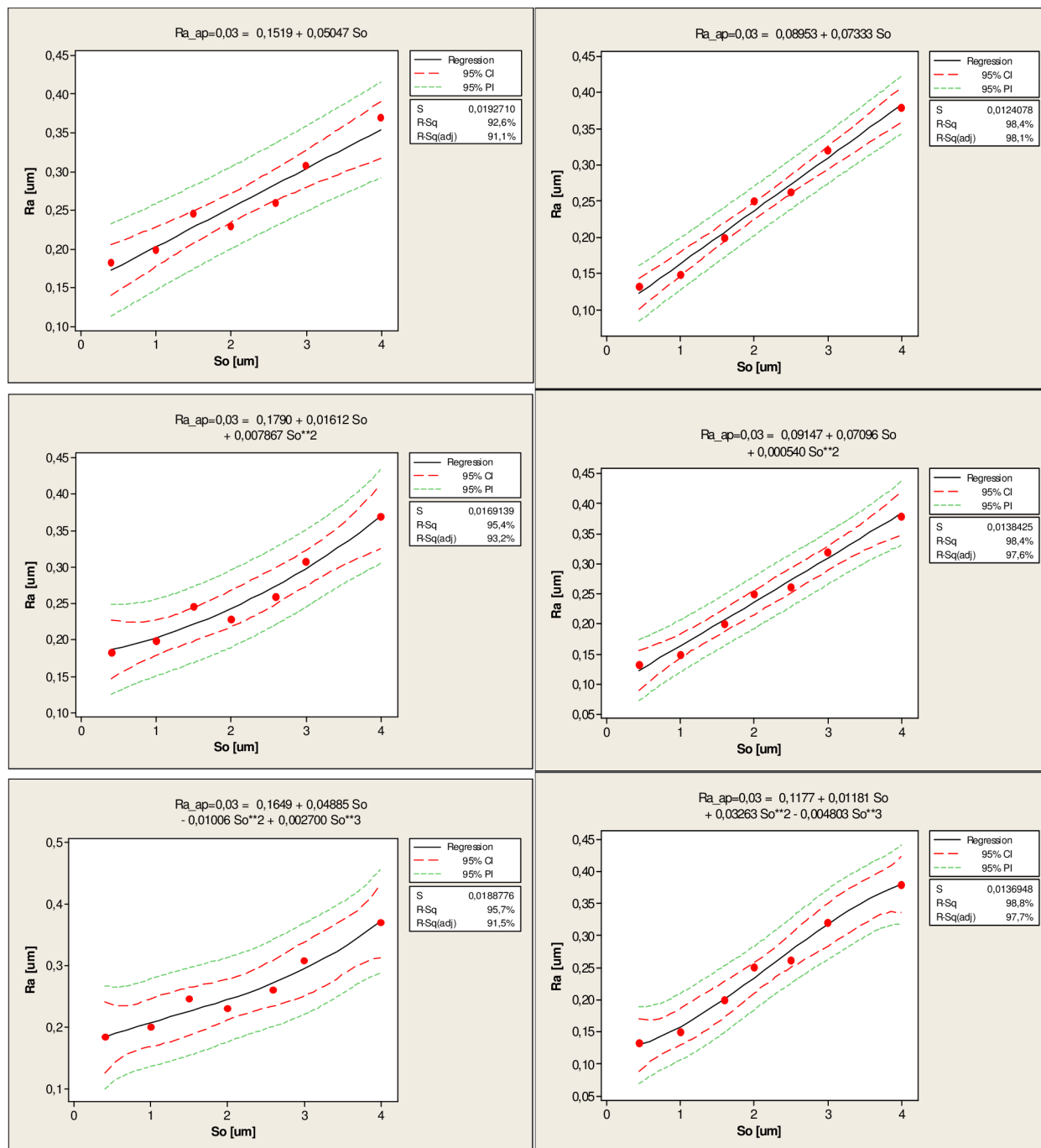


Obr. 2.21. Interval spolehlivosti pro regresní přímku



## 2.5.9 Aplikace regresní analýzy v rámci řešení

Regresní analýza hledá matematický vztah - rovnici, jež nejlépe vyjadřuje změny proměnné (znaku)  $y$  v závislosti na změnách proměnné (znaku)  $x$ .



Obr. 2.22. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu na amplitudě kmitání při broušení

Za účelem posouzení vhodnosti získaného odhadu byly pro vyhodnocení výsledku experimentu zvoleny různé alternativní typy regresní funkce. Posuzoval se index determinace (determinační koeficient), který uvádí shodu mezi naměřenými hodnotami a vypočtenými daty regresní funkce. Jak ukazují výsledky experimentů, pro oba obráběné materiály, lineární vztah mezi vstupní proměnnou (v našem případě amplitudou kmitání) a výstupní proměnnou (v našem případě průměrnou aritmetickou hodnotou drsnosti) s dostatečnou přesností vystihuje skutečnou závislost. Interval spolehlivosti má charakteristický hyperbolický tvar. Lze proto pro další hodnocení výsledků experimentů v rámci celé práce použít lineární regresi. Tuto úvahu lze rozšířit i na další výstupní parametry, vzhledem k tomu, že sledované charakteristiky struktury povrchu mají normální rozdělení. Lineární regrese bude proto použita v celé dizertační práci.

### 3 METODY HODNOCENÍ JAKOSTI [4, 9, 12, 17, 28, 30, 34, 36]

Důležitým úkolem technologie je zajištění požadované jakosti výrobku. Pojem jakost v sobě zahrnuje nejen rozměrovou, geometrickou přesnost, ale i vlastnosti povrchové vrstvy a změny, které v povrchové vrstvě nastávají. Funkční plocha, která je dokončená některou technologickou operací má svou jakost, tj. rozměr, tvar a drsnost.

Obecně lze říci, že jakost výrobku je dána souhrnem vlastností, zejména funkčních vlastností, vzhledem, spolehlivostí a životností, jestliže předpokládáme jeho používání k funkci, pro kterou je určen při stanovených podmínkách. Stanovení vlastností výrobku musí vycházet ze současného vývoje techniky a dbát na národohospodářské požadavky (v tomto pojetí je do jakosti zahrnuta spolehlivost výrobku). My se zaměříme na vlastnosti charakterizované nedokonalostí povrchu.

Nedokonalost povrchu v technologických procesech je určena zejména řeznou rychlostí, velikostí posuvů a hloubkou třísky, dále použitou technologií (definována nástrojem a jeho geometrií, typem pohybů, způsobem řezání atd.), použitým prostředím probíhajícího procesu, obráběným materiálem. Profil drsnosti povrchu je vytvářen pravidelným odběrem třísky materiálem nástroje a nepravidelnostmi, které způsobuje určitá drsnost povrchu nástroje, lomy částic materiálu, lomy a opotřebení nástroje, změny na nástroji, tvrdé částice třísky, které působí abrazivně na obráběný povrch.

Vztah mezi funkcí a jakostí povrchu ploch, která je vytvořena jistou technologickou metodou, je možné hodnotit ze dvou hledisek, a to z hlediska:

- prostorového uspořádání (textury) povrchu – je vyjadřováno především jeho drsností
- fyzikálních a chemických vlastností povrchové vrstvy součásti

Během výrobního procesu, kromě textury povrchu, mohou vzniknout změny na opracované ploše:

- povrch je plasticky deformován v důsledku mechanického a tepelného účinku
- dochází k rekrystalizaci
- mění se tvrdost povrchové vrstvy
- vznikají mikro a makrotrhliny
- vznikají zbytková napětí v povrchové vrstvě apod.

Základní ČSN EN ISO normy týkající se struktury povrchu:

#### **Geometrické požadavky na výrobky (GPS)**

##### **– Struktura povrchu:**

Profilová metoda – Termíny, definice  
a parametry struktury povrchu

ČSN EN ISO 4287

01 4450

## **Geometrické požadavky na výrobky (GPS)**

### **-Struktura povrchu**

ČSN EN ISO 4288

Profilová metoda – Pravidla a postupy  
pro posuzování struktury povrchu

01 4449

Funkční vlastnosti povrchu součásti a části strojů ve velké míře závisí na charakteru povrchu. Optimální volba a dodržení požadavků na charakter povrchu při vyhotovení výrobků ovlivňuje provozní vlastnosti povrchu, spolehlivost a životnost konstrukcí a mechanismů. Hodnocení charakteru povrchu vychází z profilové metody, tj. hodnocení povrchu z profilu čáry.

V souladu s novým pojetím geometrické specifikace výrobků (GPS – Geometrical Product Specification) se v současné době nedokonalost povrchu člení podle velikosti rozteče příslušných nerovností na:

- drsnost povrchu – složka s nejmenší roztečí nerovností
- vlnitost povrchu
- tvar povrchu – složka s největší roztečí nerovností určenou základním profilem

### **Odchylka tvaru**

Geometrická struktura povrchu je soustavou geometrických prvků povrchu, podmíněná tvarem, rozměrem a rozmístěním převýšenin a prohlubní, které pocházejí z mechanického obrábění, anebo jsou zapříčiněné opotřebením. Odchylkou tvaru je myšleno posouzení odchylky jednoho tvarového prvku od ideálního geometrického tvaru.

### **Vlnitost povrchu**

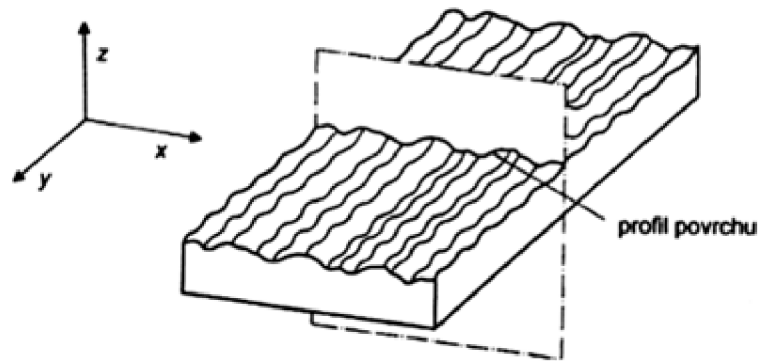
Velký význam má kromě drsnosti broušeného povrchu i jeho vlnitost, což je souhrn periodických a neperiodických výstupků a prohloubenin. Tvoření vln při broušení na čisto je nejvíce ovlivněno pracovními pohyby obrobku, broušícího vřeteníku kotouče a jeho tvarovou úchylkou (neokrouhlostí, ovalitou). Značný vliv má i poměr obvodových rychlostí kotouče a obrobku, jejich velikosti, počet záběrů kotouče a fázový posun vln při dalších průchodech kotouče.

### **Drsnost povrchu**

Nerovnosti na povrchu, které vznikají po libovolné technologické operaci, představují prostorový útvar, který lze velmi obtížně posuzovat. Problém hodnocení nerovnosti povrchu (drsnosti), je obvykle řešen redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. V rovině řezu je získán profil, který je základním zdrojem informací pro posuzování textury povrchu.

Uvedená norma definuje mimo jiné následující základní pojmy:

**Profil povrchu** je průsečnice skutečného povrchu a dané roviny



Obr. 3.1. Povrch profilu

**Snímaný profil** je geometrické místo středů snímacího hrotu stanovených parametrů.

Dále jsou definovány parametry povrchu profilu

P – parametr: je parametr vypočítaný ze základního profilu

W – parametr: je parametr vypočítaný z profilu vlnitosti

R – parametr: je parametr vypočítaný z profilu drsnosti

**Základní profil (P – profil):** je základem pro hodnocení parametrů základního profilu, získá se potlačením krátkovlnných složek profilu povrchu filtrem  $\lambda_s$ .

**Profil vlnitosti (W – profil):** je profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu  $\lambda_f$  a filtru profilu  $\lambda_c$  na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem  $\lambda_f$  a krátkovlnné složky filtrem profilu  $\lambda_c$ .

**Profil drsnosti (R – profil):** je profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru  $\lambda_c$  a úplně nejkratších vlnových složek  $\lambda_s$ .

### Filtrace profilu

Strukturu povrchu můžeme rozdělit podle velikosti rozteče, nejdříve ji ale musíme separovat. Separace se provede jejich filtrováním.

**Filtr profilu** - jako filtr rozdělující profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky. Rozeznáváme tři druhy filtrování povrchu.

**$\lambda$ filtr profilu** – jako filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu.

$\lambda_c$  **filtr profilu** – jako filtr určující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti

$\lambda_f$  **filtr profilu** – jako filtr určující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu

**Cut – off** – je mezní vlnová délka filtru profilu

### Střední čára

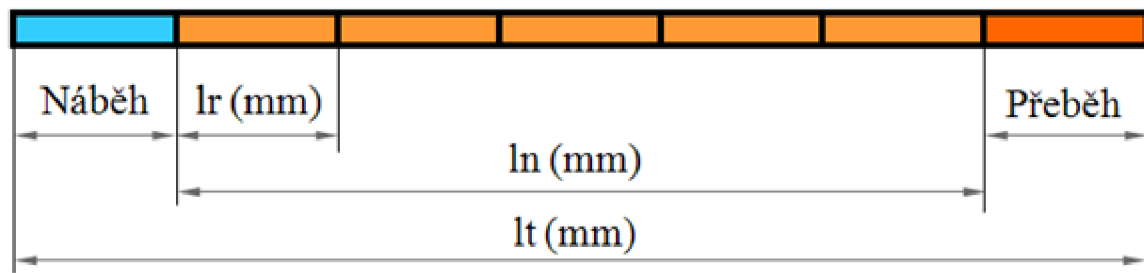
Je čára probíhající středem vrcholů a prohlubní, kdy součet ploch ohraničených profilem nerovnosti nad touto čarou je roven součtu ploch pod touto čarou.

*Pro přesnější určení střední čáry se používá výpočet pomocí metody nejmenších čtverců. Poloha vztažné čáry je určena tak, že součet čtverců úchylek této čáry je minimální; její poloha je jiná než poloha střední čáry podle plochy - je totiž jednoznačněji určena.*

### Schéma měřicí dráhy snímače

Náběh =  $l_r$  (mm)     $l_n = n \times l_r$  (mm)     $l_t = l_n + 2 \times l_r$  (mm)

Přeběh =  $l_r$  (mm)



Obr. 3.2. Měřicí dráha snímače

$l_r$  (mm) – základní délka profilu drsnosti

$l_n$  (mm) – vyhodnocovaná délka profilu

$l_t$  (mm) – celková délka snímání

$n$  (-) – počet základních délek (1,3,5)

**Základní délka  $l_r$  (mm)** je délka ve směru osy  $\underline{X}$ , použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil drsnosti.

**Vyhodnocovaná délka  $l_n$  (mm)** je délka ve směru osy  $\underline{X}$ , použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu.

### Parametry profilu nerovnosti

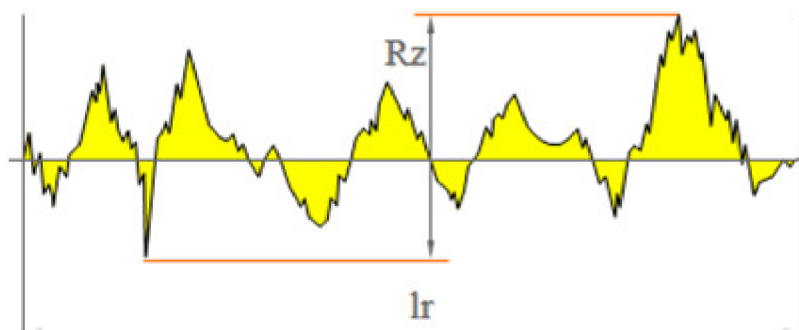
Dělí se do následujících skupin:

- **Amplitudové** (výškové) parametry, které určují pouze velikosti vrcholů nebo prohlubní, resp. obojí, bez ohledu na rozteč (např.  $R_a$ );
- **Frekvenční** parametry (v podélném směru), které se určují pouze při roztečích nepravidelností podél plochy (např. Průměrná šířka prvků profilu  $R_{sm}$ );
- **Hybridní** parametry, které jsou určeny kombinací amplitudy a rozteče (např. střední vlnová délka).

**Největší výška výstupků profilu drsnosti ( $R_p$ )** je výška ( $Z_p$ ) nejvyššího výstupku profilu drsnosti v rozsahu základní délky ve směru osy  $z$ .

**Největší hloubka prohlubně profilu drsnosti ( $R_v$ )** je hloubka ( $Z_v$ ) nejnižší prohlubně profilu drsnosti v rozsahu základní délky ve směru osy  $z$ .

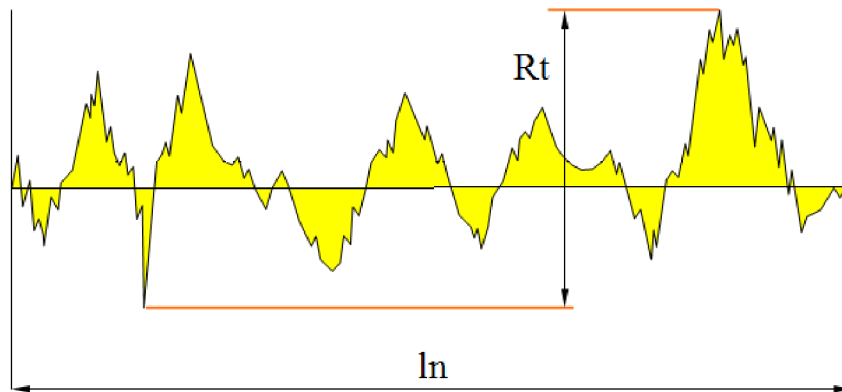
**Největší výška profilu drsnosti ( $R_z$ )** je součet výšky ( $Z_p$ ) nejvyššího výstupku profilu a hloubky ( $Z_v$ ) nejnižší prohlubně profilu drsnosti v rozsahu základní délky.



Obr. 3.3. Největší výška profilu  $R_z$

**Celková výška profilu  $R_t$**  patří mezi výškové parametry (výstupky a prohlubně). Celková výška profilu  $R_t$  ( $\mu\text{m}$ ) - je součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.

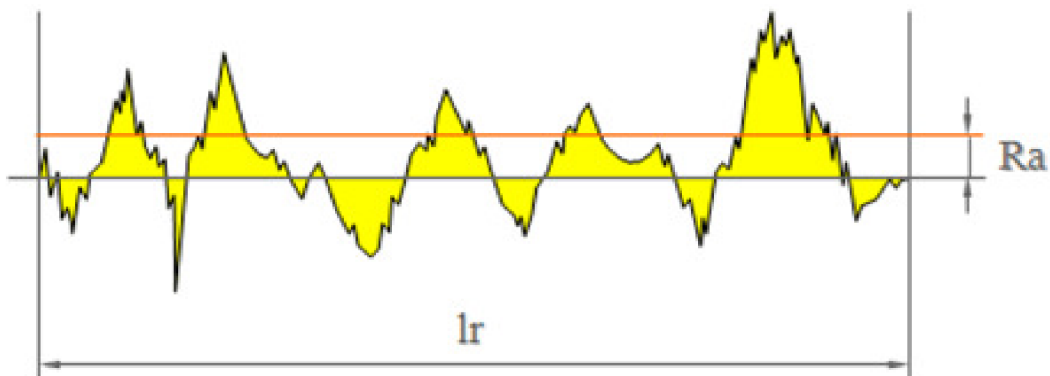
$$R_t = Z_{p_{\max.}} + |Z_{v_{\max.}}| \quad (45)$$



Obr. 3.4. Celková výška profilu  $R_t$

**Průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu  $R_a(\mu\text{m})$**  - je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (46)$$

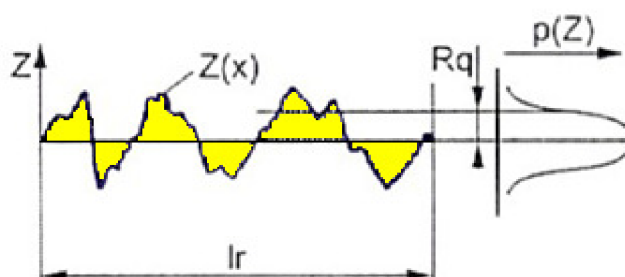


Obr. 3.5. Průměrná aritmetická úchylna profilu  $R_a$

**Průměrná kvadratická úchylna profilu  $R_q$  je dána vztahem:**

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z^2(x)| dx} \quad (47)$$

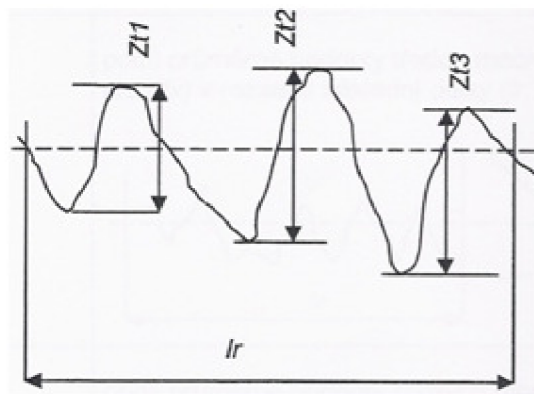




Obr. 3.6. Průměrná kvadratická úchylka  $R_q$

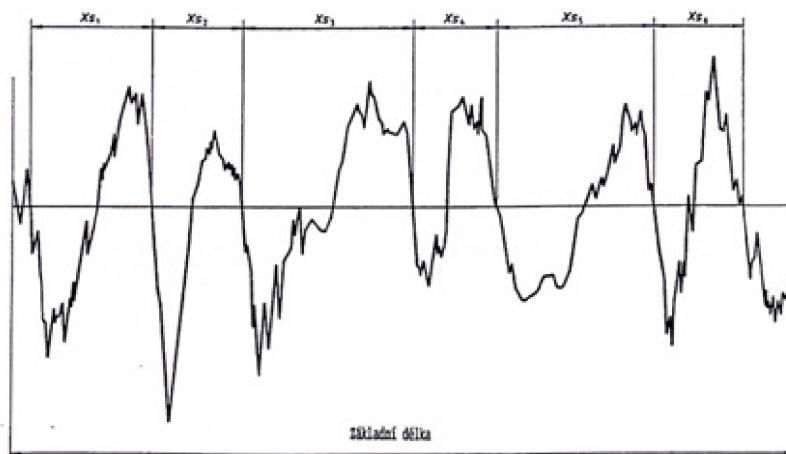
**Průměrná výška prvku profilu  $R_c$**  je průměrná hodnota výšek prvku profilu ( $Z_t$ ) v rozsahu základní délky ( $l_r, l_w, l_p$ ).

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{ti} \quad (48)$$



Obr. 3.7. Průměrná výška prvku profilu  $R_c$

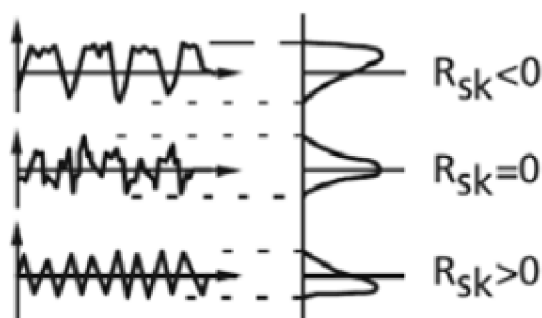
**Průměrná šířka prvků profilu  $R_{sm}$**  – je aritmetický průměr šířek  $X_s$  prvků profilu v rozsahu základní délky.



Obr. 3.8. Průměrná šířka prvků profilu  $R_{sm}$

**Šikmost posuzovaného profilu** je podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic  $Z(x)$  a třetí mocniny hodnoty  $Rq$  v rozsahu základní délky. Sklon  $Rsk$  (skewness) je hodnota asymetrie hustoty amplitudové křivky. Negativní sklon označuje povrch s dobrou nosností.

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left[ \frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right] \quad (49)$$

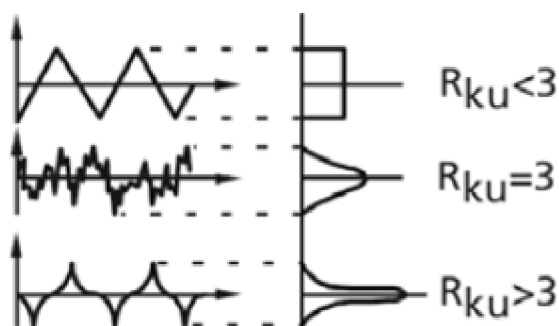


Obr. 3.9. Šikmost posuzovaného profilu  $Rsk$

**Špičatost posuzovaného profilu  $Rku$**  je podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic  $Z(x)$  a čtvrté mocniny hodnoty  $Rq$  v rozsahu základní délky. Strmost  $Kru$  (kurtosis) je hodnotou strmosti hustoty amplitudové křivky. Při normálním rozdělení hodnot profilu je

$$Rku = 3.$$

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[ \frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right] \quad (50)$$



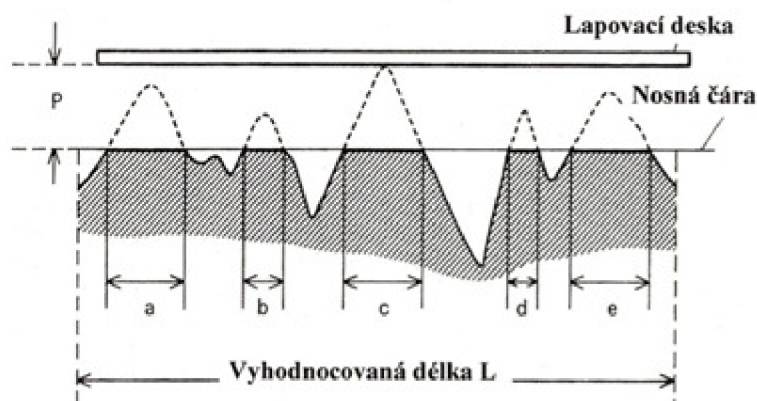
Obr. 3.10. Špičatost posuzovaného profilu  $Rku$

Hodnota šikmosti nemůže ukázat, zda vrcholy jsou rozloženy rovnoměrně kolem střední čáry. Toto umožňuje hodnota špičatosti  $Rku$ . Vysoké hodnoty  $Rku$  odpovídají špičatému profilu, nízké hodnoty profilu zaoblenému.

**Materiálový poměr profilu drsnosti (nosný podíl)**, nejvíce charakterizuje životnost výrobků, udává v inženýrské praxi velikost dotykové plochy při vzájemném pohybu dvou součástí. Materiálový poměr označovaný symbolem  $Rmr(c)$  je poměr (vyjadřovaný v %) délky nosné plochy v kterékoliv hloubce profilu na dané úrovni „c“ k vyhodnocované délce profilu

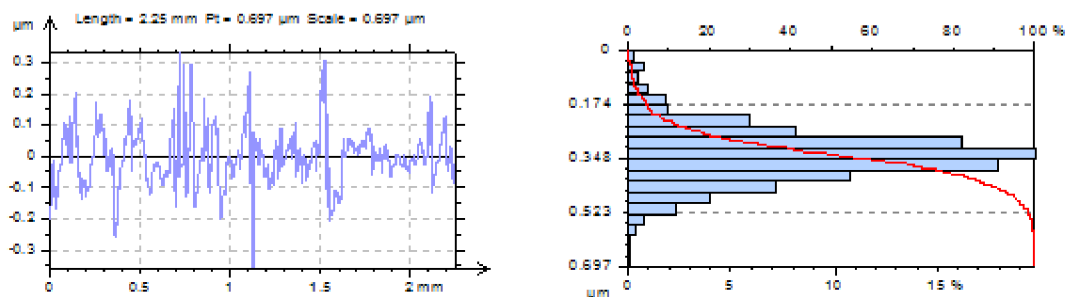
$$Rmr = \frac{a+b+c+d+e}{L} \cdot 100 \quad (51)$$

Tento materiálový poměr je poměr pouze délek, nikoliv plocha.



Obr. 3.11. Materiálový poměr  $Rmr$

**Abbot – Firestonova křivka** je nosná, nebo-li Abbot – Firestonova křivka nám umožňuje rozlišovat různé tvary profilu. Sestaví se vynesáním hodnot materiálového podílu v rozsahu celé hloubky profilu.



Obr. 3.12. Abbot – Firestonova křivka

**Hustota výstupků povrchu (Sds)** - počet výstupků na jednotkovou plochu

**Směr textury povrchu (Std)** – Stanovuje hlavní úhel směru textury povrchu. Parametr má význam, je-li hodnota menší než 0,5. Úhel směru se vyjadřuje ve stupních od  $-90^\circ$  do  $90^\circ$ .

**Poměrný aspekt textury povrchu (Str)**–Poměr nejkratší délky poklesu na 0,2 autokorelační funkce k největší délce. Parametr se pohybuje v rozmezí 0 až 1. Je –li hodnota blízká 1, lze povrch označit za isotropní, tzn. má ve všech směrech stejnou charakteristiku. Blíží-li se hodnota 0 je povrch anizotropní, tzn. s orientovanou nebo periodickou texturou povrchu.

**Fraktální dimenze povrchu (Sfd)** – parametr ukazuje tvarovou složitost profilu povrchu s využitím teorie fraktální geometrie. Dimenze povrchu se pohybuje mezi hodnotami 2 (rovinná plocha) a 3 (velmi složitý tvar povrchu). U některých tvarů povrchu nelze fraktální dimenzi stanovit a parametr pro hodnocení využít.

**Kvadratický sklon povrchu (Sdq)**

**Aritmetický průměr zakřivení výstupků povrchu (Ssc)**

**Poměrná rozvinutá styková plocha (Sdr)**

**Hloubka drsnosti jádra (Sk)**

**Redukovaná výška výstupku drsnosti (Spk)**

**Redukovaná hloubka prohlubní (Svk)**

**Horní materiálový podíl (Sr1), Dolní materiálový podíl (Sr2) aj.**

Norma obsahuje ještě další parametry jejichž využití v praxi je malé, proto je dále neuvádíme.

### 3.1 PRAVIDLA PRO HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU

1. Hodnocení sledované plochy provádíme pomocí hodnot, získaných z přístroje pro měření parametrů struktury povrchu na sledované ploše a následným porovnáním s hodnotami požadovanými pro funkčnost sledované plochy výkresem nebo výrobní dokumentací. Při hodnocení vycházíme z normy ČSN EN ISO 4288. Sledovaný parametr přitom nabývá hodnoty s určitým rozptylem, s čímž výše citovaná norma počítá a stanovuje proto pravidlo 16 - ti %. Podle pravidel normy provedeme *kontrolu homogenity povrchu*. Je-li struktura povrchu homogenní, hodnoty parametrů určených z celého povrchu měřeného vzorku nebo obrobku budou použity pro porovnání s hodnotami uvedenými na výkrese, nebo ve výrobní dokumentaci.
2. Je-li povrch obrobku složen z několika různých ploch s různou strukturou, budou hodnoty parametrů hodnoceny na každé ploše odděleně podle výrobní dokumentace nebo dle požadavků na výkrese.

3. Je-li povrch obrobku složen z několika různých ploch s různou strukturou, budou hodnoty parametrů hodnoceny na každé ploše odděleně podle výrobní dokumentace nebo dle požadavků na výkrese.

Měření je provedeno na té části povrchu, na které lze očekávat kritické hodnoty, to může být posouzeno vizuálním pozorováním. Pro získání nezávislých výsledků jsou jednotlivá měření na této části povrchu rozdělena rovnoměrně. Jsou – li použity speciální postupy měření, musí být popsány ve specifikacích v protokolu o měření.

Norma definuje dvě pravidla, která rozhodují o shodnosti jakosti ploch se specifikacemi ve výrobní dokumentaci.

#### **Pravidlo 16 - ti %**

Pro požadavky specifikované horní mezí parametru jsou považovány za přijatelné plochy, u kterých je maximálně 16% všech naměřených hodnot větších než tato mez. Pro dolní mez je tomu naopak. Norma předpokládá, že hodnoty kontrolovaného parametru se řídí zákonem normálního rozdělení.

Hodnota 16% odpovídá pro případ normálního rozdělení hodnot sledovaných parametrů reprezentativní hodnotě.

$$R_R = \mu + \sigma \quad (52)$$

$\mu$ .....střední hodnota základního statického souboru ( $n \rightarrow \infty$ )

$\sigma$ .....směrodatná odchylka základního souboru

Tato teoretická definice neumožňuje praktickou kvantifikaci reprezentativní hodnoty parametru, protože hodnoty  $\mu$  a  $\sigma$  nemůžeme zajistit. Norma doporučuje náhradní postup dle přílohy A:

Kontrolovaný povrch bude přijat (akceptován) a postup zkoušky zastaven, jestliže:

- první měřená hodnota nepřesáhne 70% hodnoty specifikované na výkrese, například při požadované hodnotě parametru  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ , se plocha přijme již po 1. měření, které má výsledek menší než  $3,2 \times 0,7 = 2,24 \mu\text{m}$ .
- první tři měřené hodnoty nepřesáhnou specifikovanou hodnotu (při specifikované hodnotě  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$  budou mít první tři měření  $R_a < 3,2$ )
- ne více než jedna z prvních šesti naměřených hodnot přesáhne specifikovanou hodnotu, ne více než dvě z prvních dvanácti měřených hodnot nepřesáhnou specifikovanou hodnotu

V každém jiném případě bude kontrolovaná plocha zamítnuta. Tato příloha má pouze informativní charakter a není závazná. Navíc spolehlivost rozhodování není definována.

### **Pravidlo maxima**

V průběhu kontroly nesmí žádná z naměřených hodnot překročit hodnotu požadovanou ve výrobní dokumentaci. Při požadavku stanovení největší dovolené hodnoty parametru je ve výrobní dokumentaci značka parametru doplněna indexem „max“. (např. Ramax). Pokud tomu tak není, platí pravidlo 16%. [9, 35]

Vzhledem k velkému rozptylu hodnot je tento požadavek těžko splnitelný.

## **3.2 POSTUP PRO KONTROLU A MĚŘENÍ PARAMETRŮ PROFILU DRSNOSTI DOTYKOVÝMI PŘÍSTROJI**

Pro praktické zjišťování hodnot charakteristik drsnosti povrchu existuje řada metod, z nichž zatím nepoužívanější je metoda dotyková. Tato metoda využívá ostrého hrotu, který se v daném směru posouvá po povrchu a umožňuje získat informace o jeho profilu.

