

Návrh statistického hodnocení jakosti povrchu v 3D s využitím vícerozměrné statistiky

Bc. Michal Antel

Diplomová práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Antel**
Osobní číslo: **T20777**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Návrh statistického hodnocení jakosti povrchu v 3D s využitím vícerozměrné statistiky**

Zásady pro vypracování

1. Zpracování rešerše způsobů scanování technických povrchů v prostoru, se zaměřením na přístrojovou techniku využívanou na UVI.
2. Popsání způsobů hodnocení jakosti technických povrchů s využitím vícerozměrných statistických metod v souladu s metodikou popsanou v rámci ISO 25178.
3. Následně budou naměřená data drsnosti povrchu vyhodnocena pomocí programů Minitab a Statistika.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 9781420082012.
2. MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompedium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2196-8.
3. MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Statistická analýza experimentálních dat*. Vyd. 2., upr. a rozš. Praha: Academia, 2004. ISBN 80200-1254-0.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milena Kubišová, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 18. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem statistického hodnocení jakosti povrchu. Teoretická část této práce je zaměřena na způsoby skenování povrchů technických dílů, parametrů pro hodnocení jakosti povrchu a jejich statistickým vyhodnocením. Dále jsou zde popsány technologie výroby ozubených kol a jejich zpracování. Praktická část se zabývá měřeními a statistickým vyhodnocením parametrů Ra a Rz na povrchu vybraných ozubených kol používaných v převodovkách závodních aut. Pro vyhodnocení dat byl použit program MINITAB.

Klíčová slova: jakost povrchu, drsnost, ozubená kola, vícerozměrná statistika

ABSTRACT

This thesis deals with the design of a statistical evaluation of surface quality. The theoretical part of this thesis is focuses on the methods of scanning surfaces of technical parts, parameters for surface quality assessment and their statistical evaluation. Furthermore, there are described the technologies of gear production and processing. The practical part deals with the measurement and statistical analysis of Ra and Rz parameters on the surface of selected gears used in gearboxes of racing cars. The MINITAB program was used for data analysis.

Keywords: surface quality, roughness, gears, multivariate statistics

Chtěl bych poděkovat vedoucí diplomové práce paní Ing. Mileně Kubišové PhD. za její cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při tvorbě této diplomové práce. Děkuji své rodině, která mě při celém studiu podporovala. Mé poděkování patří též přítelkyni a přátelům.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ZPŮSOBY SKENOVÁNÍ JAKOSTI POVRCHU	12
1.1 HISTORIE ZKOUMÁNÍ CHARAKTERIZACE POVRCHU	12
1.2 DOTYKOVÉ PŘÍSTROJE PRO SKENOVÁNÍ JAKOSTI POVRCHU	12
1.3 BEZKONTAKTNÍ PŘÍSTROJE PRO SKENOVÁNÍ JAKOSTI POVRCHU	13
1.3.1 Laserový snímač.....	14
1.3.2 CLA snímač	15
2 PARAMETRY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU	16
2.2.1 Filtr profilu	17
2.2.2 Drsnost povrchu	18
2.2.3 Vlnitost povrchu.....	18
2.2.4 Tvar profilu povrchu	18
2.2.5 Základní délka	19
2.2.6 Vyhodnocovaná délka	19
2.3 PARAMETRY SKENOVÁNÍ POVRCHU VE 2D	19
2.3.1 Amplitudové parametry	19
2.3.2 Délkové parametry	21
2.3.3 Tvarové parametry	21
2.3.4 Křivkové a další parametry	21
2.4 PARAMETRY SKENOVÁNÍ POVRCHU VE 3D	22
2.4.1 Výškové parametry	22
2.4.2 Prostorové parametry	23
2.4.3 Hybridní parametry	23
2.4.4 Funkční parametry	23
2.4.5 Smíšené parametry	24
3 ANALÝZA DAT MATEMATICKO-STATISTICKÝMI METODAMI	25
3.1 EXPLORATIVNÍ DATOVÁ ANALÝZA	26
3.1.1 Histogram.....	26
3.1.2 Rozptylový graf.....	26
3.1.3 Diagram časové řady	27
3.1.4 Anderson – Darling	28
3.1.5 Grubbsův test	28
3.2 TEORIE HYPOTÉZ	28
3.2.1 Postup testování hypotéz.....	28
3.2.2 Chyby I. a II. druhu	29
4 VÍCEROZMĚRNÁ STATISTICKÁ ANALÝZA	30
4.1 REGRESNÍ ANALÝZA	30
4.1.1 Lineární regrese.....	30

4.1.2	Nelineární regrese	30
4.2	ANALÝZA HLAVNÍCH KOMPONENT	31
4.2.1	Shluková analýza	32
4.3	JEDNOFAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU ANOVA	33
4.3.1	Metoda Bonferroniho porovnávání párů	33
4.3.2	Metoda Bonferroniho porovnávání sloupců.....	33
4.3.3	Tukeyova metoda	33
4.3.4	Metoda Scheffého porovnání	34
4.3.5	Kruskal–Wallisův test	34
5	OZUBENÁ KOLA	35
5.1	TYPY OZUBENÍ	35
5.1.1	Čelní ozubení se zuby přímými.....	35
5.1.2	Čelní ozubení s šikmými zuby	35
5.1.3	Čelní ozubení se zuby šípovitého tvaru	35
5.1.4	Kuželové ozubení s přímými zuby.....	36
5.1.5	Kuželové ozubení se šikmými a zakřivenými zuby	36
5.1.6	Spiroidní kuželová ozubená kola	36
5.1.7	Šroubová ozubená kola	36
5.1.8	Šneková ozubená kola.....	36
5.2	VÝROBA OZUBENÝCH KOL	37
5.2.1	Obrážecí metoda.....	37
5.2.2	Obrábění tvarovým nástrojem.....	38
5.2.3	Odvalovací frézování	38
5.2.4	Vyřezávání ozubených kol.....	38
5.2.5	Lisování ozubených kol	39
5.2.6	Tisk ozubených kol	39
5.3	ZPRACOVÁNÍ OZUBENÝCH KOL	39
5.3.2	Cementování	40
5.3.3	Nitridování	40
5.4	DOKONČOVACÍ OPERACE	41
5.4.1	Broušení	41
5.4.2	Lapování.....	41
5.4.3	Švingování.....	42
5.5	VLIV ZPŮSOBY VÝROBY A ZPRACOVÁNÍ NA JAKOST POVRCHU	42
5.6	POUŽÍVANÉ KOVY PRO VÝROBU OZUBENÝCH KOL.....	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST	44
6	CÍL PRÁCE	45
7	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ.....	46
7.2	VZORKY PRO MĚŘENÍ DRSNOSTI	46
7.3	VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE OZUBENÝCH KOL	48
7.4	NAMĚŘENÁ DATA.....	50

7.5	EXPLORATORNÍ DATOVÁ ANALÝZA	52
7.6	POROVNÁNÍ PARAMETRŮ RA A RZ NA PLOŠE JEDNOTLIVÝCH KOL	55
7.6.1	Porovnání parametru Ra pro malé ozubené kolo nové	56
7.6.2	Porovnání parametru Rz pro malé ozubené kolo nové	57
7.6.3	Porovnání parametru Ra pro malé ozubené kolo použité	58
7.6.4	Porovnání parametru Rz pro malé ozubené kolo použité	59
7.6.5	Porovnání parametru Ra pro střední ozubené kolo nové	60
7.6.6	Porovnání parametru Rz pro střední ozubené kolo nové	61
7.6.7	Porovnání parametru Ra pro střední ozubené kolo použité	62
7.6.8	Porovnání parametru Rz pro střední ozubené kolo použité	63
7.6.9	Porovnání parametru Ra pro velké ozubené kolo nové	64
7.6.10	Porovnání parametru Rz pro velké ozubené kolo nové	65
7.6.11	Porovnání parametru Ra pro velké ozubené kolo použité	66
7.6.12	Porovnání parametru Rz pro velké ozubené kolo použité	67
7.7	ANOVA	68
7.7.1	ANOVA - Ra malého nového a použitého ozubeného kola	68
7.7.2	ANOVA - Rz malého nového a použitého ozubeného kola	69
7.7.3	ANOVA - Ra středního nového a použitého ozubeného kola	70
7.7.4	ANOVA - Rz středního nového a použitého ozubeného kola	71
7.7.5	ANOVA - Ra velkého nového a použitého ozubeného kola	72
7.7.6	ANOVA - Rz velkého nového a použitého ozubeného kola	73
ZÁVĚR		74
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		75
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		79
SEZNAM OBRÁZKŮ		82
SEZNAM TABULEK		84

ÚVOD

Jakost povrchu má velký vliv na efektivnost a životnost vyráběných dílů, proto jsou na ni kladeny velké nároky. Měření povrchových vlastností se vyvíjí již mnoho let, za kterých se stanovila metodika snímání povrchů, popis a pravidla parametrů drsností, a ty byly zaneseny do norem. Z důvodu málo vypovídající hodnocení drsnosti ve 2D, byly vyvinuty skenery povrchu ve 3D, které umí hodnotit povrchy komplexněji. Základem pro hodnocení povrchu ve 3D jsou parametry používané u skenování ve 2D.

Naměřené parametry pro hodnocení technických povrchů bylo nutné dále zpracovat pro komplexní analýzu povrchu. Pro základní vyhodnocení a kontrolu dat se využívá exploratorní datová analýza, kterou lze statisticky a graficky posoudit základní parametry souboru naměřených dat.

Pro získání přesnějšího posouzení kvality povrchu se využívá statistických metod vícerozměrné statistiky, jako je například analýza rozptylu ANOVA. Díky které je možné zjistit podobnost rozptylů souborů podle určitého znaku.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZPŮSOBY SKENOVÁNÍ JAKOSTI POVRCHU

Na většinu vyráběných dílů je kladen nárok na jakost povrchu. Povrch součásti obvykle interaguje s prostředím nebo povrchem jiného dílu. Topografie povrchu a fyzikální vlastnosti materiálu silně ovlivňují kluznost, integritu povrchu dílu nebo vizuální vlastnosti. Charakterizace povrchové topografie je komplexní metrologické odvětví s velkým množstvím technologických parametrů měření funkčních ploch. [1]

1.1 Historie zkoumání charakterizace povrchu

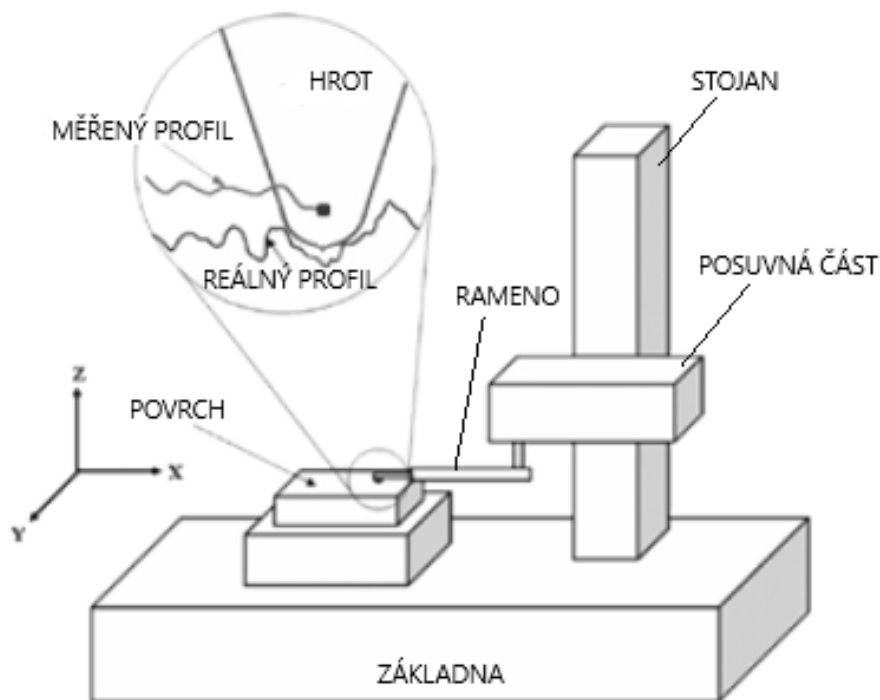
Textura ploch byla poprvé charakterizována na univerzitě v Birminghamu. Následně se povrchy začala zabývat i Mezinárodní organizace pro normalizaci, která definovala několik základních parametrů povrchu a zanesla je do souboru norem ISO. [1]

1.2 Dotykové přístroje pro skenování jakosti povrchu

V praxi nejrozšířenějším způsobem měření struktury povrchu je pomocí kontaktního přístroje složeného z mechanické a elektrické části. Mechanická část se skládá z elektromotoru, zajišťujícím plynulý pohyb a ramene, na kterém je připevněný snímací hrot. Snímání povrchu dotykovým způsobem je založeno na pohybu diamantového hrotu po povrchu vzorku a zaznamenání rozdílů výšky při definovaných podmínkách jako jsou:

- úhel diamantového hrotu 60° či 90°
- přítláčná síla na povrch vzorku (0,00075 N)
- rychlost pohybu ramene
- poloměr zaoblení hrotu 2 μm , 5 μm 10 μm

Rozdíly výšek jsou způsobeny nerovnostmi, výstupky a prohlubněmi. Pomocí souřadnic pak dokáže elektronická část přístroje převést vertikální pohyb na elektrický signál. Díky výpočetní technice je možné elektrický signál zpracovat, vykreslit drsnost snímaného povrchu a vyhodnotit požadované parametry. Měření kontaktní metodou je předepsáno normou ČSN ISO 3274 a provádí na zařízení zvaném profilometr. [2,3]



Obrázek 1 Schéma kontaktního profilometru [4]

Výhody kontaktního způsobu měření povrchu jsou:

- snadná obsluha,
- možnost měření vnitřních ploch dílů,
- malé rozměry přístroje,
- jednoduchá konstrukce. [2]

Nevýhody pro měření kontaktním profilometrem jsou:

- možnost poškození povrchu hrotem,
- pomalejší metoda oproti metodám optickým,
- omezení měření mikro nerovností, kvůli rádiusu hrotu,
- možnost poškození hrotu na adhezním povrchu. [2,4]

1.3 Bezkontaktní přístroje pro skenování jakosti povrchu

Pro bezkontaktní měření povrchu se využívá několik typů snímačů. Nejčastější je snímač optický CLA (Chromatic Length Aberration) a snímač laserový. Přesnost snímačů CLA je oproti snímačům laserovým o řád vyšší. Tyto snímače pracují na principu rozptýlení či zachycení emitovaných světelných paprsků zpět do přístroje. [5]

Výhody bezkontaktního měření povrchu, oproti kontaktnímu jsou:

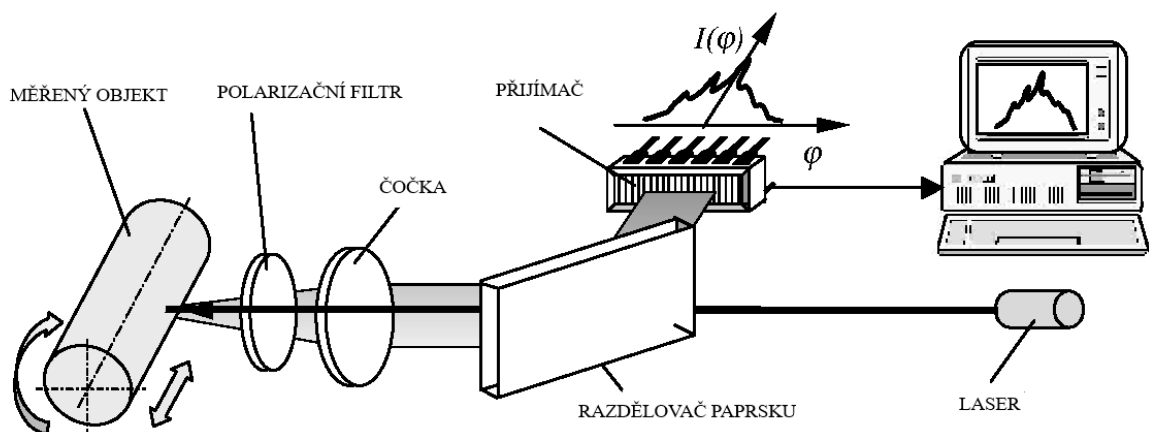
- větší přesnost,
- nedestruktivní měření povrchu vzorku,
- rychlost měření,
- zachycení i mikro nerovností,
- možnost měřit adhezní a měkké materiály,
- možnost snímat větší plochu najednou. [5,6]

Nevýhody měření bezkontaktní metodou jsou:

- možnost vzniku chyb na lesklém či členitém povrchu,
- složitá interpretace výsledků,
- vysoká pořizovací cena přístroje a softwaru. [5,6]

1.3.1 Laserový snímač

Laserový snímač je méně přesný než snímač CLA. Funguje na principu laserového paprsku vyslaného z polovodičového zdroje, který se po odražení od povrchu měřeného vzorku odrazí zpět do snímače zařízení. Tento snímač propojen s mikropočítačem vyhodnotí úhel rozptylu světla a analyzuje polohu laserového paprsku pro přesné zaměření bodů. Pomocí softwaru je pak schopen body převést na grafickou vizualizaci. [6,7]



Obrázek 2 Shéma laserového bezkontaktního měření drsnosti povrchu [7]

1.3.2 CLA snímač

Snímač CLA pracuje s bílým světlem, které rozkládá na vlnové délky a pomocí optiky jsou tyto paprsky usměrněny na měřený povrch. V každém bodě se zaostří jen určitá vlnová délka paprsku. Následně se světlo odrazí a do přijímače se propustí jen světlo zaostřené vlnové délky. Světlo je v přijímači vychýleno na maticový senzor, který každému bodu přidělí prostorovou polohu. Pomocí softwarů jsou tyto body zpracovány na 3D síť a je možné ji dále vyhodnocovat. [5]

2 PARAMETRY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU

Kvalita povrchu je soubor nerovnosti na velmi malé ploše, které vznikají při výrobě. Jakost povrchu má vliv na životnost, vzhled a funkčnost dílu. Drsnost také ovlivňuje chemické a fyzikální vlastnosti materiálu a jeho používání. Kvalitu povrchu není možné měřit přímo, ale vyhodnocuje se na základě kritérií, jež změřit lze. Parametry, jednotky, termíny a definice charakterizující kvalitu povrchu jsou sepsané v platných normách ČSN EN ISO. [8]

2.1 Normy ISO

Geometrické požadavky struktury povrchu na výrobky specifikuje norma ČSN EN ISO 4287 z roku 1999. Zahrnuje termíny, definice a parametry povrchu pro vlastnosti jako jsou drsnost, vlnitost, délkové a tvarové parametry stanovené profilovou metodou. [8]

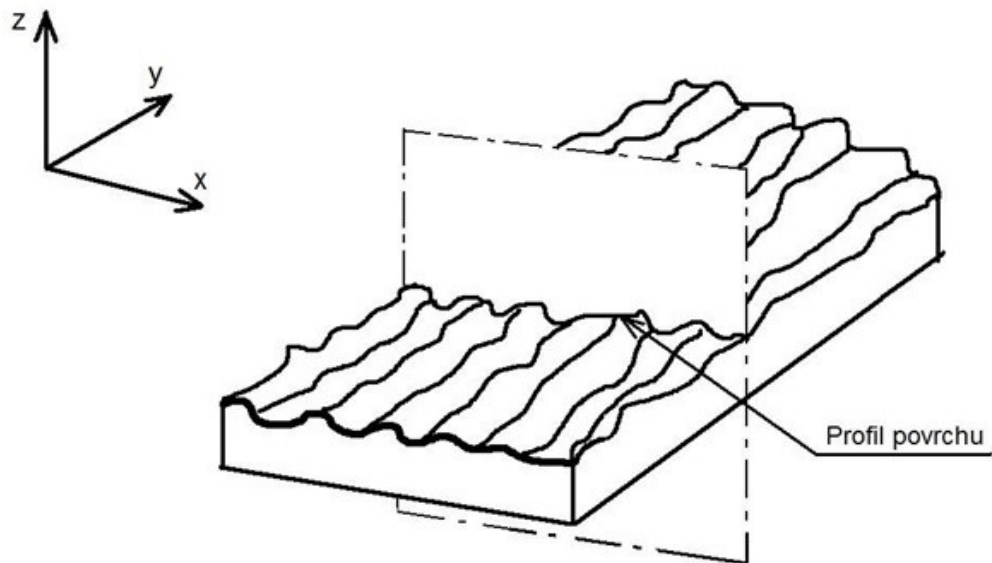
Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu profilovou metodou jsou sepsány v normě ČSN EN ISO 4288. Zabývá se porovnáváním naměřených hodnot s tolerančními mezemi, které definuje normě ISO 4287, ISO 12085, ISO 13565-2 a ISO 13565-3. Také specifikuje pravidla pro výběr vlnových délek pro parametry profilu drsnosti měřených pomocí kontaktních (hrotových) přístrojů podle ISO 3274. [29]

Podmínky měření a ideální operátor definuje mezinárodní norma EN ISO 12085. Tato norma zahrnuje pojmy a parametry používané pro určování struktury povrchu metodou Motif. [30]

Geometrické specifikace textury povrchu produktu udává norma ČSN EN ISO 25178-2. Druhé vydání z roku 2012 zahrnuje termíny, definice a parametry povrchu stanovené pomocí plošných metod. [11]

2.2 Profil povrchu

Měření profilu povrchu se provádí pomocí kontaktního nebo optického skenovacího přístroje, jež je schopen vykreslit čáru přes povrch a matematickou interpretaci pomocí výškové funkce. Při měření se používá kartézský souřadnicový systém, kde osa x udává směr přímky, osa y je nominální a osa Z je vykresluje vnější rozměry od materiálu. Profil je obvykle extrahován pomocí softwaru po plošném měření. Směr řezu zkoumaného vzorku je pro skenování na povrch kolmý. [1]

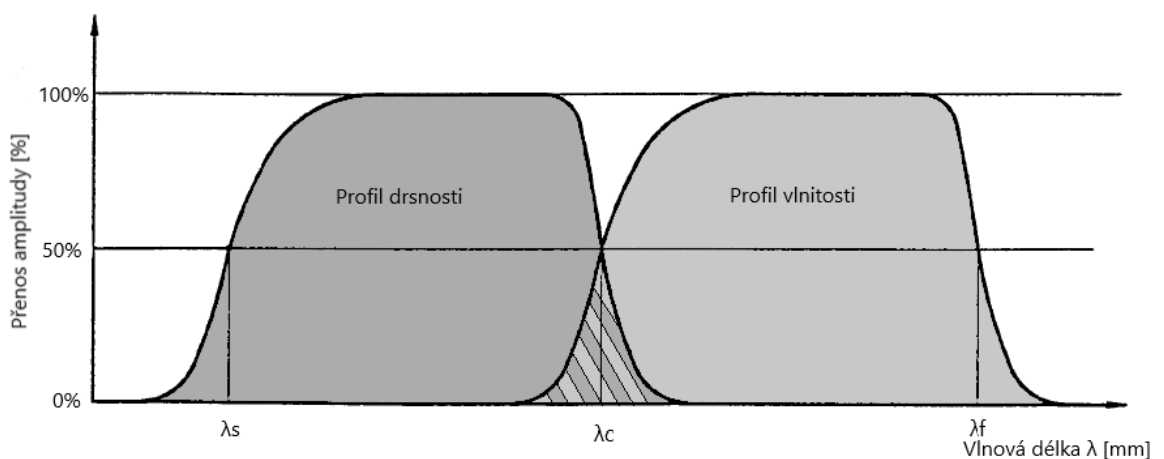


Obrázek 3 Profil povrchu [8]

2.2.1 Filtr profilu

Filtr profilu rozděluje profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky podle normy ISO 11562. Tyto složky mají shodné přenosové charakteristiky, ale odlišné hodnoty mezi vlnových délek.

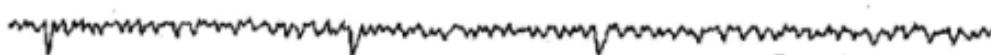
- Filtr profilu λ_s – definuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln
- Filtr profilu λ_c – definuje rozhraní mezi složkou drsnosti a vlnitostí
- Filtr profilu λ_f – definuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln [8]



Obrázek 4 Přenosová charakteristika profilových filtrů [8]

2.2.2 Drsnost povrchu

Drsnost vzniká především působením nástroje na obrobek. Skládá se z mikro nerovností a závisí na použité technologii obrábění, kondicích nástroje a jinými vlivy. Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů drsnosti. [9]



Obrázek 5 Drsnost povrchu [9]

2.2.3 Vlnitost povrchu

Vlnitost na povrchu dílu vzniká nejčastěji chvěním nástroje či deformací obrobku. Jedná se o makro nerovnosti. Vlnitost lze eliminovat zachycením vibrací či kalibrací nástroje. Naměřenou vlnitost lze odfiltrovat pomocí Gaussova filtru. [9]



Obrázek 6 Profil vlnitosti povrchu [9]

2.2.4 Tvar profilu povrchu

Obecný tvar povrchu vznikne odfiltrováním drsnosti a vlnitosti povrchu. Tvar povrchu obvykle vznikne špatnou tuhostí stroje či vzniklým teplem, které vznikne při výrobním procesu. [9]



Obrázek 7 Tvar profilu povrchu s odfiltrovanou drsností a vlnitostí [9]

2.2.5 Základní délka

Základní délka se používá pro rozeznání nerovností na měřeném profilu. Jedná se o délku ve směru osy X. Značí se l_p pro základní profil a rovná se vyhodnocované délce. [8]

2.2.6 Vyhodnocovaná délka

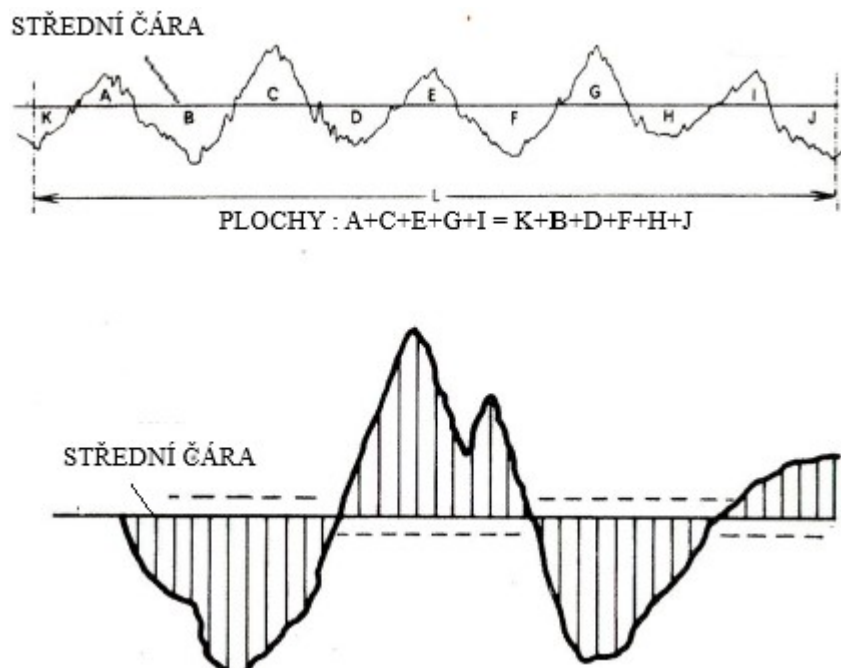
Vyhodnocovaná délka se používá pro posouzení hodnoceného profilu. Může obsahovat i více základních délek. Značí se l_n . [8]

2.3 Parametry skenování povrchu ve 2D

Parametry charakterizují povrch ve 2D je možné rozdělit na amplitudové, délkové a tvarové. Dále se dělí dle definovaných délek. Pokud je definovaná základní délka, tak se parametry počítají jako aritmetický průměr základních délek. Parametry povrchu ve 2D jsou definovány v normě ČSN EN ISO 4287. [8]

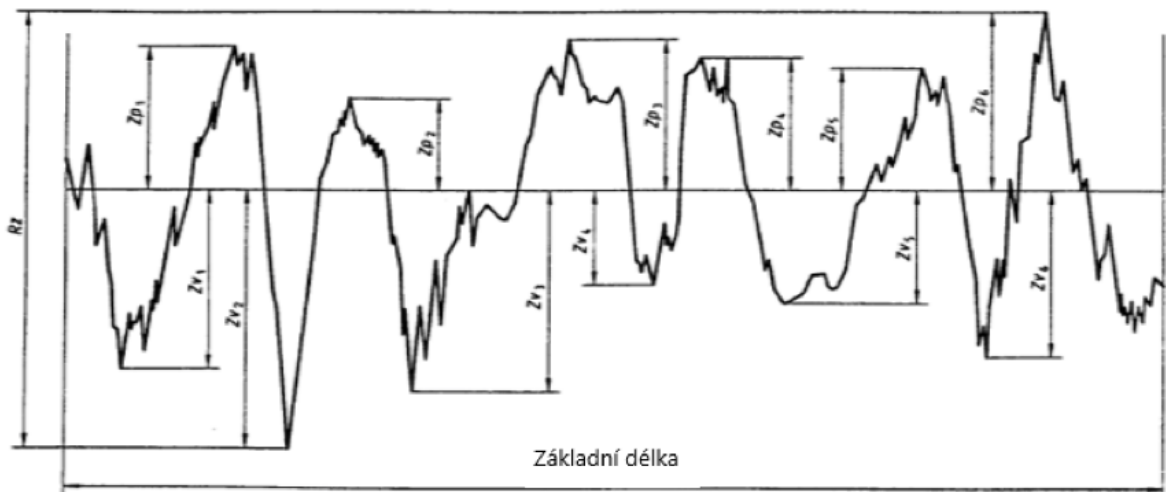
2.3.1 Amplitudové parametry

- Střední čára – protíná středy vrcholů a prohlubní tak, aby součet ploch nad touto čarou byl roven součtu ploch pod čarou. Určit polohu střední čáry lze metodou nejmenších čtverců.



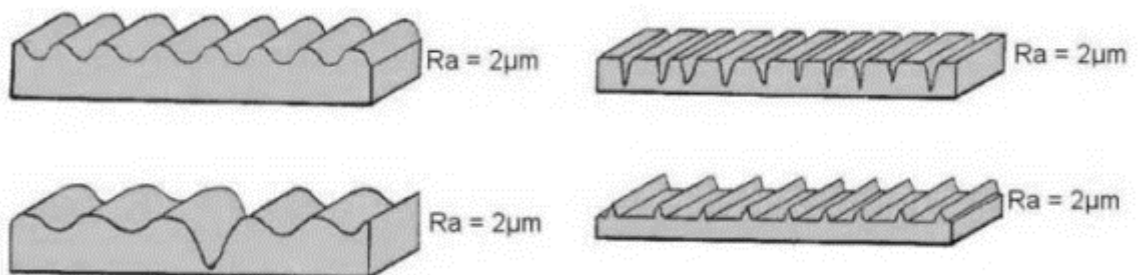
Obrázek 8 Parametr střední čáry [9]

- Největší výška výstupku profilu R_p – největší výška Z_p výstupku profilu na základní délce.
- Hloubka největší prohlubně profilu R_v – největší hloubka Z_v prohlubně profilu na základní délce.
- Největší výška profilu R_z – součet největší výšky Z_p a největší hloubky Z_v na základní délce.



Obrázek 9 Největší výška profilu [8]

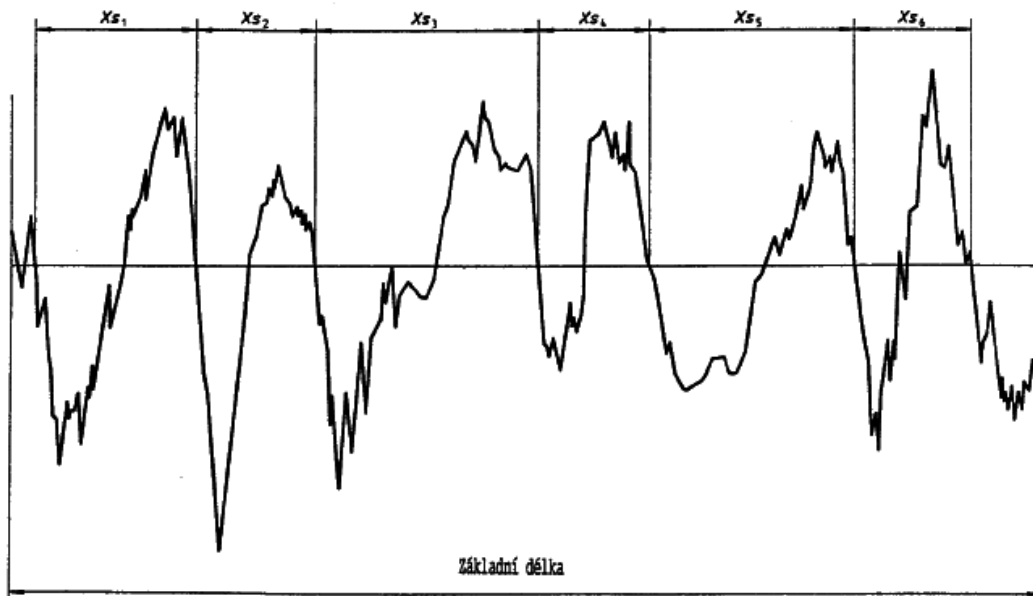
- Průměrná výška profilu R_c – průměrná hodnota výšek Z_t profilu na základní délce.
- Celková výška profilu R_t – součet největší výšky výstupku Z_p a největší prohlubně Z_v na vyhodnocené délce.
- Střední odchylka profilu R_a – aritmetický průměr absolutního hodnot souřadnic Z na základní délce. Není příliš vypovídající o tvaru nerovností, přesto je nejčastěji používaným parametrem. [8]

Obrázek 10 Různé tvary profilu se stejnou hodnotou R_a [10]

- Špičatost profilu R_{ku} – podíl průměrných hodnot čtvrtých mocnin souřadnic Z a mocniny hodnoty R_q na základní délce. Vyšší hodnoty znamenají špičatější profil. Vhodný parametr pro srovnání ploch vytvořených za podobných podmínek. [8]

2.3.2 Délkové parametry

- Průměrná šířka prvků profilu P_{Sm} , R_{Sm} , W_{Sm} – aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu na základní délce. Parametr musí být omezen výškově či délkově. Není-li specifikováno jinak je omezení výškové 10 % P_z , R_z nebo W_z a 1 % rozteče základní délky l_r . [8]



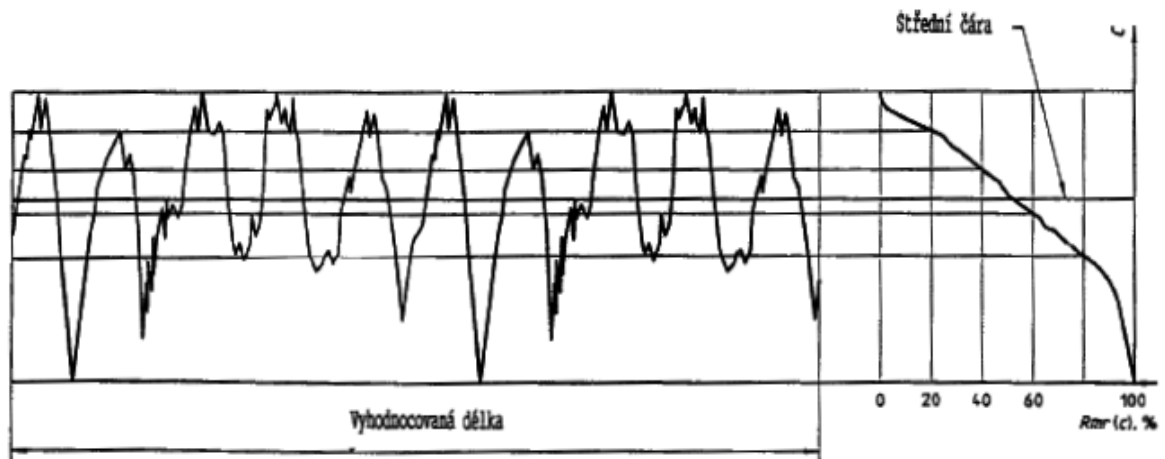
Obrázek 11 Znázornění základní délky [8]

2.3.3 Tvarové parametry

- Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu $P_{\Delta q}$, $R_{\Delta q}$, $W_{\Delta q}$ – kvadratický průměr sklonů pořadnic dZ/dX na základní délce. [8]

2.3.4 Křivkové a další parametry

- Materiálový poměr délky materiálu elementů na dané úrovni k vyhodnocované délce
- Křivka materiálového poměru profilu – křivka představující materiálový poměr profilu v závislosti na výšce úrovně. Tento parametr je nazýván Abbott Firestoneova křivka.