Metoda umožňuje zjišťovat číselné hodnoty nebo grafy normalizovaných a nenormalizovaných charakteristik drsnosti povrchu a lze ji využít i pro moderní statistický a spektrální hodnocení textury povrchu.

Snímání profilu měřeného povrchu může být provedeno jako snímání:

- **Absolutní** – měřící základnou je velmi přesná přímá nebo tvarová dráha snímače (viz ČSN EN ISO 4287, 4288)
- **Relativní** – měřící základnou je dráha generovaná kluznou patkou snímače klouzající po měřeném povrchu

Velikost měřených nerovností musí být přiměřena měřicímu rozsahu snímače (vertikální zdvih). Nastavená hodnota snímané délky by měla zahrnovat pětinasobek základní délky plus dráhu náběhu a doběhu snímače. Měřený objekt musí být, pokud je to možné, upnut, prostorově orientován a snímač musí být vhodně umístěn na měřený povrch. Musí být nastaveny odpovídající pracovní podmínky:

- Měřicí rozsah
- Snímaná délka
- Typ filtru
- Základní délka (cutoff) filtru

Při hodnocení parametrů profilu drsností postupujeme následovně:  
odhadne se neznámý parametr profilu drsnosti - vizuálně  
pro odhadnutý parametr se určí dle tabulky hodnoty  $l_r$

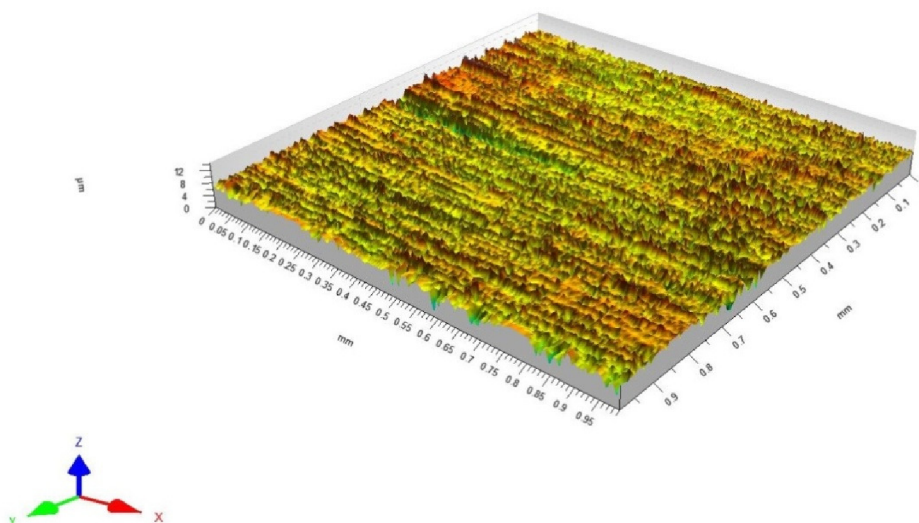
získá se reprezentativní hodnota žádaného parametru – měřením

Tab. 2. Základní délky drsnosti pro měření

Ra ( $\mu\text{m}$ )	Základní délka drsnosti $l_r$ (mm)	Vyhodnocovaná délka drsnosti $l_n$ (mm)
(0.006; 0.02 >	<b>0.08</b>	0.4
(0.02; 0.1 >	<b>0.25</b>	1.25
(0.1; 2 >	<b>0.8</b>	4
(2; 10 >	<b>2.5</b>	12.5
(10; 80 >	<b>8</b>	40

### Plošné hodnocení textury povrchu

Třírozměrné hodnocení textury povrchu (3D) vyžaduje aplikaci použitelných poznatků z dvojrozměrného hodnocení textury povrchu (2D) a zavedení dalších potřebných informací pro úplný popis. Pro úplný prostorový popis nerovnosti povrchu lze aplikovat topografickou metodu využívající spojitý záznam v jednotlivých diskrétně posunutých rovinách řezu (posunutí je řádově v mikrometrech). Zobrazení hodnocené plochy je provedeno v šikmém pohledu. Plošné hodnocení (3D) je realizováno specifickými parametry, která vyžadují použití speciálního softwaru.



Obr. 3.13. Třírozměrné hodnocení textury povrchu

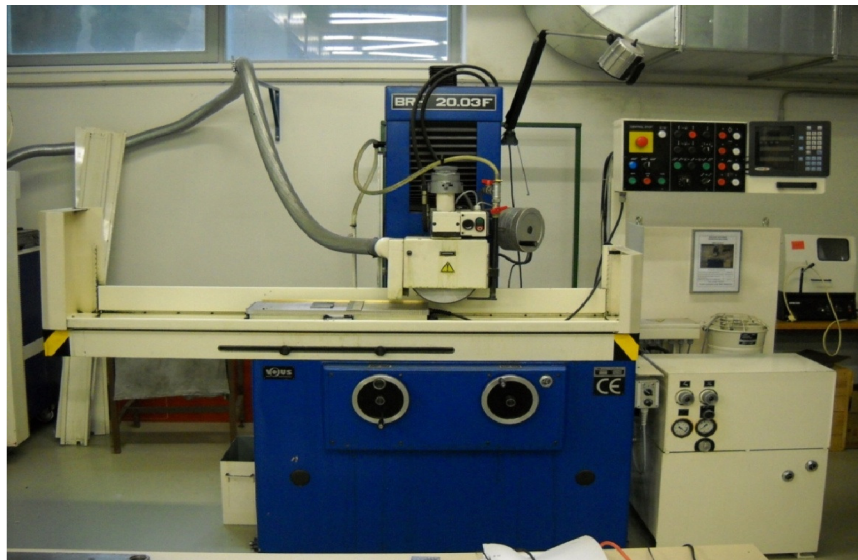


## 4 PODMÍNKY EXPERIMENTÁLNÍHO ZKOUMÁNÍ TECHNOLOGICKÉHO PROCESU

### 4.1 POUŽITÉ VÝROBNÍ STROJE

Experimentální určení vlivu charakteristik kmitání na jakost funkčních ploch po broušení se provedlo na rovinné vodorovné (horizontální) brusce BRH 20.03F (Obr. 4.1). [3, 7, 23]

Jedná se o brusku s horizontálním vřetenem a pravoúhlým pracovním stolem. Je určena pro broušení rovinných a tvarových ploch, součástek z oceli, litiny a ostatních kovových i nekovových materiálů, u kterých se vyžaduje dosažení vysoké přesnosti a kvality zpracování. Obrábění je realizováno obvodem brousicího kotouče. Broušené součástky podle svých rozměrů, tvaru a materiálu mohou být upínané přímo na elektromagnetickou desku, nebo prostřednictvím vhodných upínačů.



Obr. 4.1. Snímek brusky BRH 20.03F

Bruska pracuje v uzavřeném automatickém pracovním cyklu. K řízení cyklu je vybavena číslicovou indikací NV 300E fy FAGOR, sloužící k odměřování dráhy svislého a příčného posuvu při práci v ručním režimu a k řízení posuvu v automatickém pracovním cyklu.

Z hlediska koncepce se bruska BRH 20.03F vyznačuje tím, že stůl vykonává podélný pohyb po vedení vyhotoveném na předním loži a příčný posuv vykonává brousicí vřeteník spolu se stojanem, ve kterém je vedení pro jeho svislý posuv. Hydraulický agregát a elektrická skříň tvoří samostatné celky umístěné mimo stroj. Bruska také může pracovat s ruční obsluhou v uzavřeném nebo neuzavřeném automatickém cyklu.



*Tab. 3. Vybrané parametry brusky BRH 20.03F*

Parametr stroje	jednotka	hodnota
Výška stroje	[mm]	2240
Hmotnost stroje	[kg]	1860
Rozměry brousícího kotouče	[mm]	250x20 – 50x76
Pracovní plocha stolu	[mm]	200 x 630
Rychlost stolu plynule regulovatelná	[m.min <sup>-1</sup> ]	1 – 23
Otáčky brousícího vřetena	[min <sup>-1</sup> ]	2550

## 4.2 BROUSICÍ KOTOUČE [10, 24, 45]

V technologické praxi, zvláště v hromadné a velkosériové výrobě se používají brousící kotouče z elektrokorundu.

### 4.2.1 Elektrokorund

Krystalický oxid hlinitý (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), který se získává vytavením látek bohatých tímto oxidem (bauxity, čistý oxid hlinitý) v elektrických pecích. Podle obsahu oxidu hlinitého má elektrokorund různou barvu, strukturu a vlastnosti. Rozlišujeme elektrokorund trojího druhu: normální, bílý a monokorund.

Pro experiment byly využity kotouče *EN12413 250x20x76 A99 80 I 8 V 40m.s<sup>-1</sup> 3055min<sup>-1</sup>*. Jedná se jemnozrnné kotouče s otevřenou strukturou a keramickým pojivem. Jako základní brusivo je v těchto nástrojích využit bílý elektrokorundA99. Tento typ brusiva je vhodný na broušení náradí z nástrojových, rychlořezných a korozivzdorných ocelí. Charakteristika brousícího kotouče A je znázorněna v *Tab. 4*.

*Tab. 4. Charakteristika kotouče*

Parametr	Kotouč A	
	Označení	Popis
Rozměr	–	250x20x76 [mm]
Druh brusiva	A99	Elektrokorund bílý
Zrnitost	80	Jemná
Tvrдост	I	Měkký
Struktura	8	Otevřená
Pojivo	V	Keramické
Obvod. rychlost	–	40 [m.s <sup>-1</sup> ]

## 4.2.2 Diamant

Diamant, jako jedna z modifikací čistého uhlíku, krystalizuje v kubické soustavě (grafit, jako polymorfní modifikace uhlíku, krystalizuje v hexagonální soustavě, ve formě desek). Strukturu uspořádání uhlíkových atomů v elementární mřížce diamantu tvoří dvě plošně centrované kubické mřížky, které jsou proti sobě navzájem posunuty ve směru úhlopříčky tělesa o jednu čtvrtinu délky. Příčinou velké tvrdosti je, že se každý atom váže se svými čtyřmi sousedními atomy čtyřmi dvojicemi valenčních elektronů. V běžných rozpouštědlech je diamant nerozpustný. V některých roztavených kovech (železo, kobalt, nikl, platina atd.) se však rozpouští a po jejich ochlazení se z nich vylučuje jako grafit. Tím je zásadně omezeno použití diamantových nástrojů. Při opracování železných materiálů dochází ke zvýšenému opotřebení funkční části nástroje v důsledku difuze uhlíku do materiálu obrobku a současně urychlení grafitizace (přeměna diamantu na grafit) diamantu.

S rostoucí teplotou dochází u diamantu na vzduchu k oxidaci povrchu. Při teplotě 700°C se spaluje uhlík na oxid uhličitý. Současně s tím dochází ke grafitizaci diamantu, na kterou mají značný vliv nečistoty. Při teplotách nad 850°C dochází za přítomnosti kyslíku ke vznícení diamantu.

Tab. 5. Vlastnosti diamantu

Vlastnost	Hodnota
Krystalická mřížka	Kubická
Mřížková konstanta	b=0,356
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	3,5
Tvrdost dle Vickerse [Hv]	10 000
Tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	560
Délková roztažnost [K <sup>-1</sup> ]	0,8*10 <sup>-6</sup>

Pro experimenty byly použity brousící kotouče D100K100B-IV s brousící vrstvou 2mm.

Tab. 6. Charakteristika diamantového kotouče

Parametr	Označení	Popis
Tvar kotouče	1A1	Válcový
Rozměr		250x10x76 2-250-10/2
Druh brusnice	D	Syntetický diamant
Zrnitost	100	Jemná
Koncentrace	K100	Střední
Pojivo	B-IV	pryskyřice

### 4.2.3 Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid boru (KNB) je v současnosti druhým nejtvrdějším materiálem. Je to syntetický materiál, který se v přírodě nevyskytuje. Jedná se tedy o syntetický materiál uměle vyrobený z hexagonálního nitridu bóru. Výroba krystalů KNB je uskutečňována použitím podobné technologie jako při produkci syntetického diamantu. KNB je vyráběn transformací hexagonálního nitridu bóru na kubickou formu. Velikost a morfologie krystalů KNB je ovlivňována vzájemným poměrem mezi použitým rozpouštědlem/katalyzátorem, tlakem, teplotou a časem transformace.

Kubický nitrid boru má oproti diamantu téměř dvojnásobnou tepelnou odolnost. Běžně vydrží kubický nitrid boru teploty 1500 až 1600 °C. Při vyšších teplotách se v přítomnosti vzdušného kyslíku rozkládá na oxidy dusíku a bor. Chemická stálost je u kubického nitridu boru značně lepší než u diamantu. Nerozpouští se v běžných rozpouštědlech ani za vyšších teplot. V roztavených kovech se nerozpouští. Další z předností je vysoká pevnost v ohybu. Dobrá tepelná odolnost a vysoká chemická stálost značně rozšiřuje oblasti použití kubického nitridu boru.

Tab. 7. Vlastnosti KNB

Vlastnost	KNB
Typ mřížky	Kubická
Délka strany mřížky [nm]	0,3616
Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]	3,48
Tvrdość podle Vickerse [Hv]	8000-10000
Tepelná stálost [°C]	1500-1600
Počet atomů v 1 cm <sup>3</sup>	1,69x10 <sup>23</sup>

Pro experimenty byly použity brousící kotouče tvar 1A1 B107K100B-III s brousící vrstvou 2mm.

Tab. 8. Charakteristika diamantového kotouče

Parametr	Označení	Popis
Tvar kotouče	1A1	válcový
Rozměr		250x10x76 2-250-10/2
Druh brusnice	B	kubický nitrid bóru
Zrnitost	107	jemná
Koncentrace	K100	střední
Pojivo	B-III	pryskyřice

#### 4.2.4 Vyvažování brousících kotoučů [1, 19, 26, 45]

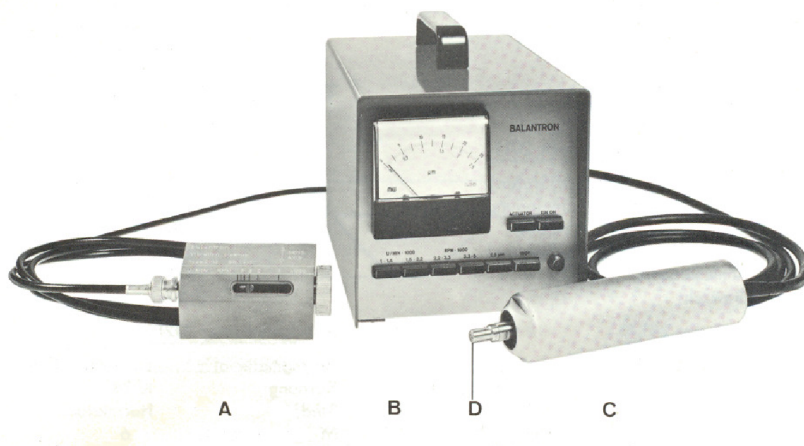
U výrobních zařízení s rotačním hlavním nebo vedlejším pohybem dochází ke vzniku kmitání hlavních nebo vedlejších funkčních částí v důsledku nevyváženosti otáčejících se dílů. Kmitání technologické soustavy má negativní vliv jak na jakost povrchu výrobků, taktéž na poruchovost, životnost případně až havárii výrobních strojů. Tento jev nastane, pokud těžiště rotující soustavy se nenachází v geometrickém středu otáčení.

Technologie broušení patří do skupiny dokončovacích metod obrábění s nedefinovanou geometrií mnohabřitého nástroje. Jednou z charakteristických vlastností broušení je vysoká řezná rychlost, nejčastěji  $35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . U nevyváženého rotujícího brousícího kotouče vznikají velké odstředivé síly, které zatěžují vřeteno, ložiska a celý vřeteník. Tyto síly negativně ovlivňují soustavu Stroj-nástroj-obrobek-přípravek; v důsledku těchto sil vznikají výrobní nepřesnosti, zvyšuje se opotřebení nástrojů, zhoršuje se jakost broušených ploch.

Pro zajištění požadované kvality je nutné, aby brousící kotouč byl vyvážen. Vyvažování spočívá v uspořádání hmoty tak, aby se těžiště rotujícího nástroje, příruby a vřetena shodovalo s geometrickým středem této soustavy, případně s osou otáčení rotujících částí. Tím se nevyváhy eliminují a brousící kotouč pracuje klidně, jsou zajištěny zvolené technologické podmínky. Pokud není brousící kotouč vyvážený, vzniká při vysokých řezných rychlostech odstředivá síla, která zatěžuje díly stroje střídavým zatížením. To se projevuje vznikem chvění a nežádoucím zhoršením jakosti obrobeneho povrchu a rozměrové přesnosti.

Brousící kotouče se vyvažují staticky nebo dynamicky. Statické vyvažování je dostačující pokud šířka kotouče je menší než  $b/10$  průměru nástroje. U větších šířek

nástrojů je třeba vyvažovat dynamicky, neboť nevyvážené hmoty jsou zpravidla rozloženy v různých rovinách. Stejně tak je dynamické vyvažování doporučováno při zvýšených rezných rychlostech (nad  $45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Dynamické vyvažování se používá též, je-li potřeba zajistit vysoké nároky na přesnost a jakost povrchu při broušení. Při našich experimentech byl použit přístroj Balantron 2001 (Kistler Instrumente AG), který provádí vyvažování za běhu kotouče, odebráním částic z obou čel nástroje (Obr. 4.2.).



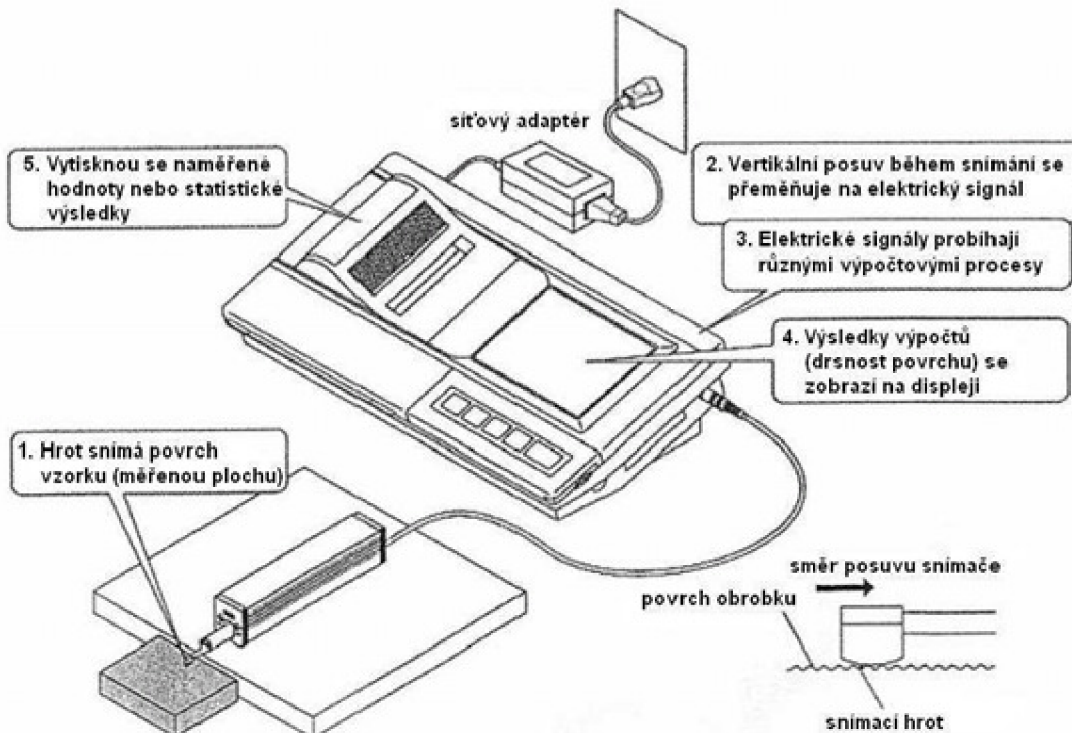
Obr. 4.2. Vyvažovací přístroj Balantron 2001 [1]

A – snímač, B – ovládací jednotka, C – aktuator, D – ubírací část aktuatoru

### 4.3 POUŽITÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Měření parametrů jakosti bylo realizováno na přístroji Mitutuyou SJ – 301 (Obr. 4.3.). Jedná se o přístroj vhodný pro použití měření drsnosti v dílenském prostředí. Snímací hrot přístroje zaznamenává i nejjemnější nepravidelnosti povrchu vzorku. Drsnost se vypočítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravidelnosti povrchu. Výsledky měření se zobrazí digitálně i graficky na speciální dotekové ovládací obrazovce a pomocí integrované tiskárny lze tyto výsledky vytisknout.





Obr. 4.3. Schéma přístroje Mitutoyo SJ-301

## 4.4 MATERIÁLY VZORKŮ

Vzhledem k návaznosti experimentů na předchozí práce byly zvoleny materiály  $100Cr6+QW$  (ČSN 4 14109.4) a  $X210Cr12+QW$  (ČSN 4 19436.4). Oba materiály jsou použity ve stavu kaleném. Hodnota tvrdosti po zakalení je 60HRC. Volba těchto materiálů byla závislá na jejich složení, respektive způsobu využití v praxi. Materiál  $14109.4$  je používán jako etalonový materiál pro broušení, materiál  $19436.4$  je jeden z nejčastěji využívaných materiálů pro funkční části vstřikovacích forem.

### 4.4.1 Materiál $100Cr6+QW$ (ČSN 4 14109.4)

Jedná se o ocel, která je nejpoužívanějším materiálem zejména pro výrobu ložisek. Zároveň se používá v nevyčísitelném množství dalších průmyslových aplikací. Patří do skupiny oceli, jež jsou legovány chromem popřípadě manganem, či křemíkem a hliníkem. Jsou to nejvíce používané slitinové oceli, které umožňují dosáhnout velmi dobrých vlastností bez použití nedostatkových prvků. Obvykle se cementují, zušlechťují, kalí, některé jsou určeny k nitridování. Na tyto oceli je kladen velký požadavek, co se týče siričků a oxidů, hlavně  $Al_2O_3$ . Chemické složení materiálů uvádí Tab. 9.

Tab. 9. Chemické složení oceli 100Cr6+QW (14109.4)

Prvek	Obsah [%]
Uhlík	0,98 – 1,1
Chrom	1,3 – 1,6
Mangan	0,25 – 0,45
Křemík	0,15 - 0,35
Síra	0,025 max.
Fosfor	0,025 max.

#### 4.4.2 Materiál X210Cr12 (ČSN 4 19436.4)

Jedná se o vysoce legovanou chromovou ocel s velkou prokalitelností ke kalení v oleji a na vzduchu, se zvlášť vysokou odolností proti opotřebení jak kovovými tak minerálními látkami. Vyznačuje se také dobrou řezivostí, velmi vysokou pevností v tlaku, značně nízkou houževnatostí zejména v příčném směru, zvýšenou citlivostí na rychlý a nestejný ohřev, vhodností ke kalení na sekundární tvrdost (možnost např. nitridování), obtížnou obrusitelností, obtížnou tvárností za tepla a poněkud ztíženou obrobitelností v žíhaném stavu. Má velmi všestranné využití (nástroje pro stříhání za studena, nástroje pro tváření, řezné nástroje, plastikářské formy, nástroje na drcení a mletí atd.). Chemické složení uvádí Tab. 10.

Tab. 10. Chemické složení oceli X210Cr12+QW (19436.4)

Prvek	Obsah [%]
Uhlík	1,8 – 2,05
Chrom	11 – 12,5
Mangan	0,2 – 0,45
Nikl	0,5 max.
Síra	0,03 max.
Fosfor	0,03 max.
Křemík	0,2 – 0,45

## 4.5 LASER [37, 46]

V rámci experimentální činnosti bylo použito zařízení. Laser XL-80, který vytváří stabilní svazek laserového záření s vlnovou délkou odpovídající národním a mezinárodním normám. Stabilita frekvence vyzařované vlnové délky je  $\pm 0,05$  ppm za 1 rok a  $\pm 0,02$  za 1 hodinu. Těchto hodnot je dosaženo dynamickou teplotní stabilizací délky laserové trubice v řádu několika málo nanometrů.

Zaručená přesnost lineárního měření je  $\pm 5$   $\mu\text{m}/\text{m}$  v celém rozsahu podmínek prostředí, tj. při teplotě  $0$  °C až  $40$  °C a tlaku  $650$  mbar až  $1150$  mbar. Systém čte hodnoty s frekvencí  $50$  kHz i při maximální rychlosti lineárního měření  $4$  m/s. Dosahovaná lineární rozlišitelnost  $1$  nm je zachována v celém rozsahu rychlostí měření (platí při použití kompenzační jednotky XC-80).

Laser XL-80 má zabudovaný USB port a nepotřebuje tedy samostatný interface laser – PC. Laserová hlavice je standardně vybavena konektorem s výstupem pomocného analogového signálu. Z výroby je možno nastavit i výstup obdélníkového signálu. Také je možno připojit signál pro synchronizaci měření dat.

Signalizační LED diody ukazují stav stabilizace laseru a sílu signálu. Tyto diody také slouží jako podpora softwarových informačních návěstí. Díky uvedenému vybavení, době stabilizace kratší než  $6$  minut a možnosti přepnutí do režimu velkého rozsahu ( $40 - 80$  m) se systém XL-80 snadno a rychle používá.

### Příslušenství laserového systému

- Kompenzační jednotka XC-80 (není součástí vybavení laboratoře)
- Měřicí optika s příslušenstvím
- Stativ a stolek
- Převážný kufr

### 4.5.1 Kompenzační jednotka XC-80

Kompenzátor pomocí „inteligentních snímačů“, které umí zpracovat naměřenou hodnotu, měří velmi přesně teplotu vzduchu, tlak vzduchu a relativní vlhkost. Na základě zjištěných údajů upravuje vlnovou délku laseru tak, aby do výpočtů stále vstupovala její správná hodnota, čímž prakticky eliminuje jakékoliv chyby měření vyplývající ze změn podmínek prostředí.

Stejně jako laser XL-80 je i kompenzátor připojen přímo k PC prostřednictvím USB portu, který také zajišťuje napájení kompenzátoru XC-80.



## 4.5.2 Měřicí optika s montáží

Hlavní části optiky pro lineární měření jsou:

- Dělič paprsku,
- Dva odražeče paprsků,
- Dvě zaměřovací krytky pro lepší nastavování paprsků.

Pokud zkombinujeme dělič paprsku a lineární odražeč, dostaneme lineární interferometr. Kostky optiky je vyrobeny z lehké slitiny hliníku, který redukuje chvění stroje a vliv teploty na materiál. Dle potřeby je lze různě kombinovat, vzájemné spojení zajišťují šrouby.

Měřicí optiku je nutné na měřený přístroj připevnit. K tomu slouží univerzální sada příslušenství obsahující potřebné komponenty. Využívají se především magnetické držáky, montážní sloupky, pomocné upínací kostky apod.

## 4.5.3 Technické příslušenství laserového systému

Součástí laserového systému XL je i stolek na stativu usnadňující manipulaci se zařízením. Stolek stativu XL umožňuje přesné pootočení a posun laserové jednotky XL-80 při ustavování a je navržen tak, aby mohl být připevněn k laserové jednotce pro rychlé uložení i rozbalení systému.

Upínací mechanismus stolku umožňuje rychlé a bezpečné upevnění na stativ. V aplikacích, kdy nevyhovuje instalace na stativ, např. při montáži přímo na stůl obráběcího stroje, lze stolek s laserem také uchytit na většinu standardních magnetických držáků pomocí adaptéru se závitem M8. Laserový systém XL-80 je navržen tak, aby bylo zařízení maximálně mobilní a metrolog měl všechny potřebné komponenty v dosahu. Proto je vybavení potřebné pro měření přenášeno ve speciálním, nárazuvzdorném kufříku.

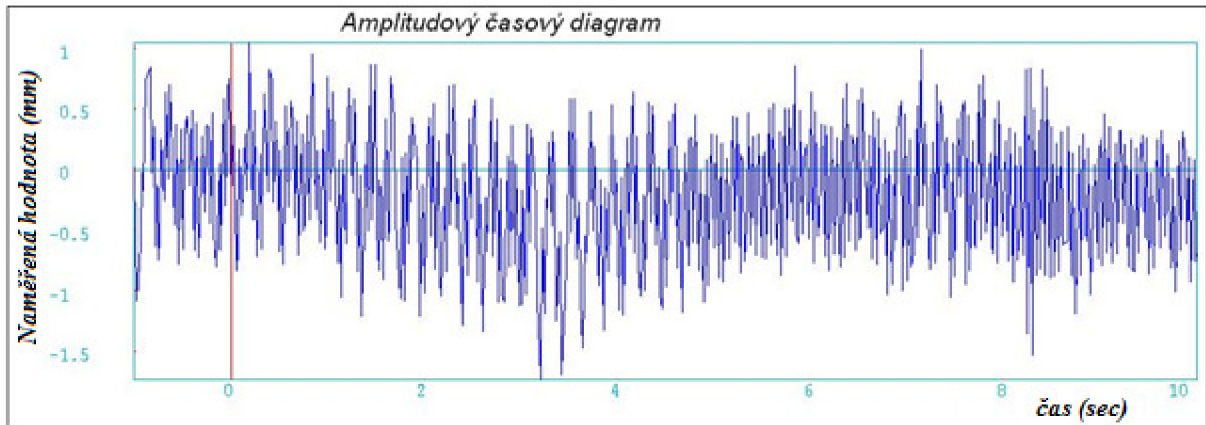
## 5 HODNOCENÍ JAKOSTI MĚŘICÍCH SYSTÉMŮ VIBRACÍ

Jakost měřidel lze hodnotit z mnoha různých hledisek. Za základní hledisko je ovšem považováno hledisko přesnosti. Přesnost měřidla je přitom nutno vždy přísně oddělit od pojmu „přesnost měření“. Pro hodnocení přesnosti měřidla je potřeba vyloučit všechny vlivy, které nemají s hodnoceným měřidlem žádnou souvislost. Přesnost měřidla je jeho schopnost udávat za stanovených podmínek výstupní signály blízké pravé hodnotě měřené veličiny (přesnost je kvalitativní pojem). [33]

Vyvažovací přístroj Balatron 2001, uvádí maximální amplitudu první harmonické frekvence. Na základě těchto hodnot pak zpětnou vazbu provádí dynamické vyvažování brousicích kotoučů. Provedli jsme proto úpravu elektronické části tohoto přístroje umožňující přesný záznam dat pomocí PC.

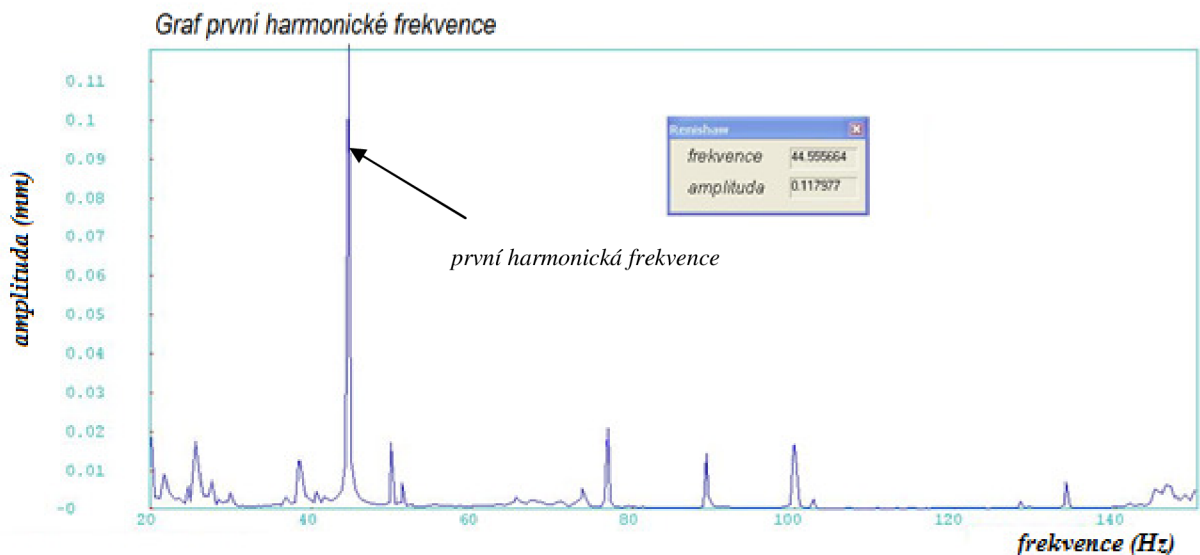
Přístroj Balatron 2001 je piezoelektrický akcelerometr, absolutní senzor vibrací. Piezoelektrický krystal při kmitání vyvolá sílu, která je úměrná zrychlení kmitající hmoty snímače. Síla působící na piezoelektrický prvek generuje náboj, který je úměrný zrychlení. Výhodou piezoelektrických snímačů je velký dynamický a frekvenční rozsah, vysoká stabilita a nízká hmotnost. Tyto charakteristiky předurčují piezoelektrické snímače pro hodnocení charakteristik kmitání technologických soustav. [1]

Pro posouzení vhodnosti použití přístroje Balatron 2001 bylo provedeno měření a statistické vyhodnocení výsledků v porovnání s laserinterferometrem Reinshaw XL 80. Pro experimenty byl použit brousicí kotouč se zrny z kubického nitridu boru a kotouč se zrny ze syntetického diamantu. Konstrukčně a tvarově jsou tyto typy kotoučů vyráběné z lehkých slitin a pouze tenká 2 mm vrstva na obvodu kotouče je z brousicích zrn. Tato úprava zaručí vysokou vyváženost brousicího kotouče a tím co nejméně ovlivní kmitání technologické soustavy. Princip měření a umístění snímačů je znázorněný na *Obr. 4.1*. Při měření byla 30krát zaznamenaná vibrace pomocí softwaru laserinterferometru Reinshaw XL 80 a pomocí SpiderCorrer – software byla zaznamenaná vibrace snímače přístroje Balatron. Proces broušení byl opakován pro zajištění statistické významnosti pětkrát. Příklad amplitudového časového diagramu je na obr *Obr. 5.1*.



Obr. 5.1. Amplitudový časový diagram software Sigview verze 2.4.0 pro přístroj Renishaw XL 80

Po provedené vibroanalýze, odfiltrování vyšších harmonických frekvencí byla určena první harmonická frekvence a amplituda. Získaná data byla dále zpracována pomocí statistického softwaru (Minitab verze 14). Příklad grafu první harmonické frekvence, tj. frekvence, kde je maximální amplituda kmitání, je uvedený na Obr. 5.2. Výsledky FFT analýzy v Tab. 12.



Obr. 5.2. Graf první harmonické frekvence přístroje Renishaw XL 80

Frekvence zjištěné I. harmonické byly shodné, jak v případě kotouče z KNB, tak diamantu. Velikost této frekvence byla 44,556 Hz pro případ měření přístrojem XL80 (Obr. 5.2.). Výsledky byly získány pomocí diamantového kotouče, který zaručil lepší dynamickou vyváženost.

*Tab. 11. Statistické charakteristiky výběrových souborů kotouče D100 K100 B-VI pro Balantron (digitalizovaný)*

Total									
Variable	Count	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	
C5	10	44,551	0,00800	0,0253	0,06	44,531	44,531	44,531	
Variable	Q3	Maximum	Range	IQR					
C5	44,580	44,580	0,0490	0,0490					

Naměřené výsledky jsou srovnatelné a odpovídají přesnostem měření jednotlivými přístroji

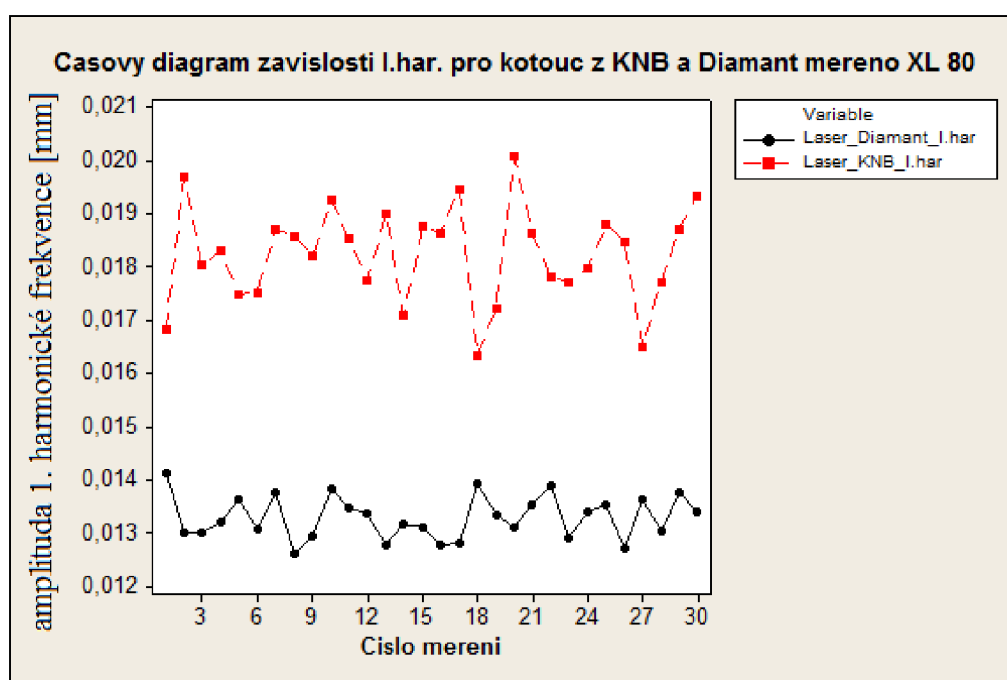
*Tab. 12. Výsledky FFT analýzy pro Renishaw Xl80 a Balantron*

<b>XL 80 D100 K100 B-VI</b>	<b>Balantron 2001 D100 K100 B-VI</b>	<b>XL80 B107 K100 B-III</b>	<b>Balantron 2001 B107 K100 B-III</b>
I.har (mm)	I.har (mm)	I.har (mm)	I.har (mm)
0,0141108	0,0134491	0,0168214	0,0181355
0,0130057	0,0133512	0,0196831	0,0174649
0,0130134	0,0132077	0,0180406	0,0186688
0,0132101	0,0130503	0,0183117	0,0181105
0,0136197	0,0132104	0,0174772	0,0184764
0,0130802	0,0131813	0,0175246	0,0175259
0,0137795	0,0131429	0,0187127	0,0174066
0,0126193	0,0133797	0,0185926	0,0180001
0,0129358	0,0131452	0,0182028	0,0179806
0,0138444	0,0128679	0,0192711	0,0177749
0,0134682	0,0129619	0,0185481	0,0177506
0,0133620	0,0130569	0,0177481	0,0180226
0,0127773	0,0131201	0,0190161	0,0181165
0,0131630	0,0128504	0,0170865	0,0178560
0,0131185	0,0130281	0,0187746	0,0178100
0,0127801	0,0131528	0,0186578	0,0181076
0,0127965	0,0135679	0,0194661	0,0179188
0,0139385	0,0133868	0,0163383	0,0181563
0,0133355	0,0131901	0,0172141	0,0179049
0,0131180	0,0134038	0,0200805	0,0175212
0,0135165	0,0131975	0,0186326	0,0181594
0,0139105	0,0131770	0,0178219	0,0178608

0,0128968	0,0135322	0,0177237	0,0180915
0,0134056	0,0132074	0,0179891	0,0177484
0,0135212	0,0132085	0,0188035	0,0177066
0,0127092	0,0130886	0,0184823	0,0177983
0,0136311	0,0132127	0,0165030	0,0184849
0,0130526	0,0132728	0,0177336	0,0176503
0,0137723	0,0131762	0,0187178	0,0179784
0,0134063	0,0131087	0,0193353	0,0180634

## 5.1 STATISTICKÉ HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTŮ

Pro relativní porovnávání přesnosti přístrojů Reinshaw XL 80 a Balantron 2001 byla použita statistická metoda pomocí software Minitab 2001 verze 14. V prvním kroku se provedla kontrola dat na vychýlené hodnoty (hrubá chyba). Kontrola se provádí pomocí metodiky vnitřní a vnější hradby. Za vychýlenou se považuje taková hodnota, která převyší v boxplotovém diagramu 1,5 interkvartilovém rozpětí.

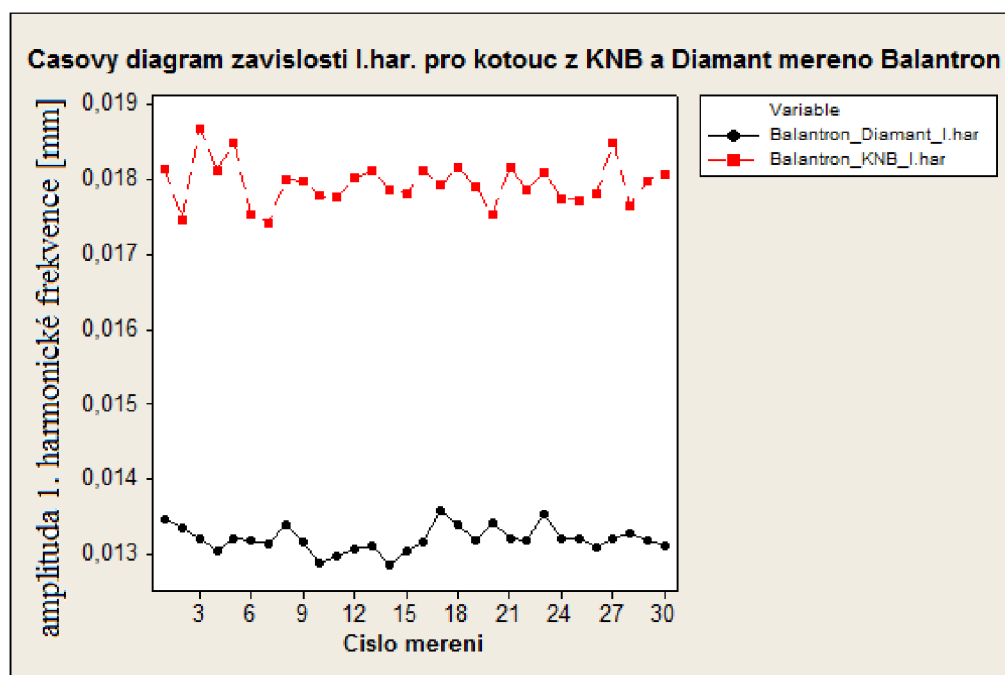


Obr. 5.3. Časový diagram závislosti amplitudy 1. harmonické frekvence pro kotouče z KNB a Diamantu měřené pomocí laserineterferometru XL 80

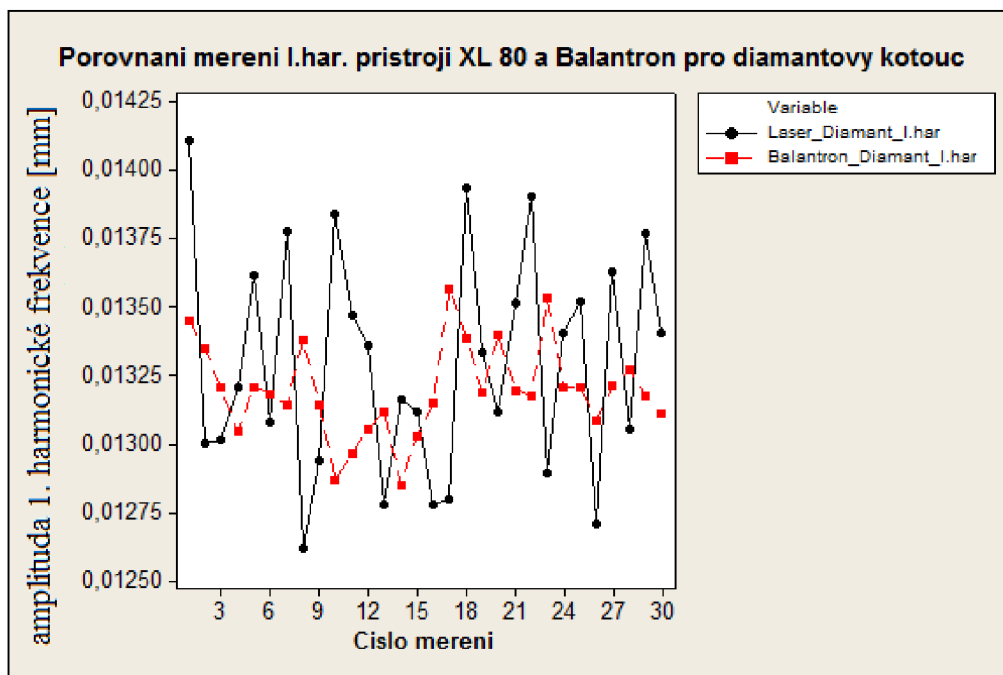
Z hodnocení grafu vyplývá, že hodnoty první harmonické frekvence pro sledované měřicí prostředky jsou vůči sobě posunuté. Při úpravě elektronické části

přístroje Balantron došlo ke vzniku systematické chyby. K podobným výsledkům při statistickém hodnocení měřicích prostředků došlo i při použití broušícího kotouče s vrstvou brusiva z diamantu, tj. kotouče D100K100B-VI. Pro zpracování výsledků měření pomocí laser interferometru Reinshaw XL 80 a Balantron 2001 byly dále provedené **F** testy a **T** testy.

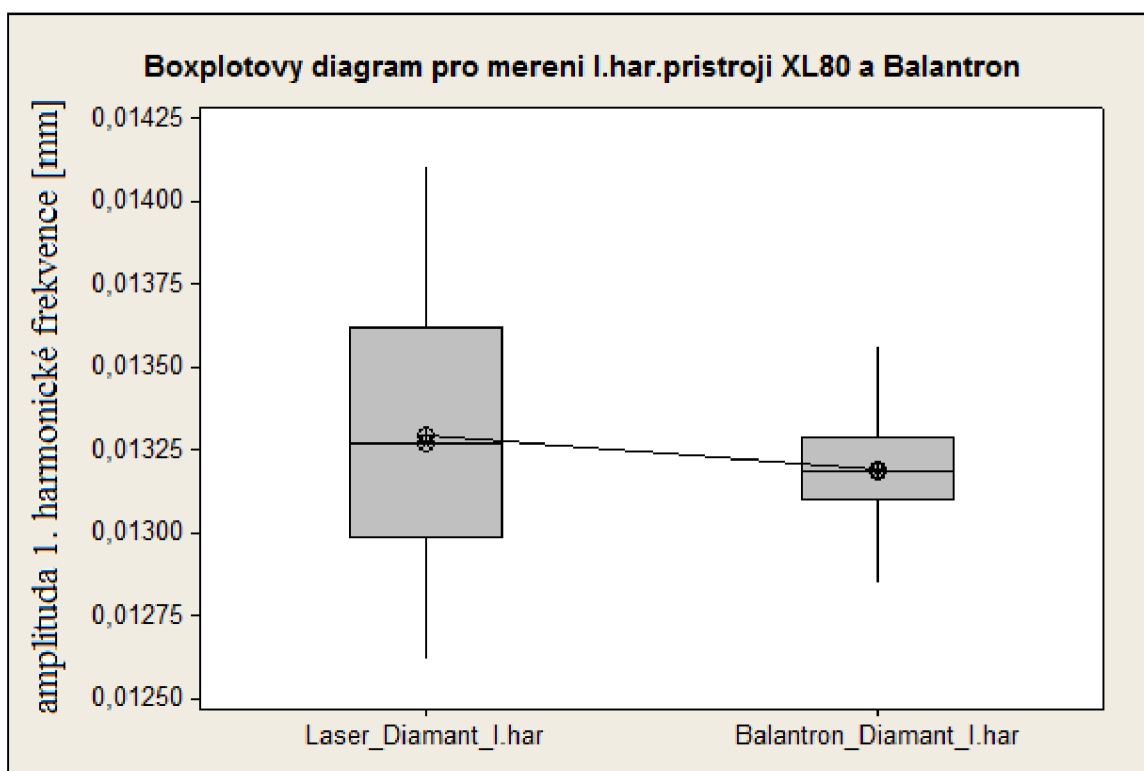
Z porovnání časových diagramů vyplývá, že data získaná laserinterferometrickým přístrojem XL 80 mají vyšší rozptyl (*Obr. 5.5.*). Znamená to, že přístroj Balantron 2001 je poněkud méně citlivý, snímá data v jiném frekvenčním pásmu. Toto tvrzení dokazuje i boxplotový diagram na *Obr. 5.6.*



*Obr. 5.4. Časový diagram závislosti amplitudy 1. harmonické frekvence pro kotouče z KNB a Diamantu měřené pomocí Balantronu*



Obr. 5.5. Porovnání amplitudy 1. harmonické frekvence při měření laserinterferometrem XL80 a Balantronem.



Obr. 5.6. Boxplotový diagram pro kotouče D100 K100 B-VI při měření laserinterferometrem XL80 a Balantronem.



**Tab. 13. Statistické charakteristiky výběrových souborů kotouče D100 K100 B-VI.**

Variable	Total					
	Count	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Minimum
Laser_Diamant_I.	30	0,013297	0,0000745	0,000408	3,07	0,012619
Balantron_Diaman	30	0,013196	0,0000311	0,000171	1,29	0,012850

Variable	Q1	Median	Q3	Maximum	Range	IQR
Laser_Diamant_I.	0,012988	0,013273	0,013623	0,014111	0,001492	0,000634
Balantron_Diaman	0,013104	0,013186	0,013292	0,013568	0,000718	0,000189

**Tab. 14. Statistické charakteristiky výběrových souborů kotouče B107 K100 BIII**

Variable	Total					
	Count	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Minimum
Laser_KNB_I.har	30	0,018244	0,000168	0,000922	5,06	0,016338
Balantron_KNB_I.	30	0,017942	0,0000540	0,000296	1,65	0,017407

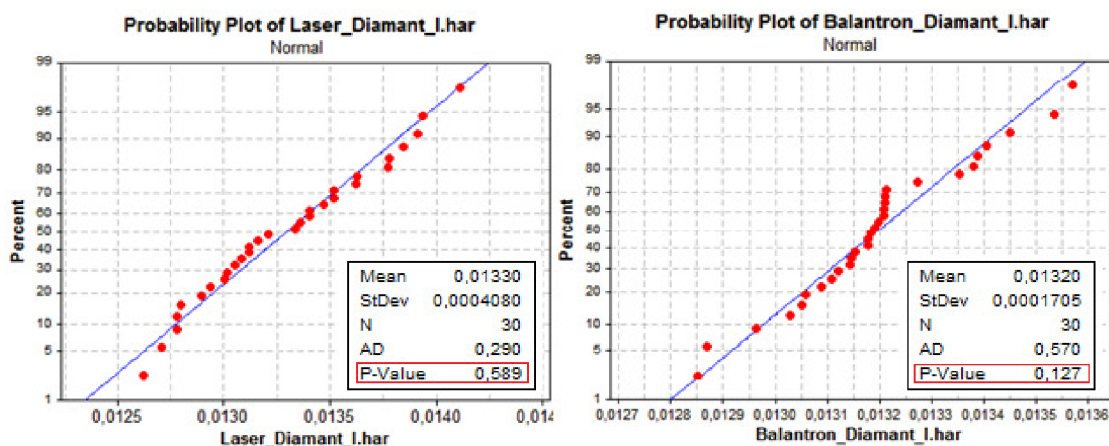
  

Variable	Q1	Median	Q3	Maximum	Range	IQR
Laser_KNB_I.har	0,017674	0,018397	0,018782	0,020081	0,003742	0,001108
Balantron_KNB_I.	0,017750	0,017949	0,018112	0,018669	0,001262	0,000362

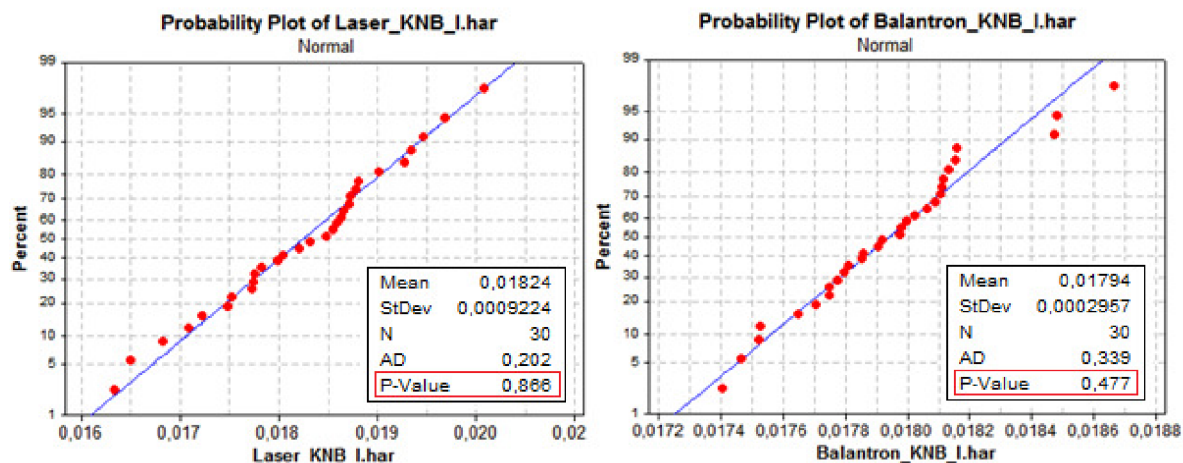
Statistické soubory ukazují na velmi nízké variační koeficienty všech výběrových souborů. Variační koeficient, tj. procentuální podíl směrodatné odchylky na aritmetickém průměru, je velmi nízký (5,06% a 1,65%) svědčí o vysoké přesnosti měřicích metod.

Naměřené data a diagramy nevykazovaly žádnou vychýlenou hodnotu (hrubou chybu), proto se přistoupilo k dalšímu kroku, tj. k určení zda výběrové soubory pochází z normálního rozdělení. Stanovily se hypotézy  $H_0$  a  $H_A$ . Hypotéza  $H_0$  je definována, že s pravděpodobností  $1 - \alpha$  (tj. s pravděpodobností 95 %) nezamítám, že daný výběrový soubor má normální rozdělení  $N(\mu, \sigma^2)$ . Hypotéza  $H_A$  je definována tak, že daný výběrový soubor nepochází z normálního rozdělení.

### **1. Test normality amplitudy 1.harmonických frekvencí**







Obr. 5.7. Test normality pro hodnoty kotouče D100 K100 B-VI.

a B107 K100 BIII při měření Laserinterferometrem XL 80 a Balantronem

## 2. Porovnání dvou rozptylů ve dvou nezávislých výběrech – F test

### Diamantový kotouč - D100 K100 B-VI

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

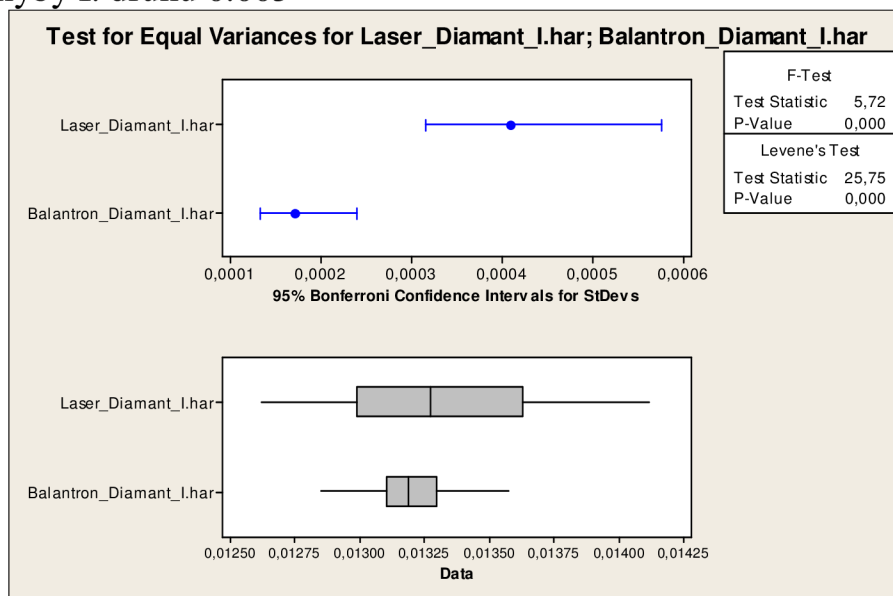
Ha: NON

$\sigma_1^2$  = amplituda 1. har. frekvence - diamantový kotouč měřeno XL80

$\sigma_2^2$  = amplituda 1. har. frekvence - diamantový kotouč měřeno Balantronem

Zvolená konfidenční úroveň  $1-\alpha = 0.95$

Velikost chyby I. druhu 0.005



Obr. 5.8 Porovnání výsledků s DIA kotoučem

Protože p hodnota je  $< 0.05$ , zamítám  $H_0$  ve prospěch  $H_a$  (tedy rozptyly při měření XL80 a Balantronem nejsou stejné)

### **KNB kotouč- B107 k100 B-III**

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$

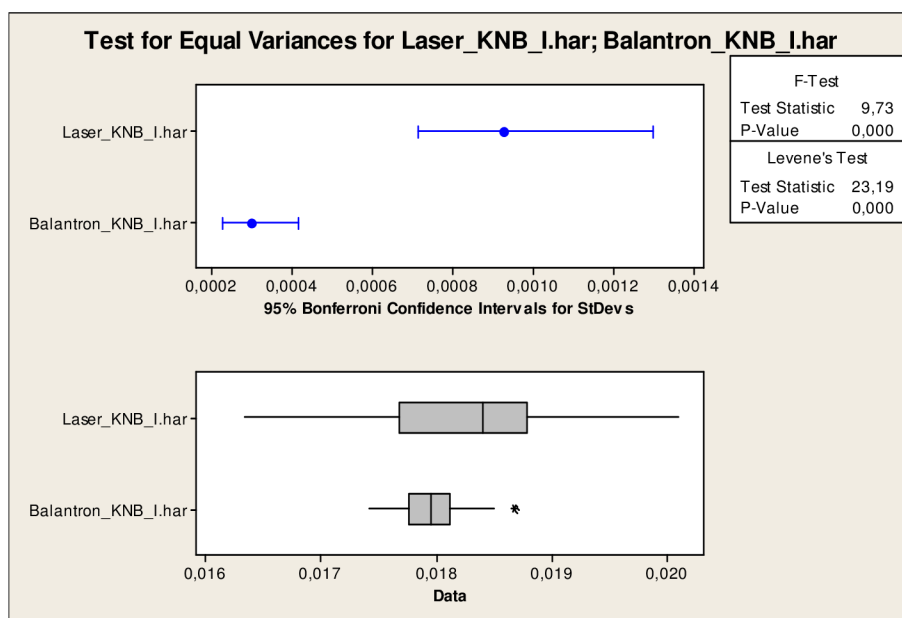
$H_a: \text{NON}$

$\sigma_1^2 =$  amplituda 1. har. frekvence - KNB kotouč měřeno XL80

$\sigma_2^2 =$  amplituda 1. har. frekvence - KNB kotouč měřeno Balantronem

Zvolená konfidenční úroveň  $1-\alpha = 0.95$

Velikost chyby I.druhu 0.005



Obr. 5.9 Srovnávací testy s kotoučem KNB

Protože p hodnota je  $< 0.05$ , zamítám  $H_0$  ve prospěch  $H_a$ , tedy rozptyly při měření XL80 a Balantronem nejsou stejné.

### ***3. Porovnání dvou průměrů ve dvou nezávislých výběrech při nestejných rozptylech – oboustranný T test***

#### **Diamantový kotouč – D100 K100 B-VI**

$H_0: \mu_1 = \mu_2$

$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$

$\mu_1 =$  amplituda 1. har. frekvence - diamantový kotouč měřeno XL80

$\mu_2 =$  amplituda 1. har. frekvence - diamantový kotouč měřeno Balantronem

Zvolená konfidenční úroveň  $1-\alpha = 0.95$

Velikost chyby I. druhu 0.005

Two-sample T for Laser\_Diamant\_I.har vs Balantron\_Diamant\_I.har

	N	Mean	StDev	SE Mean
Laser_Diamant_I.	30	0,013297	0,000408	0,000074
Balantron_Diaman	30	0,013196	0,000171	0,000031

Difference =  $\mu$  (Laser\_Diamant\_I.har) -  $\mu$  (Balantron\_Diamant\_I.har)

Estimate for difference: 0,000100

95% CI for difference: (-0,000063; 0,000264)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1,24 P-Value = 0,221 DF = 38

Protože P hodnota je  $> 0.05$ , nemohu zamítnout  $H_0$ , nemohu tedy zamítnout, ale nikoliv potvrdit, že XL 80 a Balantron měří průměrně stejně.

### **KNB kotouč- B107 K100 B-III**

$H_0: \mu_1 = \mu_2$

$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$

$\mu_1$  = amplituda 1. har. frekvence - KNB kotouč měřeno XL80

$\mu_2$  = amplituda 1. har. frekvence - KNB kotouč Balantron

Zvolená konfidenční úroveň  $1-\alpha = 0.95$

Velikost chyby I.druhu 0.005

Two-sample T for Laser\_KNB\_I.har vs Balantron\_KNB\_I.har

	N	Mean	StDev	SE Mean
Laser_KNB_I.har	30	0,018244	0,000922	0,00017
Balantron_KNB_I.	30	0,017942	0,000296	0,000054

Difference =  $\mu$  (Laser\_KNB\_I.har) -  $\mu$  (Balantron\_KNB\_I.har)

Estimate for difference: 0,000302

95% CI for difference: (-0,000057; 0,000661)

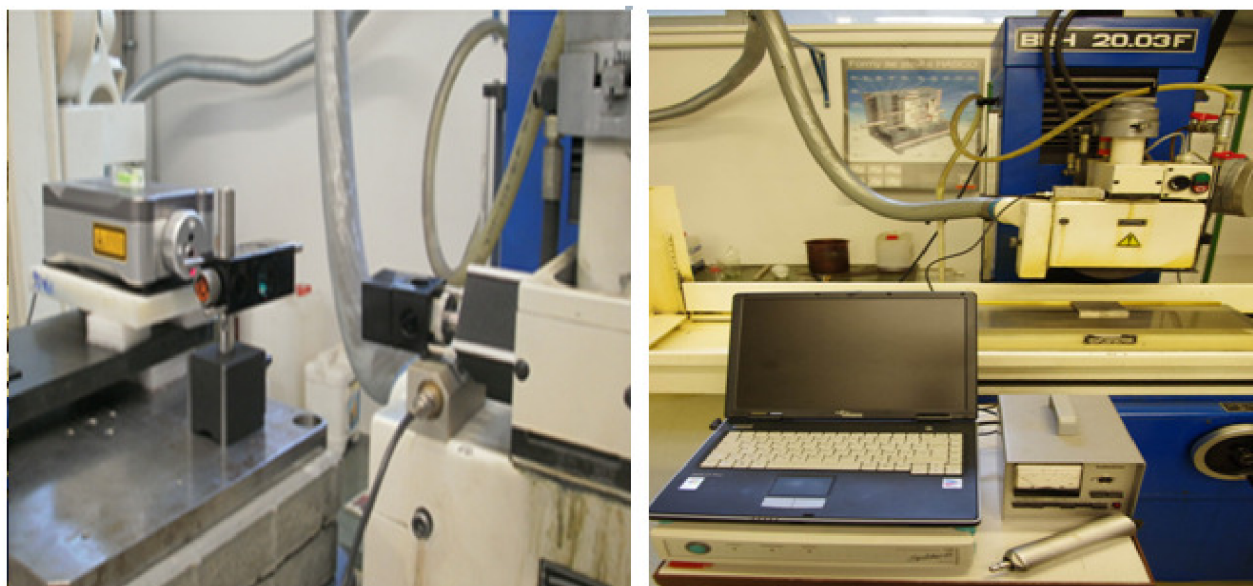
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1,71 P-Value = 0,097 DF = 34

Protože p hodnota je  $> 0.05$ , nemohu zamítnout  $H_0$ , nemohu tedy zamítnout, ale nikoliv potvrdit, že XL 80 a Balantron průměrně měří stejně.

Pro aplikaci v technologické praxi lze říci, že výsledky měření ukazují, že přístroj Balantron 2001 a XL 80 mají dobrou shodu sledovaných dat (viz též *Obr. 5.5.* a *Obr. 5.6.*). Lze tedy pro sledování procesu kmitání technologických soustav použít bezdotykovou i dotykovou metodu měření. Přístroj Balatron 2001 umožňuje, za předpokladu výrazně snížených nákladů na měření, pružně hodnotit charakteristiky kmitajících soustav. Tento přístroj nevyžaduje speciálně školenou obsluhu. Měření je mnohem jednodušší, získaná data mají menší rozptyl, přístroj je méně citlivý.

## 6 VLIV VIBRACÍ NA JAKOST OBROBENÝCH PLOCH

Experimentální určení vlivu charakteristik kmitání na jakost funkčních ploch po broušení se provedlo na rovinné vodorovné (horizontální) brusce BRH 20.03F (*Obr. 4.1*). Podrobné parametry, charakteristiky brusky a měřících zařízení jsou popsány v kap. 4.1. až 4.5. Pro experimenty byly použity broušící kotouče A9980KV9, B107 K100 B-III a D100 K100 B-VI. Nástroj pracoval při řezné rychlosti  $32,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a při pracovních radiálních záběrech: 0,005mm - 0,04mm bez použití procesní kapaliny. Pro zkoušky byly připraveny zkušební vzorky 100x100x10 z materiálu 100Cr6+QW (ČSN 4 14109.4) a materiál X210Cr12+QW (ČSN 4 19436.4) viz kap. 4.4.



*Obr. 6.1. Snímání kmitání v technologických procesech*

Na měření charakteristik vibrací byl použit laserinterferometr Renishaw XL-80 s příslušenstvím. Měřicí řetězec laserinterferometru se skládá z několika částí a to z měřícího laseru, měřící optiky a počítače se softwarem pro zobrazení, zaznamenání a analýzu měřených hodnot. Jednotlivé části měřící aparatury byly uspořádány do měřící soustavy tak, že mimo stroj na pevnou základnu (podlahu laboratoře) byl postaven stativ s deskou pro přichycení a polohování laserové jednotky a laserinterferometr Renishaw XL-80 byl ustaven do roviny pomocí dvou vzájemně kolmých vodovah.

Další část soustavy, jednotka pro rozklad svazku, byla umístěna na magnetickém stojanu na stůl zatížený betonovou deskou a dále ocelovou deskou, pro zajištění tuhosti. Pod betonovou deskou pak byly umístěny pryžové prvky pro zamezení přenosu nežádoucích vibrací.

Dále byla optická soustava seřízena tak, aby se vyslaný laserový paprsek o průměru 6mm při průchodu optickou soustavou vrátil zpět do přijímací části v co nejvyšší kvalitě. To bylo možné kontrolovat na ukazateli úrovně signálu ve spuštěném počítačovém programu Renishaw laser XL, dynamicmeasurement. Po zapnutí laserinterferometru a spuštění brusky byly naměřeny okamžité hodnoty výchylek jednoosých vibrací. To bylo také provedeno i pro odražeč 10g, který má menší rozměry a bylo možno jej umístit přímo na ložisko (uložení vřetene).

Pro toto měření byla provedena redukce průměru paprsku na 3mm. Bylo provedeno 50 měření vibrací 10g odražeče a 30 měření 100g odražeče, což je dostatečný počet měření za účelem možnosti korektního statistického vyhodnocení. Naměřená data byla dále statisticky vyhodnocena a pro další měření byl zvolen odražeč 10g, který pro danou úlohu vykazoval větší citlivost.

Během zkoušek byly brousicí kotouče staticky vyvážené a postupně se zpřesňovalo vyvažování za běhu kotouče pomocí přístroje Balatron 2001 (Kistler Instrumente AG). Při každé dané hodnotě amplitudy kmitání vřetene brousicího stroje byla hodnocena průměrná aritmetická drsnost posuzovaného profilu Ra, Rz a Rmr pomocí přístroje Mitutoyo SurfTest SV 301. Na základě těchto experimentů byly zpracovány výsledky určující vliv technologických podmínek a amplitudy kmitání na jakosti funkčních ploch.