Obrázek 12 Křivka materiálového poměru [8]

- Vzájemný materiálový poměr P_{mr} , R_{mr} , W_{mr} – poměr délky vyplněné materiálem na hodnocené délce. [8]

2.4 Parametry skenování povrchu ve 3D

Soubor parametrů drsnosti povrchu ve 3D je definován normou ČSN EN ISO 25 178. Výhodou prostorového měření je možnost zobrazení barevných map, znázorňující nerovnosti povrchu. Jednotlivé parametry jsou v normě značeny symbolem S a charakterizovány možnostmi použití. Norma rozděluje 3D parametry na výškové, prostorové, hybridní, funkční a smíšené. [11]

2.4.1 Výškové parametry

- Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu S_q – vymezení průměrné hodnoty čtverce hodnot uprostřed měřené plochy [8]

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (1)$$

- Šikmost omezené stupnice povrchu S_{sk} – kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnoty krychle S_q uprostřed měřené plochy [8]

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (2)$$

- Špičatost omezené stupnice povrchu S_{ku} – kvocient čtvrté mocniny hodnoty koordinace a hodnoty čtvrté mocniny S_q uprostřed měřené plochy

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \int_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (3)$$

- Maximální výška píku omezené stupnice povrchu S_p – nejvyšší hodnota píku uprostřed měřené plochy
- Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu S_v – největší hloubka prohlubně uprostřed měřené plochy zmenšené o její nejmenší hodnotu
- Maximální výška omezené stupnice povrchu S_z – součet největší hodnoty výšky píku a největší hodnoty hloubky prohlubně uprostřed měřené plochy
- Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu S_a – aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uprostřed měřené plochy [8]

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z^2(x, y)| dx dy \quad (4)$$

2.4.2 Prostorové parametry

- Délka autokorelace S_{al}
- Poměr aspektu textury S_{tr} [8]

2.4.3 Hybridní parametry

- Základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnicí povrchu S_{dq} – základ průměrného čtverce povrchu gradientu uprostřed měřené plochy omezené stupnicí povrchu.
- Poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu S_{dr} – poměr přírůstku mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu uprostřed měřené plochy na určené ploše. [8]

2.4.4 Funkční parametry

- Poměr funkce plochy materiálu omezené stupnicí povrchu – funkce poměru plochy materiálu omezené stupnicí povrchu funkce výšky.
- Poměr plochy materiálu omezené stupnicí povrchu S_{mr} – poměr plochy materiálu určené výšce k ploše hodnocení.

- Opačný poměr plochy materiálu omezené stupnicí povrchu S_{mc} – výška od referenční roviny, ve které vyhovuje poměr plochy materiálu.
- Parametr plochy pro rozvrstvenou omezenou funkční stupnici povrchů – poměr plochy materiálu rozvrstvené funkčním omezením stupnice povrchu, kterou je funkce výšky.
- Objem materiálu V_m – objem materiálu na jednotku plochy v daném poměru materiálu vypočtený z poměru materiálu plochy křivky. [8]

2.4.5 Smíšené parametry

Směr textury omezené stupnice povrchu Std – úhel, se specifikovaným směrem absolutní minimální hodnotou úhlového spektra [8]

3 ANALÝZA DAT MATEMATICKO-STATISTICKÝMI METODAMI

Data z jednorozměrné a vícerozměrné analýzy jsou často v praxi společně zahrnuta v náhodném skaláru ξ . Pomocí vícerozměrných statistických metod je možné:

- sledovat množství složky produktů, odpadních surovin v závislosti na čase a místě, kde se vyskytují,
- regulovat jakost podle nejrozličnějších procesních faktorů,
- stanovit vlastnosti produktu díky měření různých charakteristik na sobě závislých,
- identifikovat a charakterizovat chemické sloučeniny pomocí spekter výskytů a velikostí píků, poloh a ploch absorpčních pásů,
- vyjádřit a charakterizovat vlastnosti produktů. [15]

Pojem vícerozměrné statistiky obsahuje postupy, metody a typy statistických analýz, pomocí kterých je možné zpracovávat údaje o vektoru proměnných pro dané soubory dat. Metody se dělí na zpracování číselných dat a kategorizovaných dat. Číselné metody se dělí na parametrické (s platností normálního rozdělení) a neparametrické, jež nevyžadují předpoklad normálního rozložení. Existují také metody na zpracování smíšených dat číselných i kategorizovaných. Hlavními metodami hodnocení číselných dat jsou:

- testování hypotéz,
- jednofaktorová analýza ANOVA,
- faktorová analýza,
- kanonická analýza,
- metoda hlavních komponent,
- regresní analýzy,
- diskriminační analýza. [12,16]

Před hodnocením je nutné data škálovat a najít množinu podobných proměnných, tedy shluků. Podobnost se určí dle vzdálenosti shluků. Čím blíže od sebe shluky jsou, tím se k sobě více podobají. K základnímu rozeznání shluků se využívá EDA (exploratorní datová analýza), obsahující několik metod pro vyšetření normality souboru, chyb měření a bližší pochopení dat. Díky grafickému znázornění polohy a rozptylu dat, lze odhadnout podobnost

shluků. Pro určení jednotlivých vazeb mezi proměnnými se využívá metody hlavních komponent. [12]

3.1 Explorativní datová analýza

Před výběrem vhodné metody vícerozměrné statistiky a jejím použitím je nutné provést explorativní datovou analýzu EDA. Tato analýza je souborem postupů a grafů, které nejlépe vypoví o datech. Lze posuzovat podobnost dat, stanovit možný předpoklad lineárních vazeb najít odlehlé hodnoty, které pomocí teorie hypotéz nutno otestovat, zda se nejedná o hrubou chybu. Stejně tak testováním hypotéz lze ověřit normalitu a homogenitu souboru. Pro explorativní datovou analýzu jsou voleny typy grafů jako:

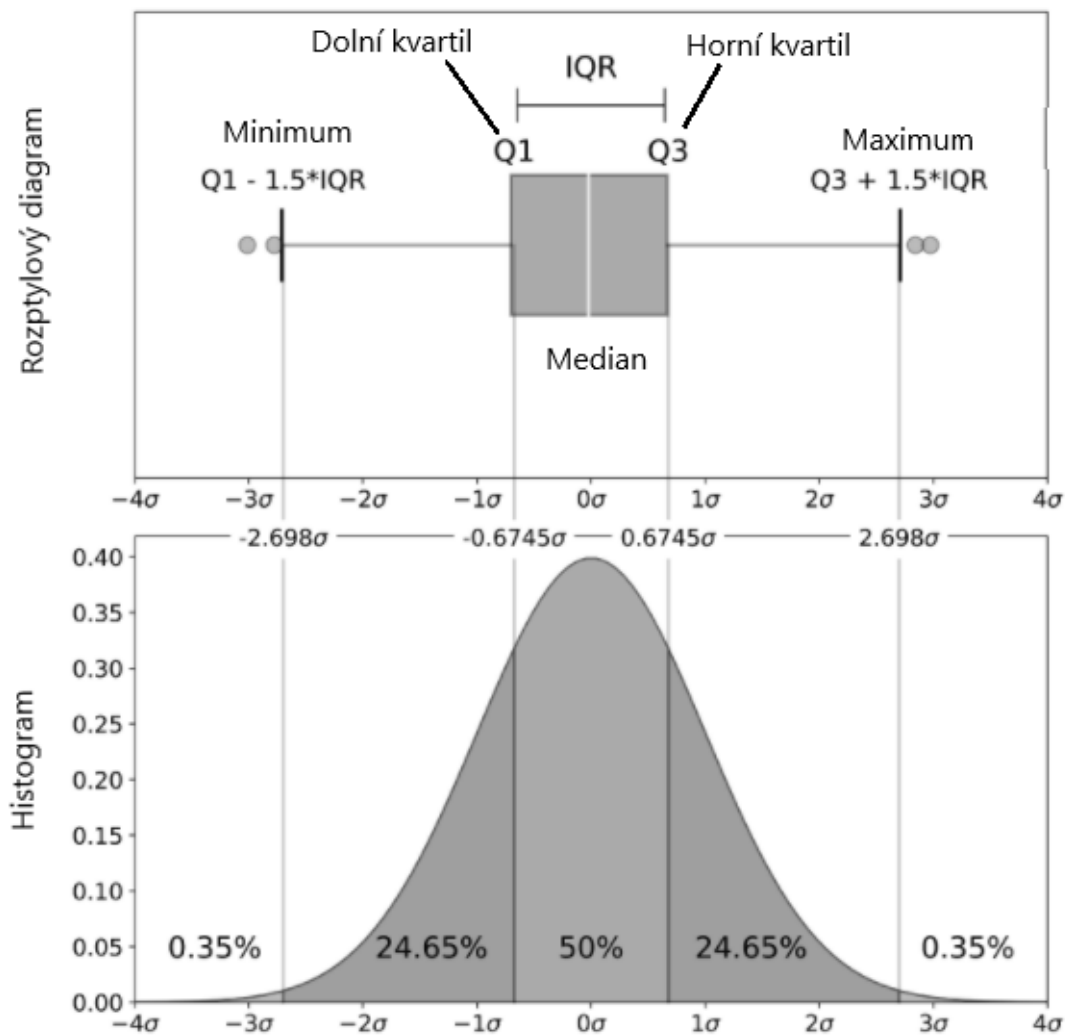
- Histogram,
- rozptylový graf,
- diagram časové řady. [12]

3.1.1 Histogram

Histogram graficky znázorňuje intervalové rozdělení četnosti. V případě, že výběrový soubor dat obsahuje pouze chybu náhodnou bude křivka grafu odpovídat Gaussovu normálnímu rozdělení. Na ose X jsou měřené parametry, na ose Y je znázorněna četnost. Pokud tvar křivky neodpovídá Gaussovu normálnímu rozdělení, tak pravděpodobně data nepochází ze souboru zatíženého pouze náhodnou chybou a je nutné tyto odlehlé hodnoty otestovat. [12]

3.1.2 Rozptylový graf

Graf rozptylů neboli box-plot diagram má ve statistice svou významnou roli. Umožňuje zobrazovat distribuci dat pomocí pěti parametrů. Kvartil rozděluje uspořádaný soubor hodnot na stejně velké části. Nejčastěji se používá dělení souboru na 4 díly s 25 % obsažením hodnot v každém z nich. Označují se Q1 (dolní kvartil), Q2 (druhý kvartil, medián) a Q3 (horní kvartil). Dalším parametrem jsou IQR (interkvartilové rozpětí mezi Q1 a Q3), minimum ($Q1 - 1,5 \times IQR$) a maximum ($Q3 + 1,5 \times IQR$). Pomocí box-plot diagramu je možné odhalit odlehlé hodnoty, porovnat větší množství souborů mezi sebou, zhodnotit způsobilost procesů, posoudit symetričnost a těsnost dat souboru. [12,17]



Porovnání rozptylového grafu a histogramu [17]

3.1.3 Diagram časové řady

Je jedním z nejpoužívanějších grafů pro vizualizaci dat, který znázorňuje datové body v po sobě jdoucích intervalech. Každý bod odpovídá měřenému času a veličině. Obecně se osa X využívá ke znázornění přírůstku času a osa Y určuje hodnoty měřené proměnné. [12]



Obrázek 13 Příklad použití časové řady – míra inflace v závislosti na čase [18]

3.1.4 Anderson – Darling

Pomocí Anderson – Darling testu je možné ověřit, zda data ze základního souboru mají normální rozdělení. Využívá se testu hypotéz:

H_0 : data pocházejí ze základního souboru s normálním rozdělením

H_a : data nepocházejí ze základního souboru s normálním rozdělením [21]

3.1.5 Grubbsův test

Pomocí Grubbsova testu je možné odhalit odlehlé hodnoty souboru. Test zkoumá hodnoty vzdálené od aritmetického průměru výběrového souboru s normálním rozdělením. Pokud testovací kritérium má vyšší hodnotu než kritickou pro danou velikost souboru, tak je nutné vyloučit testovanou hodnotu ze souboru. [22]

3.2 Teorie hypotéz

Před druhou světovou válkou se začali statistici zabývat testováním statistických hypotéz. Jedněmi z prvních statistiků byli J. Neyman a E.S. Pearson. [19]

Hypotézy lze rozdělit na parametrické a neparametrické. Neparametrické hypotézy jsou o vlastnostech populace, jako jsou závislost proměnných či tvar rozdělení. V případě parametrických hypotéz se jedná o parametry rozdělení populace a je možné rozřadit dle množství populace na:

- hypotézy jednoho parametru populace (medián, rozptyl, četnost, střední hodnota),
- hypotézy dvou parametrů populací,
- hypotézy parametrů třech a více. [19]

3.2.1 Postup testování hypotéz

Testování hypotéz slouží jako rozhodovací proces, ve kterém se stanoví dvě hypotézy. Jako první je nutno stanovit hypotézu nulovou H_0 , která potvrzuje testovací předpoklad a vyjadřuje se rovností. Naproti hypotéze nulové je stanovena hypotéza alternativní H_A o nerovnosti předpokládaného tvrzení. Stanovení alternativní hypotézy:

- oboustranné se značí symbolem \neq ,
- jednostranné se značí symboly $<$, $>$. [19,23]

V dalším kroku je nutné stanovit hladinu významnosti testu (obvykle $\alpha = 5\%$). Tato hladina významnosti se dále srovnává s vypočtenou p-hodnotou pravděpodobnosti platnosti hypotézy. Pokud vyjde hodnota $p < \alpha$ je nutné zamítnout nulovou hypotézu na hladině významnosti α ve prospěch hypotézy alternativní. Pokud vyjde hodnota $p > \alpha$ pak není třeba zamítnout nulovou hypotézu ve prospěch hypotézy alternativní. [23]

3.2.2 Chyby I. a II. druhu

Při testování hypotéz je možné se dopustit nežádoucích chyb I. a II. druhu. Protože při testování hypotéz pracujeme s výběrovým souborem, který nemusí být plně vypovídající o základním souboru, je možné se dopustit chyb. Pravděpodobnost možnosti dopustit se chyb by měla být co nejmenší. Velikost chyby I. druhu α je volena před testováním a určuje hladinu významnosti. Velikost chyby II. druhu β je závislá na hladině významnosti a udává sílu testu. [20,23]

		Výsledek testu	
		Nezamítáme H_0	Zamítáme H_0
Skutečnost	Platí H_0	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost rozhodnutí: $1 - \alpha$ (spolehlivost)	Chyba I. druhu Pravděpodobnost rozhodnutí: α (hladina významnosti)
	Platí H_A	Chyba II. druhu Pravděpodobnost rozhodnutí: β	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost rozhodnutí: $1 - \beta$ (síla testu)

Obrázek 14 Výsledek testu hypotéz [20]

V případě zamítnutí platné nulové hypotézy, dojde k chybě I. druhu. Pokud nulová hypotéza není testem zamítnuta a platí, je rozhodnutí správné s pravděpodobností $1 - \alpha$. Ke správnému rozhodnutí dojde i při zamítnutí nulové hypotézy při platnosti hypotézy alternativní. Pokud ovšem není zamítnuta nulová hypotéza, při platnosti alternativní, dojde k chybě II. druhu. [20,23]

4 VÍCEROZMĚRNÁ STATISTICKÁ ANALÝZA

Podle zjišťovaného parametru se volí správná technika určení vzájemných vazeb. Pro analýzu struktur a vazeb se využívá faktorová analýza, analýza hlavních komponent, vícerozměrné škálování, korespondenční a shluková analýza. Pokud je analyzována skupina dvou proměnných a jedna z nich patří mezi závisle proměnné, zatímco druhá mezi nezávisle proměnné je vhodné použít kanonickou korelační analýzu. [19]

4.1 Regresní analýza

Pro porovnávání závislostí dvou a více proměnných se využívá regresní analýzy. Korelační analýza zkoumá míru asociace mezi dvěma spojitými proměnnými a definuje, do jaké míry je daný vztah proložen přímkou. Obecně se tato analýza používá k odhadu míry asociace mezi dvěma proměnnými, když neexistují dostatečné informace o tom, která z těchto dvou proměnných je odpovědná za variabilitu v druhé proměnné, nebo když jsou tyto informace pro položenou otázku irelevantní. Regresní analýzy se dělí na lineární, popsanou funkcí prvního stupně a nelineární popsanou kvadratickou funkcí druhého stupně a funkcí kubickou třetího stupně. Vhodnost proložení správné regrese udává Pearsonův korelační koeficient. [14,24]

4.1.1 Lineární regrese

Nejjednodušším typem regrese je lineární, znázorňuje závislost 2 proměnných, závislé a nezávislé. Lineární regresi popisuje rovnice přímky

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times x \quad (5)$$

Kde β_0 a β_1 jsou regresní koeficienty, X je nezávisle proměnná a Y závisle proměnná.

Zvolení koeficientů β_0 a β_1 určuje proložení výsledné přímky, která musí vystihovat daný soubor dat co nejlépe. Každá zkoumaná hodnota vynesena na ose X má odpovídající hodnotu závisle proměnnou na ose Y a teoreticky vypočítanou hodnotu y ležící na regresní přímce. Pro správné zvolení přímky, tak aby byla nejvíce vypovídající o daném souboru dat, se využívá metoda nejmenších čtverců. [14,25]

4.1.2 Nelineární regrese

Přímková lineární regrese často nepříliš dobře odpovídá vlastnostem souboru dat, proto je v těchto případech vhodnější využít nelineárních regresí. Z nelineárních regresí se ke

vhodnému proložení dat využívají rovnice kvadratické, kubické, logaritmické či hyperbolické. [13]

Regresi kvadratickou popisuje polynommická rovnice:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times x + \beta_2 \times x^2 \quad (6)$$

Kde β_0 , β_1 a β_2 jsou regresní koeficienty, X je nezávisle proměnná a Y závisle proměnná.