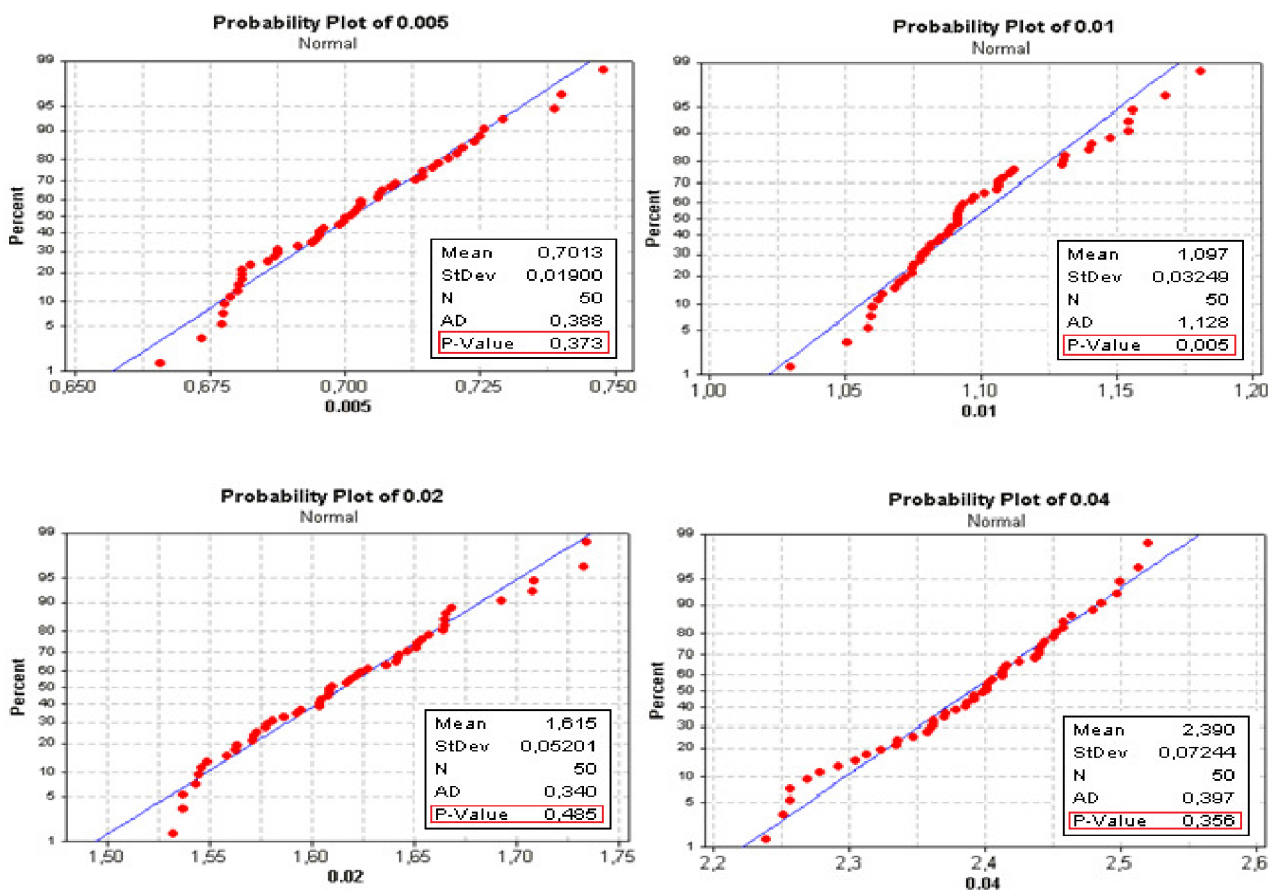
## 6.1 ANALÝZA DAT ZÍSKANÝCH PŘI EXPERIMENTECH

Předpokladem statistického hodnocení výsledků experimentů je, že soubor má normální rozdělení. Jak ukazovali kontroly na vychýlené hodnoty (hrubé chyby), v údajích a v boxplotových diagramech, soubory nevykazovaly žádné vychýlené hodnoty (hrubé chyby). Na základě těchto zjištění lze přistoupit k analýze, zda má výběrový soubor normální rozdělení. Pro hodnocení byl použit Anderson - Darlinguv test normality. Při určení P hodnoty byla ve třech případech P hodnota vyšší než 0,150. Proto lze s pravděpodobností 95% nezamítnout, že daný výběr pochází z normálního rozdělení. Pouze výběrový soubor pro hloubku úběru 0,01mm nepotvrzuje naši hypotézu (P hodnota je 0,05). Jedná se o okrajovou hodnotu, ale i v tomto případě nezamítám, že výběrový soubor má normální rozdělení. Lze tedy na základě výsledků hodnotit vliv hloubky úběru na průměrnou aritmetickou drsnost funkčních ploch.



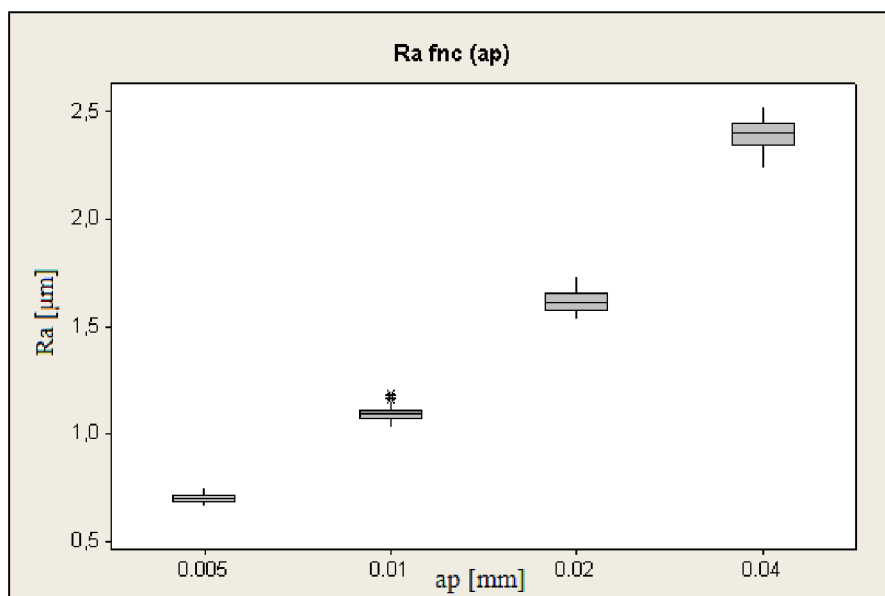
## 6.2 VLIV ZMĚNY HLOUBKY ÚBĚRU

### 6.2.1 Závislost průměrné aritmetické úchyly posuzovaného profilu ( $R_a$ ) na hloubce úběru

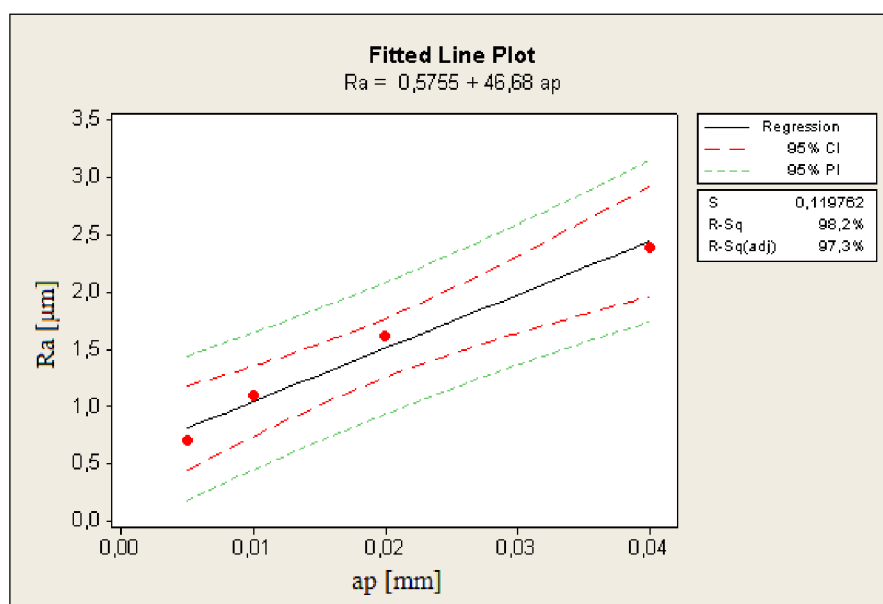


Obr. 6.2. Testy normality pro určení vlivu hloubky úběru na průměrnou aritmetickou úchyly posuzovaného profilu funkční plochy

Boxplotový diagram v souladu s fyzikální podstatou oddělování třísky při broušení, ukazuje na nárůst průměrné aritmetické úchyly posuzovaného profilu obrobenej plochy v závislosti na hloubce úběru ( $a_p$ ). Názorně ukazuje též příčinu nesouladu při hodnocení těchto parametrů v testech normality. Při hloubce úběru 0,01mm se objevila vychýlená hodnota (hrubá chyba). Při zkoumání příčiny vzniku hrubé chyby bylo zjištěno, že při měření byl snímač optické soustavy upevněný s nedostatečnou tuhostí, proto se při kmitání mohl uvolnit. Po pevném upnutí odražeče na vřeteno stroje byla vychýlená hodnota odstraněna a soubor vykazoval normální rozdělení.



Obr. 6.3. Boxplotový diagram pro korelaci průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu na hloubce úběru

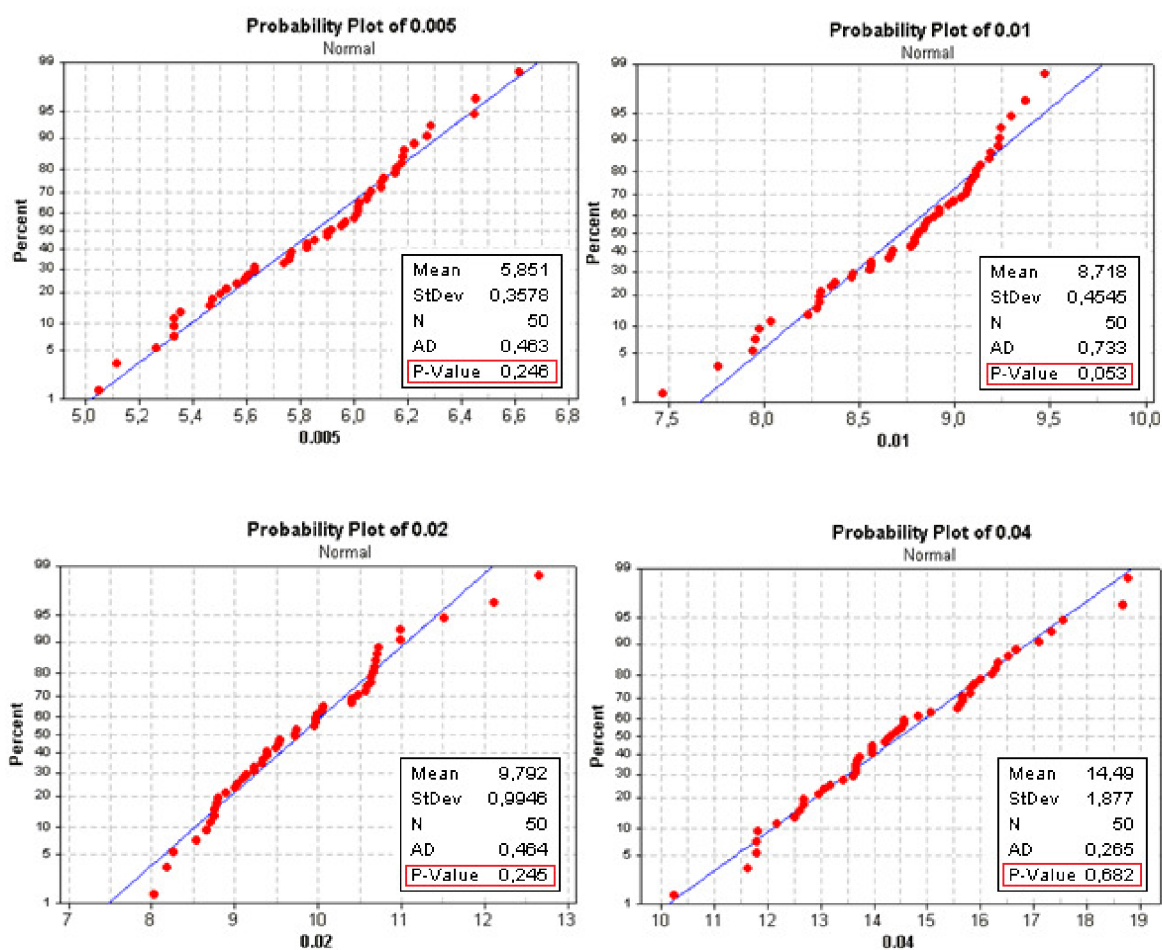


Obr. 6.4. Vliv hloubky úběru na průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu – lineární regrese

Po provedených úpravách optické soustavy bylo možné statisticky hodnotit vliv hloubky úběru materiálu na průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu. Zvětšováním hloubky úběru se zvyšuje tloušťka třísky oddělovaná jedním zrnem, zvětšují se “drážky“, které vytváří brousicí zrna na obrobene ploše tzn. úměrně se zvyšuje průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu funkční plochy. Při

broušení na rovinné brusce lze tuto závislost uvést ve tvaru  $Ra=0,5755+46,689a_p$ . Tento výsledek byl získán lineární regresí. Pro porovnání a potvrzení správnosti této úvahy byly výsledky experimentů zpracovány též kvadratickou regresí. Ačkoliv se zvýšil index determinace a je tedy větší shoda, vzhledem na statistický charakter procesů a na přesnost hodnocených dat, lze lineární regresi považovat za dostačující (viz. Obr. 2.22., kap. 2.5.9.)

## 6.2.2 Závislost největší výšky profilu ( $R_z$ ) na hloubce úběru

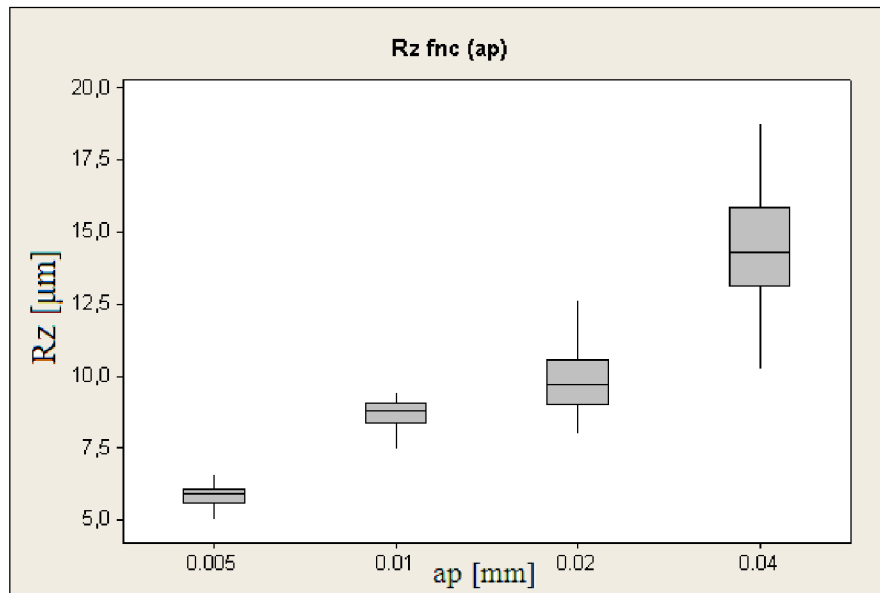


Obr. 6.5. Testy normality pro určení vlivu hloubky úběru na největší výšku profilu ( $R_z$ ) funkční plochy

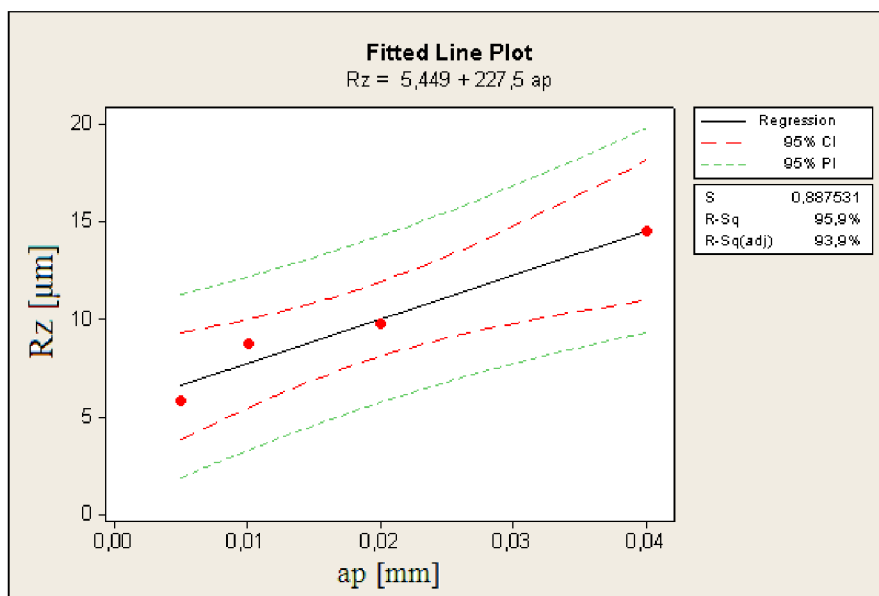
Největší výška profilu  $R_z$  patří mezi výškové parametry, která nejvíce vypovídá o míře ovlivnění (poškození) funkční plochy v rozsahu základní délky. Může být proto určitou charakteristikou životnosti výrobků. Pro statistické zpracování výsledků experimentu je nutné určit, zda výběrové soubory pochází z normálního rozdělení. Podle Kolmogor-Smirnovova testu má být P hodnota větší než 0,050, pak nezamítám, že s pravděpodobností  $1-\alpha$  (tj. s pravděpodobností 95%) pochází



výběrový soubor z normálního rozdělení. Testy normality ukazují, že všechny zkoumané soubory mají P hodnotu větší než 0,050. Tuto skutečnost potvrzuje i boxplotový diagram (Obr 6.6.). V hodnoceném souboru se nenachází žádné vychýlené hodnoty.



Obr. 6.6. Boxplotový diagram pro korelaci největší výšky profilu (Rz) na hloubce úběru



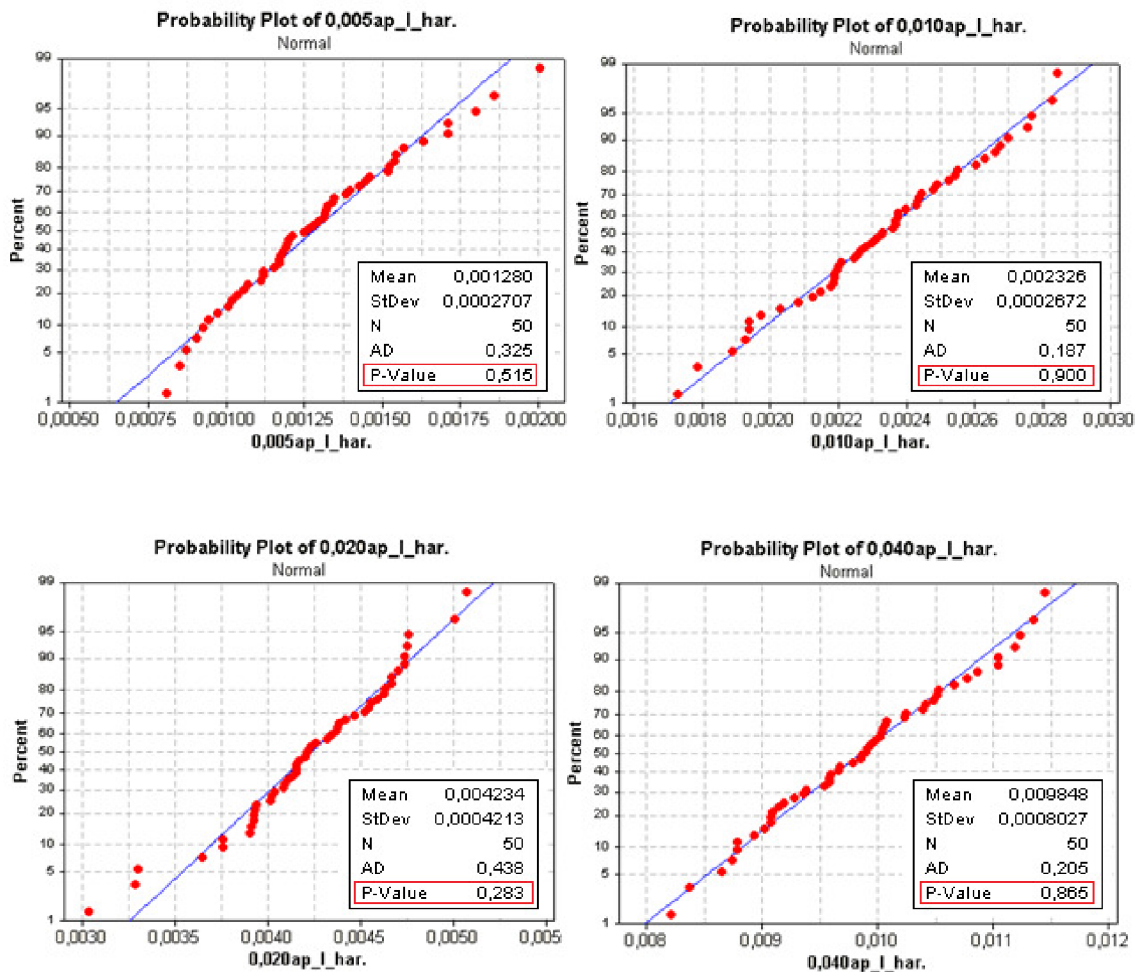
Obr. 6.7. Vliv hloubky úběru na největší výšku profilu (Rz)

S růstem hloubky úběru se zvyšuje hodnota největší výšky profilu parametru Rz. Zvětšováním hloubky úběru se zvyšuje síla potřebná k oddělení třísky, dochází k deformaci brousicích zrn v pojivu, větší a více vysunutá zrna vytváří na povrchu „rýhy“ – zvyšuje se největší výška profilu parametru Rz. Tuto závislost lze popsat

vzorcem  $Rz=5,449+227,5a_p$ . Tyto děje jsou v souladu s fyzikální podstatou a dynamikou oddělování třísky v procesu broušení.

### 6.2.3 Závislost hloubky úběru na amplitudě 1. harmonické frekvence

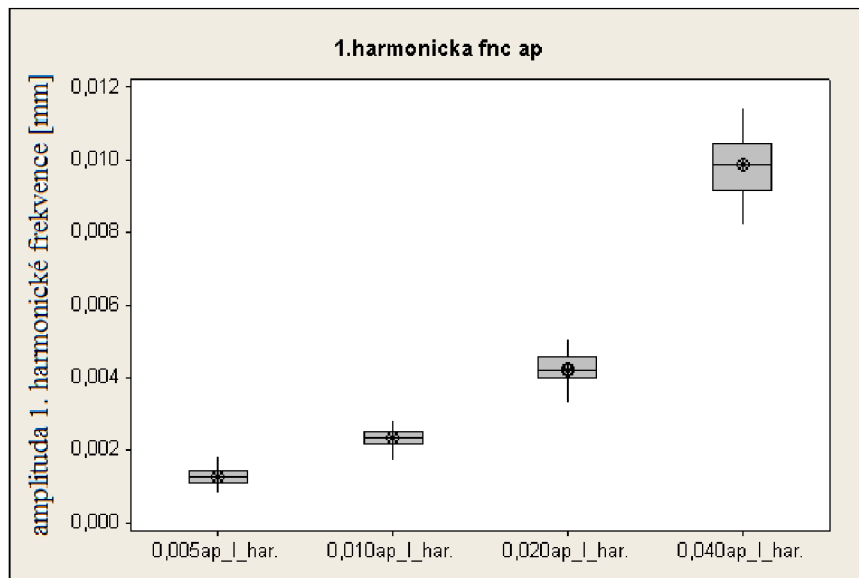
Hodnocení procesu broušení pomocí charakteristických parametrů kmitání technologické soustavy, umožní analyzovat technologický proces bez přerušení výroby. Je proto nutné provést hodnocení testů normality.



Obr. 6.8. Testy normality pro určení vlivu hloubky úběru na 1 harmonickou frekvenci

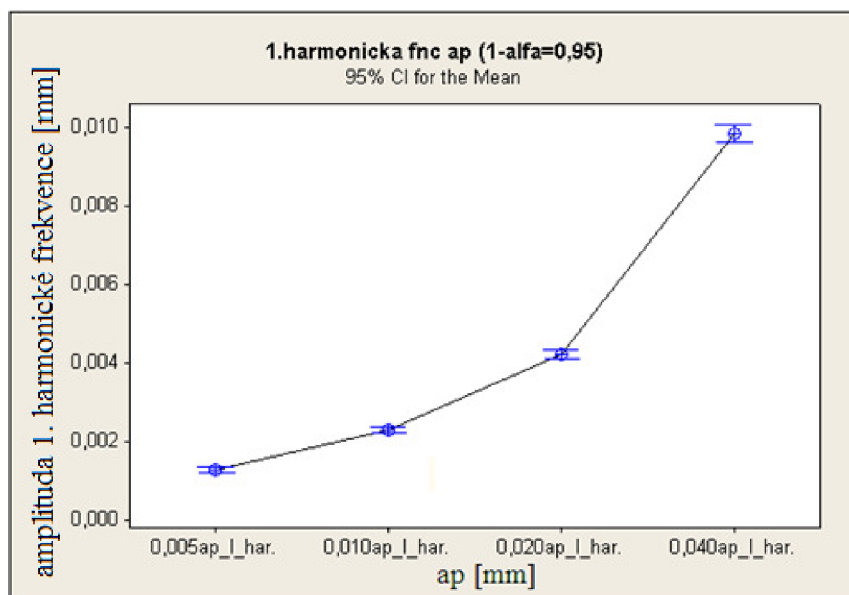
Ve všech testovaných případech můžeme konstatovat, že s možností omylu 0.05 (tedy 5 procent) nemůžeme zamítnout, že naměřená data amplitud 1. harmonických frekvencí pocházejí ze základního souboru s rozdělením  $N(\mu, \sigma^2)$ .

Na základě statistického hodnocení výsledků experimentů můžeme zpracovat boxplotové diagramy a diagramy závislosti amplitudy 1. harmonické frekvence na hloubce úběru včetně rozptylu hodnot.



Obr. 6.9. Boxplotový diagram pro korelaci amplitudy

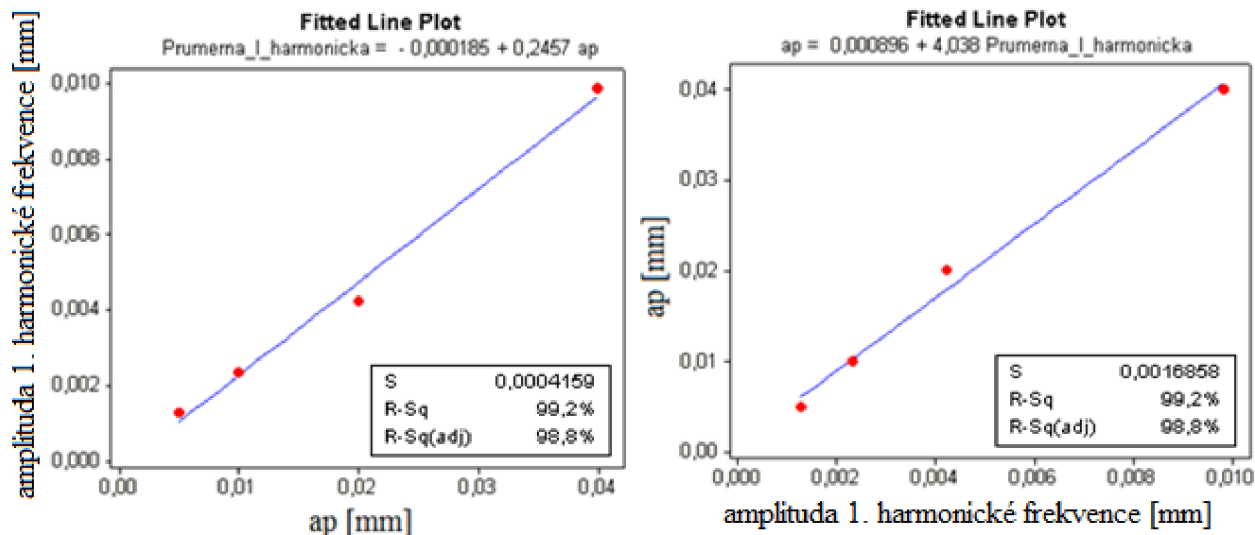
1. harmonické frekvence na hloubce úběru



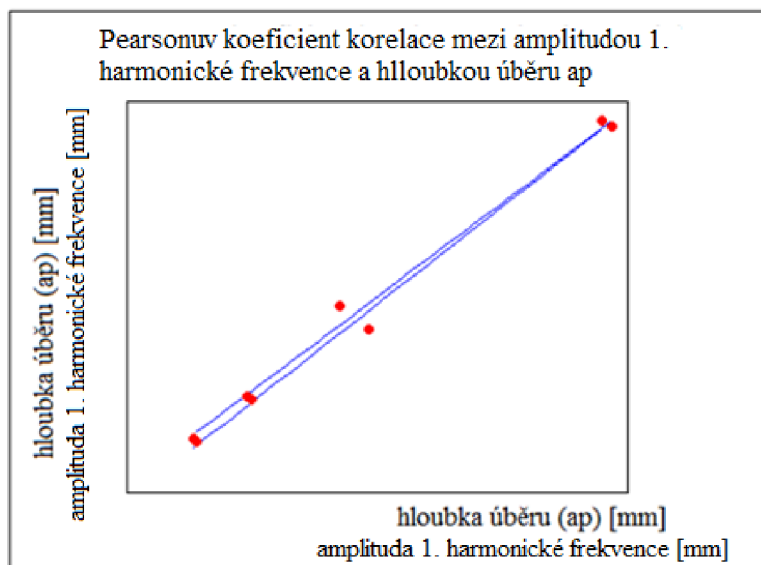
Obr. 6.10. Závislost amplitudy 1. harmonické frekvence na hloubce úběru se zobrazením rozptylu

Boxplotový diagram závislosti amplitudy 1. harmonické frekvence ukazuje, že v rámci experimentu nevznikly vychýlené hodnoty (hrubé chyby). Dále lze z grafu vyčíst, že se zvyšováním zatěžování brousicího nástroje se úměrně zvyšuje rozptyl naměřených hodnot. Tento jev zřejmě souvisí se změnou tuhosti technologické soustavy a se změnou a fázovým zpožděním tlumení kmitů. Výsledky potvrzují korelaci mezi amplitudou 1. harmonické frekvence a změnou technologických podmínek.

## 6.2.4 Stanovení Pearsonova koeficientu korelace



Obr. 6.11. Závislosti mezi amplitudou 1. harmonické frekvence a hloubkou úběru



Obr. 6.12. Pearsonuv koeficient korelace mezi amplitudou 1. harmonické frekvence a hloubkou úběru

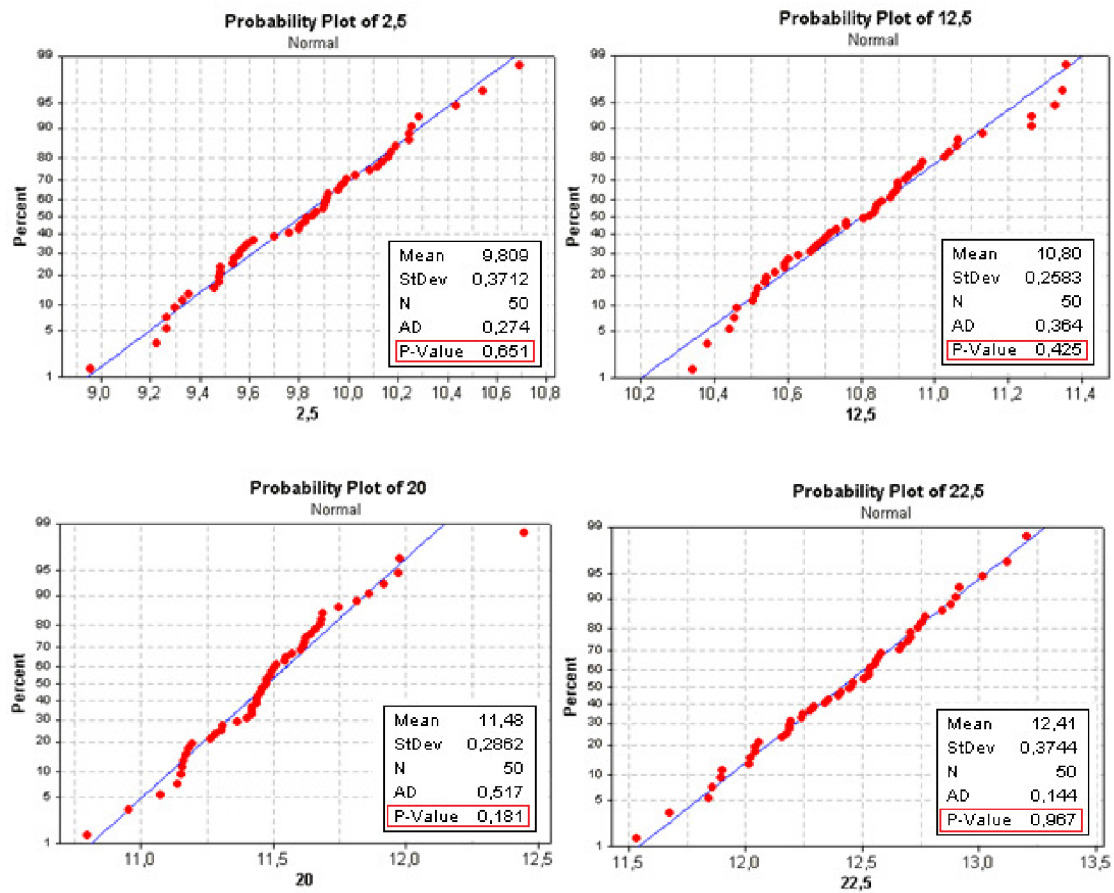
Pro posouzení a potvrzení těsné korelace mezi zkoumanými daty (tj. lineární závislosti mezi závislou a nezávislou proměnnou) slouží Pearsonovy koeficienty korelace. Předpoklad, že se tyto závislosti budou hodnotit pomocí lineární regrese, bylo uvedeno již v kap. 2.5.9. Uvážíme-li, že je mezi sledovanými parametry lineární závislost lze záměnou závislé a nezávislé proměnné (závislost x-y zaměnit za y-x) získat druhou regresní přímku. Sdružením regresních přímek získáme grafickou

závislost potvrzující přímou úměrnost proměnných. Malý nebo nulový úhel regresních přímk potvrzuje vysokou shodu a vhodnou volbu lineární regrese pro hodnocení procesů. Při zkoumání závislosti amplitudy 1. harmonické frekvence na hloubce úběru (Obr. 6.12.) je mezi sruženými regresními přímkami pouze malý úhel. Lineární regrese byla tedy zvolena vhodně. Lze pomocí charakteristik kmitání hodnotit charakteristiky nedokonalosti povrchu.