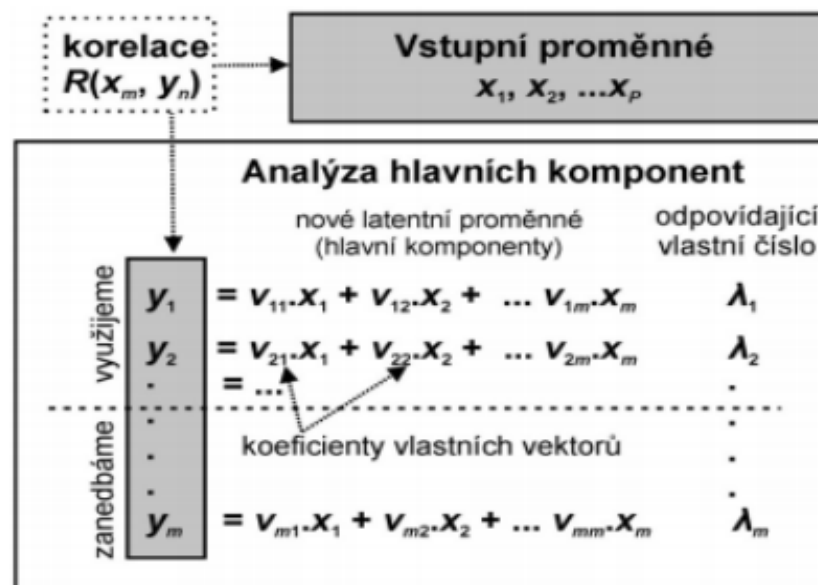
Regresi kubickou popisuje rovnice třetího polynomu:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times x + \beta_2 \times x^2 + \beta_3 \times x^3 \quad (7)$$

Kde β_0 , β_1 , β_2 a β_3 jsou regresní koeficienty, X je nezávisle proměnná a Y závisle proměnná.

4.2 Analýza hlavních komponent

Analýza hlavních komponent z anglického Principal Component Analysis (PCA) má zásadní využití pro dekorelaci, redukci a kompresi dat. Pomocí PCA lze otáčet datové body v euklidovském prostoru, tak aby rozptýl byl maximální podél hlavní komponenty. Z matematického hlediska PCA zahrnuje nalezení ortogonální lineární transformace souřadnic. V praxi se často objevuje nutnost, vypořádat se s datovými body velkých rozměrů, které představují zásadní potíže pro analýzu dat. Touto metodou se zjednoduší popis vlastnosti znaků, které silně korelují. Transformací velkého množství prvotních dat dojde ke snížení počtu dat do skrytých proměnných. [12, 26]



Obrázek 15 Schéma analýzy PCA [12]

Charakteristikou hlavních komponent je rozptyl představující původní znaky, který je seřadí dle důležitosti. Nejvíce informací o původních datech se nachází v první části a nejmenší rozptyl, tedy nejméně informací o původních datech je v poslední části. [12, 26]

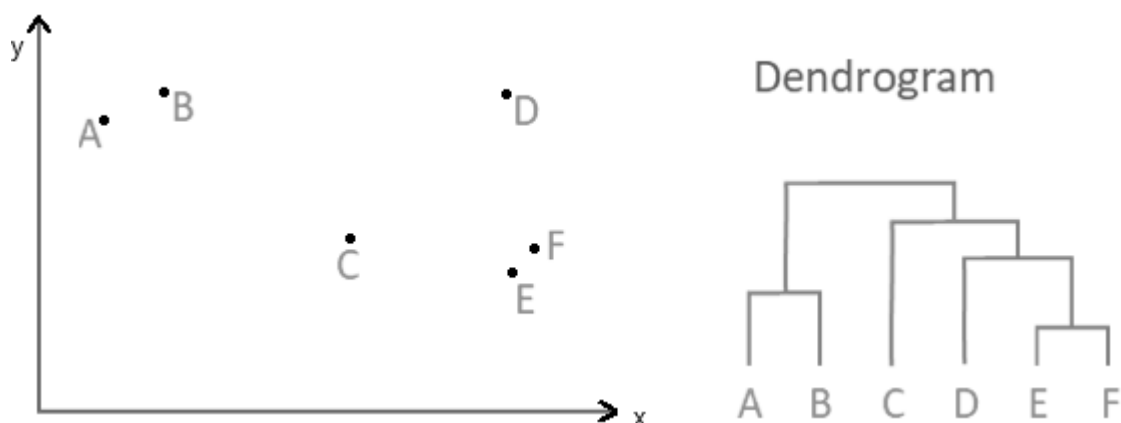
4.2.1 Shluková analýza

Pomocí shlukové analýzy je možné určit podobnosti mezi objekty v prostoru. Tento typ analýzy je vhodný pro objekty, u kterých je potenciál k seskupování podle různých znaků. Pro různé typy úloh jsou rozdílné metody shlukování. Metody se liší například algoritmem řazení objektů do shluků, měřením vzdálenosti mezi objekty nebo interpretací výstupu. [12]

Jako první je třeba identifikovat odlehle objekty. Ty mají výrazně negativní vliv na výsledky. Následně se určí znaky, podle kterých lze stanovit podobnosti. Podobné objekty se dále třídí do shluků. [12]

Objekty dané souřadnicemi ve vícerozměrném prostředí lze charakterizovat mezi sebou vzdáleností. Dle vzdálenosti je možné shlukovat a slučovat do skupin pro zjednodušení jejich popisu v prostoru. Pro shlukování podle míry vzdálenosti se využívá profilový diagram. Míru vzdálenosti lze měřit euklidovským způsobem či geometrickou metrikou. Geometricky se vzdálenost vypočítá jako přepona trojúhelníku za pomoci Pythagorovy věty. Euklidovská vzdálenost, často označovaná Hammingovou metrikou, je naopak součet délek 2 stran čtverce. [12]

Uspořádání do shluků s identifikovanými vazbami se vykreslí v dendrogramu. Dendrogram vykresluje hierarchický vztah mezi objekty. [12, 27]



Obrázek 16 Data seskupeny do dendrogramu [27]

Na dendrogramu je vidět krátká vzdálenost bodů E a F, což značí jejich podobnost. Dalšími podobnými hodnotami jsou A a B. Dle míry podobnosti je stanovena i výška spojující čáry. V hierarchii podobnosti jsou další bod D a následně bod C k bodům E a F. Dendrogram tak dělí data na 2 klastry, na každé straně shluky o různé podobnosti. [27]

4.3 Jednofaktorová analýza rozptylu ANOVA

Jedna z matematicky statistických metod umožňující studovat zdroje variability lineárních statistických modelů je metoda jednofaktorová analýza rozptylu ANOVA. Pomocí této metody je možné zjistit, které proměnné silně ovlivňují sledované veličiny. Metodou ANOVA jsou všechny průměrné rozptyly testovány současně, namísto jednoho páru, jako je tomu u t-testu. Provádění t-testu opakovaně zvyšuje pravděpodobnost nesprávného rozhodnutí. [28]

Stejně jako u jiných statistických testů se u této metody předpokládá, že data vzorku pocházejí ze souboru dat, jež mají normální distribuci a stejný neznámý rozptyl. Dalším předpokladem je, že náhodné veličiny v jedné skupině mají stejné střední hodnoty. [28]

Při předpokladu nezávislosti mezi sloupcovými výběry, normalitou a stejnými rozptyly, je možné použít několik porovnávacích metod. Každá z těchto metod je volena podle toho, jaké parametry porovnává, nebo zda se budou analyzovat chyby metodické či experimentální. Jednotlivé modely mají výhody i úskalí a neexistuje metoda univerzální. [12]

4.3.1 Metoda Bonferroniho porovnávání párů

Metoda porovnávání Bonferroniho slouží k odhalení rozličných párů. [12]

4.3.2 Metoda Bonferroniho porovnávání sloupců

Je metoda, kde se vybere jeden hlavní sloupec dat a ostatní sloupce dat se s hlavním porovnávají. [12]

4.3.3 Tukeyova metoda

Jedná se o metodu vycházející z t-testu a její využití je především v případě stejného počtu pozorování. Je jednou z nejčastěji používanou metodou, kvůli vhodnosti kompromisu síly testu a možnosti výskytu chyby. [12]

4.3.4 Metoda Scheffého porovnání

Je vícerozměrná metoda porovnání, u které je větší tendence k chybě II. druhu, tím pádem odhalí menší počet rozdílů mezi středními hodnotami. Výhodou tohoto testu je, že hodnoty, které jsou potřebné k této metodě jsou přítomny ve všech statistických tabulkách. Tato metoda se využívá k porovnání průměrů sloupců. [12]

4.3.5 Kruskal–Wallisův test

Pomocí tohoto testu lze porovnat mediány sloupců v páru bez nutnosti splnění podmínky normality dat. [12]

5 OZUBENÁ KOLA

Ozubená kola jsou nenahraditelnou součástí pohyblivých zařízení. Jejich účel je přenášení rotačního pohybu a převod kroutícího momentu v mechanických zařízeních. Dle typu zařízení jsou navrhovány různé typy kol a kompletována v soukolí. Pro optimální přenos momentu by mělo být zamezeno prokluzu mezi koly. Nevhodným návrhem či vadnou výrobou může docházet k tření, hluku a nadměrnému opotřebení. Těmito a dalšími následky dochází ke ztrátám přenosu momentu. Základem odvalování mezi zabírajícími koly soukolí je shodná obvodová rychlost na roztečných kružnicích. [32]

Soukolí představuje nejrozšířenější druh převodových mechanismů pracujících na přenosu sil tlakem na zuby kol. Soukolí je složeno z menšího kola označovaného za pastorek a většího ozubeného kola. Tyto dvě spolu zabírající kola jsou základní jednotkou pro složité mechanismy převodů. Pomocí těchto kol dochází k transformaci úhlových rychlostí a točivých momentů s vysokou mechanickou účinností. [31,32]

5.1 Typy ozubení

Ozubená kola je možné třídit dle typu ozubení a zubů. Pro velké spektrum využití ozubených kol byly zkonstruovány různé typy, které vyhovují požadavku na změnu rychlosti, směru nebo přenosu momentu. [31]

5.1.1 Čelní ozubení se zuby příkými

Jedním z nejvíce používaných typů jsou ozubená kola s příkými zuby, hlavně kvůli poměrně jednoduché výrobě. Na kola s čelním ozubením a příkými zuby nepůsobí osová síla. Tato kola nejsou vhodná do zařízení s požadovaným plynulým chodem a jsou poněkud hlučná. [31,32]

5.1.2 Čelní ozubení s šikkými zuby

Plynulejší chod soukolí je možné zajistit ozubenými koly čelním ozubením a šikkými zuby. U tohoto typu kol však působí osová síla závislá na zatěžovacím momentu. [31,32]

5.1.3 Čelní ozubení se zuby šípovitého tvaru

Pro plynulý chod bez působení osových sil se využívají ozubená kola s šípovitým tvarem zubů. Kvůli komplikované výrobě se často využívá kombinace dvou ozubených kol se šikkými zuby uspořádaných zrcadlově k sobě. [31]

5.1.4 Kuželové ozubení s přímými zuby

V případě různých os ozubených kol je vhodné použití kuželového ozubení. Přímé zuby jsou konstrukčně jednodušší, ovšem nemají zcela plynulý chod. U kuželového ozubeného kola vzniká i nežádoucí osová síla. [31, 33]

5.1.5 Kuželové ozubení se šikmými a zakřivenými zuby

Pro plynulejší chod ozubených kol a vysokou účinností a mimoběžnými osami se využívá kuželové ozubení se šikmými či zakřivenými zuby. [31,32]

5.1.6 Spiroidní kuželová ozubená kola

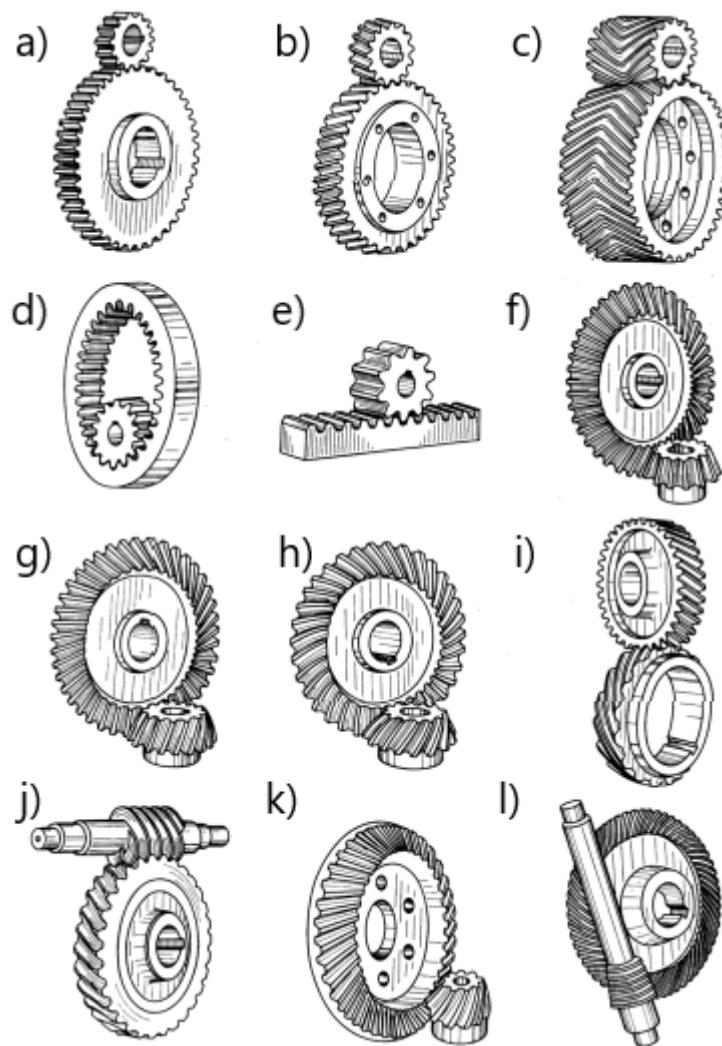
Speciální typ přenosů momentu je spiroidním kuželovým kolem, které umožňuje větší vzdálenost mezi mimoběžnými osami. [31]

5.1.7 Šroubová ozubená kola

Šroubová ozubená kola umožní převod momentu na mimoběžných hřídelích, ovšem kvůli působení tření se snižuje účinnost, a tak je nutné kvalitně promazávat. V případě střídání hnacího a hnaného kola je nutné navrhnout úhel vyklopení stejný či velmi podobný. [31]

5.1.8 Šneková ozubená kola

Pokud je požadován velký převodový poměr s mimoběžnými hřídeli je vhodné navrhnout kola šneková. Tyto kola mají nižší účinnost, ve srovnání s koly čelními či kuželovými. Šneková kola se využívají ve stavebních strojích, výtazích, lisech, a to kvůli velkému převodovému poměru a možnosti přenášet velké kroucí momenty. [31, 32, 33]



Obrázek 17 Typy ozubených kol [32]

Na obrázku č. je čelní ozubení s přímými zuby (a, d, e), s šikmými zuby (b) a šípovými zuby (c), kuželová kola s přímými zuby (f), se šikmými (g) a zakřivenými zuby (h), spiroidní kuželová kola (l), šroubová kola na (i, k), šneková kola (k).

5.2 Výroba ozubených kol

Ozubená kola je možné vyrábět velkou škálou metod a postupů, které se vybírají dle požadavků na produktivitu, materiál, přesnost či náklady výroby. Nejčastěji jde o metody konvenčního odebrání materiálu. Lze je také vyrábět lisováním, odléváním, vstřikováním či pomocí 3D tisku. [33]

5.2.1 Obrážecí metoda

Obrábění ozubených kol obrážecí metodou probíhá nožem o velikosti a tvaru mezery zubu. Tvar zubové mezery závisí na modulu kola, pro který je specifický nástroj. Nástrojem je

hřebenový nůž či obrážecí kolo. Jednotlivé zuby nástroje jsou negativem pro výrobu mezery ozubeného kola zvětšena o vůli. Hlavní řezný pohyb koná nástroj ve směru sklonu zubu. Jedná se o pohyb přímočarý vratný. Vedlejší pohyb koná obráběné kolo odvalující se po nástroji, případně i nástroj pohybující se ve směru odvalování. Výhodou je, že pomocí jednoho nástroje je možné vyrobit libovolný počet zubů o stejném modulu. Nevýhodou je použití speciálního jednoúčelového stroje – obrážčky. Tato metoda je málo produktivní a méně přesná. Pomocí obrázení lze vytvořit vnitřní ozubení, ale i šikmé zuby. [33]

5.2.2 Obrábění tvarovým nástrojem

Obráběním pomocí tvarového nástroje o tvaru zubové mezery vzniká ozubené kolo zub po zubu. Ozubení se vytváří odstraňováním přebytečného materiálu v místech zubové mezery za vzniku třísek a tepla. Nástrojem pro tento typ obrábění ozubených kol jsou kotoučové či stopkové frézy. Větší životnost má kotoučová fréza z důvodu většího počtu zubů. Hlavním pracovním pohybem je rotace nástroje a vedlejší pohyb vykonává vlastní obrobek. Po dokončení jedné zubové mezery je nutné pootočit vyráběné kolo o určitý úhel. Pro tuto metodu obrábění je možné využít i tříosou frézku s dělicím nástrojem. Nevýhodou je potřeba pro každý modul specifický tvar nástroje. Tato metoda je nevhodná pro velkosériovou výrobu. [33]

5.2.3 Odvalovací frézování

Odvalovací frézou o stejném modulu jako požadované ozubené kolo, lze vyrobit přesné kolo s libovolným počtem zubů. Obrobek se plynule otáčí a zuby frézy, jež jsou uspořádané do šroubovice, vytváří požadované ozubení. Osa nástroje je nakloněna o určitý úhel k rovině výrobku, tak aby se vyrovnalo stoupání šroubovice, s kterou je vyrobena fréza. Pokud je ovšem požadováno ozubené kolo se šikmým stoupáním je třeba o tento úhel naklonit i nástroj. U odvalovacího frézování zabírají všechny zuby najednou, proto je tato metoda přesná a efektivní. [33]

5.2.4 Vyřezávání ozubených kol

Ozubená kola je taktéž možné vyřezávat z plechu o tloušťce 0,5 mm až 15 mm. Výhodou je použití víceúčelových vyřezávacích metod. Vyřezávat kola je možné za pomoci laserového či vodního paprsku. [33]

5.2.5 Lisování ozubených kol

Na výrobu ozubených kol. bez nároku na velké momenty a výkony. je vhodné použít metodu lisování. Touto metodou je možné docílit přesných rozměrových vlastností. Jedná se o produktivní metodu výroby kol z plechu o tloušťce 0,5 až 3 mm, kdy na jeden zdvih lisu vznikne hned několik výrobků současně. Lisování je beztržisková metoda výroby ozubených kol z ocelových, mosazných, měděných, hliníkových či nerezových plechů. [33]

5.2.6 Tisk ozubených kol

Pro rychlou výrobu ozubených kol především pro prototypovou výrobu se využívá metoda 3D tisku. Touto metodou je možné vytvořit i složitá ozubená kola bez odpadního materiálu. Principem je nanášení kovového prášku na pracovní plochu tiskárny v tenké vrstvě, kterou následně souřadnicově řízený laser nataví v místech budoucího ozubeného kola. Následně se nanese další vrstva prášku, jež se nataví k vrstvě předchozí. Přebytečný nevytvrzený prášek se odstraní a je možné ho znovu využít. [34]

5.3 Zpracování ozubených kol

Pro zlepšení tvrdosti povrchu, houževnatosti jádra kol a tím prodloužení životnosti, se dosahuje tepelným či chemicko-tepelným zpracováním. Pomocí následujících metod lze dosáhnout požadovaných vlastností jako jsou tvrdost povrchu a houževnatost jádra. [36]

5.3.1 Kalení

Principem kalení je ohřev dílu na překryštalizační teplotu a následné prudké zchlazení pomocí vody, oleje či vzduchu. Po kalení obvykle následuje další teplené zpracování, například popouštění. Metodou kalením dojde ke změně austenitu na tvrdší martenzit. Prokalený materiál je ovšem křehký a až dalším zpracováním dosahuje houževnatosti a tvrdosti povrchu 45 až 55 HRC. [36]

Kalit je možné povrchově či v celém objemu dílu. Zásadním rozdílem je intenzita ohřevu a rychlost chlazení. V případě ohřevu celého dílu na kalící teplotu je nutné zajistit rychlé a intenzivní ochlazení v místech požadované tvrdosti. Nikoliv tak velké, aby se zakalilo i jádro kola. Naopak pokud je zajištěn intenzivní a rychlý ohřev, je možné kalit jen místa s požadovanou tvrdostí. Rychlost ohřevu musí být větší než tepelná vodivost materiálu, tak aby se ohřívala jen povrchová vrstva a jádro zůstalo téměř netknuté. Tato metoda ohřevu

povrchu je rozšíření z ekonomických důvodů. Dle typu dodávané teplené energie se kalení dělí na: kalení plamenem, indukci či energetickými svazky. [36]

Dnes již nejméně používanou metodou je kalení plamenem. Kvůli obtížnosti usměrnování plamene pouze na zuby kol dochází i k nežádoucímu tepelnému ovlivnění dalších částí kola. Po ohřátí povrchu zubu na teplotu kalení, je nutné kolo ochladit pomocí vody či oleje. Dojde tak k prokalení povrchu do několika milimetrů a postupným chlazením na vzduchu o popouštěcí teplotě, se zajistí houževnatost jádra kola. [36]

Další metodou je kalení pomocí elektrické indukce. Principem je dutá cívka omotaná v těsné blízkosti zubů kola, v níž putuje chladící médium. Cívka pod proudem indukuje magnetické pole, které zajistí ohřev povrchu zubů kola. Po dosažení teploty kalení, následuje prudké ochlazení a popouštění jako u metody kalení plamenem. [36]

Moderní metodou kalení je pomocí laserových, elektronových nebo plazmových energetických svazků. Počítačem řízený energetický paprsek usměrněný na povrch zubů kol dokáže efektivně do požadované hloubky prokalit povrch materiálu bez tepelného ovlivnění jádra. Rychlým lokáním ohřevem na teplotu kalení, dojde k teplotnímu spadu a přenosem tepla do středu kola. Tím dojde k prudkému zchlazení bez nutnosti chladícího média. [36]

5.3.2 Cementování

Cementování je chemicko-tepelná metoda zpracování ocelí, které mají malý obsah uhlíku. Pokud je obsah uhlíku v oceli pod 0,25 % je možné povrch ozubených kol sytit uhlíkem. Sycení povrchu probíhá pomocí žíhání za teploty 850-950 °C. Pomocí cementace je následně možné výrobky kalit. Nasycená vrstva uhlíkem je přibližně 0,8 mm silná a neovlivní houževnatost jádra dílu. Cementování probíhá v prostředí obsahující uhlík, a to obvykle v uhlíkatých plynech jako je propan, butan či acetylen. Pro zkvalitnění cementace povrchu se provádí sycení ve vakuové peci za nízkého tlaku. Kvůli vysoké teplotě, jež způsobuje překrystalisaci vznikají okuje a je nutné dále výrobek opracovat broušením. [36]

5.3.3 Nitridování

Nitridování je chemické sycení povrchu dílu dusíkem, který vzniká rozkladem čpavku. Pomocí nitridování se vytvrzují zušlechtnuté oceli při teplotách kolem 500 °C. Ocel musí obsahovat tvrdé nitridy jako je hliník, nikl či chrom. A zároveň musí být popouštěcí vyšší než zmiňovaných 500 °C. Tvrdost povrchu oceli pomocí této metody nabude až na 60 HRC a klesá postupně směrem k jádru. Tato metoda vytvrzení je určena především pro řezné

nástroje. Po nitridaci již není třeba díly dále tepelně opracovávat, jako tomu je u cementování. Povrch je pomocí nitridování je vytvrzen do hloubky až 0,3 mm. [36]

5.4 Dokončovací operace

Přesný tvar ozubení a lepší jakost povrchu lze docílit pomocí dokončovacích operací jako je broušení, lapování nebo ševingování. Každá z metod má své výhody i úskalí pro dané použití. [36]

5.4.1 Broušení

Nejpřesnější technologii pro dokončení zakalených ozubených kol je broušení. Jedná se o nejčastěji používanou dokončovací technologii pro ozubená kola. Provádí se pomocí několika metod. [36,37]

Odvalovací metoda broušení Pomocí dvou brusných kotoučů talířového tvaru, jež opracovávají boky zubů. Díky malé styčné ploše brousícího kotouče s plochou zubu nevzniká velké teplo a je možné brousit za sucha, bez nutnosti chlazení. Malou brousící plochou ovšem dochází k většímu úbytku na brousícím kotouči, proto jsou ve stroji umístěny detektory, které sledují úbytek a dorovnávají brusné kotouče do správné polohy. [36]

Ozubená kola je možné brousit na odvalovací frézce, stejně jako u výroby ozubení kol. Používá se brusný šnekový kotouč o tvaru základního profilu. Tato metoda je kontinuální a tím i produktivnější. [36]

Dělicí metoda broušení Dalším způsobem, jak brousit ozubená kola je kotoučem kopírujícím přesný tvar zubové mezery či tvar boku jednoho zubu. V tomto případě je styčná plocha brusného kotouče se zubem kola velká a vzniká teplo, jež může negativně ovlivnit nástroj i samotné ozubené kolo. Proto je vždy u této metody zajištěno chlazení. Vždy po dobroušení jedné zubové mezery se kolo pootočí o daný úhel a broušení pokračuje. Metoda je náročná na přesnou výrobu brusného kotouče, jeho kontrolu a následné orovnění. [36,37]

5.4.2 Lapování

Lapování je jednou z metod pro přesnou dokončovací operaci ozubených kol. Využívá se nástroje tvaru ozubeného kola přesně vyrobeného obvykle z litiny, jež odpovídá modulu obrobku. Nástrojové kolo se po bržděném obráběném kole odvaluje a proudící kapalina nebo pasta s abrazivem ubírá materiál obráběného kola. [35]

5.4.3 Ševingování

Ševingování je dokončovací metoda u nezakalených ozubených kol či metoda předcházející kalení. Pomocí metody ševingování se dosahuje zlepšení povrchových vlastností ozubeného kola. Jedná se o velmi malý úběr materiálu pomocí ševingovacího kola postaveného mimoběžně ke kolu obráběnému. Ševingovací kolo je osazeno břity s drážkami pro odvod třísek na bocích kola. Jak kolo obráběné, tak i nástroj koná pohyb rotační, a navíc jedno z těchto kol i pohyb posuvný vratný. Ševingovací kolo může být nahrazeno ševingovacím hřebenem či šnekem. [37]

5.5 Vliv způsobu výroby a zpracování na jakost povrchu

Způsobu výroby a opracováním dílu se dosahuje požadovaných drsností povrchu pro dané použití. [36]

Stupeň přesnosti podle ČSN 01 4682		4	5	6	7	8	9	10	11
Max. drsnost povrchu Ra (μm)*		0,1 až 0,2	0,2 až 0,4	0,4 až 0,8	0,8 až 1,6	1,6	1,6 až 3,2	3,2 až 6,3	6,3 až 12,5
Max. obvodová rychlost (m.s-1)	zuby přímé	libovolná	60	35	15	8	5	3	3
	zuby šikmé	libovolná	80	50	30	12	8	5	3
Způsob výroby	kola netvrzená			frézována na speciálních odvalovacích frézách		ševingována frézována odvalovacím způsobem		obrážena	obrážena, frézována dělicím způsobem
	kola tvrzená	broušená na nejpresnějších bruskách		broušená na odvalovacích bruskách		lapovaná			
Použití	kontrolní kola pro stupeň přesnosti 6 až 8 8 až 10		rychlěžné převodovky		průmyslové převodovky		pohony rotačních pecí		
	měřicí přístroje				lehké lodní motory	válcovací stolice, těžké lodní motory, lokomotivy a			
	reduktory turbin			osobní automobily		zdvihadla a stavební stroje			
						obráběcí stroje		zemědělské stroje	
						letecké motory	nákladní automobily		
						textilní stroje			

Obrázek 18 Drsnost povrchu ozubených kol dle typu zpracování [38]

5.6 Používané kovy pro výrobu ozubených kol

Podle požadavků na pevnost, obrobitelnost, velikost a životnost se volí materiál pro výrobu ozubených kol. Dalším kritériem volby může být cena, možnost prokalitelnosti či jiného tepelného zpracování anebo dle množství výroby. Pro malé obvodové rychlosti s tichým chodem, nižší cenou, ale i nižší pevností, se volí litiny. Tyto litiny mají výhodu v dobré odolnosti proti oděru. Pro ozubené kola v hodinkách a jiných stojkách se využívá mosazi či

bronzu. Kola z těchto materiálů mají dobré kluzné vlastnosti a jsou vhodné pro malé momenty. Nejhojněji používaným materiálem jsou oceli. Ty splňují základné požadavky na pevnost, obrobiteľnosť a životnosť. Dle stupně namáhání se volí třídy oceli. Oceli třídy 11 se obvykle využijí na málo namáhaná kola. Pro více namáhaná kola se použijí zušlechťené oceli. Pro kola vyžadující odolnost proti otěru se používají oceli cementační. [37]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce je návrh statistického hodnocení povrchu vyrobených ozubených kol převodovky s předepsanými požadavky na jakost povrchu a porovnání pomocí vícerozměrné statistiky s koly po absolvovaném závodě.

Měření je prováděno na profilometru ZIGO New View řady 8000 a požadované parametry vyhodnoceny pomocí programu MINITAB 17 a MINITAB 14.

Hlavními cíli práce je kontrola naměřených dat metodikou EDA, kdy pomocí grafického znázornění a statistických vyhodnocovacích metod sledovat parametry Ra a Rz. Ověřit, zda soubory dat pochází z normálního rozdělení, pomocí Anderson-Darlingova testu, a zda neobsahují odlehlé hodnoty pomocí Grubsova testu odlehlých hodnot. Použitím jednocestné ANOVY následně otestovat a zhodnotit podobnost jednotlivých souborů.

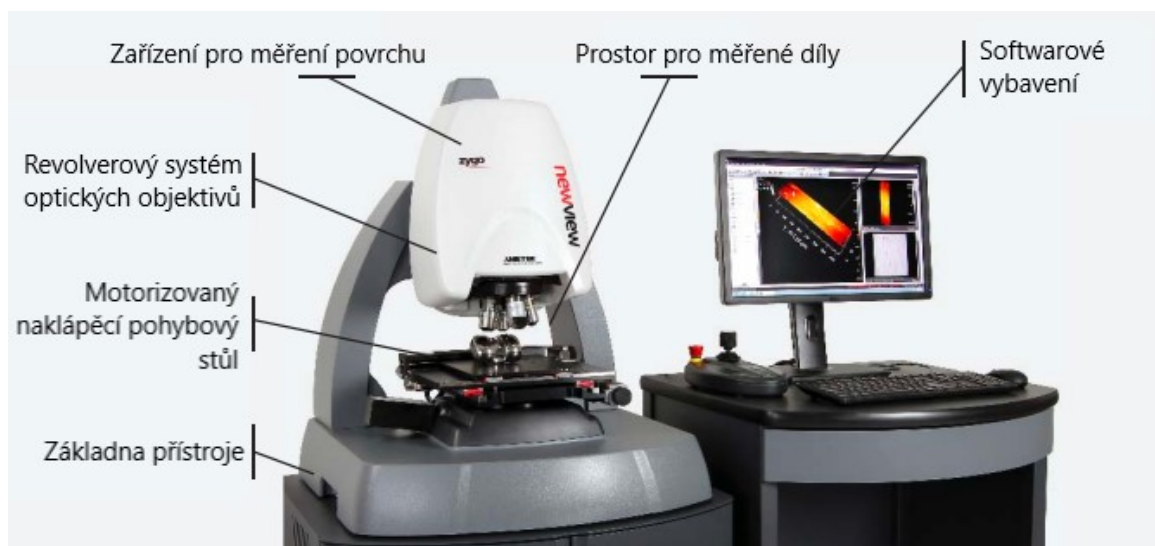
7 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

7.1 Způsob měření drsnosti

Pro měření drsnosti byl zvolen bezkontaktní 3D profilometr ZYGO New View 8000. Měření bylo prováděno v laboratoři na půdě fakulty technologické univerzity Tomáše Bati ve Zlíně za odborného dohledu Ing. Milena Kubišové, Ph.D. V laboratoři byla konstantní vlhkost a teplota 22,2 °C .

7.1.1 ZYGO New View 8000

Profilometr Zygo je výkonný interferometrický přístroj pro měření drsnosti povrchu transparentních a netransparentních materiálů. Tento přístroj bez změny módu měření dokáže měřit materiály s hrubým povrchem, ale i s vysokým leskem. [39]



Obrázek 19 Profilometr Zygo [39]

7.2 Vzorky pro měření drsnosti

Vzorkem pro měření drsnosti byly 3 ozubená kola o různé velikosti určeny do převodovky sportovních aut. Každé kolo bylo řádně označeno pro zajištění opakovatelnosti měření. Před měřením ozubená kola kondicionovala po dobu 24 hodin v laboratoři.

Ozubená kola jsou vyrobena ze středně legované ušlechtilé chrom-nikl-molybdenové oceli (18CrNiMo7-6), jež je možné cementovat.

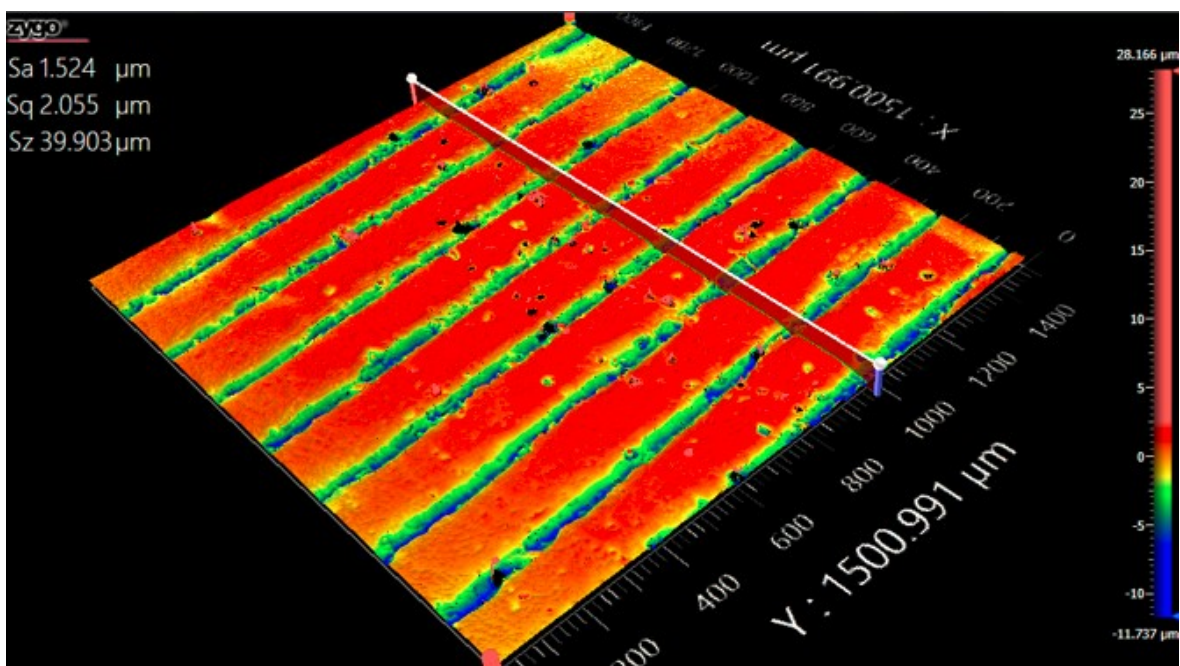
Měřené plochy na ozubených kolech jsou ve výrobě cementovány do hloubky 0,7-0,8 mm, následně kaleny a popouštěny s výslednou tvrdostí 59-61 HRC. Finální úpravou je broušení na požadovanou drsnost $R_a = 0,8 \mu\text{m}$.