## 6.3 VLIV ZMĚNY POSUVOVÉ RYCHLOSTI

### 6.3.1 Závislost průměrné aritmetické úchyly posuzovaného profilu

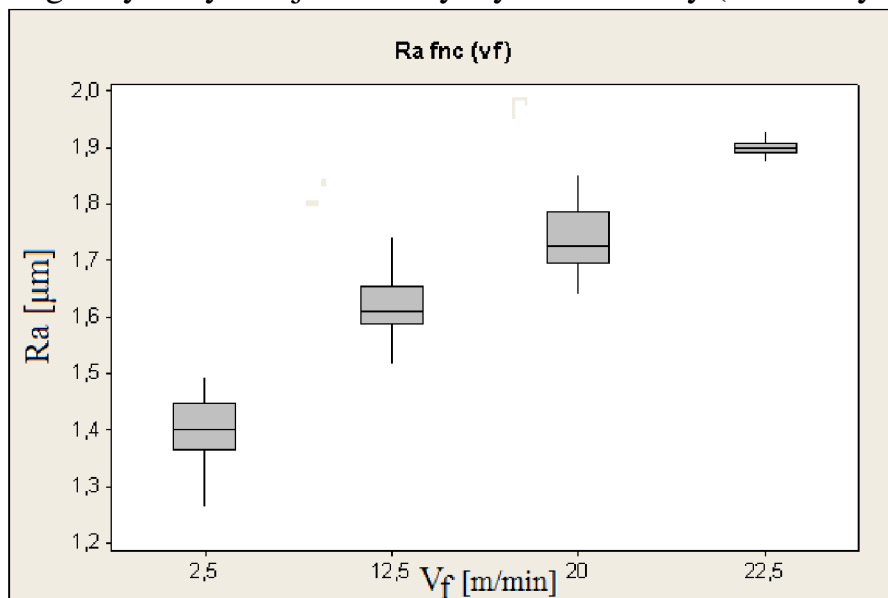
#### (Ra) na posuvové rychlosti



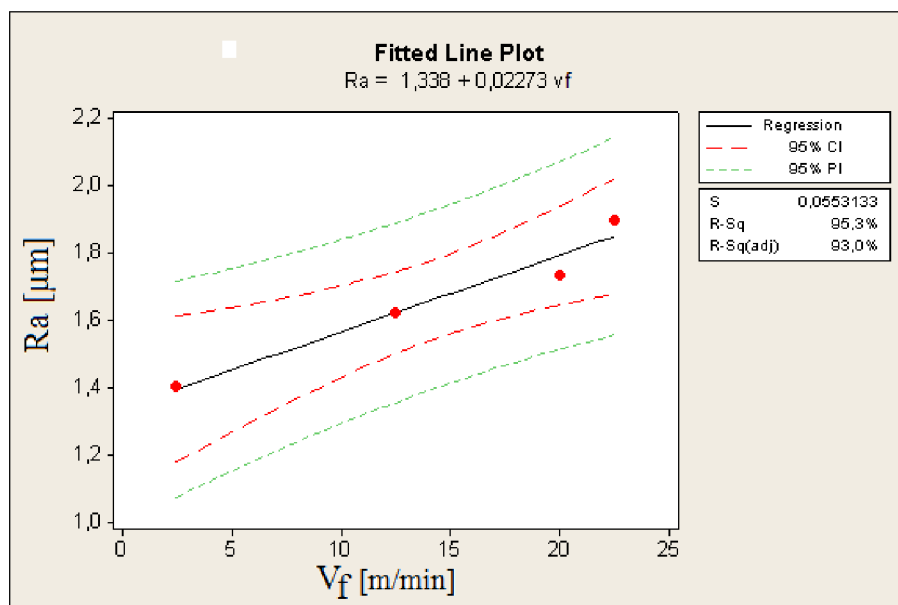
Obr. 6.13. Testy normality pro určení vlivu posuvové rychlosti na průměrnou aritmetickou úchyly posuzovaného profilu funkční plochy

Podle uvedených výsledků testů normalit mají data, získaná při různých posuvových rychlostech, normální rozdělení. P hodnota je ve všech testovaných

případech větší než 0,050. Lze tedy konstatovat, že s možností omylu 5% nemůžeme zamítnout, že naměřená data pocházejí ze základního souboru s rozdělením  $N(\mu, \sigma^2)$ . Boxplotové diagramy nevykazují žádné vychýlené hodnoty (hrubé chyby).



Obr. 6.14. Boxplotový diagram pro korelaci průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu na posuvové rychlosti



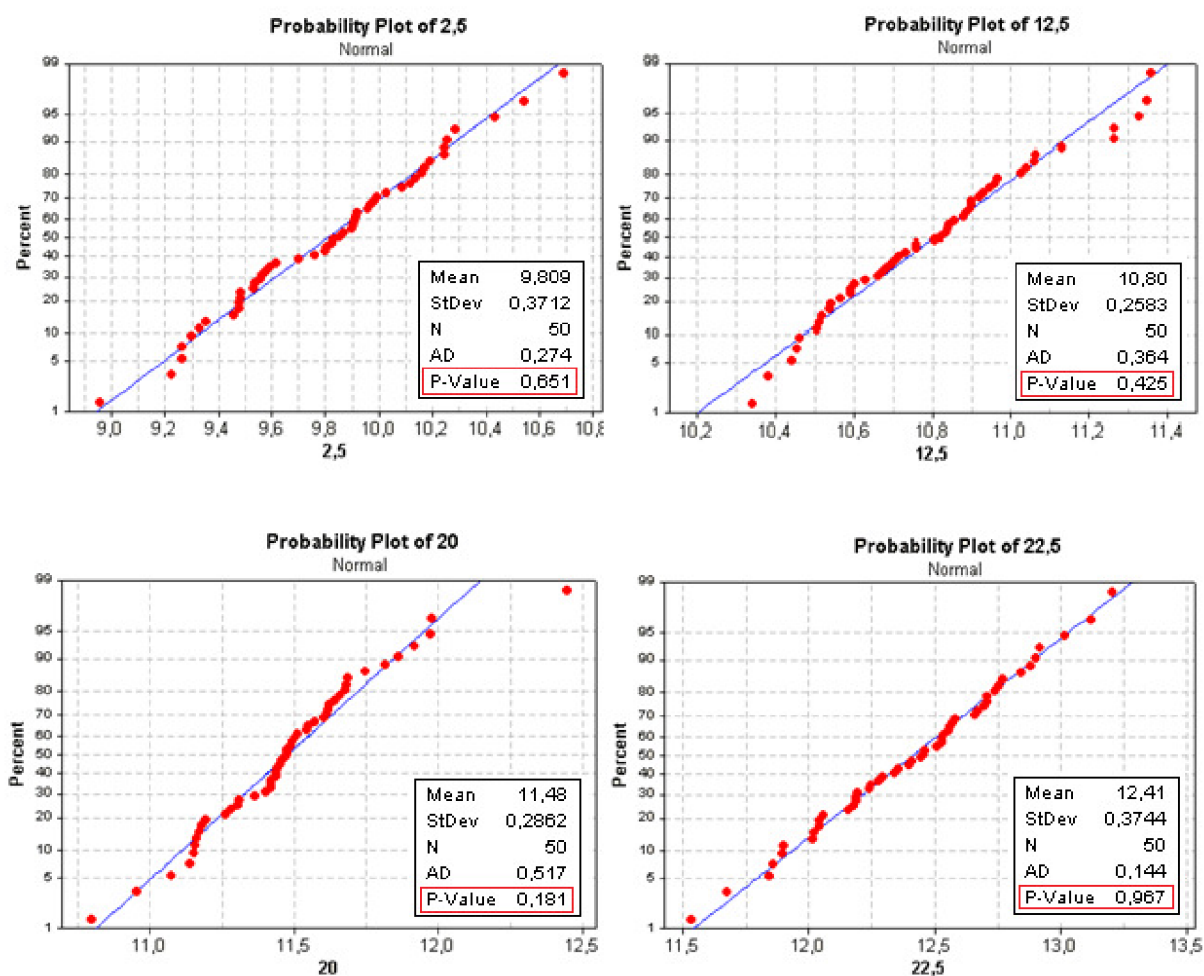
Obr. 6.15. Vliv posuvové rychlosti na průměrnou aritmetickou úchytku posuzovaného profilu

Na základě zákonů matematické statistiky dle výsledků experimentu, byl zpracován graf znázorňující závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu na posuvové rychlosti. Výsledky byly získány lineární regresí s vysokou



hodnotou indexu determinace mezi vyrovnanými (vypočtenými) a empirickými (naměřenými) daty. Zvyšování posuvové rychlosti se zvětší dotkový oblouk, postupně se zvyšuje periodicky se měnící síla, která vyvolá zvětšení hodnoty průměrné aritmetické úchytku posuzovaného profilu, tj. parametru, který se nejčastěji uvádí ve výkresové dokumentaci. Posuvová rychlost způsobuje výraznější ovlivnění reliéfu povrchu (v porovnání s  $a_p$ ), ale její změna, daná možnostmi brusky je relativně menší. Závislost lze popsat matematickým vztahem  $Ra=1,338+0,02273v_f$ .

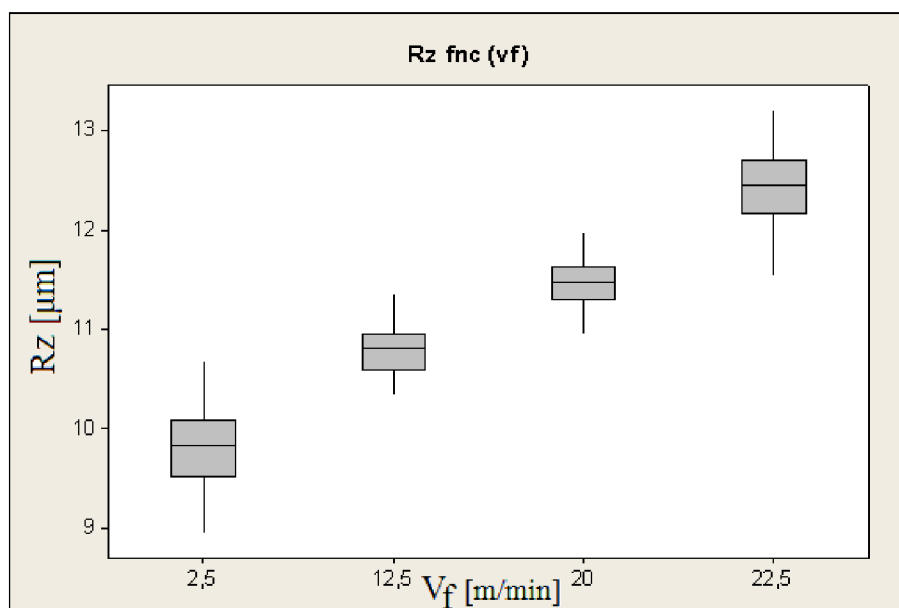
### 6.3.2 Závislost největší hloubky profilu ( $Rz$ ) na posuvové rychlosti



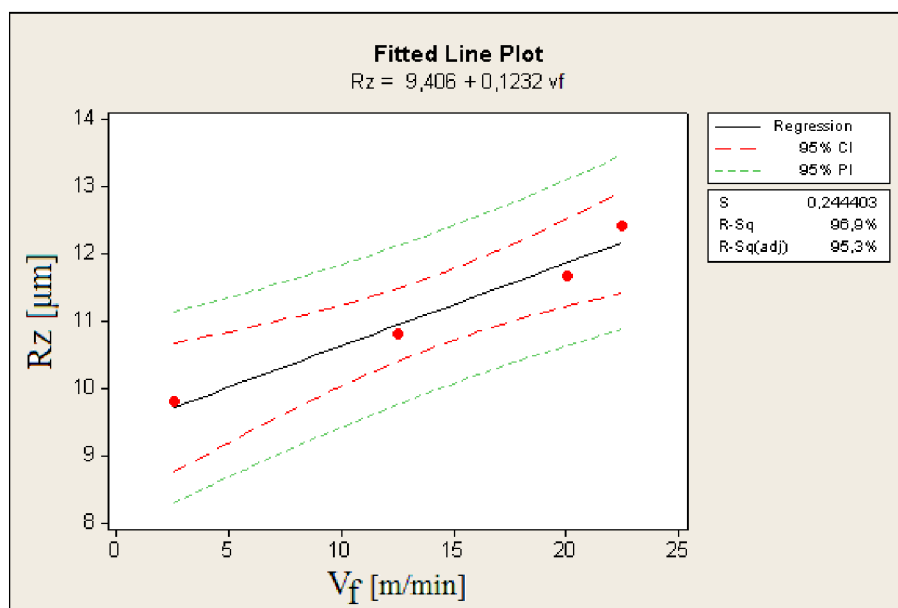
Obr. 6.16. Testy normality pro určení vlivu posuvové rychlosti na největší výšku profilu ( $Rz$ ) funkční plochy

Ve všech testovaných případech můžeme konstatovat, že s možností omylu 0,05 nemůžeme zamítnout, že naměřená data pocházejí ze základního souboru s rozdělením  $N(\mu, \sigma^2)$ . P hodnoty jsou všude větší než 0,050.

Boxplotové diagramy ani v tomto případě nevykazují žádné vychýlené hodnoty (hrubé chyby)



Obr. 6.17. Boxplotový diagram pro korelaci parametru Rz na posuvové rychlosti

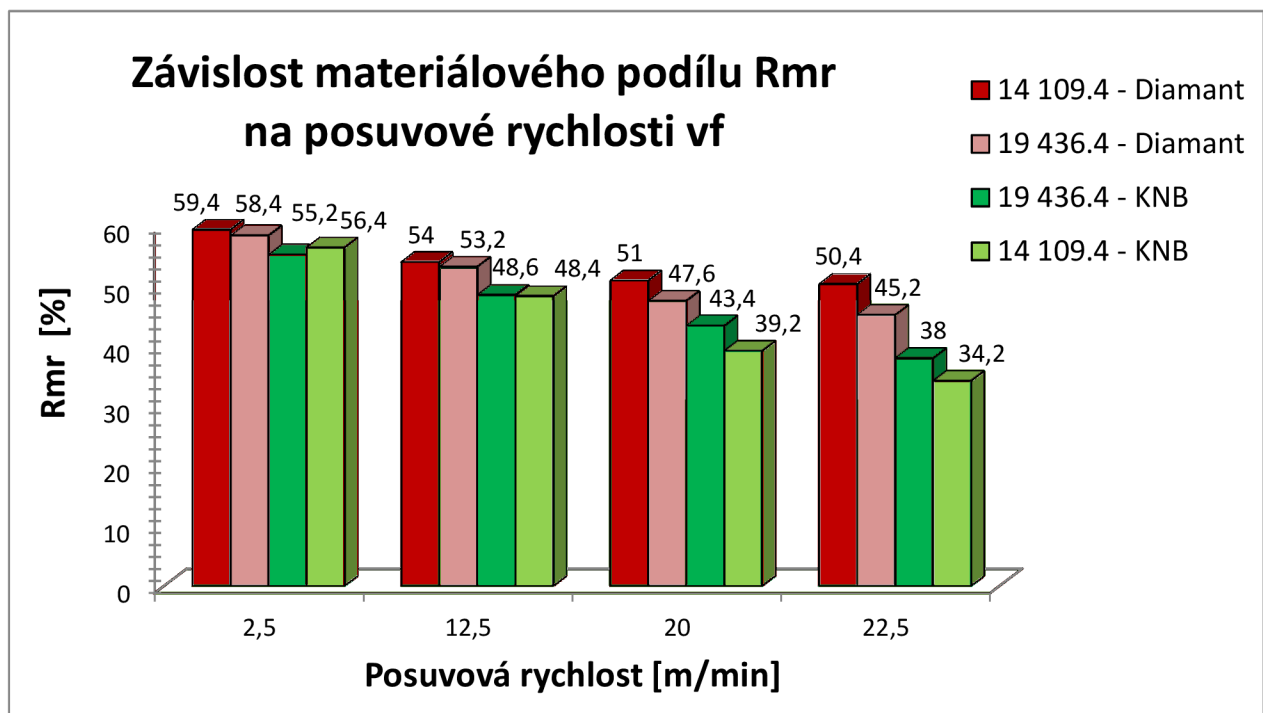


Obr. 6.18. Vliv hloubky úběru na největší výšku profilu (Rz)



Objemový výkon (odebrané množství materiálu za časovou jednotku) lineárně ovlivňuje posuvová rychlost stolu brusky. Zvyšováním posuvové rychlosti dochází k růstu plochy dotykového oblouku (tvaru odebrané třísky) a tím k postupnému nárůstu jak průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu (parametru Ra), tak též největší výšky profilu (parametru Rz). Zvětšuje se tepelně a mechanicky ovlivněná povrchová vrstva vzniklá v brousicím procesu. Závislosti mají jednoduchý lineární tvar (v rámci sledované oblasti změny technologických podmínek) umožňující matematickou predikci hodnot parametrů Ra a Rz včetně konfidenčních intervalů s typickým hyperbolickým tvarem.

### 6.3.3 Závislost materiálového podílu (Rmr) na rychlosti posuvu

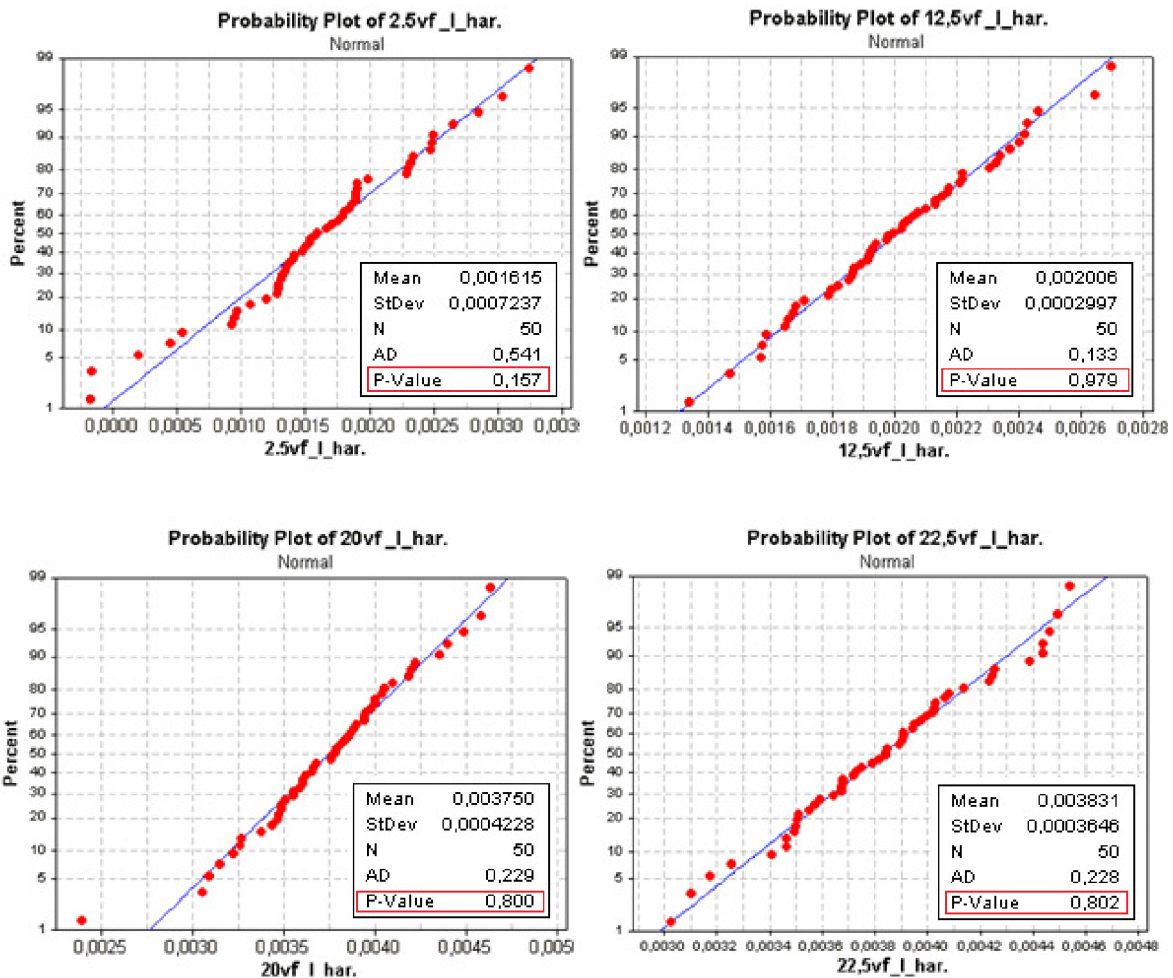


Obr. 6.19. Závislost materiálového podílu Rmr na posuvové rychlosti

Materiálový podíl Rmr lze považovat za jednu z nejlepších charakteristik životnosti vyrobených součástí. Lze předpokládat, že čím větší je hodnota materiálového podílu tím delší bude životnost funkčních ploch. [17, 22, 27] Materiálový podíl nemá normálové rozložení, z toho důvodu a z důvodu potvrzení trendu jsme provedli informativní hodnocení vlivu posuvové rychlosti na tuto charakteristiku jakosti. Intenzifikace technologických podmínek vede k trendu poklesu materiálového podílu. Z hlediska životnosti výrobků bude nutné dodržovat sled operací tj. po výkonném obrábění bude nutné realizovat dokončovací obrábění

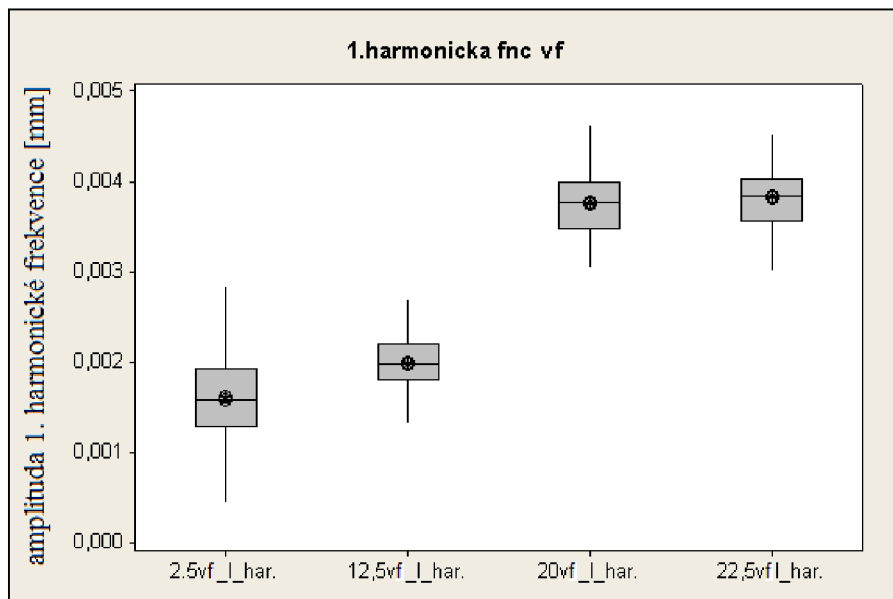
s méně intenzivními technologickými podmínkami. I z tohoto důvodu v kap. 7 jsme zkoumali časovou změnu parametrů struktury povrchů při hrubovacím i dokončovacím obrábění.

### 6.3.4 Závislost posuvové rychlosti na amplitudě 1. harmonické frekvence

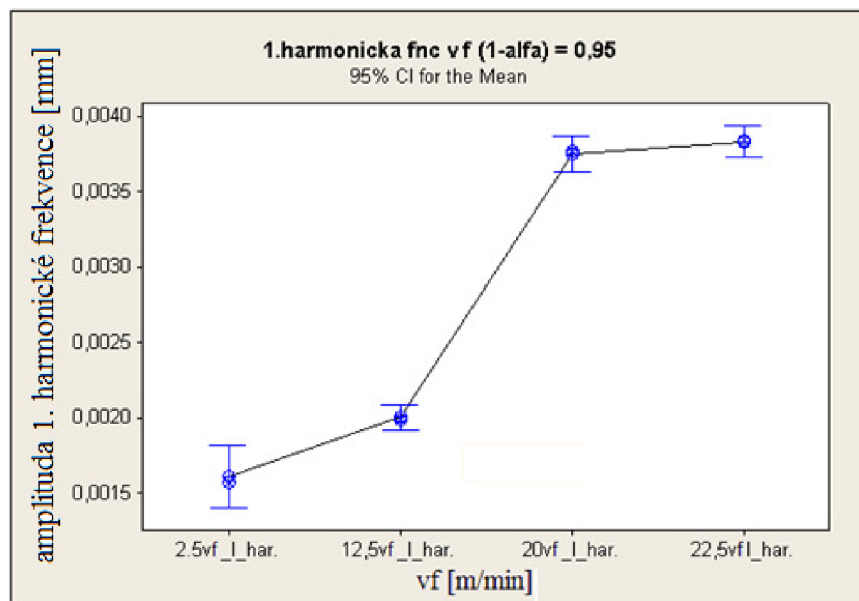


Obr. 6.20. Testy normality pro určení vlivu posuvové rychlosti na amplitudu 1. harmonické frekvence

Ve všech testovaných případech můžeme konstatovat, že s možností omylu 0.05 (tedy 5 procent) nemůžeme zamítnout, že naměřená data amplitud 1. harmonických frekvencí pocházejí ze základního souboru s rozdělením  $N(\mu, \sigma^2)$ . Boxplotový diagram zpracovaný na základě metod statistické analýzy nevykazuje žádné vychýlené hodnoty (hrubé chyby), což svědčí o vhodně voleném a správně provedeném experimentu.



Obr. 6.21. Boxplotový diagram pro korelaci amplitudy  
1. harmonické frekvence na posuvové rychlosti

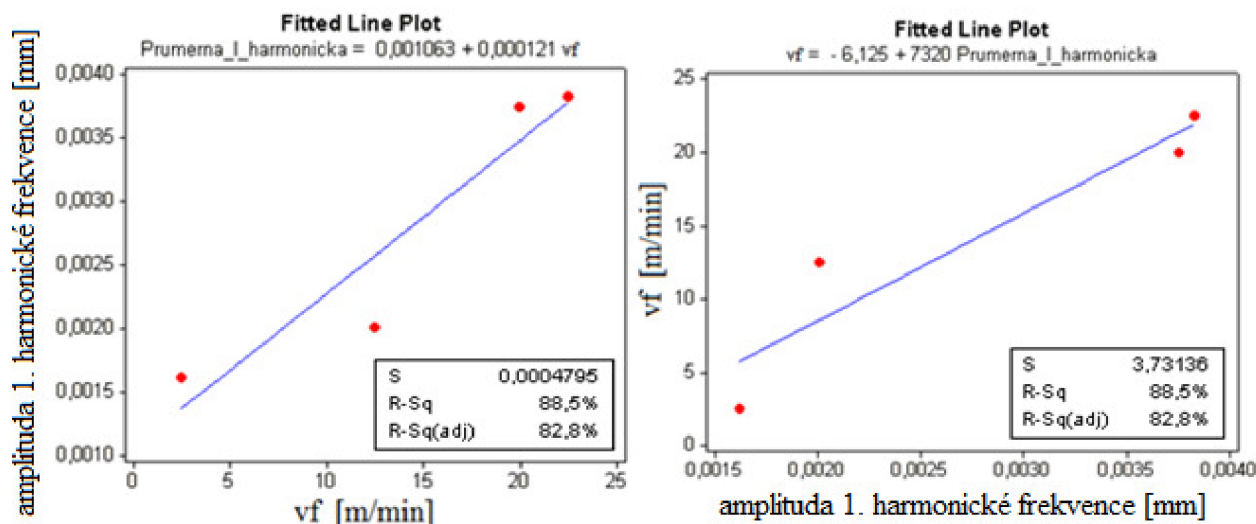


Obr. 6.22. Závislost amplitudy 1. harmonické frekvence na posuvové rychlosti  
se zobrazením rozptylu

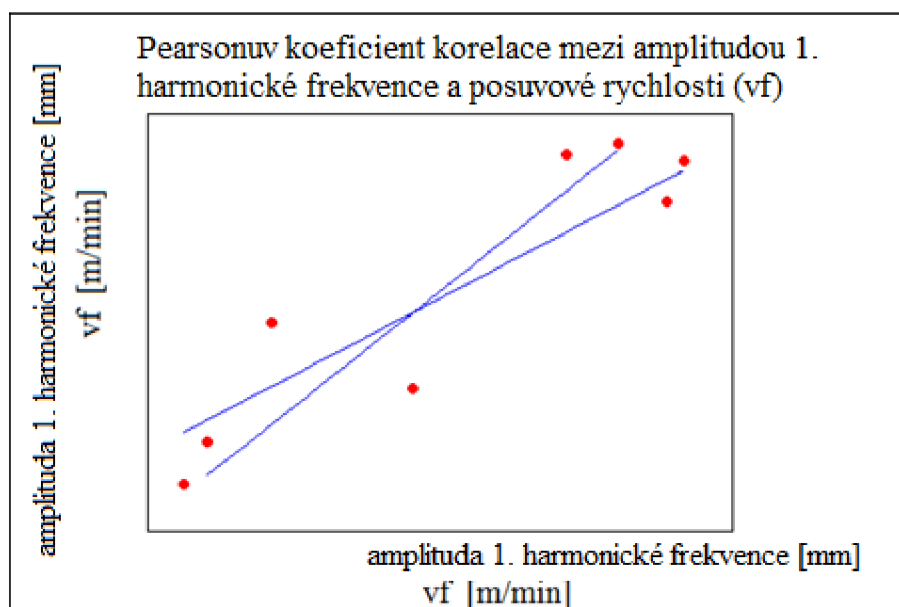
Získané grafické závislosti potvrzují úvahy o možnosti měřit amplitudu kmitání a z ní určit Ra a Rz. Výsledky výzkumu jsou podrobně rozebírány v kap. 7. Ukazuje se, že se zvyšováním posuvové rychlosti dochází k vymezení vůlí v technologické soustavě a tím k ustálení kmitání v důsledku čehož se zvyšuje normálová složka

řezné síly (u největších posuvových rychlostí). Žel nelze dál zvyšovat posuvovou rychlost (v experimentech je použita hodnota max. posuvové rychlosti posuvu) a proto nelze tuto úvahu potvrdit další zkouškou.

### 6.3.5 Stanovení Pearsonova koeficientu korelace



Obr. 6.23. Závislosti mezi amplitudou 1. harmonické frekvence a posuvovou rychlostí



Obr. 6.24. Pearsonuv koeficient korelace mezi amplitudou 1. harmonické frekvence a posuvovou rychlostí

Pearsonův koeficient korelace, potvrzující vhodnou volbu lineární regrese, pro hodnocení závislostí ukazuje malý úhel mezi sdruženými regresními přímkami. tento graf potvrzuje vysokou shodu a vhodnost volby lineární regrese. Lze tedy pomocí určené amplitudy 1. harmonické frekvence hodnotit námi sledované charakteristiky nedokonalosti povrchu. V porovnání s obr. 6.12 je při tomto hodnocení větší úhel mezi sdruženými regresními přímkami. Příčinu lze spatřit v tom, že posuvová rychlost se nastavovala na výrobním stroji a dále nebyla měřena, vlivem provozních podmínek mohl vzniknout větší rozptyl. Další příčina může mít výraznější vliv  $v_f$  na výsledek a tím i na rozptyl naměřených hodnot.

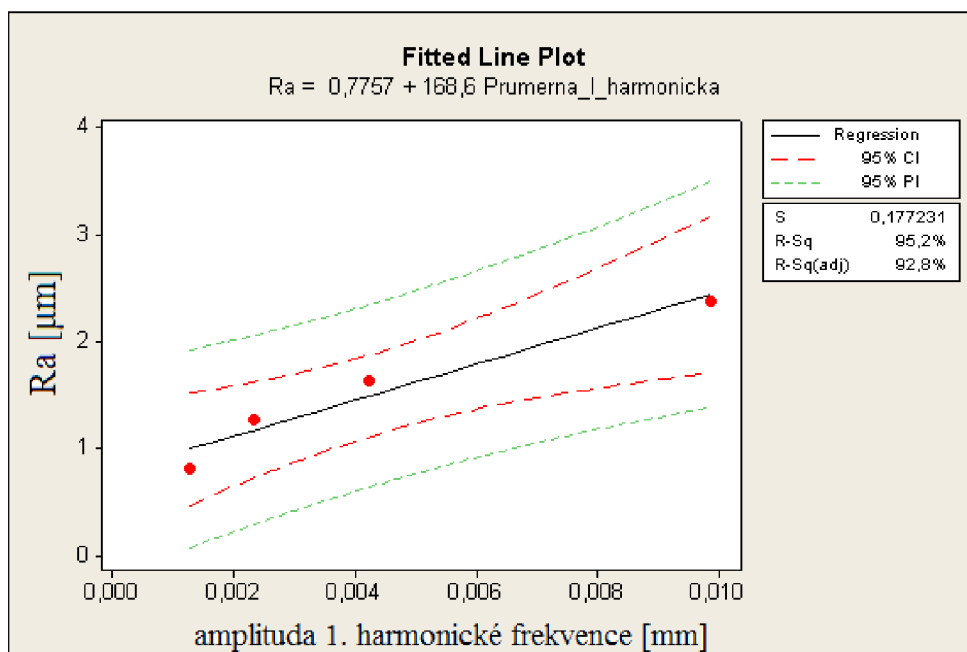
## 7 MĚŘENÍ TECHNOLOGICKÝCH CHARAKTERISTIK V ČASOVÉM SLEDU

V předešlých kapitolách pomocí experimentů, metod matematické statistiky a testů normalit jsme ukázali, že technologické podmínky rovinné brusky tj. hloubka úběru a posuvová rychlost výrazně ovlivňují jakost povrchu funkčních ploch. Závislosti jsou matematicky popsány v grafech. Je třeba zdůraznit, že pro snímání kmitů technologické soustavy nelze zamítnout, že jsou testované přístroje XL 80 rekonstruovaný Balantron 2001 průměrně měřit stejně. Pro další hodnocení byl proto častěji použit levnější a obsluze jednodušší přístroj Balantron 2001 (viz. Kap. 4. a 5.).