Měření probíhalo na ploše paty zubu, a to na každém ozubeném kole ve 4 místech zvolených po 90° (Obrázek č. 20).

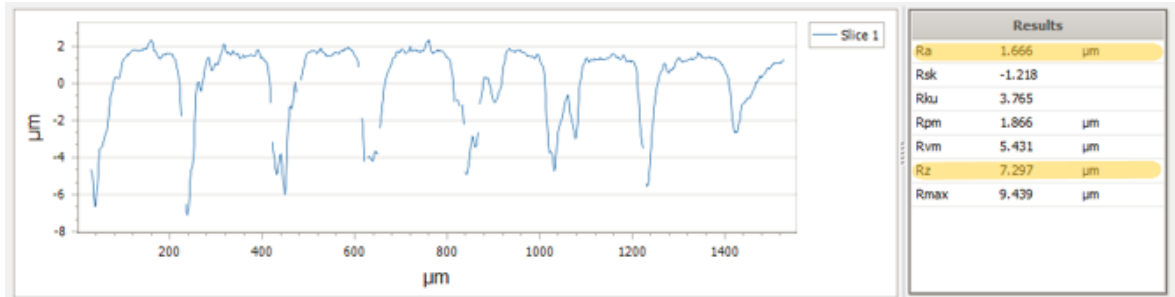


Obrázek 20 Označené ozubené kolo

Z každého naskenovaného místa bylo vytvořeno 10 řezů a odečteny parametry Ra a Rz.



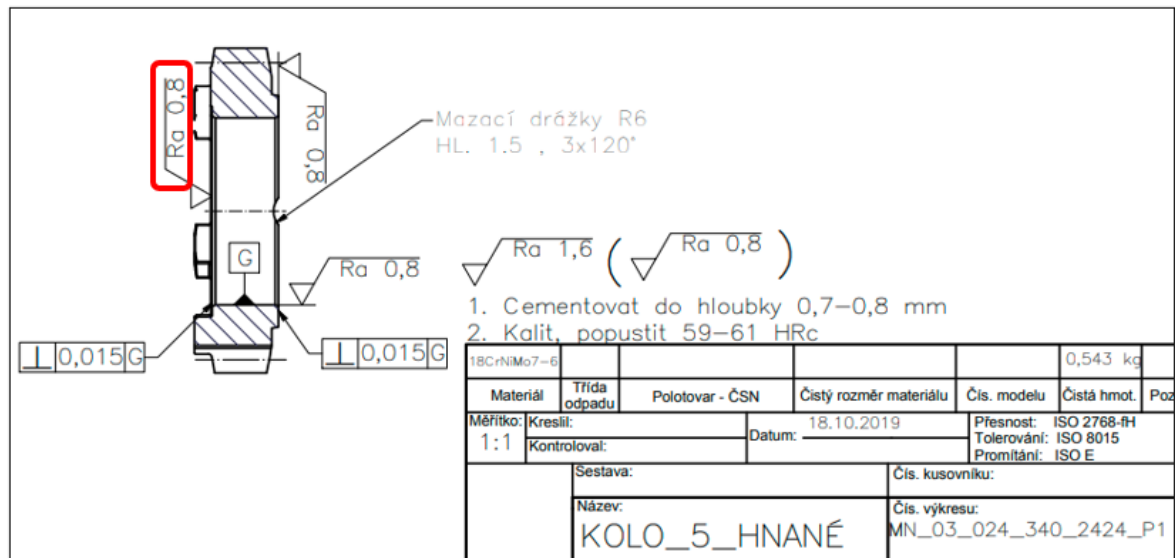
Obrázek 21 3D model povrchu



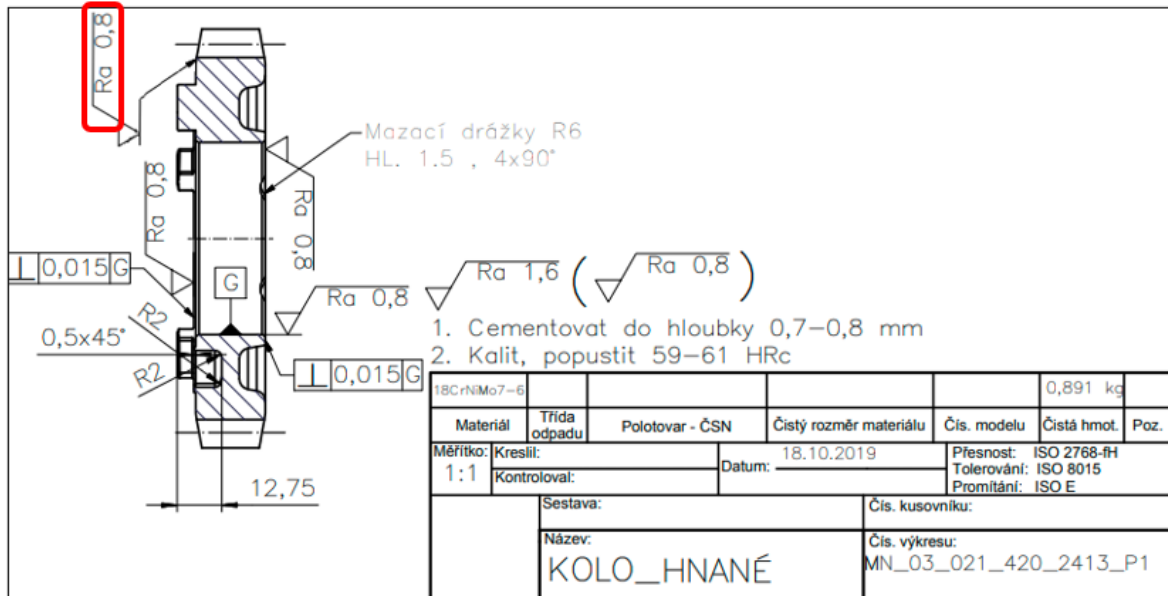
Obrázek 22 Profil řezu naskenované 3D plochy s naměřenými parametry

7.3 Výkresová dokumentace ozubených kol

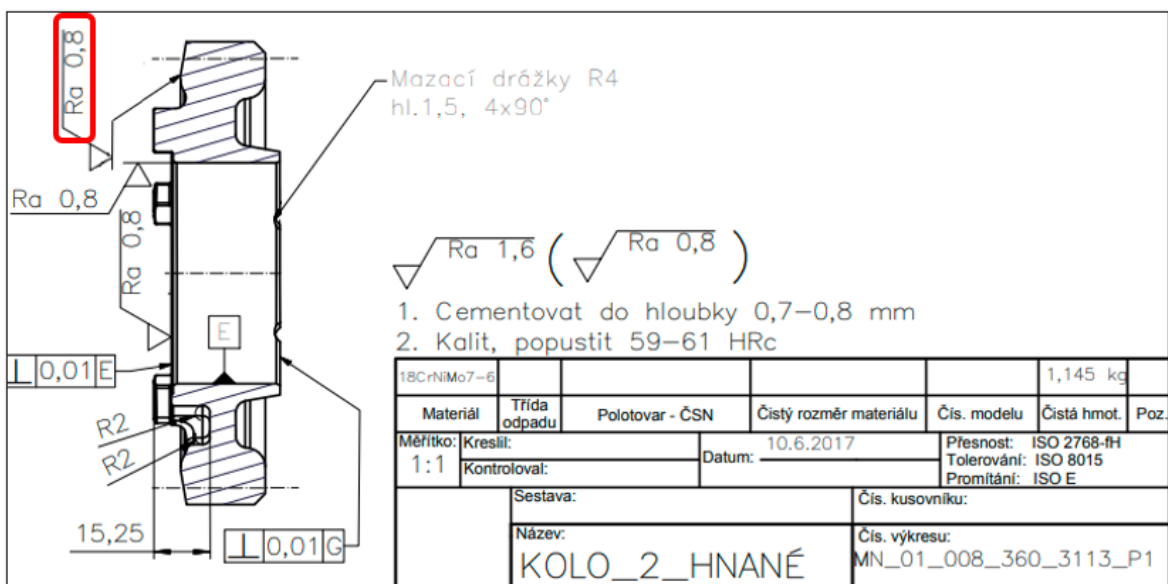
Každé z kol má požadované parametry drsnosti povrchu zaneseny ve výkresové dokumentaci. Na měřenou plochu ozubeného kola je kladen požadavek drsnosti $Ra = 0,8 \mu\text{m}$, kterou výrobce docílí pomocí broušení.



Obrázek 23 Část výkresové dokumentace malého ozubeného kola



Obrázek 24 Část výkresové dokumentace středního ozubeného kola



Obrázek 25 Část výkresové dokumentace velkého ozubeného kola

7.4 Naměřená data

Tabulka 1 Naměřené parametry Ra a Rz na malém novém kole

Č. řezu	Ra_M_N_1 [μm]	Rz_M_N_1 [μm]	Ra_M_N_2 [μm]	Rz_M_N_2 [μm]	Ra_M_N_3 [μm]	Rz_M_N_3 [μm]	Ra_M_N_4 [μm]	Rz_M_N_4 [μm]
1	0,438	3,682	1,065	2,725	0,467	0,180	0,674	3,802
2	0,613	3,749	0,932	2,882	0,338	1,932	0,777	4,506
3	0,524	5,920	0,972	4,906	0,695	2,301	1,160	5,495
4	0,442	2,871	0,997	1,900	0,594	2,078	1,121	4,962
5	0,411	3,836	0,976	3,807	0,501	4,090	0,507	2,123
6	0,662	4,932	1,027	1,256	0,678	2,189	0,633	3,080
7	0,568	3,783	1,052	4,745	0,372	3,972	0,954	5,052
8	0,643	4,872	1,069	3,703	0,670	3,943	0,356	2,643
9	0,380	2,927	0,694	1,675	0,624	1,263	0,697	1,752
10	0,805	4,717	1,278	2,679	0,362	1,104	1,093	5,634

Tabulka 2 Naměřené parametry Ra a Rz na malém použitém kole

Č. řezu	Ra_M_P_1 [μm]	Rz_M_P_1 [μm]	Ra_M_P_2 [μm]	Rz_M_P_2 [μm]	Ra_M_P_3 [μm]	Rz_M_P_3 [μm]	Ra_M_P_4 [μm]	Rz_M_P_4 [μm]
1	2,295	8,616	1,169	5,976	1,467	7,234	2,231	9,033
2	2,124	8,763	1,594	7,321	1,641	7,327	2,381	9,405
3	2,074	8,070	1,795	8,445	1,336	7,207	2,124	8,601
4	2,145	9,020	1,357	6,775	1,200	6,187	2,177	8,767
5	2,101	8,728	1,171	7,052	1,387	6,361	2,338	8,551
6	2,187	8,469	1,286	6,938	1,452	6,204	2,195	9,023
7	2,153	8,710	1,724	7,999	1,370	6,207	2,455	9,125
8	2,164	8,452	1,101	7,165	1,510	8,136	2,290	8,812
9	2,223	8,466	1,594	7,379	1,397	6,816	2,148	8,458
10	2,323	8,837	1,666	7,297	1,281	7,618	2,447	8,942

Tabulka 3 Naměřené parametry Ra a Rz na středně velkém novém kole

Č. řezu	Ra_St_N_1 [μm]	Rz_St_N_1 [μm]	Ra_St_N_2 [μm]	Rz_St_N_2 [μm]	Ra_St_N_3 [μm]	Rz_St_N_3 [μm]	Ra_St_N_4 [μm]	Rz_St_N_4 [μm]
1	0,254	0,431	0,442	0,685	0,217	0,547	0,220	0,567
2	0,306	0,433	0,180	0,663	0,373	0,657	0,348	0,461
3	0,238	0,433	0,325	0,563	0,158	0,532	0,328	0,537
4	0,156	0,531	0,392	0,637	0,459	0,482	0,257	0,387
5	0,321	0,407	0,228	0,434	0,306	0,579	0,188	0,659
6	0,194	0,519	0,374	0,943	0,129	0,547	0,265	0,479
7	0,202	0,411	0,295	0,618	0,404	0,525	0,327	0,386
8	0,190	0,467	0,323	0,790	0,408	0,506	0,196	0,547
9	0,304	0,499	0,155	0,728	0,251	0,548	0,124	0,681
10	0,257	0,429	0,543	0,477	0,223	0,502	0,253	0,333

Tabulka 4 Naměřené parametry Ra a Rz na středně velkém použitém kole

Č. řezu	Ra_St_P_1 [μm]	Rz_St_P_1 [μm]	Ra_St_P_2 [μm]	Rz_St_P_2 [μm]	Ra_St_P_3 [μm]	Rz_St_P_3 [μm]	Ra_St_P_4 [μm]	Rz_St_P_4 [μm]
1	0,748	3,510	0,581	2,922	0,736	2,067	0,466	2,631
2	0,783	3,705	0,666	2,809	0,734	2,065	0,711	4,480
3	0,508	2,803	0,670	2,593	0,605	2,617	0,487	2,840
4	0,727	3,273	0,672	2,328	0,715	2,405	0,447	2,701
5	0,668	3,572	0,553	2,916	0,656	2,205	0,881	4,490
6	0,645	3,415	0,602	2,892	0,650	2,258	0,784	3,774
7	0,611	2,699	0,682	2,606	0,536	1,966	0,530	2,436
8	0,734	3,485	0,590	3,227	0,713	2,218	0,712	2,638
9	0,594	3,205	0,683	2,846	0,673	2,176	0,667	3,403
10	0,607	3,399	0,544	2,915	0,523	2,009	0,533	3,573

Tabulka 5 Naměřené parametry Ra a Rz na velkém novém kole

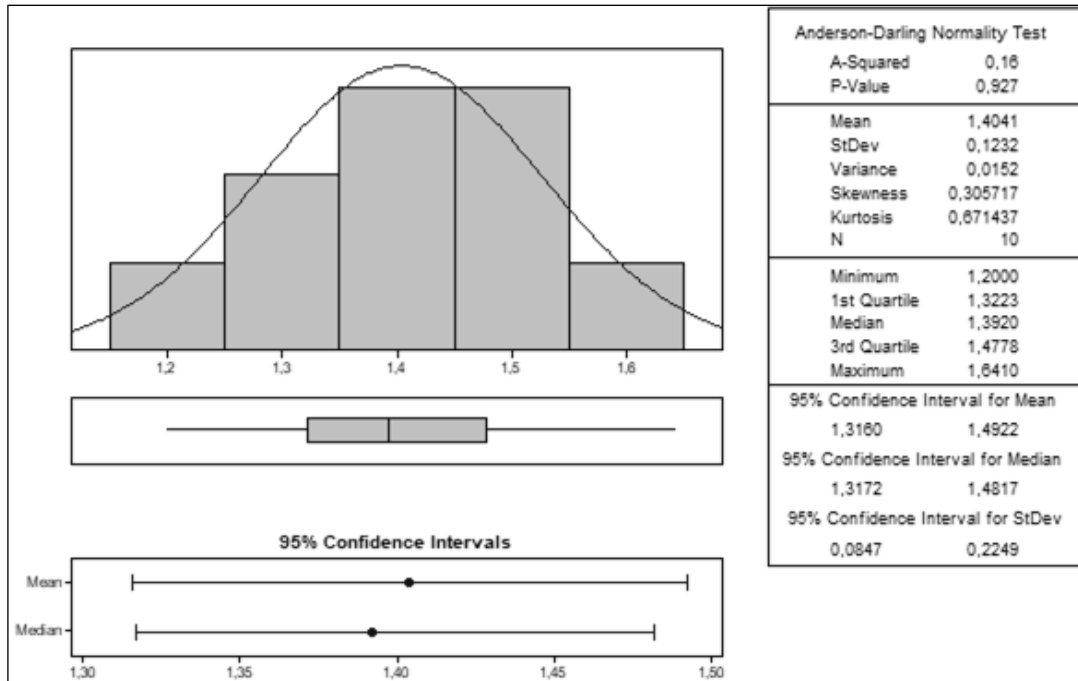
Č. řezu	Ra_V_N_1 [μm]	Rz_V_N_1 [μm]	Ra_V_N_2 [μm]	Rz_V_N_2 [μm]	Ra_V_N_3 [μm]	Rz_V_N_3 [μm]	Ra_V_N_4 [μm]	Rz_V_N_4 [μm]
1	1,218	1,343	0,748	1,446	0,391	1,345	0,573	0,940
2	1,477	1,403	0,769	1,683	1,203	1,020	0,914	1,040
3	1,186	1,726	0,993	1,206	0,611	1,120	0,374	1,367
4	0,602	2,575	0,777	1,371	1,116	1,423	0,571	1,618
5	1,274	1,615	0,813	1,132	0,795	1,882	0,793	1,012
6	1,488	1,168	0,738	1,164	0,608	1,395	0,838	0,987
7	1,454	1,014	0,455	0,832	1,162	1,110	0,581	1,813
8	0,609	1,280	0,624	1,350	0,721	1,178	0,976	1,238
9	0,653	2,965	0,980	1,127	1,358	1,071	0,873	1,293
10	0,843	1,784	0,794	1,063	0,980	1,306	0,464	1,604

Tabulka 6 Naměřené parametry Ra a Rz na velkém použitém kole

Č. řezu	Ra_V_P_1 [μm]	Rz_V_P_1 [μm]	Ra_V_P_2 [μm]	Rz_V_P_2 [μm]	Ra_V_P_3 [μm]	Rz_V_P_3 [μm]	Ra_V_P_4 [μm]	Rz_V_P_4 [μm]
1	1,056	3,616	0,997	2,028	0,613	1,653	1,250	2,358
2	1,291	4,118	0,823	2,722	0,833	1,929	0,861	3,000
3	1,381	4,307	0,610	2,963	0,876	1,875	0,768	2,438
4	1,294	2,818	0,477	2,477	0,705	1,615	1,082	3,603
5	1,204	5,602	0,608	2,569	0,729	2,398	0,638	2,413
6	0,939	5,194	0,572	2,957	0,837	2,421	0,624	2,792
7	1,169	4,679	0,605	2,525	0,787	2,601	1,047	2,631
8	1,182	3,917	0,920	2,477	0,854	1,988	0,776	2,844
9	1,394	4,363	0,827	3,208	0,765	1,442	1,133	3,207
10	1,401	2,661	0,794	2,829	0,874	2,236	0,979	2,767

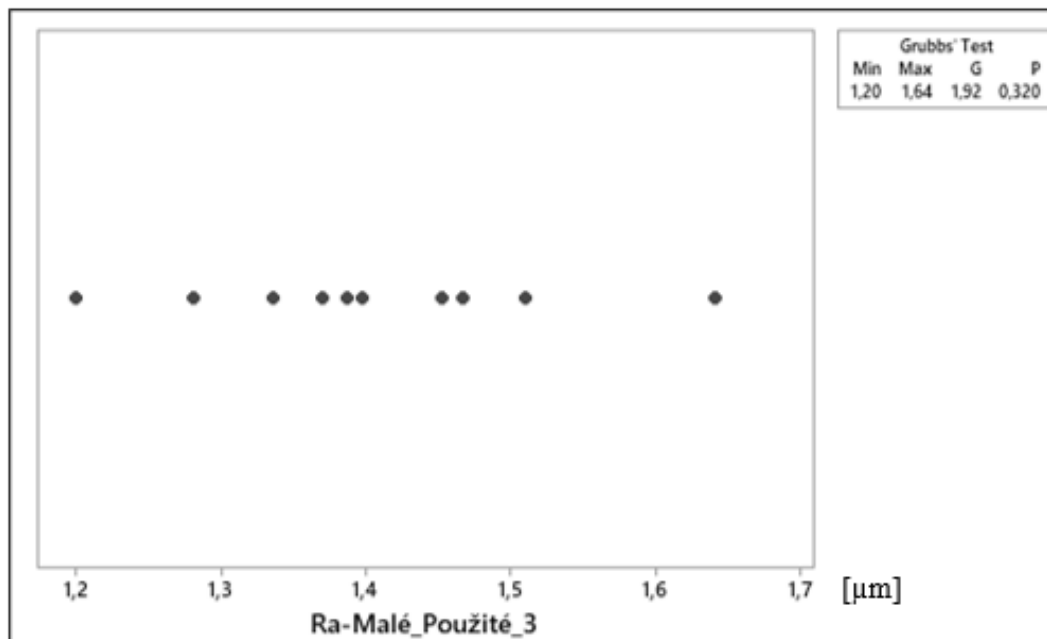
7.5 Exploratorní datová analýza

Pomocí exploratorní datové analýzy bylo zjištěno, zda data odpovídají normálnímu rozdělení a neobsahují odlehlé či hrubé chyby. Metodikou EDA byly analyzovány parametry Ra a Rz.



Obrázek 26 Sumarizace souboru dat parametru Ra na malém použitém kole

Na základě hodnocení dat pomocí Anderson-Darlingova testu normality vyšla „P“ hodnota vyšší než 0,05 ve všech hodnocených souborech částí měřených ploch. Lze tedy s pravděpodobností na 95 % tvrdit, že data pochází z normálního rozdělení.



Obrázek 27 Diagram odlehlých hodnot parametru Ra na malém použitém kole

Dalším krokem bylo ověřit, zda soubor neobsahuje outliery pomocí Grubbsova testu odlehlých hodnot. V případě výskytu hrubé chyby, je nutné tyto data ze souboru vymazat. Pokud se jedná jen o odlehlou hodnotu, tak není možné data ze souboru vyloučit. Testem odlehlých hodnot byly analyzovány všechny soubory měřených ploch a vykazují hodnotu „P“ vyšší jak 0,05. Nezamítám tedy H_0 a tvrdím s pravděpodobností na 95 %, že ani jeden soubor neobsahuje hrubé chyby, které by bylo nutné vyloučit.

Tabulka 7 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz malého nového kola

	Průměr [μm]	Sm. Odchylka [μm]	Min [μm]	Median [μm]	Max [μm]	A-D test „p“hodnot	Grubbs test „p“ hodnota
Ra_M_N_1	0,549	0,1348	0,380	0,546	0,805	0,619	0,347
Rz_M_N_1	4,129	0,9619	2,871	3,810	5,920	0,365	0,401
Ra_M_N_2	1,006	0,1449	0,694	1,012	1,278	0,081	0,112
Rz_M_N_2	3,028	1,2479	1,256	2,804	4,906	0,712	1,000
Ra_M_N_3	0,530	0,1401	0,338	0,548	0,695	0,220	1,000
Rz_M_N_3	2,305	1,3290	0,180	2,134	4,090	0,260	0,910
Ra_M_N_4	0,797	0,2749	0,356	0,737	1,160	0,557	0,895
Rz_M_N_4	3,905	1,4301	1,752	4,154	5,634	0,433	1,000

Tabulka 8 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz malého použitého kola

	Průměr [μm]	Sm. Odchylka [μm]	Min [μm]	Median [μm]	Max [μm]	A-D test „p“ hodnot	Grubbs test „p“ hodnota
Ra_M_P_1	2,179	0,0805	2,074	2,159	2,323	0,464	0,516
Rz_M_P_1	8,613	0,2633	8,070	8,663	9,020	0,536	0,178
Ra_M_P_2	1,446	0,2574	1,101	1,476	1,795	0,244	1,000
Rz_M_P_2	7,235	0,6669	5,976	7,231	8,445	0,394	0,366
Ra_M_P_3	1,404	0,1232	1,200	1,392	1,641	0,927	0,320
Rz_M_P_3	6,930	0,6826	6,187	7,012	8,136	0,268	0,554
Ra_M_P_4	2,279	0,1221	2,124	2,261	2,455	0,514	1,000
Rz_M_P_4	8,872	0,2914	8,458	8,877	9,405	0,895	0,449

Tabulka 9 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz středního nového kola

	Průměr [μm]	Sm. Odchylka [μm]	Min [μm]	Median [μm]	Max [μm]	A-D test „p“ hodnot	Grubbs test „p“ hodnota
Ra_St_N_1	0,242	0,0563	0,156	0,246	0,321	0,534	1,000
Rz_St_N_1	0,456	0,0452	0,407	0,433	0,531	0,069	0,770
Ra_St_N_2	0,326	0,1194	0,155	0,324	0,543	0,931	0,465
Rz_St_N_2	0,654	0,1484	0,434	0,650	0,943	0,904	0,289
Ra_St_N_3	0,293	0,1141	0,129	0,279	0,459	0,569	1,000
Rz_St_N_3	0,543	0,0490	0,482	0,540	0,657	0,154	0,075
Ra_St_N_4	0,251	0,0711	0,124	0,255	0,348	0,713	0,528
Rz_St_N_4	0,504	0,1162	0,333	0,508	0,681	0,804	1,000

Tabulka 10 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz středního použitého kola

	Průměr [μm]	Sm. Odchylka [μm]	Min [μm]	Median [μm]	Max [μm]	A-D test „p“ hodnot	Grubbs test „p“ hodnota
Ra_St_P_1	0,663	0,0855	0,508	0,657	0,783	0,664	0,484
Rz_St_P_1	3,307	0,3261	2,699	3,407	3,705	0,132	0,399
Ra_St_P_2	0,624	0,0557	0,544	0,634	0,683	0,059	1,000
Rz_St_P_2	2,805	0,2444	2,328	2,869	3,227	0,177	0,284
Ra_St_P_3	0,663	0,0855	0,508	0,657	0,783	0,664	0,704
Rz_St_P_3	3,307	0,3261	2,699	3,407	3,705	0,132	0,128
Ra_St_P_4	0,624	0,0557	0,544	0,634	0,683	0,059	0,614
Rz_St_P_4	2,805	0,2444	2,328	2,869	3,227	0,177	1,000

Tabulka 11 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz velkého nového kola

	Průměr [μm]	Sm. Odchylka [μm]	Min [μm]	Median [μm]	Max [μm]	A-D test „p“hodnot	Grubbs test „p“ hodnota
Ra_V_N_1	1,080	0,3683	0,602	1,202	1,488	0,092	1,000
Rz_V_N_1	1,687	0,6258	1,014	1,509	2,965	0,080	0,195
Ra_V_N_2	0,769	0,1558	0,455	0,773	0,993	0,208	0,218
Rz_V_N_2	1,237	0,2350	0,832	1,185	1,683	0,696	0,354
Ra_V_N_3	0,895	0,3152	0,391	0,888	1,358	0,673	0,913
Rz_V_N_3	1,285	0,2532	1,020	1,242	1,882	0,125	0,071
Ra_V_N_4	0,696	0,2077	0,374	0,687	0,976	0,314	1,000
Rz_V_N_4	1,291	0,3059	0,940	1,266	1,813	0,352	0,671

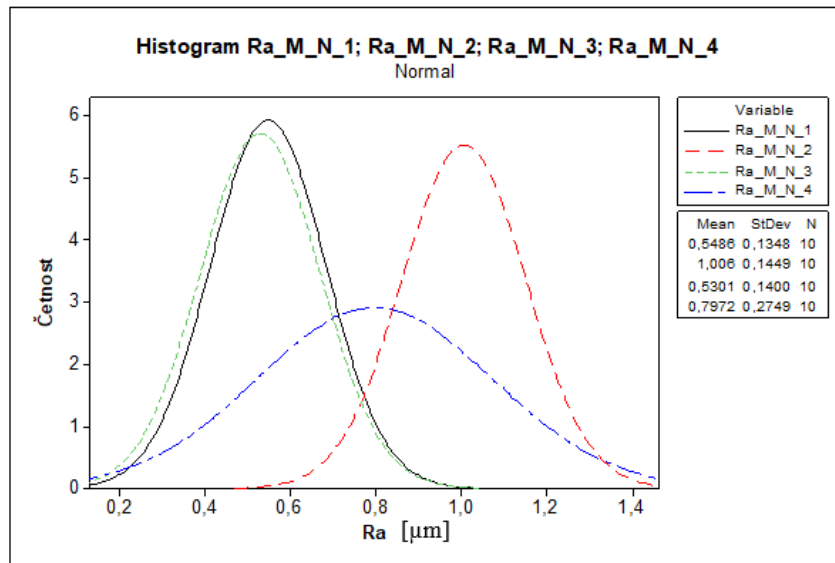
Tabulka 12 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz velkého použitého kola

	Průměr [μm]	Sm. Odchylka [μm]	Min [μm]	Median [μm]	Max [μm]	A-D test „p“hodnot	Grubbs test „p“ hodnota
Ra_V_P_1	1,231	0,1522	0,939	1,248	1,401	0,493	0,324
Rz_V_P_1	4,128	0,9354	2,661	4,213	5,602	0,873	0,967
Ra_V_P_2	0,723	0,1709	0,477	0,702	0,997	0,276	0,904
Rz_V_P_2	2,676	0,3339	2,028	2,646	3,208	0,677	0,300
Ra_V_P_3	0,787	0,0853	0,613	0,810	0,876	0,364	0,193
Rz_V_P_3	2,016	0,3874	1,442	1,959	2,601	0,755	1,000
Ra_V_P_4	0,916	0,2146	0,624	0,920	1,250	0,729	1,000
Rz_V_P_4	2,805	0,3884	2,358	2,780	3,603	0,520	0,185

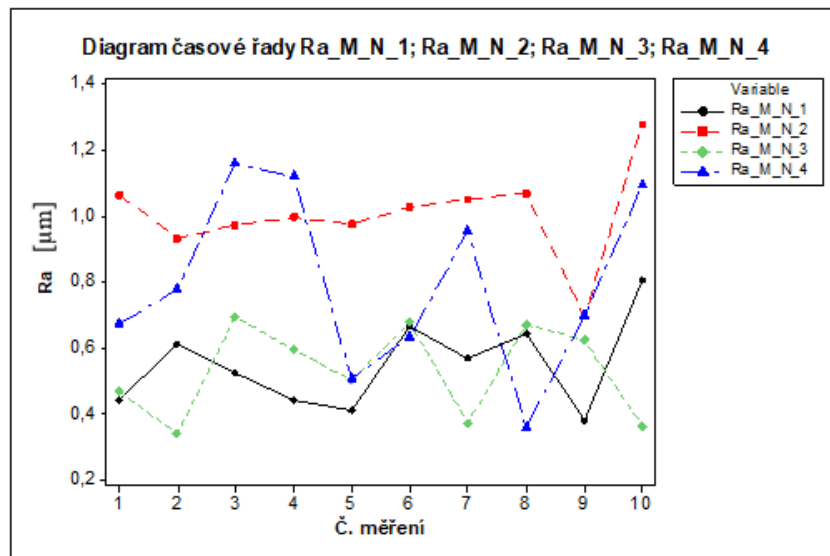
7.6 Porovnání parametrů Ra a Rz na ploše jednotlivých kol

Ve čtyřech vybraných protilehlých místech byla změřena drsnost ve 3D. Z těchto ploch bylo vytaženo 10 řezů a zhodnoceny parametry Ra a Rz.

7.6.1 Porovnání parametru Ra pro malé ozubené kolo nové



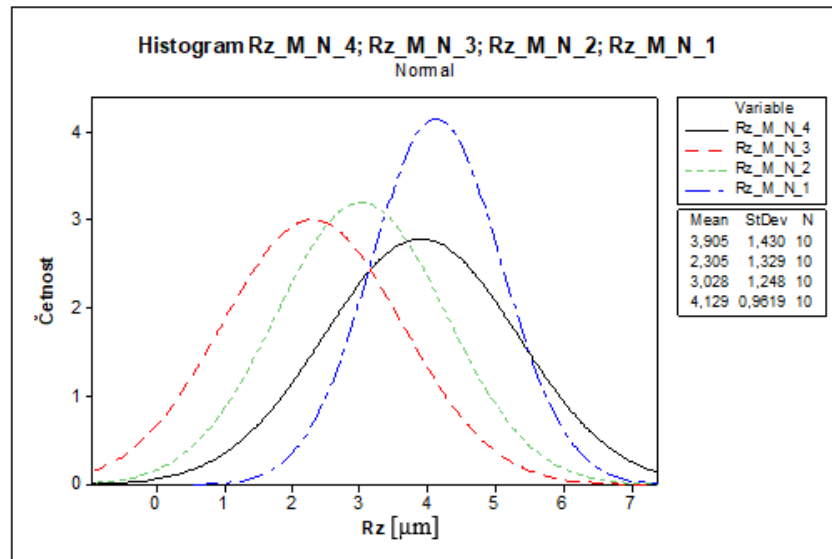
Obrázek 28 Histogram parametru Ra malého nového kola



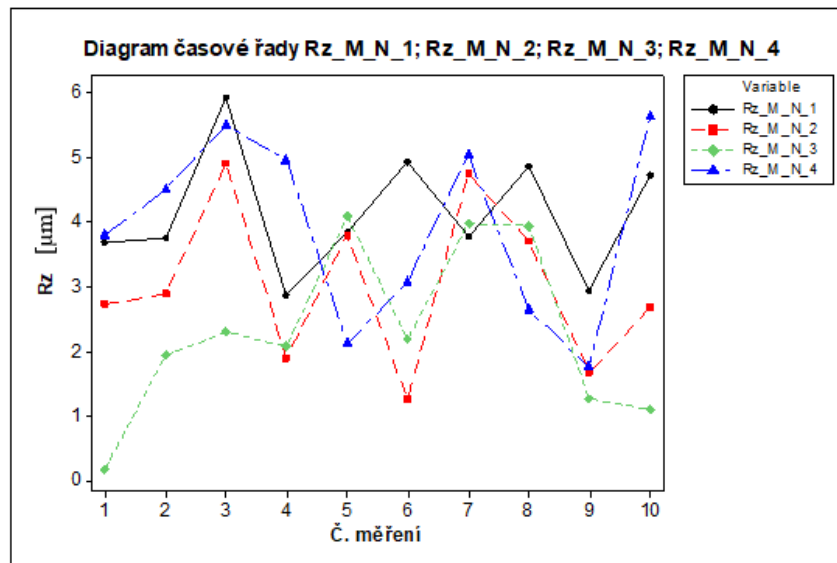
Obrázek 29 Diagram časové řady parametru Ra malého nového kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Ra malého nového kola. Drsnost způsobená broušením dílu byla rozličná. Ve dvou místech plochy kola byla naměřená podobná drsnost Ra (0,549 μm a 0,530 μm). Nicméně jedno z míst vykazuje drsnost vyšší (1,006 μm). V místě č. 4 byl naměřena drsnost Ra 0,797 μm , ale s podstatně vyšší směrodatnou odchylkou (0,275 μm).