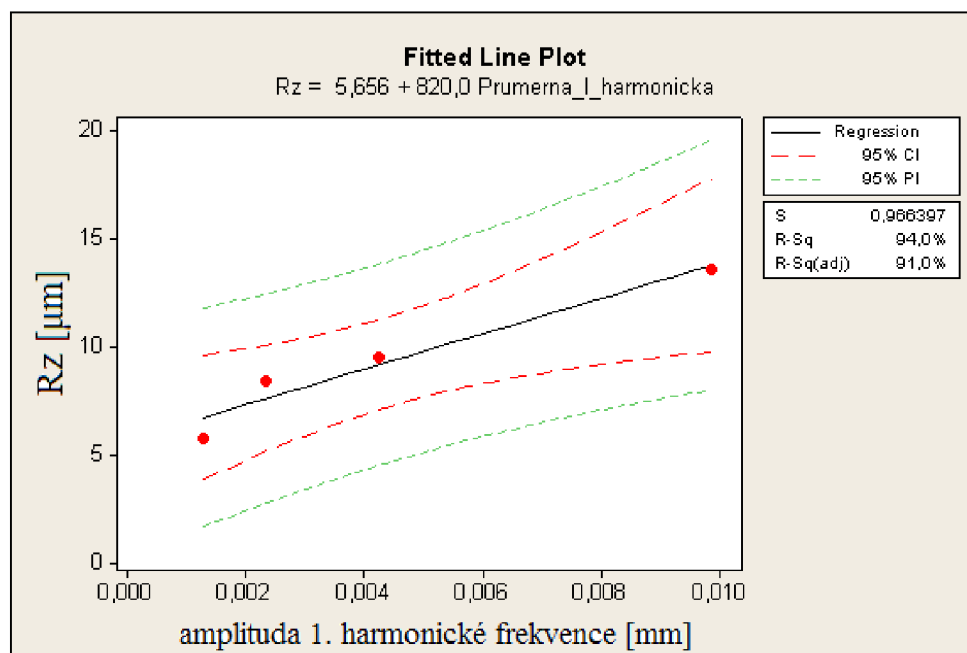
Dále aplikací metod matematické statistiky bylo prokázáno, že pomocí parametrů bezdotykové i dotykové vibrodiagnostiky (viz kap. 5) lze určit parametry struktury povrchu. Dalším cílem našeho zkoumání je v horizontu několika let sledovat změnu amplitudy 1. harmonické frekvence a změny technologických podmínek v korelaci s parametry struktury povrchu.

Pro dlouhodobé sledování procesu broušení byla použita rovinná bruska BRH 20.03 F. Pro účely našeho sledování byl zvolen nově zakoupený a instalovaný stroj, umístěný ve dvousměnném provozu výroby rovinných ploch ložisek (ocel 14 109.4). Na této brusce byly provedeny experimenty, postupně v ročních intervalech a výsledky výzkumu byly statisticky zpracovány. Tím se mohla určit závislost opotřebení výrobního stroje na charakteristiky kmitání a na jakost broušených ploch. Výrobní podnik na základě těchto výzkumů plánuje interval oprav brusky. Při předešlých experimentech byly nejpřesnější výsledky získány pomocí broušícího kotouče s vrstvou diamantu D100 K100 B-VI. Pro opakované experimenty proto byl použit tento nástroj. Diamantový broušící kotouč byl před použitím vyvážený pomocí přístroje Balantron 2001. Pro broušení byl použit etalonový materiál ocel 14 109.4. Při experimentech byly technologické podmínky měněny v rozsahu hloubky úběru  $a_p=0,005\text{mm}$  (jemné broušení) až  $0,04\text{mm}$  (hrubovací broušení) a posuvové rychlosti  $v_f$  v rozsahu 2,5 až 25 m/min. Brusky pracují s řeznou rychlostí 32,4m/s. Snímání charakteristik kmitání se provedlo pomocí přístroje Laserinterferometr XL 80 a též digitalizovaným přístrojem Balantron 2001. Parametry struktury povrchu  $R_a$ ,  $R_z$  byly hodnocené pomocí přístroje Surfes S 301 (Mitutoyo). Data z měření byla získávána a zpracována v ročních intervalech (1., 2. a 3. rok) a posléze pomocí statistických metod predikována na další roky provozu brusky. Výsledky experimentálního šetření zpracované pomocí statistických metod jsou uvedené v následujících kapitolách práce.

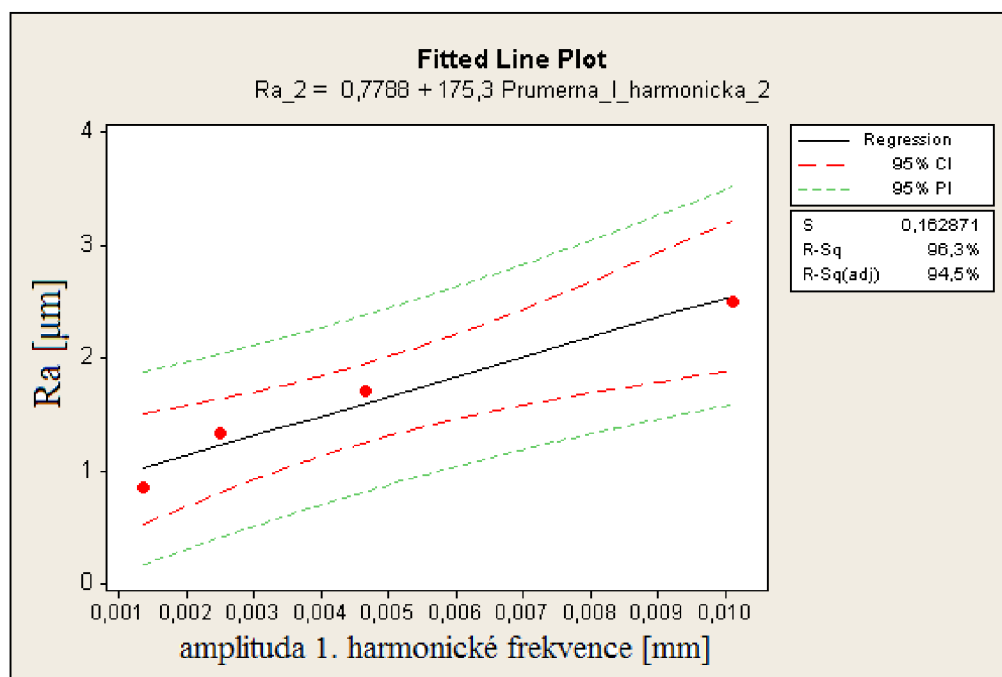
### 7.1.1 Závislost Ra, Rz na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $v_f$ a proměnné $a_p$ v časovém sledu



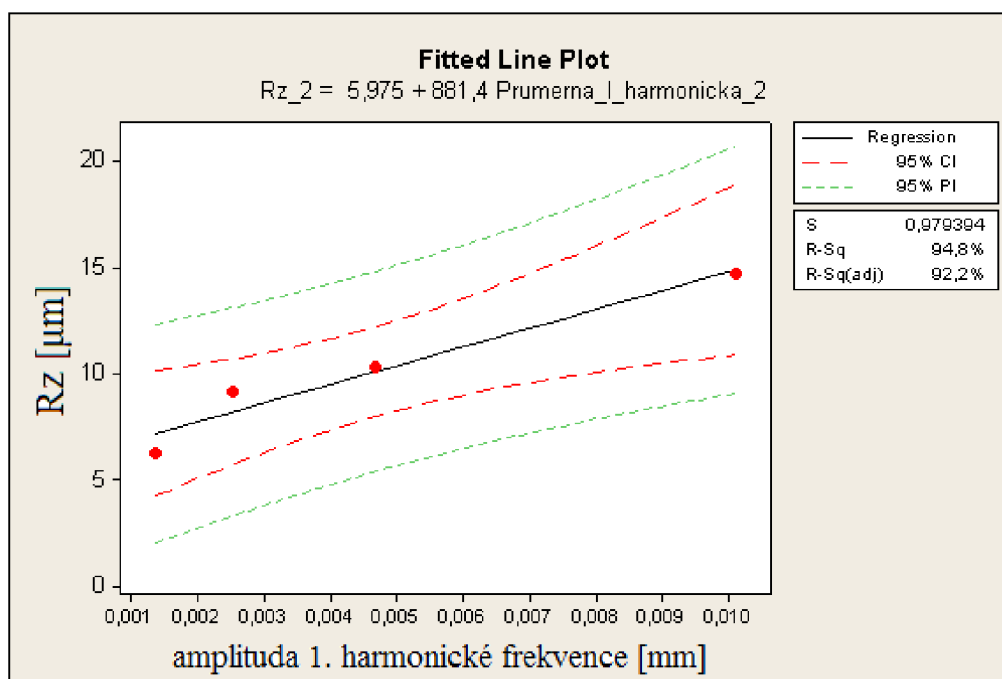
Obr. 7.1. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu Ra na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $v_f$  a proměnné  $a_p$  v 1. roce



Obr. 7.2. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu Rz na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $v_f$  a proměnné  $a_p$  v 1. roce

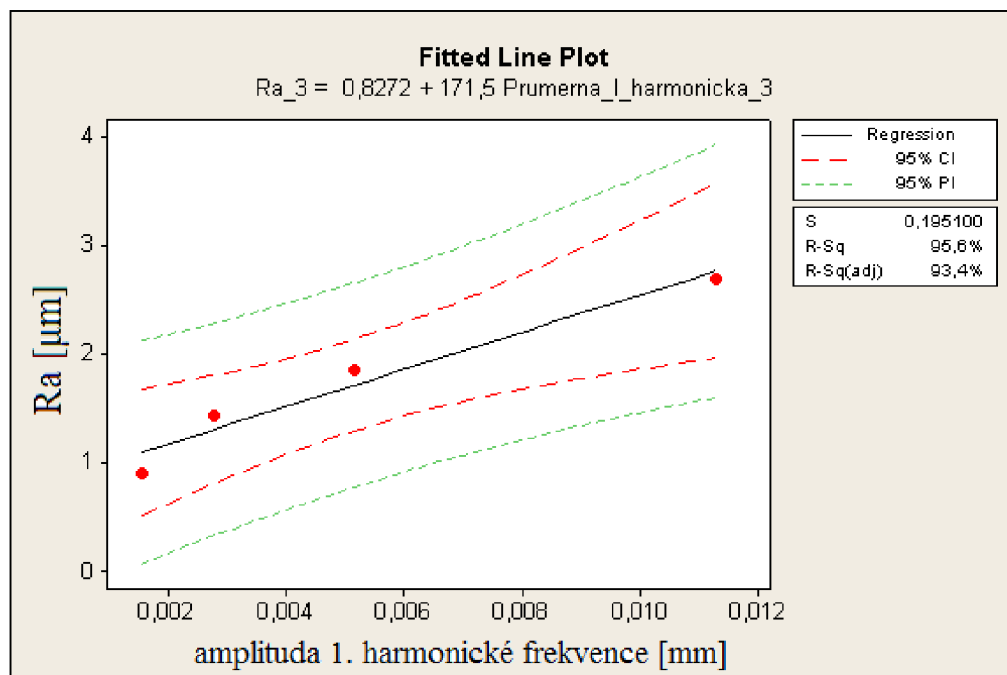


Obr. 7.3. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu Ra na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $v_f$  a proměnné  $a_p$  v 2. roce

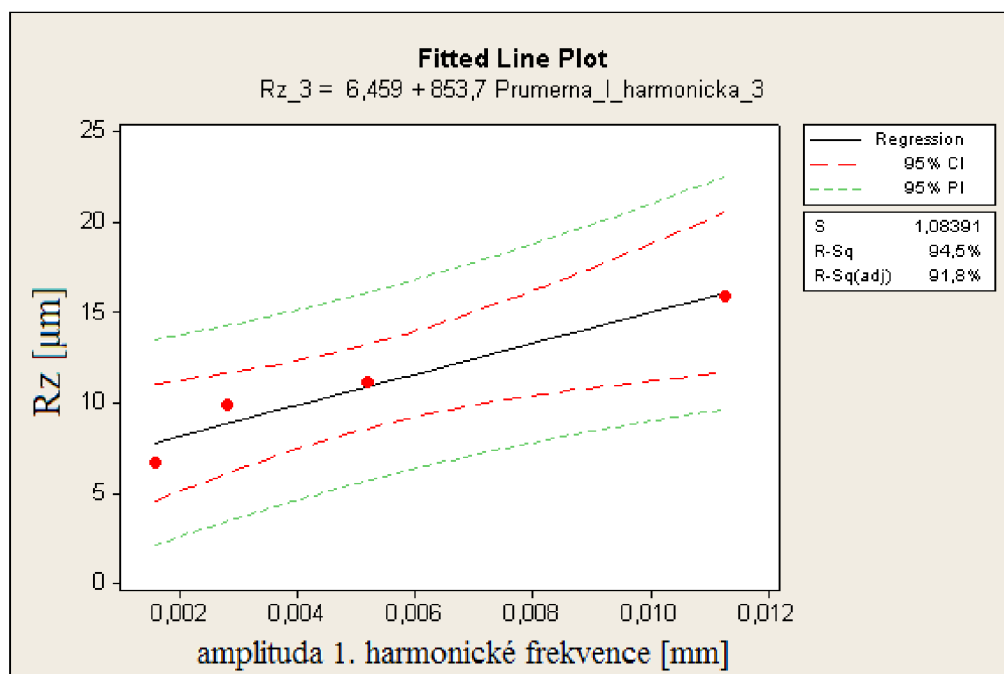


Obr. 7.4. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu Rz na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $v_f$  a proměnné  $a_p$  v 2. roce



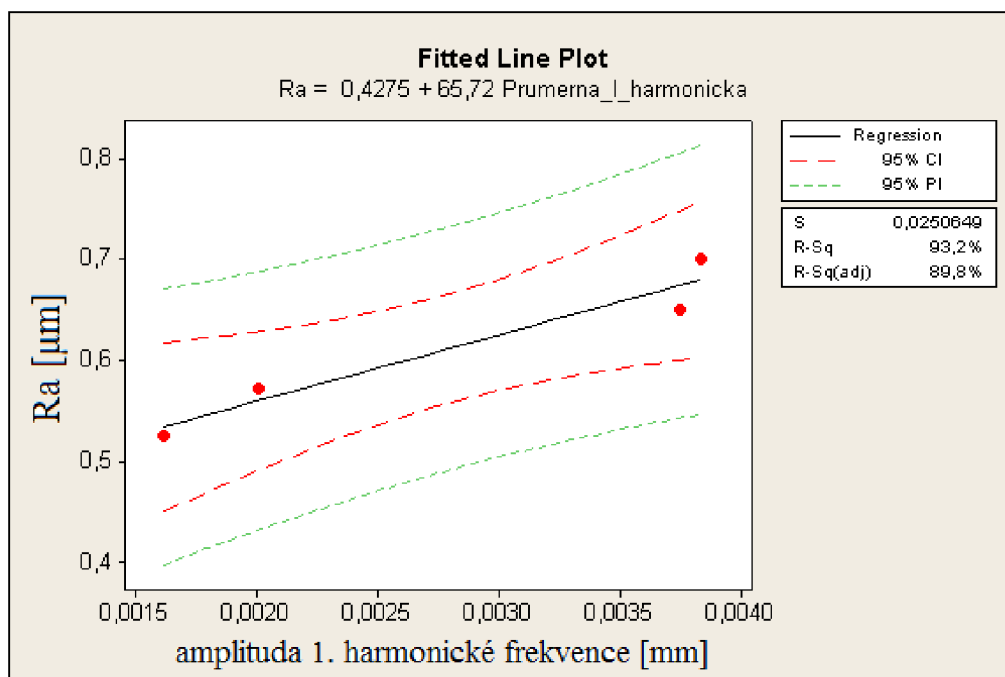


Obr. 7.5. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu Ra na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $v_f$  a proměnné  $a_p$  v 3. roce

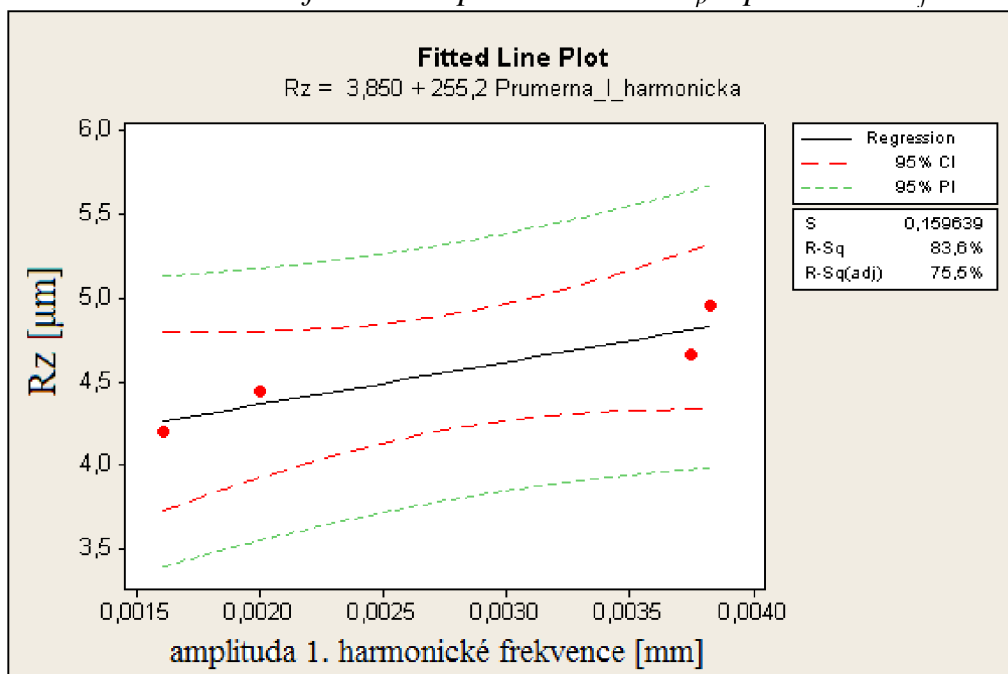


Obr. 7.6. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu Rz na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $v_f$  a proměnné  $a_p$  v 3. roce

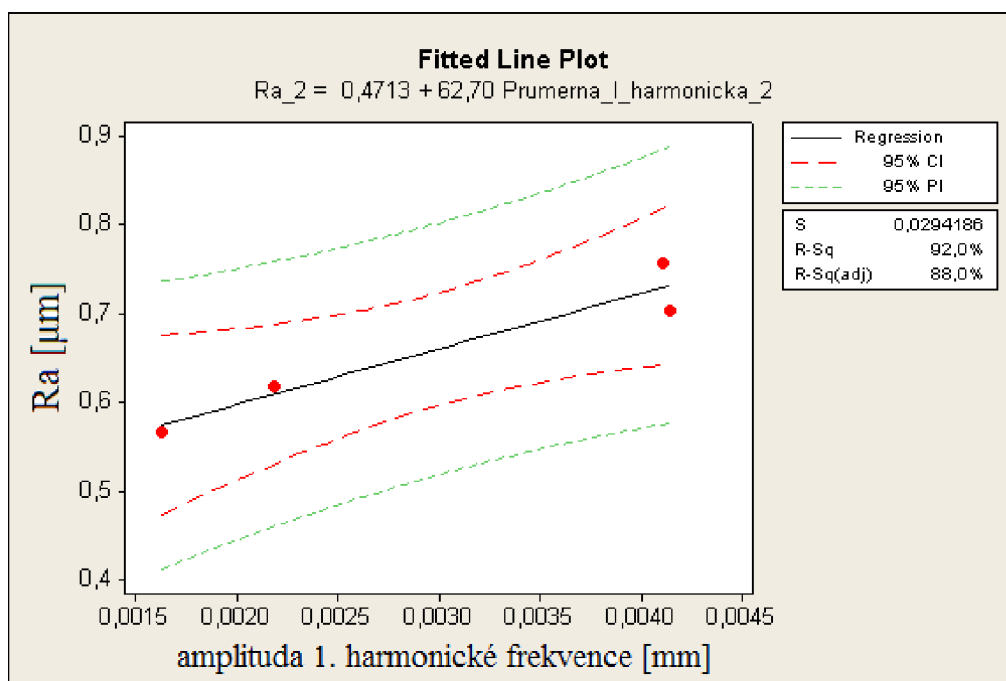
### 7.1.2 Závislost Ra, Rz na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $a_p$ a proměnné $v_f$ v časovém sledu



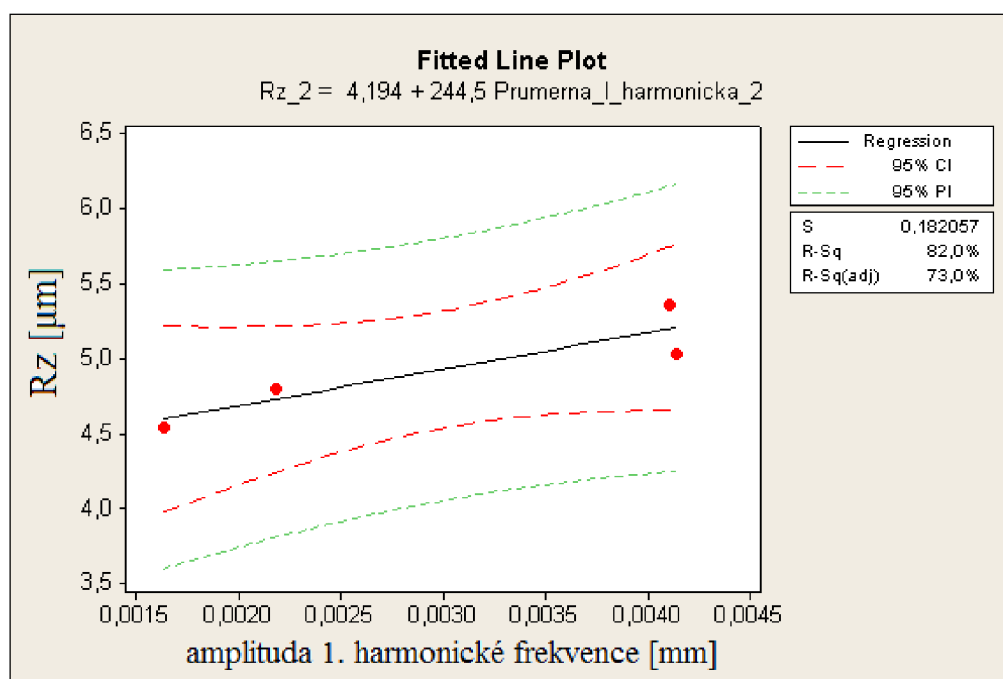
Obr. 7.7. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu Ra na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $a_p$  a proměnné  $v_f$  v 1. roce



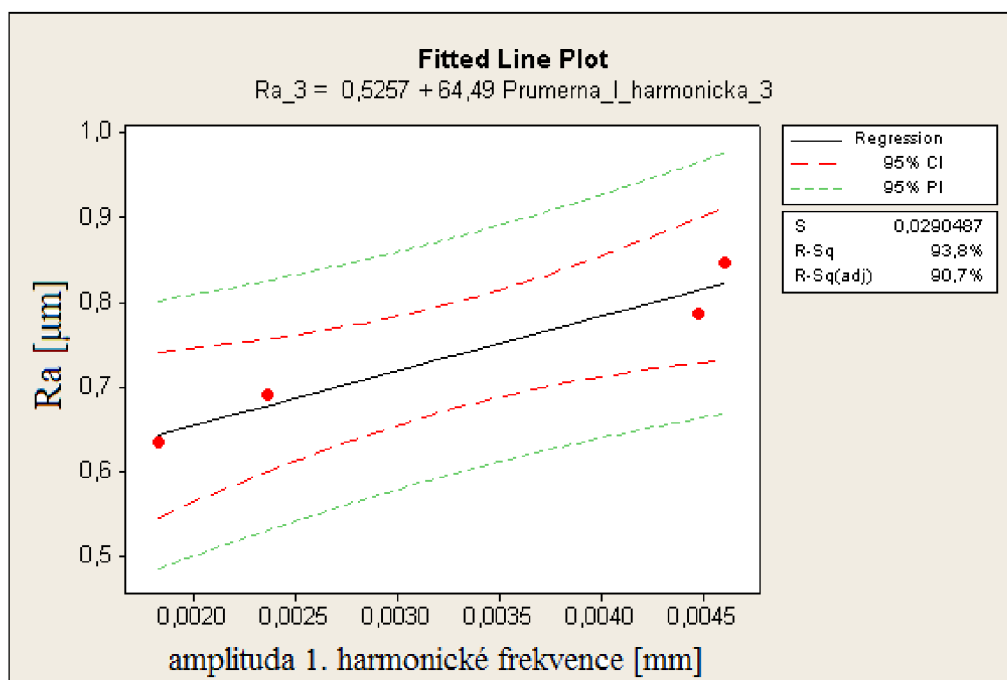
Obr. 7.8. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu Rz na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $a_p$  a proměnné  $v_f$  v 1. roce



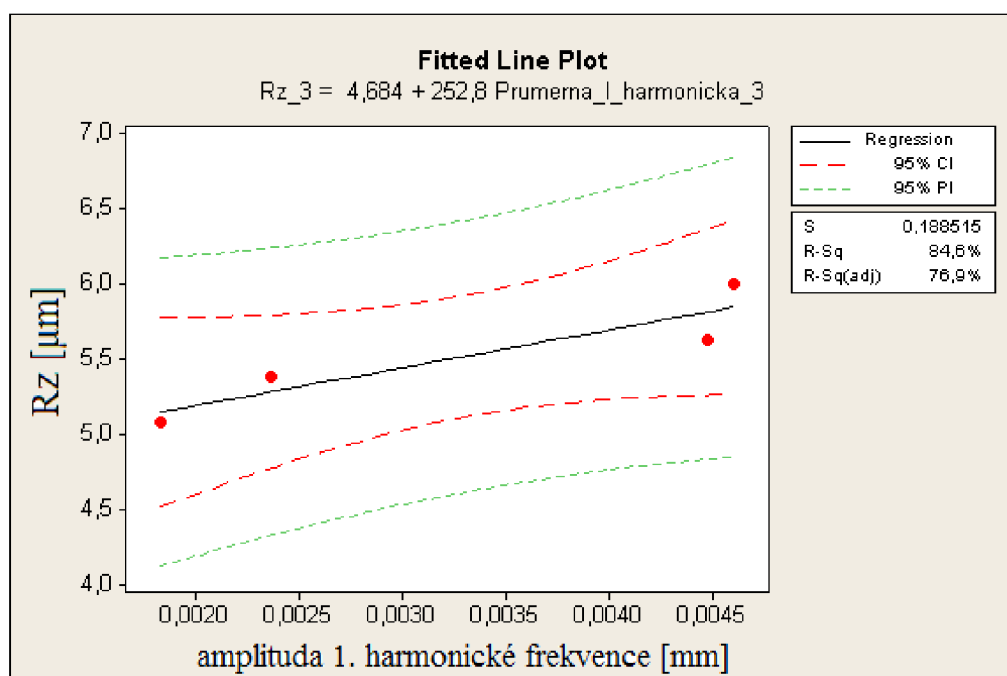
Obr. 7.9. Závislost průměrné aritmetické úchyly posuzovaného profilu  $Ra$  na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $a_p$  a proměnné  $v_f$  v 2. roce



Obr. 7.10. Závislost parametru úchyly posuzovaného profilu  $Rz$  na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $a_p$  a proměnné  $v_f$  v 2. roce



Obr. 7.11. Závislost průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu  $Ra$  na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $a_p$  a proměnné  $v_f$  v 3. roce



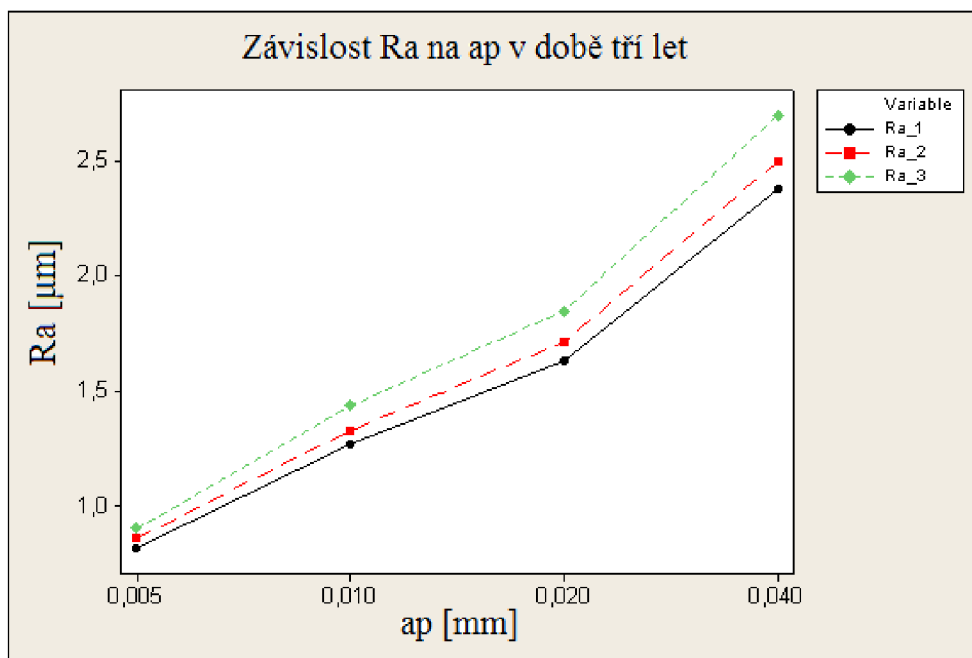
Obr. 7.12. Závislost parametru úchylky posuzovaného profilu  $Rz$  na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní  $a_p$  a proměnné  $v_f$  v 3. roce

Statisticky zpracované výsledky experimentů ukazují na přímou úměrnost mezi amplitudou kmitání technologické soustavy 1. harmonické frekvence a parametry Ra a Rz. Na základě vyhodnocené amplitudy lze lineárně učit parametry úchyly posuzovaného profilu broušených ploch včetně předpokládaných rozptylů. Konfidenční interval drsnosti broušených ploch včetně předpokládaných rozptylů. Konfidenční interval má u všech závislostí typicky hyperbolický tvar, což též potvrzuje vhodně zvolenou statistickou metodu. S intenzivněním technologických podmínek se zvyšuje amplituda kmitání soustavy stroj – nástroj – obrobek – upínač a zhoršuje se jakost obrobených ploch. Sledujeme-li průběh změn amplitudy 1. harmonické frekvence zjistíme, že vyšší hodnotě tohoto parametru přímo úměrně odpovídá vyšší hodnota průměrné aritmetické úchyly posuzovaného profilu a vyšší hodnota největší hloubky profilu drsnosti. Konstanty úměrnosti lze odečíst z grafů uvedených na obr. 7.3 až 7.12. Tyto konstanty se mění každým rokem provozu a jsou charakteristikou postupného opotřebování pohybujících se dílů technologické soustavy. Tyto závislosti charakterizují též změnu technologických podmínek. Zvyšováním se technologických podmínek se zvyšují hodnoty Ra a Rz. Je třeba zdůraznit, že zvoleným hodnotám hloubky úběru a posuvové rychlosti odpovídají změřené a vypočtené amplitudy 1. harmonické frekvence. Lze tedy na základě měření amplitudy vyhodnotit parametry struktury povrchu. Závislosti jsou lineární s velmi dobrou shodou empirických (naměřených) a vyrovnaných (vypočtených) hodnot. Můžeme tato data použít pro další statistické zpracování výsledků experimentů.

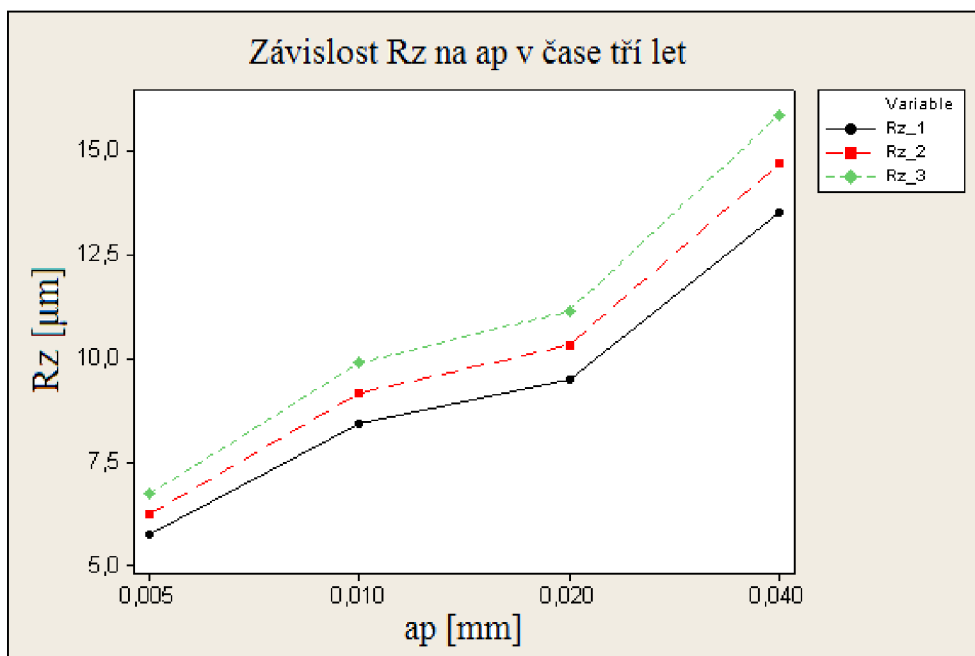
## 7.2 ČASOVÉ HODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Na základě dříve měřených a zpracovaných dat lze získat závislosti vlivu technologických podmínek na parametry struktury povrchu a na změnu parametrů kmitání technologické soustavy. Data byla sledována na stroji ve výrobním podniku po dobu tří let. Stroje pracovali v dvousměnném provozu v sériové výrobě.

## 7.2.1 Závislost Ra a Rz na hloubce úběru v čase tří let

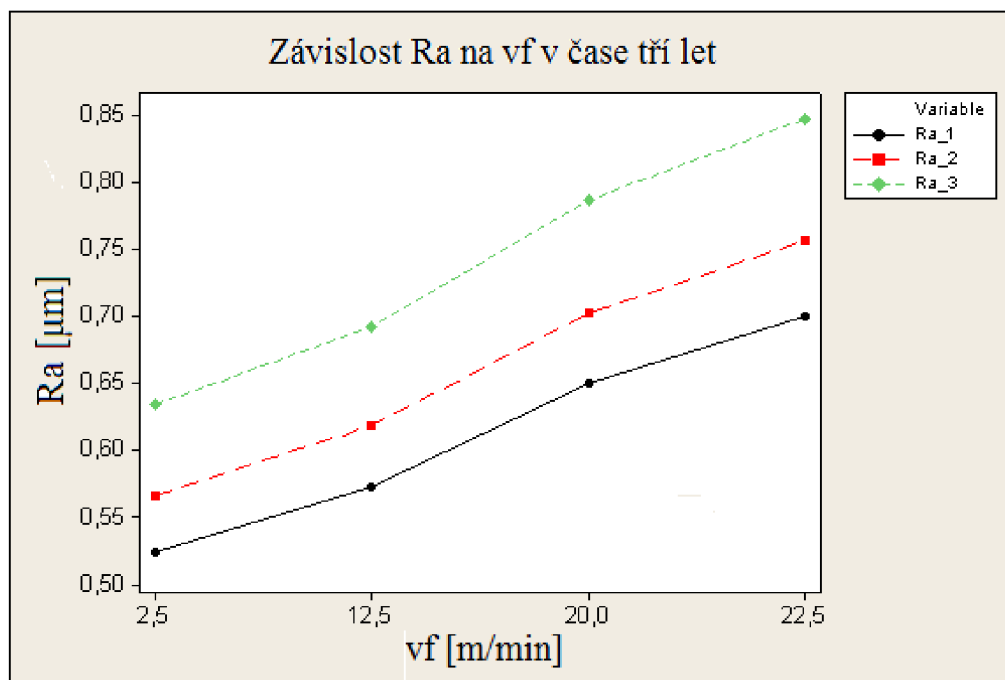


Obr. 7.13. Závislost průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu Ra na hloubce úběru v době tří let

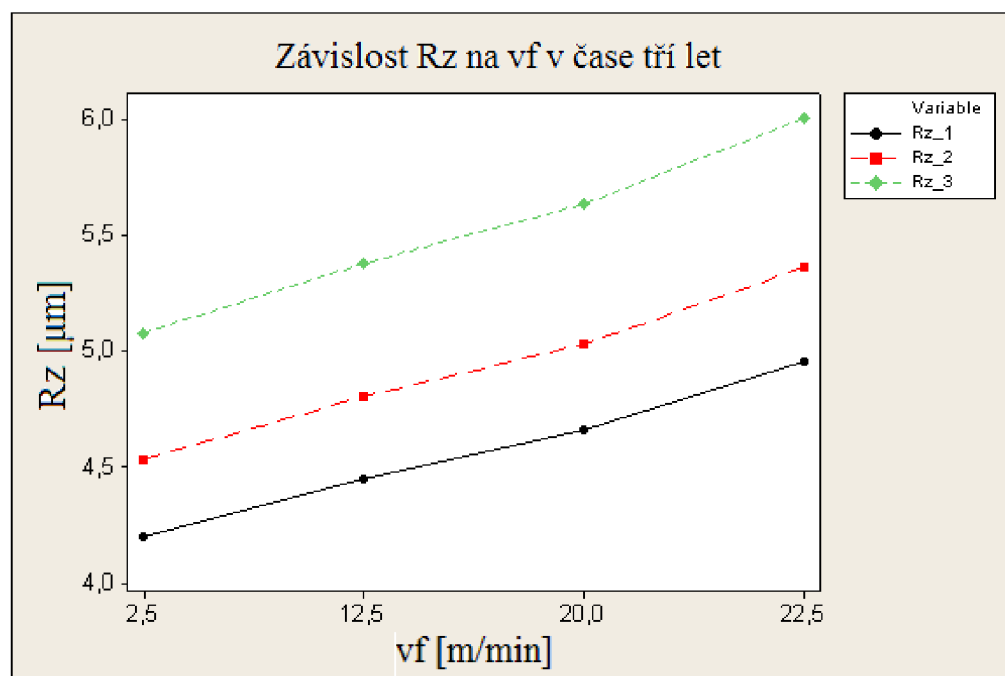


Obr. 7.14. Závislost parametru úchylky posuzovaného profilu Rz na hloubce úběru v době tří let

## 7.2.2 Závislost Ra a Rz na posuvové rychlosti v čase tří let



Obr. 7.15. Závislost průměrné aritmetické úchlky posuzovaného profilu Ra na posuvové rychlosti v době tří let



Obr. 7.16. Závislost parametru úchlky posuzovaného profilu Rz na posuvové rychlosti v době tří let

Sledujeme-li závislost zvyšování se hloubky úběru a posuvové rychlosti zjistíme, že, jak již dříve jsme uvedli, postupně se zvyšuje průměrná hodnota sledovaných parametrů struktury povrchu. Rozborem závislostí v jednotlivých letech zjistíme, že dochází k postupnému narůstání diferencí těchto hodnot s roky. Znamená to, že dochází k zintenzivnění opotřebení pohybujících se částí výrobního zařízení. Přitom relativně větší je vliv hloubky úběru než posuvné rychlosti. Tuto skutečnost lze vysvětlit intenzivnějším nárůstem počtu brousicích zrn, které jsou v řezu. Rozměry třísky odebrané jedním zrnem se rychleji zvětšují při nárůstu hloubky úběru. Tím se zvětšuje vliv hloubky úběru na zhoršení jakosti povrchu. Grafické závislosti (obr. 7.15, 7.16) ukazují, že hloubka úběru má srovnatelný vliv na průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu a největší výškou drsnosti funkčních ploch (je mezi něma těsná korelace).

Méně výrazným je vliv posuvové rychlosti na parametry struktury povrchu (nárůst je asi 20%). I v tomto případě je dobrá korelace mezi průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu ( $R_a$ ) a největší výškou úchylky posuzovaného profilu ( $R_z$ ) broušených funkčních ploch. Příčina těchto změn je zřejmě skutečnost, že změnou posuvové rychlosti se zvětší dotykový oblouk, čímž se stabilizuje řezný proces. Zvětšováním styku nástroje s obrobkem dochází k nárůstu pasivní složky řezné síly, účinněji se vymezují vůle v uložení, tuhost technologické soustavy je lineární. Důsledkem nárůstu řezné síly se stabilizuje technologický proces. Změna posuvové rychlosti proto má výrazně menší vliv než ostatní technologické podmínky. Z této úvahy vyplývá, že při konstrukční úpravě by bylo účelnější zvýšit posuvovou rychlost. Vzhledem k tomu, že výkon broušení (odebraný materiál) je lineární funkcí  $v_f$  lze zvyšovat tuto hodnotu bez výrazné změny hodnot parametrů struktury povrchu.

V procesu oddělování třísky dochází ke změně amplitudy kmitání. S nárůstem technologických podmínek roste i amplituda 1. harmonické frekvence. Budeme-li sledovat tyto změny, zjistíme že hloubka úběru má téměř pětkrát větší vliv než posuvová rychlost. I tyto výsledky potvrzují naše zjištění, že pro zajištění stability procesu broušení je vhodnější zvyšovat posuvovou rychlost. Při experimentálním šetření byly zvolené technologické podmínky tak, aby se využil celý rozsah možných změn (maximální posuvová rychlost brusky BRH 20.03F je 25 m/min). Rozsah hloubky úběru byl dán skutečností, že při největší hodnotě  $a_p$  (0,04) již nastal rezonanční jev, došlo k drnčení, rozkmitání technologické soustavy, dále se nedala zvyšovat hloubka úběru. Grafický a matematický popis korelačních vztahů nám umožní měřit a hodnotit amplitudu kmitání bez přerušení technologického procesu, byť už dotykově pomocí piezoelektrického snímače nebo bezdotykově pomocí laserinterferometrie.

Graf uvádějící závislost posuvové rychlosti  $n$  amplitudě 1. harmonické frekvence i v tomto případě ukazuje na ustálení amplitudy 1. harmonické frekvence pro vnější posuvové rychlosti. Zřejmě dochází k stabilizaci řezného procesu v důsledku

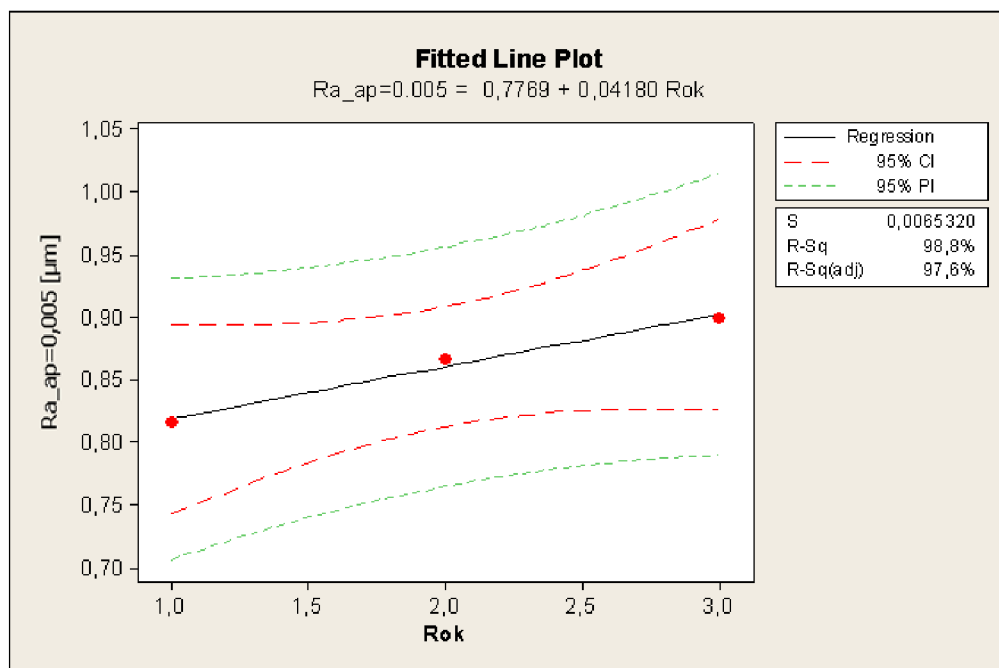


ustálení řezných sil a vzniku konstantní tloušťky mazacího filmu ve vedení upínacího stolu. Určení těchto závislostí nám umožní pomocí metod matematické statistiky predikovat technologické možnosti výrobního stroje i pro delší časové období.

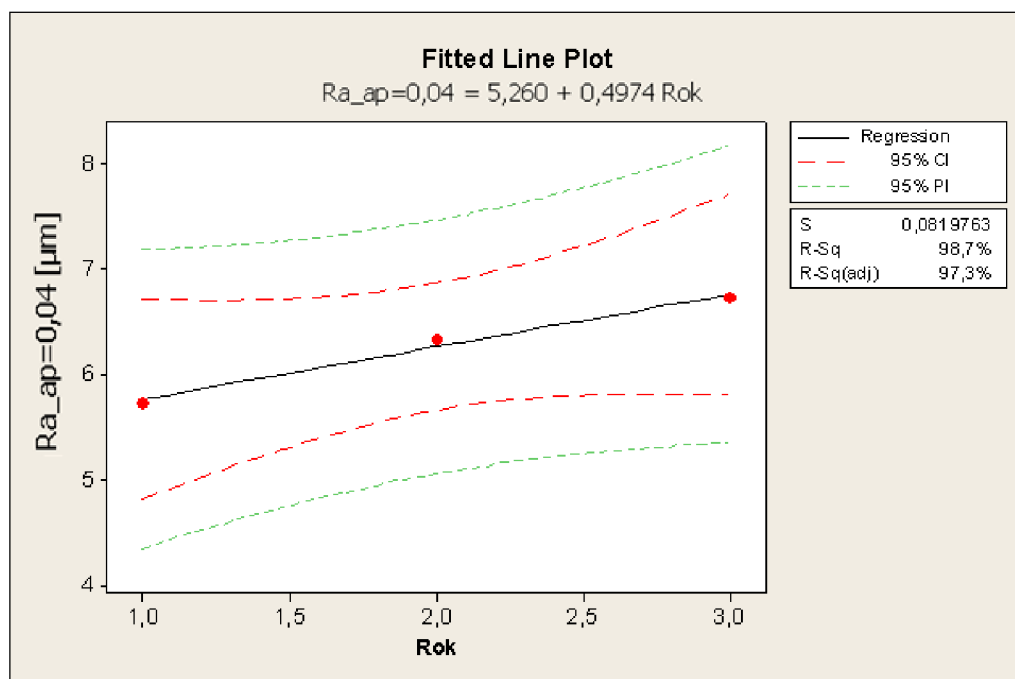
### **7.3 PREDIKCE TECHNOLOGICKÝCH CHARAKTERISTIK ČTVRTÉHO A PÁTÉHO ROKU**

V technologické praxi často jsou výrobní stroje rozdělené na hrubovací a dokončovací zařízení. Stroje pro jemné dokončovací operace jsou méně zatížené, intenzita opotřebení je menší, lze pomocí těchto zařízení získat lepší hodnoty parametrů struktury. Proto jsme sledovali změnu jednotlivých parametrů v časové závislosti (za 1., 2., 3. rok) při jemném a hrubovacím broušení kotoučem s diamantovou vrstvou. Pro získání dat u jemného, dokončovacího broušení byla zvolena hodnota hloubky úběru  $a_p=0,005\text{mm}$ , pro hrubovací broušení  $a_p=0,04\text{ mm}$  (hodnota kde se ještě neobjevil rezonanční jev). Výsledky experimentů jsou statisticky zpracovány v následujících částech práce.

### 7.3.1 Hodnocení parametru Ra

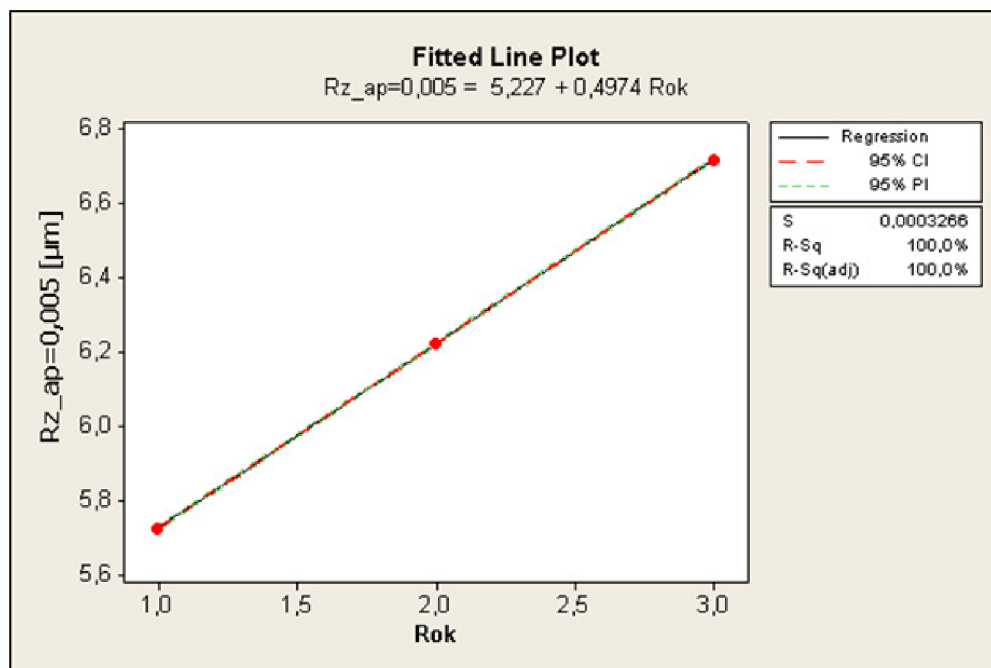


Obr. 7.17. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu Ra v čase tři let pro  $a_p = 0,005\text{mm}$  (jemné broušení)

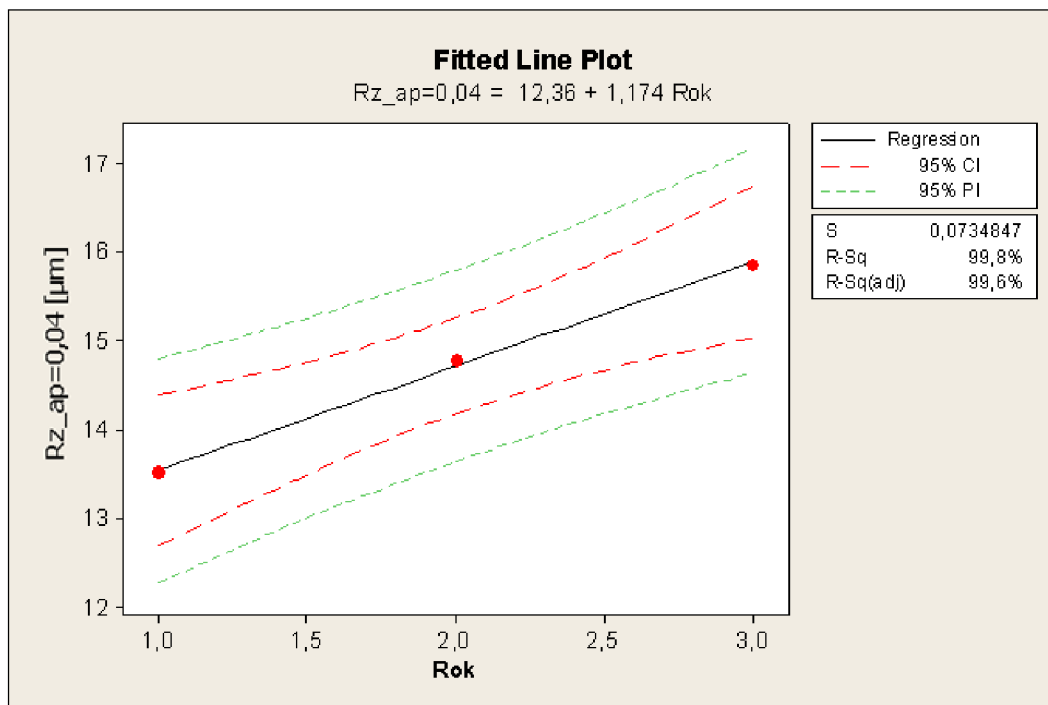


Obr. 7.18. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu Ra v čase tři let pro  $a_p = 0,04\text{mm}$  (hrubovací broušení)

### 7.3.2 Hodnocení největší výšky profilu

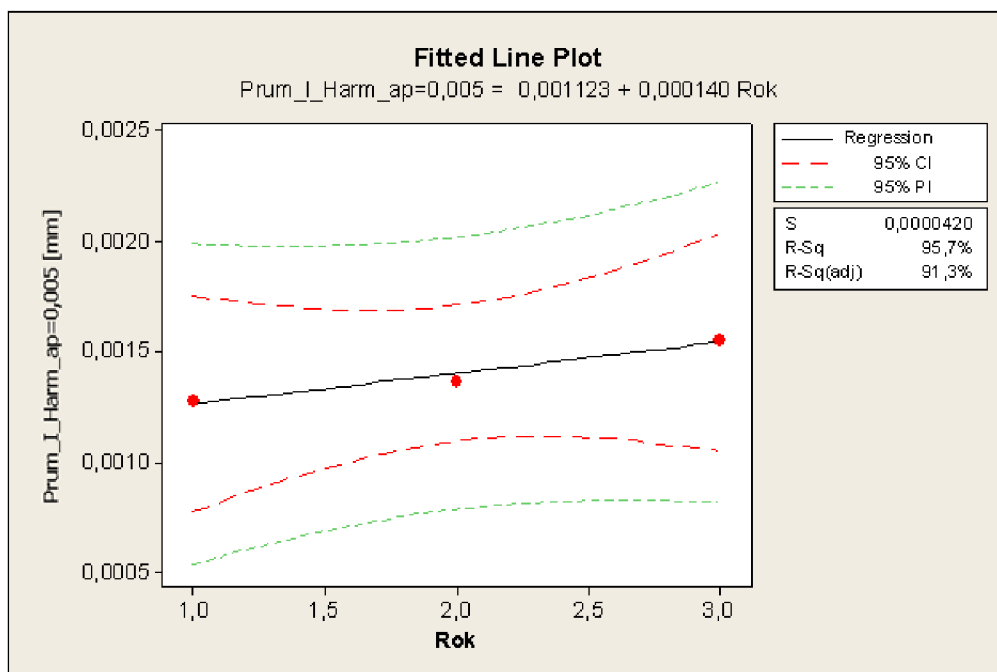


Obr. 7.19. Závislost parametru  $Rz$  v čase tři let při  $a_p = 0,005\text{mm}$  (jemné broušení)

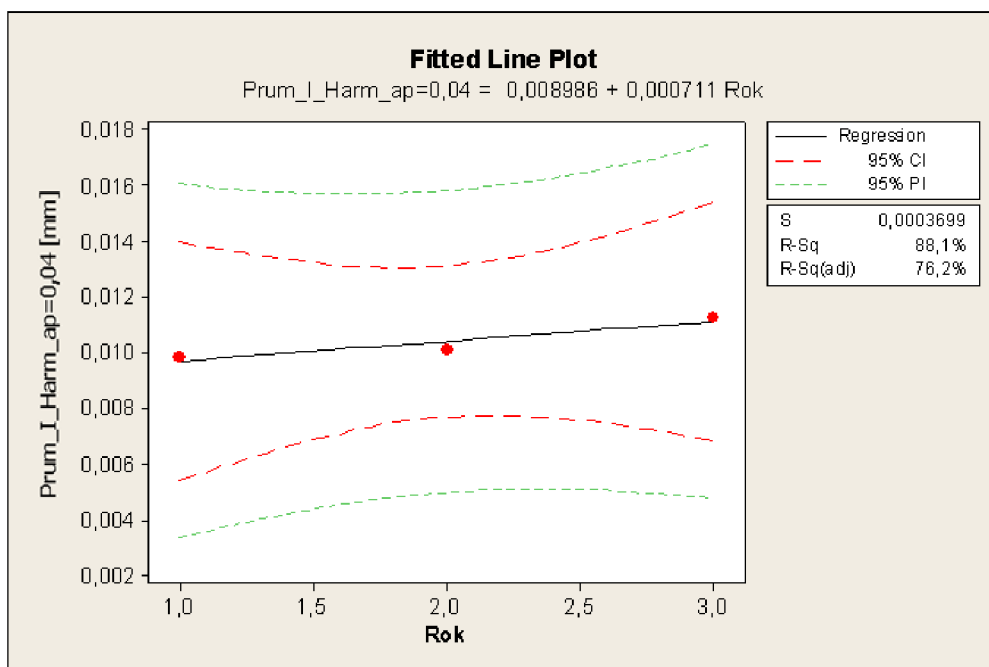


Obr. 7.20. Závislost parametru  $Rz$  v čase tři let při  $a_p = 0,04\text{mm}$  (hrubovací broušení)

### 7.3.3 Hodnocení amplitudy 1. harmonické frekvence



Obr. 7.21. Závislost amplitudy 1. Harmonické frekvence v čase tří let při  $a_p = 0,005\text{mm}$  (jemné broušení)



Obr. 7.22. Závislost amplitudy 1. harmonické frekvence v čase tří let při  $a_p = 0,04\text{mm}$  (hrubovací broušení)

Jak jsme dokázali již dříve, parametry struktury povrchu se mění v závislosti na technologických podmínkách. Neméně důležitá je změna těchto dat v závislosti na době činnosti výrobního stroje v technologickém procesu. Bylo proto nutné sledovat změnu parametrů struktury povrchu v závislosti od technologických podmínek a v neposlední řadě změnou amplitudy 1. harmonické frekvence v časové závislosti.

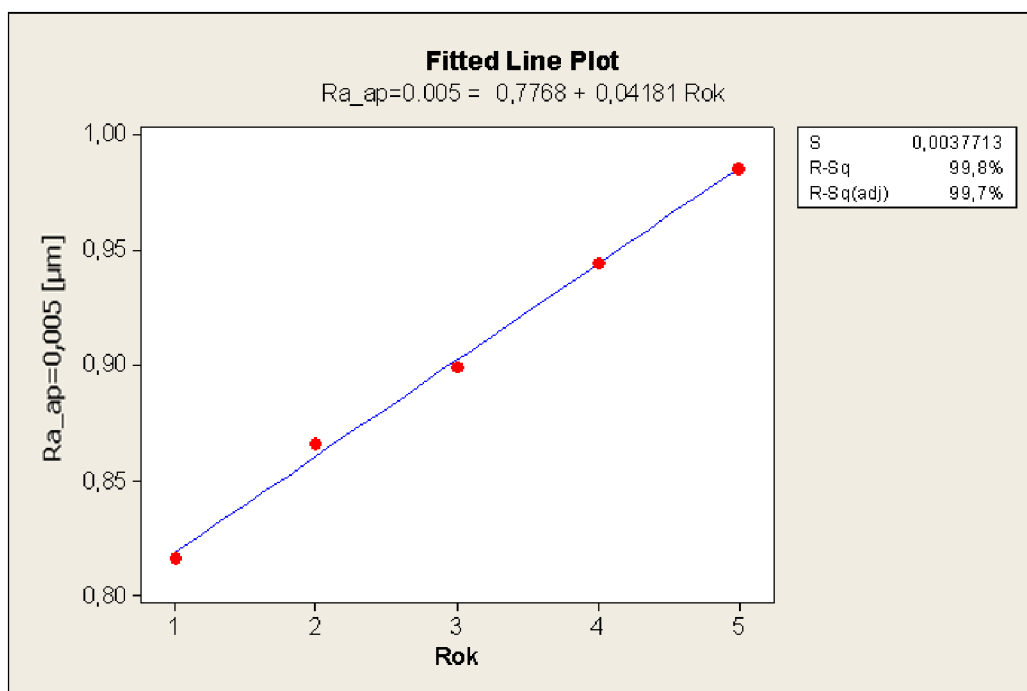
Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu se zvyšuje v závislosti na době činnosti stroje (viz. Obr. 7.21 a obr. 7.22). Tento trend platný jak pro jemné taktéž pro hrubovací broušení. I když změny jsou relativně malé (do 10%) svědčí o postupném opotřebením dílů výrobního zařízení. Matematický popis průběhu děje je uvedený v grafech. Konstanty jsou charakteristické pro opotřebením daného stroje.

Největší výška profilu drsnosti v závislosti na době provozu výrobního zařízení má též stoupající tendenci. Tento trend se ukazuje jak u dokončovacím tak též u hrubovacím broušení. Ze statistických dat lze určit velmi dobrou korelaci mezi  $R_a$  a  $R_z$ . Pomocí součinitelů lineární regrese lze posoudit průběh opotřebením brousících strojů.

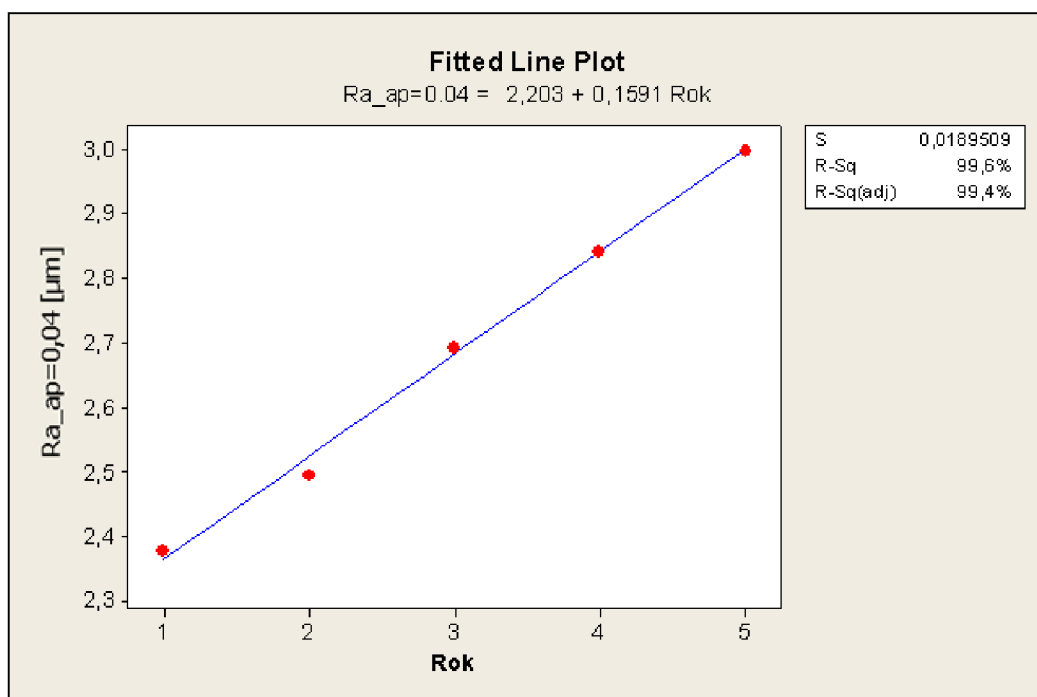
Lineární průběh v závislosti na době činnosti výrobního stroje vykazuje i amplituda 1. vlastní frekvence kmitající technologické soustavy. I v tomto případě se zvyšování roků provozu výrobního stroje lineárně se zvyšuje amplituda 1. vlastní frekvence. Konstanty charakterizující proces opotřebením stroje jsou uváděné v grafických závislostech. Vzhledem k tomu, že ve všech případech se jedná o těsnou lineární závislost lze tvrdit, že mezi parametry je těsná korelace.

Budeme-li vycházet z výsledků tříletého sledování jakosti výrobních zařízení, lze na základě zákonů matematické statistiky predikovat průběh sledovaných parametrů v delší časové závislosti. Výsledky výzkumů jsou prezentovány v následujících grafech.

### 7.3.4 Predikce průměrné aritmetické úchlky posuzovaného profilu

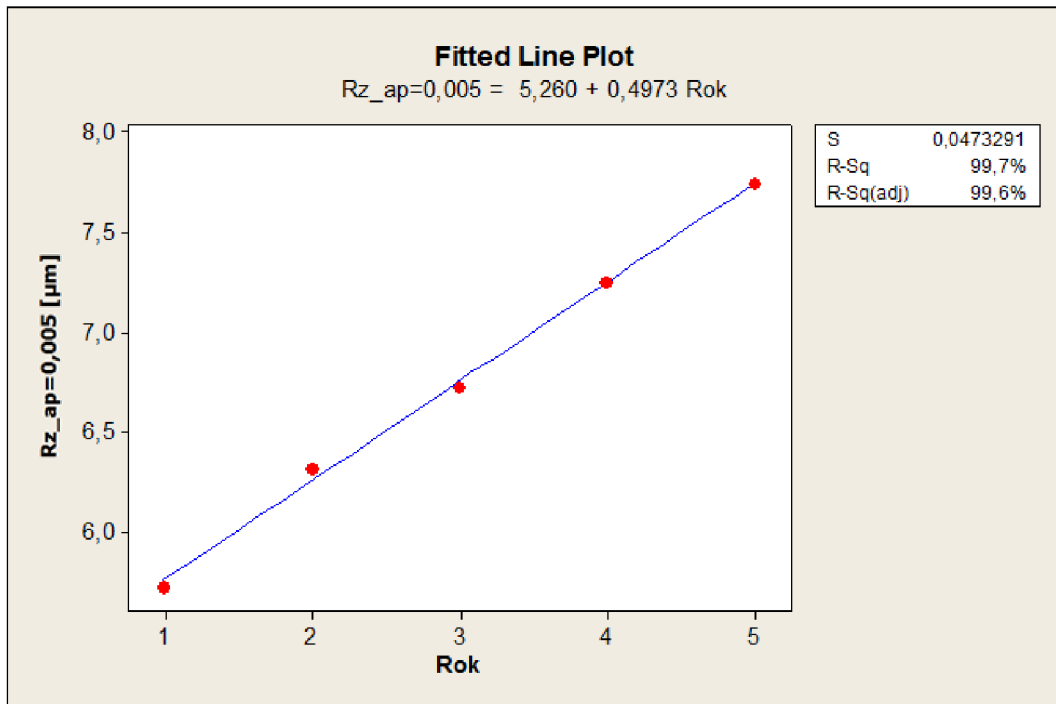


Obr. 7.23. Predikce průměrné aritmetické úchlky posuzovaného profilu  $Ra$  pro  $a_p = 0,005 \text{ mm}$  (jemné broušení)

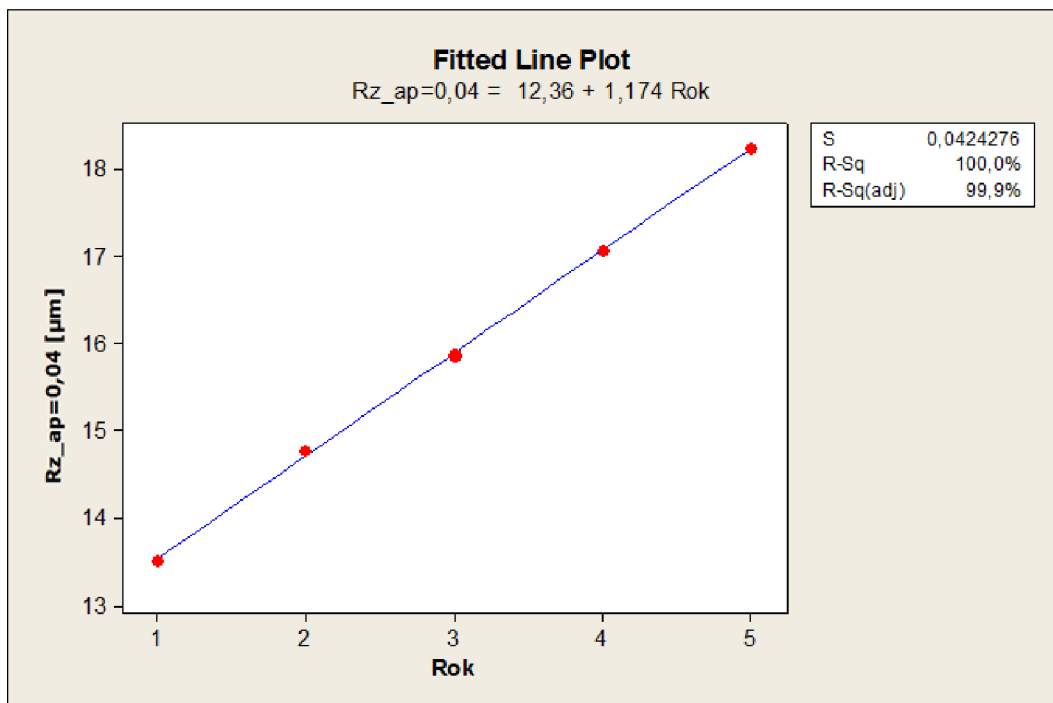


Obr. 7.24. Predikce průměrné aritmetické úchlky posuzovaného profilu  $Ra$  pro  $a_p = 0,04 \text{ mm}$  (hrubovací broušení)

### 7.3.5 Predikce největší výšky profilu drsnosti

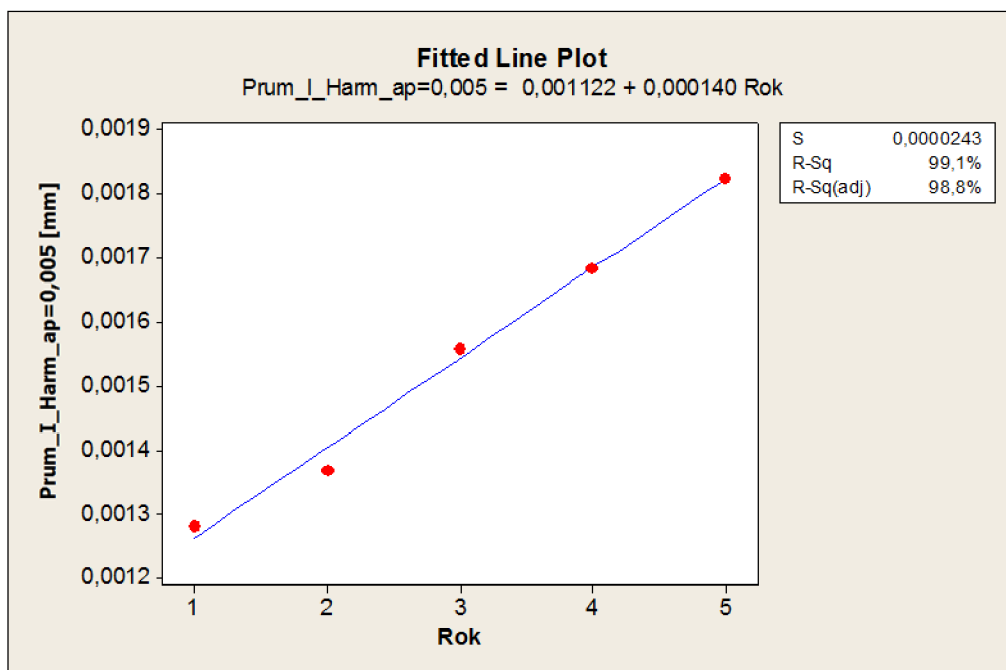


Obr. 7.25. Predikce parametru  $Rz$  při  $a_p = 0,005\text{mm}$  (jemné broušení)

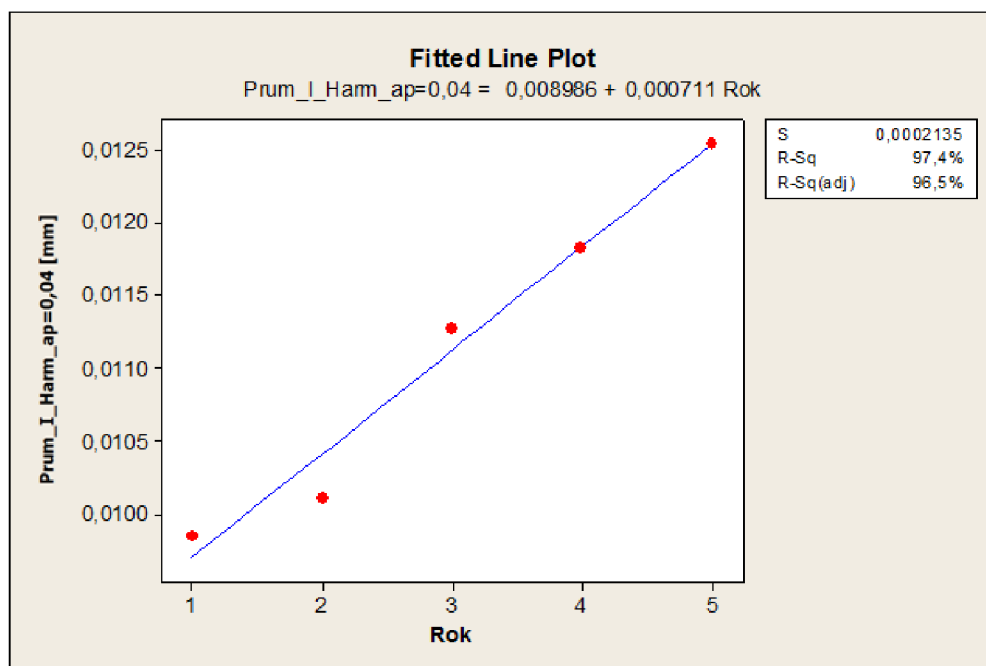


Obr. 7.26. Predikce parametru  $Rz$  při  $a_p = 0,04 \text{ mm}$  (hrubovací broušení)

### 7.3.6 Predikce amplitudy 1. harmonické frekvence



Obr. 7.27. Predikce amplitudy 1. harmonické frekvence pro  $a_p = 0,005\text{mm}$  (jemné broušení)



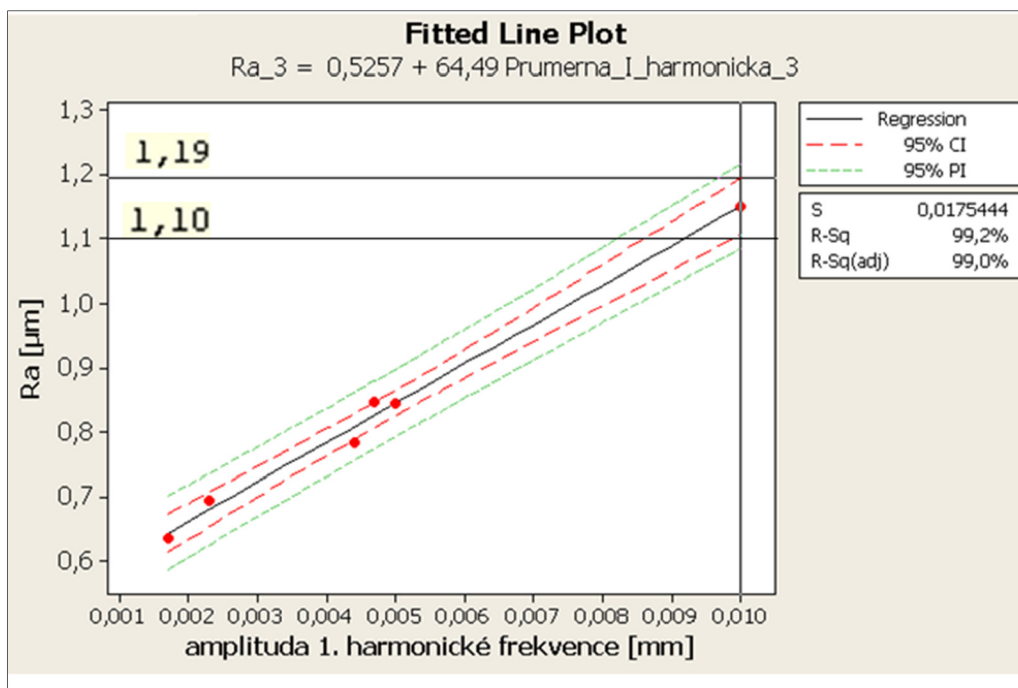
Obr. 7.28. Predikce amplitudy 1. harmonické frekvence pro  $a_p = 0,04\text{ mm}$  (hrubovací broušení)



Predikce výstupních parametrů procesu broušení byla vypracována s použitím metod matematické statistiky. Ve všech případech jsme předpokládali a dokázali, že naměřená data mají normální rozložení.

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu se mění lineárně v rozsahu odpovídající statistickým datům. Na základě těchto výsledků lze hodnotit přesnost a výrobní možnosti brusky. Podle stejných zásad byly vypracované predikce pro určení největší výšky profilu drsnosti a amplitudy 1. harmonické frekvence kmitající soustavy. Vzhledem k tomu, že grafy uvádí též konfidenční intervaly lze předpovídat, v jakém rozmezí se budou pohybovat parametry struktury povrchu v jednotlivých letech.

Vycházíme – li z výsledků měření hodnot 1. harmonické frekvence při hrubovacím broušení ve třetím roce provozu, zjistíme, že této době provozu odpovídá průměrná amplituda 1. Harmonické frekvence  $\mu = 0,01\text{mm}$ . Z matematické závislosti paramter Ra – amplituda první harmonické frekvence lze zjistit dosažitelnou jakost broušené plochy (viz obr. 7.29).



Obr. 7.29. Určení paramteru Ra v závislosti od amplitudy kmitání

Z matematických závislostí lze určit hodnotu průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu  $Ra = 1,145 \pm 0,045 \mu\text{m}$ .

S pravděpodobností 95% lze tvrdit, že experimentálně určené hodnoty paramteru Ra budou v zobrazeném konfidenčním intervalu.

## 8 ZÁVĚR

Při dokončovacích operacích je obecně známo, že rozměrová přesnost a parametry struktury povrchu jsou ovlivněné jakostí broušícího kotouče, technologickými podmínkami, vlastnostmi broušeného materiálu a v neposlední řadě tuhostí stroje a stabilitou řezného procesu. Jak prokázaly naše experimenty, kmitání technologické soustavy výrazně ovlivňuje jakost broušených ploch. Z parametrů kmitání jakost obrobených funkčních ploch nejlépe charakterizuje amplituda 1. vlastní frekvence. Amplituda 1. vlastní frekvence byla hodnocena pomocí přístrojů laserinterferometr Renishaw XL 80 (bezdotyková metoda) a Balantron 2001 (Kistler a dotyková metoda) a na základě porovnání přesnosti přístrojů statistického vyhodnocení měření, lze říci, že tyto přístroje lze využít pro hodnocení technologických procesů. Amplituda 1. harmonické frekvence u obou přístrojů je srovnatelná, statistické soubory vykazují velmi nízké variační koeficienty, což svědčí o vysoké přesnosti obou přístrojů. Dotykový přístroj vykazuje menší rozptyl dat, tzn. že je méně citlivý. Měření přístrojem Balantron je rychlejší, jednodušší, cenově výhodnější. Při hodnocení výsledků experimentů byly použité metody matematické teorie snímání kmitů, regresní analýzy a matematické statistiky.

Parametry struktury povrchu nejméně ovlivňují řezné podmínky. V procesu broušení se mění hloubka úběru a posuvová rychlost. Ze zvolených parametrů struktury tj.  $R_a$  a  $R_z$ , jak rostoucí hloubka úběru, tak zvětšující se posuvová rychlost, lineárně zvyšují hodnoty průměrné aritmetické úchylnosti posuzovaného profilu a největší hloubky profilu drsnosti. Výraznější je vliv hloubky úběru. Menší je vliv posuvové rychlosti. Matematické závislosti byly získané lineární regresí a mají vysoké indexy determinace. Z hlediska zvyšování výkonnosti procesu broušení bych doporučil u nových konstrukčních strojů zvýšit rozsah posuvové rychlosti.

Velikost parametrů struktury povrchu lze hodnotit též pomocí charakteristik kmitání technologické soustavy. Změna velikosti 1. amplitudy vlastní frekvence přímo úměrně ovlivňuje jak průměrnou aritmetickou úchylnost posuzovaného profilu, tak též největší výšku profilu drsnosti. Matematický popis těchto závislostí byl získán lineární regresí a má vysoký index determinace, což svědčí o přesnosti metod. Aplikace přístrojů na určení amplitudy 1. vlastní frekvence umožní diagnostiku technologického procesu bez přerušení výroby, bez ekonomických ztrát.

Dlouhodobé experimentální sledování procesu broušení pomocí vibrodiagnostiky umožňuje jak predikci jakosti funkčních ploch, tak také stav a výrobní možnosti technologických zařízení. Na základě získaných experimentálních dat a statistických metod lze určit přesnost a dosažitelné parametry struktury povrchu a tím predikovat možnosti použití strojů případně určit intervaly údržby a oprav výrobních zařízení na základě měření amplitudy kmitání technologické soustavy během výroby.

Výsledky tohoto výzkumu byly získány ve výrobním podniku, kde bruska BRH 20.03F pracovala ve dvousměnném provozu. Měření a statistické hodnocení se provádělo postupně v ročních intervalech po dobu tří let. Tím se zjistil vliv míry opotřebení funkčních částí stroje na parametry kmitání a jakost broušených ploch a umožnila se predikce míry opotřebení a optimalizace technologického procesu.

Z prvků technologické soustavy, tj. stroj-nástroj-obrobek-upínač, má značný vliv na velikost parametrů struktury povrchu nástroj-brousicí kotouč. Je velmi důležité dokonalé vyvážení rotujícího brousicího kotouče s přírubami. U větších šířek nástroje je nutné kromě statického vyvažování provádět dynamické vyvažování brousicích kotoučů. Doporučuji proto při konstrukci nových brousicích strojů přidat dynamické vyvažovací zařízení na vřeteno brousicího kotouče.

Pro hodnocení stavu výrobního zařízení, jak jsme prokázali, je velmi důležitou a relevantní veličinou amplituda 1. harmonické frekvence. Při vývoji nových brousicích strojů by bylo vhodné umístit na stroj snímače kmitání, které umožní, jak predikci parametrů struktury povrchu a tím automatizaci technologického procesu, tak též určení intervalů údržby a oprav.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Balantron 2001. Návod k použití.
- [2] BEŇO, J.: *Teoretické základy inovačních technologií*. VIENALA Košice, 2010. 174 s. ISBN 978-80-553-0449-6
- [3] BRH 20.03.F, Rovinná horizontální bruska, Návod k použití.
- [4] BUMBÁLEK, L., PERNIKÁŘ, J., PATA, V.: *Kontrola a měření*. Informatorium Praha, 2009. ISBN 978-80-7333
- [5] CALABRO, S.R.: *Základy spolehlivosti a jejich využití v praxi*. SNTL Praha, 1965. 309s.
- [6] ČECH, Jaroslav, PERNIKÁŘ, Jiří, PODANÝ, Kamil *Strojírenská metrologie*. 4. vyd. Brno: CERM, 2005. 175 s. ISBN 80-214-3070-2
- [7] ČOP, J.: *Výzkum broušení dílů forem kotoučem z diamantu a kubického nitridu bóru*. Diplomová práce UTB – FT. Zlín, 2012.
- [8] ČSN ISO 2041/2010. *Vibrace, rázy a monitorování stavu – Slovník*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [9] ČSN EN ISO 4288:1999. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS), Struktura povrchu: Profilová metoda*. Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu.
- [10] ČSN EN ISO 6103/2005. *Nástroje z pojeného brusiva – Přípustné nevývažky dodávaných broušicích kotoučů – statistická zkouška*. Český normalizační institut. Praha, 2005.
- [11] ČSN ISO 16269-6:2007. *Statistická interpretace dat. Část 6: Stanovení statistických tolerančních intervalů*.
- [12] DVOŘÁK, R.: *Metrologie geometrických vlastností povrchů: Úvod do problematiky*. Strojírenská technologie, roč. X., č.1. UJEP. Ústí nad Labem, 2005. ISSN 1211-4162

- [13] FERENCEY, V., GOGORA, V.: *Technická diagnostika* [online]. Trenčín, 2002. [cit. 2012-04-03]. ISBN 80-88914-66-3. Dostupné z: [http://fsi.utc.sk/ktvi/leitner/2\\_predmety/KTS/podklady/TD.pdf](http://fsi.utc.sk/ktvi/leitner/2_predmety/KTS/podklady/TD.pdf)
- [14] FRIEDRICH, V.: *Statistika pro ekonomy*. [online]. 2. přepracované. Ostrava, 2006 [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: <http://cs.scribd.com/>
- [15] HÁJEK, V.: *Nové nešstandardné metódy merania a analýzy vibrácií* [online]. [cit. 2012-02-01]. Dostupné z: <http://www.matdesign.sav.sk/data/files/362.pdf>
- [16] HINDLS, R., HRONOVÁ, S., SEGER, J. *Statistika pro ekonomy*. 5.thed. Praha: Professional Publishing, 2004. 417 p. ISBN 80-86419-59-2.
- [17] HOLEŠOVSKÝ, F.: *Broušení a jeho vliv na vlastnosti povrchu*. VŠB-TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1644-9
- [18] CHUDÝ, V., PALENČÁR, R., KUREKOVÁ, E., HALAJ, M.: *Meranie technických veličín*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľství STU, 1999. 672 s. ISBN 80-227-1275-2
- [19] JANÁČ, A., aj.: *Technologia obrabania*. SVŠT Bratislava, 2004. ISBN 80-227-2031-3
- [20] KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika: senzory metody – analýzy signálu*. 1. vydání. BEN technická literatura Praha 10, 2006. 408 s. ISBN 8073001586
- [21] LIEMERT, G., aj.: *Obrábění*. Praha, SNTL Praha, 1972, 351s
- [22] LUKOVICS, I.: *Kmitání technologické soustavy při dokončovacích operacích*. Strojírenská technologie: Časopis pro vědu, výzkum a výrobu, 2008, vol. XII, p. 133–136. ISSN 1211-4162.
- [23] LUKOVICS, I.: *Progresivní metody dokončování funkčních ploch nástrojů*. VŠB-TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-2033-0

- [24] MAROŠ, B.: *Empirické modely I: analýza inženýrského procesu*. Brno: CERM, 2001. 112 p. ISBN 8021419849.
- [25] MASLOV, J.N.: *Teorie broušení kovů*. 1st ed. STNL Praha, 1979.
- [26] Mendelova univerzita v Brně. *Metoda nejmenších čtverců*. [online]. [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: <http://user.mendelu.cz/marik/prez/mnc-cz.pdf>
- [27] NESLUŠAN, M., aj.: *Experimentální metody v trieskovom obrábání*. ZU ŽILINA, 2007. ISBN 978-80-7318-488-9
- [28] NOVÁK, M., HOLEŠOVSKÝ, F.: *Vybrané parametry jakosti broušeného povrchu u materiálů strojních součástí a dílů automobilového průmyslu*. Strojírenská technologie., roč. XV. č.4. UJEP Ústí nad Labem, 2010. ISSN 1211-4162
- [29] NOVÁK, Z.: *Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson Ltd* [online]. [cit. 2010-11-14]. Dostupné z: [http://gps.fmw.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2\\_NOVAK\\_3D\\_mereni\\_textury.pdf](http://gps.fmw.vutbr.cz/STAH_INFO/2_NOVAK_3D_mereni_textury.pdf)
- [30] PATA, V.: *Základní aplikace laserových interferometrů v průmyslu*. Zlín. Skriptum. Univerzita Tomáše Bati.
- [31] PEJŠA, L., et. al.: *Technická diagnostika*. 1. vydání. Česká zemědělská univerzita v Praze, Technologická fakulta. Praha, 1995. 195 s. ISBN 80213-02496
- [32] PERNIKÁŘ, J.: *Technická měření* [online]. c2002. [cit. 2010-11-24].. Dostupný z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TechnickaMereni.pdf>
- [33] PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M.: *Strojírenská metrologie II*. 1. vyd. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-2
- [34] PERNIKÁŘ, J., MUSIL, M.: *Hodnocení jakosti povrchu kroužků valivých ložisek*. Strojírenská technologie, roč. XVI, č. 5. UJEP Ústí nad Labem, 2011. s. 29-32. ISSN 1211-4162.

- [35] PĚŠIČKA, L.: *Geometrická specifikace výrobků strojírenské výroby (GPS)*. Praha: ČNI, 2006, 49 s.
- [36] RENISHAW [online]. [cit. 2011-01-17]. Dostupný z: <http://renishaw.cz>
- [37] *Rozdělení a značení ocelí* [online]. c2010 [cit. 2010-11-14]. Dostupné z: <http://www.ateam.ic.cz/folie.pdf>
- [38] ROKYTA, L. *Výzkum vlivu dokončovacích operací na jakost výrobků: Disertační práce*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2013. 121, 5 p.
- [39] SMETANA, C., et al.: *Hluk a vibrace: Měření a hodnocení*. 1. vydání. Praha 1 : Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 8090193625.
- [40] STODOLA, J.: *Vibrace a jejich využití v technické diagnostice strojů*. Brno: VA Brno, 2003. 43 s. ISBN 8085960648.
- [41] *Studium integrity broušeného povrchu* [online]. [cit. 2010-11-14]. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/fvtipo/casopis/pdf08/2-str-11-13.pdf>
- [42] ŠPERKA, P.: *Struktura povrchů vybraných strojních součástí* [online]. c2009. [cit. 2010-11-24]. Dostupné z: [http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/struktura\\_povrchu\\_vybranych\\_tech\\_nologii\\_obrabeni.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/struktura_povrchu_vybranych_tech_nologii_obrabeni.pdf)
- [43] ŠTOLL I., *Elektřina a magnetismus*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2003
- [44] VASILKO, K., BOKUČAVA, G.: *Brúsenie kovových materiálov*. Alfa Bratislava, 1988. 235 s.
- [45] VDOLEČEK, F.: *Spolehlivost a technická diagnostika*. FSI VUT Brno, 2002. 49 s.
- [46] *XL-80 Laserový systém* [online]. [cit. 2010-01-19]. Dostupný z: [http://resources.renishaw.com/download/\(d45dd6569592477a8c634cf5b4deb032\)?lang=cs&inline=true](http://resources.renishaw.com/download/(d45dd6569592477a8c634cf5b4deb032)?lang=cs&inline=true)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1. Časový průběh vlastních kmitů</i> .....	11
<i>Obr. 2.2. Fyzikální model a časový průběh vynuceného kmitání</i> .....	12
<i>Obr. 2.3. Rezonanční jev</i> .....	13
<i>Obr. 2.4. Schéma laserového interferometru</i> .....	15
<i>Obr. 2.5. Rozdělení vibrací dle kategorií</i> .....	16
<i>Obr. 2.6. Časové průběhy vibrací a odpovídající spektrální veličiny</i> .....	17
<i>Obr. 2.7. Princip časové a frekvenční analýzy</i> .....	20
<i>Obr. 2.8. Vznik aliasingu při vzorkování</i> .....	24
<i>Obr. 2.9. Projev aliasingu</i> .....	25
<i>Obr. 2.10. Histogram a) sinusový signál b) šum s normálním rozložením</i> .....	28
<i>Obr. 2.11. Vztahy mezi časovou a kmitočtovou oblastí</i> .....	29
<i>Obr. 2.12. Amplitudový časový diagram softwaru Sieview 32 verze 2.4.0 pro hodnoty z přístroje Balantron</i> .....	30
<i>Obr. 2.13. Graf první harmonické frekvence naměřené pomocí přístroje Balantron</i> .....	30
<i>Obr. 2.14. Různé typy statistických závislostí</i> .....	32
<i>Obr. 2.15. Lineární regrese</i> .....	33
<i>Obr. 2.16. Zobrazení metody nejmenších čtverců</i> .....	34
<i>Obr. 2.17. Kvadratická regrese</i> .....	36
<i>Obr. 2.18. Hyperbolická regrese</i> .....	37
<i>Obr. 2.19. Exponenciální regrese</i> .....	38
<i>Obr. 2.20. Polynomické křivky 3. stupně</i> .....	39
<i>Obr. 2.21. Interval spolehlivosti pro regresní přímkou</i> .....	41
<i>Obr. 2.22. Závislost průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu na amplitudě kmitání při broušení</i> .....	42
<i>Obr. 3.1. Povrch profilu</i> .....	46
<i>Obr. 3.2. Měřicí dráha snímače</i> .....	47
<i>Obr. 3.3. Největší výška profilu Rz</i> .....	48
<i>Obr. 3.4. Celková výška profilu Rt</i> .....	49
<i>Obr. 3.5. Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra</i> .....	49
<i>Obr. 3.6. Průměrná kvadratická úchylka Rq</i> .....	50



<i>Obr. 3.7. Průměrná výška prvku profilu <math>R_c</math> .....</i>	50
<i>Obr. 3.8. Průměrná šířka prvků profilu <math>R_{sm}</math> .....</i>	50
<i>Obr. 3.9. Šikmost posuzovaného profilu <math>R_{sk}</math> .....</i>	51
<i>Obr. 3.10. Špičatost posuzovaného profilu <math>R_{ku}</math> .....</i>	51
<i>Obr. 3.11. Materiálový poměr <math>R_{mr}</math> .....</i>	52
<i>Obr. 3.12. Abbot – Firestonova křivka .....</i>	52
<i>Obr. 3.13. Třírozměrné hodnocení textury povrchu .....</i>	56
<i>Obr. 4.1. Snímek brusky BRH 20.03F .....</i>	57
<i>Obr. 4.2. Vyvažovací přístroj Balantron 2001 [1] .....</i>	62
<i>Obr. 4.3. Schéma přístroje Mitutoyo SJ-301 .....</i>	63
<i>Obr. 5.1. Amplitudový časový diagram softwaru Sigview verze 2.4.0 pro přístroj Renishaw XL 80.....</i>	68
<i>Obr. 5.2. Graf první harmonické frekvence přístroje Renishaw XL 80 .....</i>	68
<i>Obr. 5.3. Časový diagram závislosti amplitudy 1. harmonické frekvence pro kotouče z KNB a Diamantu měřené pomocí laserinterferometru XL 80.....</i>	70
<i>Obr. 5.4. Časový diagram závislosti amplitudy 1. harmonické frekvence pro kotouče z KNB a Diamantu měřené pomocí Balantronu .....</i>	71
<i>Obr. 5.5. Porovnání amplitudy 1. harmonické frekvence při měření laserinterferometrem XL80 a Balantronem.....</i>	72
<i>Obr. 5.6. Boxplotový diagram pro kotouče D100 K100 B-VI při měření laserinterferometrem XL80 a Balantronem.....</i>	72
<i>Obr. 5.7. Test normality pro hodnoty kotouče D100 K100 B-VI. ....</i>	74
<i>Obr. 5.8 Porovnání výsledků s DIA kotoučem .....</i>	74
<i>Obr. 5.9 Srovnávací testy s kotoučem KNB .....</i>	75
<i>Obr. 6.1. Snímání kmitání v technologických procesech .....</i>	77
<i>Obr. 6.2. Testy normality pro určení vlivu hloubky úběru na průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu funkční plochy.....</i>	79
<i>Obr. 6.3. Boxplotový diagram pro korelaci průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu na hloubce úběru .....</i>	80
<i>Obr. 6.4. Vliv hloubky úběru na průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu – lineární regrese.....</i>	80

<i>Obr. 6.5. Testy normality pro určení vlivu hloubky úběru na největší výšku profilu (<math>R_z</math>) funkční plochy.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 6.6. Boxplotový diagram pro korelaci největší výšky profilu (<math>R_z</math>) na hloubce úběru.</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 6.7. Vliv hloubky úběru na největší výšku profilu (<math>R_z</math>) .....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 6.8. Testy normality pro určení vlivu hloubky úběru na 1 harmonickou frekvenci ....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 6.9. Boxplotový diagram pro korelaci amplitudy 1. harmonické frekvence na hloubce úběru .....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 6.10. Závislost amplitudy 1. harmonické frekvence na hloubce úběru se zobrazením rozptylu .....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 6.11. Závislosti mezi amplitudou 1. harmonické frekvence a hloubkou úběru.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 6.12. Pearsonuv koeficient korelace mezi amplitudou 1. harmonické frekvence a hloubkou úběru .....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 6.13. Testy normality pro určení vlivu posuvové rychlosti na průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu funkční plochy.....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 6.14. Boxplotový diagram pro korelaci průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu na posuvové rychlosti .....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 6.15. Vliv posuvové rychlosti na průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu .....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 6.16. Testy normality pro určení vlivu posuvové rychlosti na největší výšku profilu (<math>R_z</math>) funkční plochy.....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 6.17. Boxplotový diagram pro korelaci parametru <math>R_z</math> na posuvové rychlosti .....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 6.18. Vliv hloubky úběru na největší výšku profilu (<math>R_z</math>) .....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 6.19. Závislost materiálového podílu <math>R_{mr}</math> na posuvové rychlosti.....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 6.20. Testy normality pro určení vlivu posuvové rychlosti.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 6.21. Boxplotový diagram pro korelaci amplitudy .....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 6.22. Závislost amplitudy 1. harmonické frekvence na posuvové rychlosti.....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 6.23. Závislosti mezi amplitudou 1. harmonické frekvence a posuvovou rychlostí.....</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 6.24. Pearsonuv koeficient korelace mezi amplitudou 1. harmonické frekvence a posuvovou rychlostí .....</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 7.1. Závislost průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu <math>R_a</math> na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní <math>v_f</math> a proměnné <math>a_p</math> v 1. roce .....</i>	<i>96</i>

Obr. 7.2. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu $R_z$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $v_f$ a proměnné $a_p$ v 1. roce .....	96
Obr. 7.3. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu $R_a$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $v_f$ a proměnné $a_p$ v 2. roce .....	97
Obr. 7.4. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu $R_z$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $v_f$ a proměnné $a_p$ v 2. roce .....	97
Obr. 7.5. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu $R_a$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $v_f$ a proměnné $a_p$ v 3. roce .....	98
Obr. 7.6. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu $R_z$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $v_f$ a proměnné $a_p$ v 3. roce .....	98
Obr. 7.7. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu $R_a$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $a_p$ a proměnné $v_f$ v 1. roce .....	99
Obr. 7.8. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu $R_z$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $a_p$ a proměnné $v_f$ v 1. roce .....	99
Obr. 7.9. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu $R_a$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $a_p$ a proměnné $v_f$ v 2. roce .....	100
Obr. 7.10. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu $R_z$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $a_p$ a proměnné $v_f$ v 2. roce .....	100
Obr. 7.11. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu $R_a$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $a_p$ a proměnné $v_f$ v 3. roce .....	101
Obr. 7.12. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu $R_z$ na amplitudě 1. harmonické frekvence při konstantní $a_p$ a proměnné $v_f$ v 3. roce .....	101
Obr. 7.13. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu $R_a$ na hloubce úběru v době tří let.....	103
Obr. 7.14. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu $R_z$ na hloubce úběru v době tří let .....	103
Obr. 7.15. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu $R_a$ na posuvové rychlosti v době tří let.....	104
Obr. 7.16. Závislost parametru úchytky posuzovaného profilu $R_z$ na posuvové rychlosti v době tří let.....	104
Obr. 7.17. Závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu $R_a$ v čase tři let pro $a_p = 0,005\text{mm}$ (jemné broušení) .....	107

<i>Obr. 7.18. Závislost průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu Ra v čase tři let pro <math>a_p = 0,04\text{mm}</math> (hrubovací broušení).....</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 7.19. Závislost parametru Rz v čase tři let při <math>a_p = 0,005\text{mm}</math> (jemné broušení) .....</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 7.20. Závislost parametru Rz v čase tři let při <math>a_p = 0,04\text{mm}</math> (hrubovací broušení)..</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 7.21. Závislost amplitudy 1. Harmonické frekvence v čase tři let při .....</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 7.22. Závislost amplitudy 1. harmonické frekvence v čase tři let při .....</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 7.23. Predikce průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu Ra pro.....</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 7.24. Predikce průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu Ra pro <math>a_p = 0,04</math> mm (hrubovací broušení).....</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 7.25. Predikce parametru Rz při <math>a_p = 0,005\text{mm}</math> (jemné broušení) .....</i>	<i>112</i>
<i>Obr. 7.26. Predikce parametru Rz při <math>a_p = 0,04</math> mm (hrubovací broušení).....</i>	<i>112</i>
<i>Obr. 7.27. Predikce amplitudy 1. harmonické frekvence pro <math>a_p = 0,005\text{mm}</math> (jemné broušení) .....</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 7.28. Predikce amplitudy 1. harmonické frekvence pro <math>a_p = 0,04</math> mm (hrubovací broušení).....</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 7.29. Určení parametru Ra v závislosti od amplitudy kmitání .....</i>	<i>114</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Přehled vybraných veličin a vztahů ve vibrodiagnostice</i> .....	18
<i>Tab. 2. Základní délky drsnosti pro měření</i> .....	56
<i>Tab. 3. Vybrané parametry brusky BRH 20.03F</i> .....	58
<i>Tab. 4. Charakteristika kotouče</i> .....	58
<i>Tab. 5. Vlastnosti diamantu</i> .....	59
<i>Tab. 6. Charakteristika diamantového kotouče</i> .....	60
<i>Tab. 7. Vlastnosti KNB</i> .....	60
<i>Tab. 8. Charakteristika diamantového kotouče</i> .....	61
<i>Tab. 9. Chemické složení oceli 100Cr6+QW (14109.4)</i> .....	64
<i>Tab. 10. Chemické složení oceli X210Cr12+QW (19436.4)</i> .....	64
<i>Tab. 11. Statistické charakteristiky výběrových souborů kotouče D100 K100 B-VI pro Balatron (digitalizovaný)</i> .....	69
<i>Tab. 12. Výsledky FFT analýzy pro Renishaw Xl80 a Balatron</i> .....	69
<i>Tab. 13. Statistické charakteristiky výběrových souborů kotouče D100 K100 B-VI</i> .....	73
<i>Tab. 14. Statistické charakteristiky výběrových souborů kotouče B107 K100 BIII</i> .....	73