7.6.2 Porovnání parametru Rz pro malé ozubené kolo nové



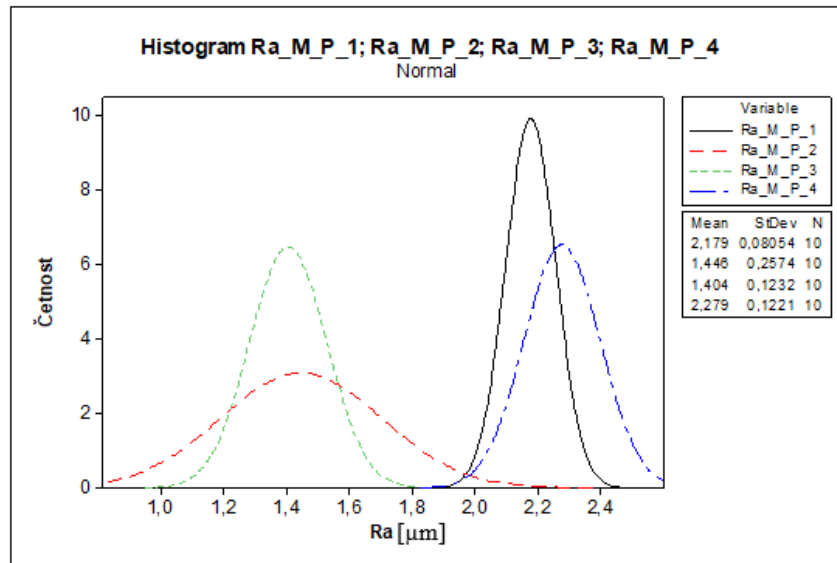
Obrázek 30 Histogram parametru Rz malého nového kola



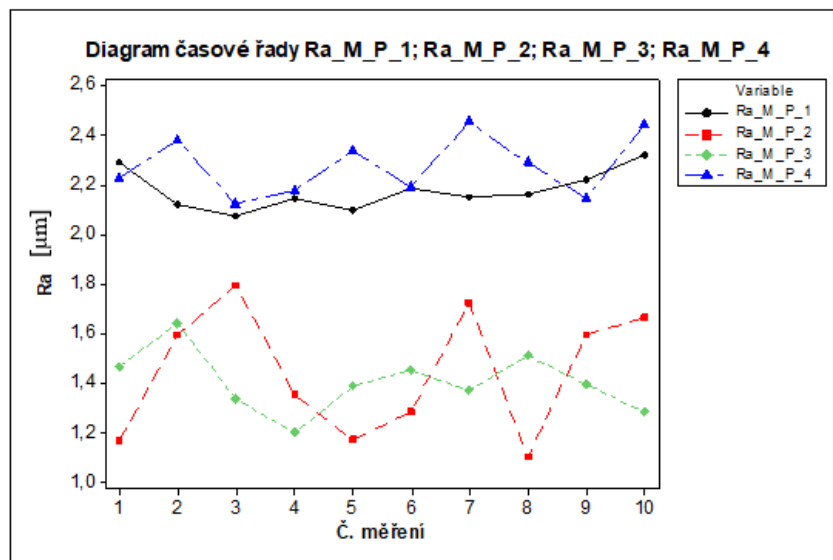
Obrázek 31 Diagram časové řady parametru Rz malého nového kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Rz malého nového kola. Největší hodnota největší výšky profilu byla naměřena v místě č. 1 ($Rz = 4,129 \mu\text{m}$), naopak nejmenší v místě č. 3 ($Rz = 2,305 \mu\text{m}$).

7.6.3 Porovnání parametru Ra pro malé ozubené kolo použité



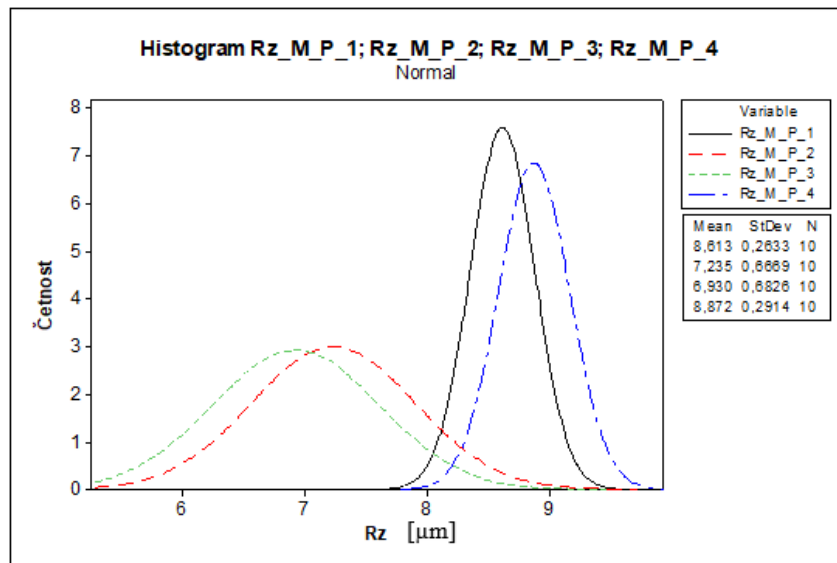
Obrázek 32 Histogram parametru Ra malého použitého kola



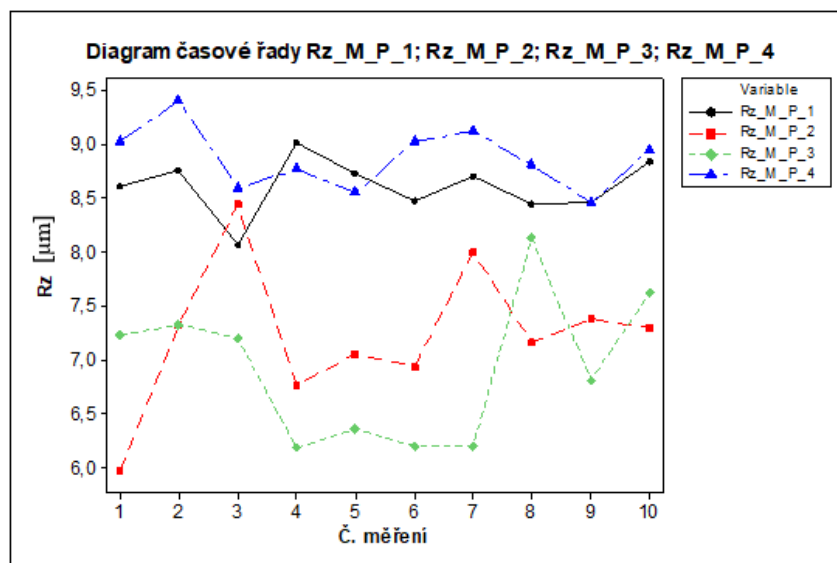
Obrázek 33 Diagram časové řady parametru Ra malého použitého kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Ra malého použitého kola. Drsnost způsobená opotřebením dílu je různá. Ve dvou místech plochy kola byla naměřená podobná drsnost Ra (1,446 μm a 1,404 μm). V protilehlých místech vykazovala drsnost Ra podobnost (Ra = 2,179 μm a 2,279 μm).

7.6.4 Porovnání parametru Rz pro malé ozubené kolo použité



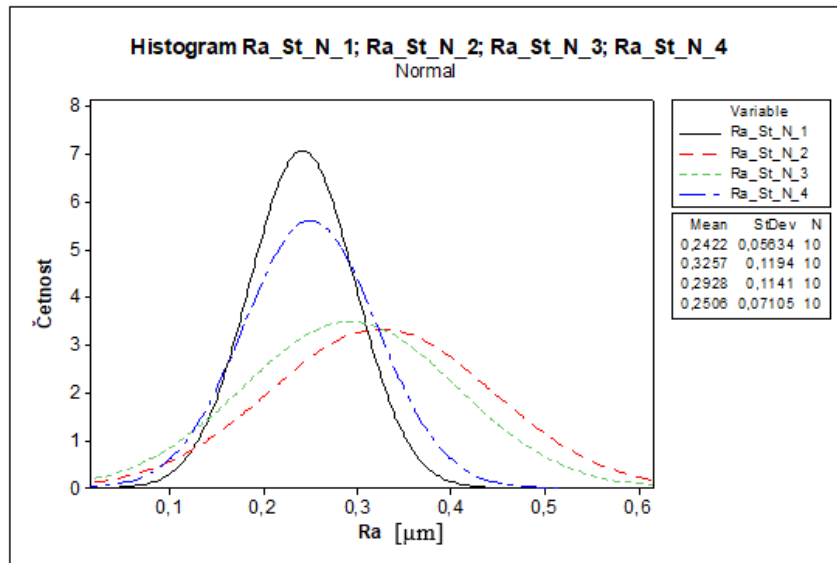
Obrázek 34 Histogram parametru Rz malého použitého kola



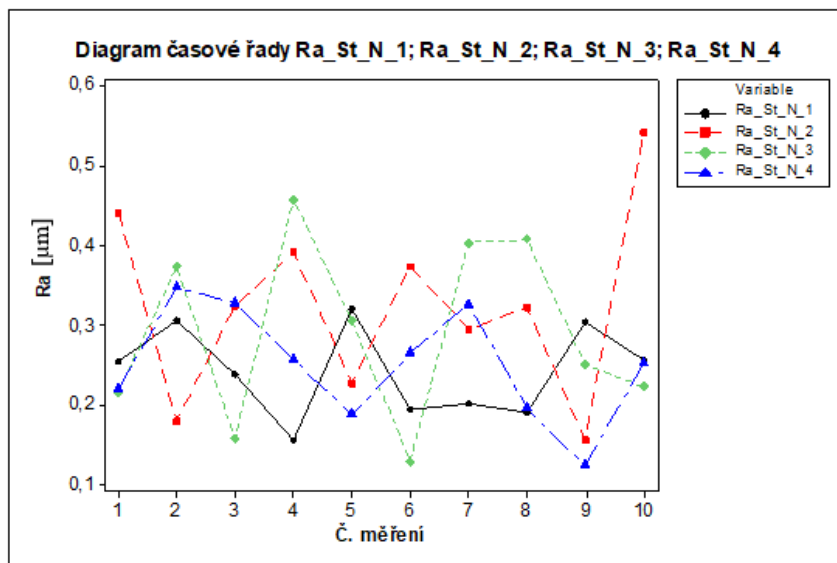
Obrázek 35 Diagram časové řady parametru Rz malého použitého kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Rz malého nového kola. Největší hodnota největší výšky profilu vykazovalo místo č. 4 ($Rz = 8,872 \mu\text{m}$) a č. 1 ($Rz = 8,613 \mu\text{m}$). Nejmenší hodnotu Rz vykazují místa č. 3 ($Rz = 6,930 \mu\text{m}$) a č. 2 ($Rz = 7,235 \mu\text{m}$).

7.6.5 Porovnání parametru Ra pro střední ozubené kolo nové



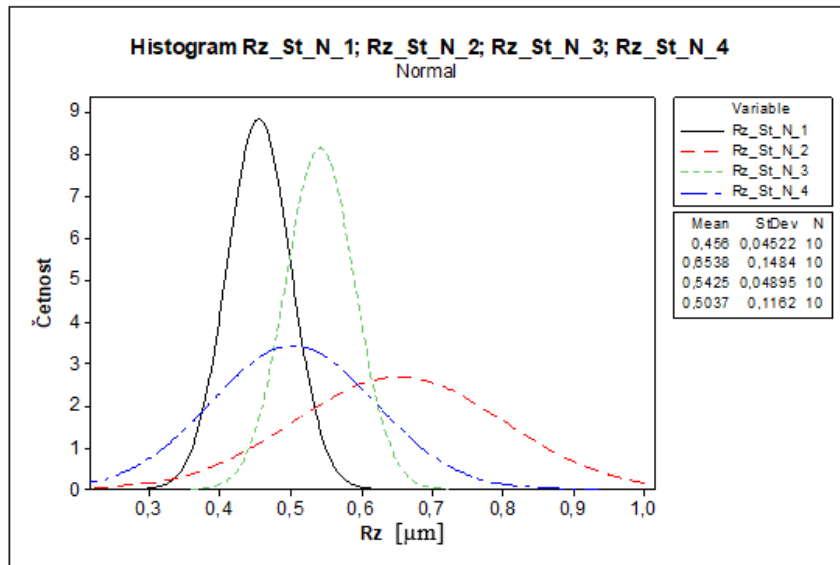
Obrázek 36 Histogram parametru Ra středního nového kola



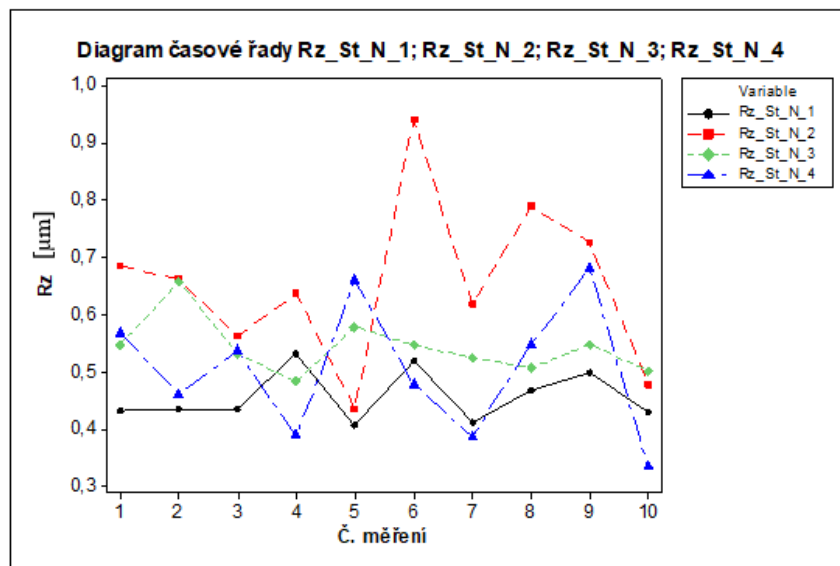
Obrázek 37 Digram časové řady parametru Ra středního nového kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Ra středně velkého nového kola. Podobnou drsnost vykazují části plochy ozubeného kola č. 1 ($Ra = 2,422 \mu\text{m}$) a č. 4 ($Ra = 0,251 \mu\text{m}$). Protilehlé plochy vykazují vyšší drsnost a to u č. 2 drsnost $Ra = 0,326 \mu\text{m}$ a u č. 3 $Ra = 0,293 \mu\text{m}$.

7.6.6 Porovnání parametru Rz pro střední ozubené kolo nové



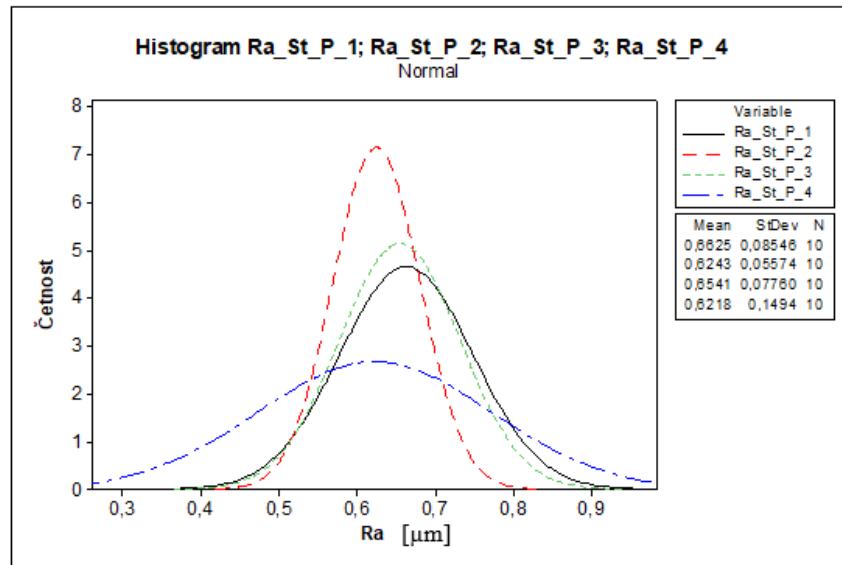
Obrázek 38 Histogram parametru Rz středního nového kola



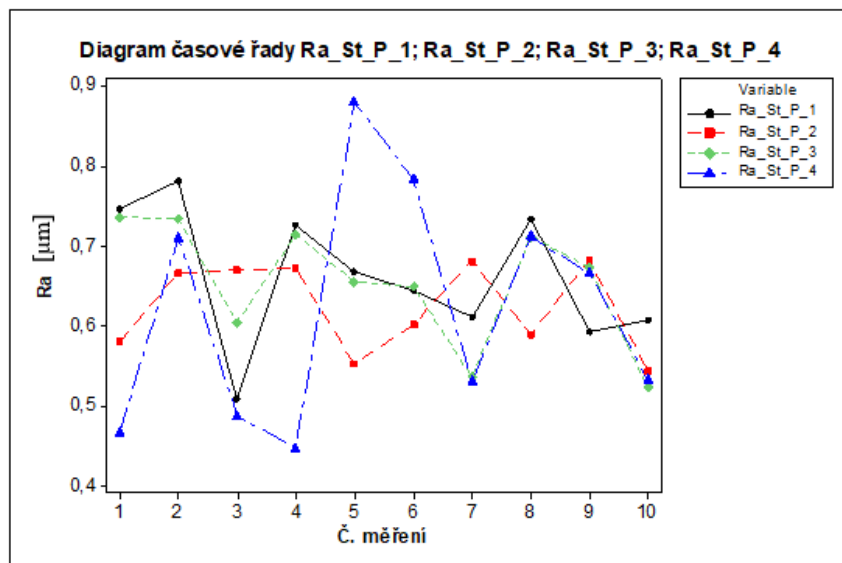
Obrázek 39 Digram časové řady parametru Rz středního nového kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Rz středně velkého nového kola. Největší hodnota největší výšky profilu vykazovalo místo č. 1 ($Rz = 0,456$) a č. 3 ($Rz = 0,543$). Nejmenší hodnotu Rz vykazují místa č. 2 ($Ra = 7,235$) a č. 3 ($Rz = 6,930$).

7.6.7 Porovnání parametru Ra pro střední ozubené kolo použité



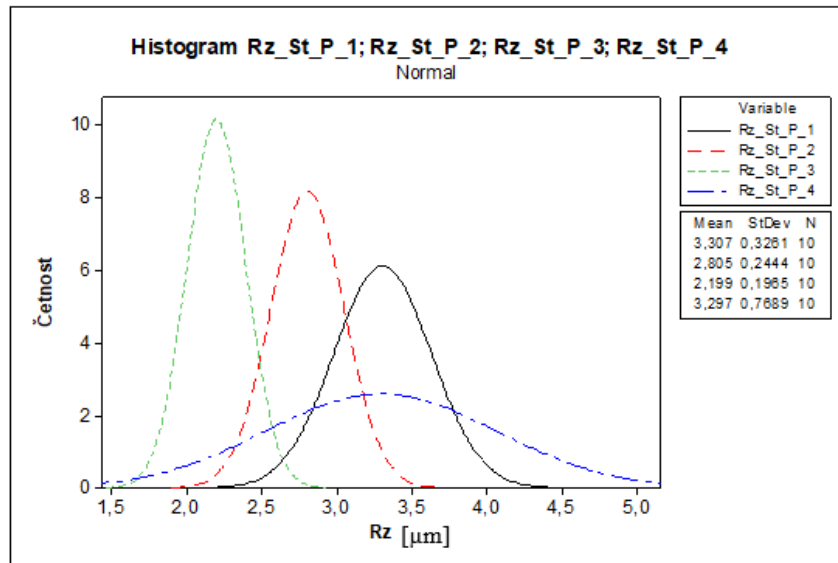
Obrázek 40 Histogram parametru Ra středního použitého kola



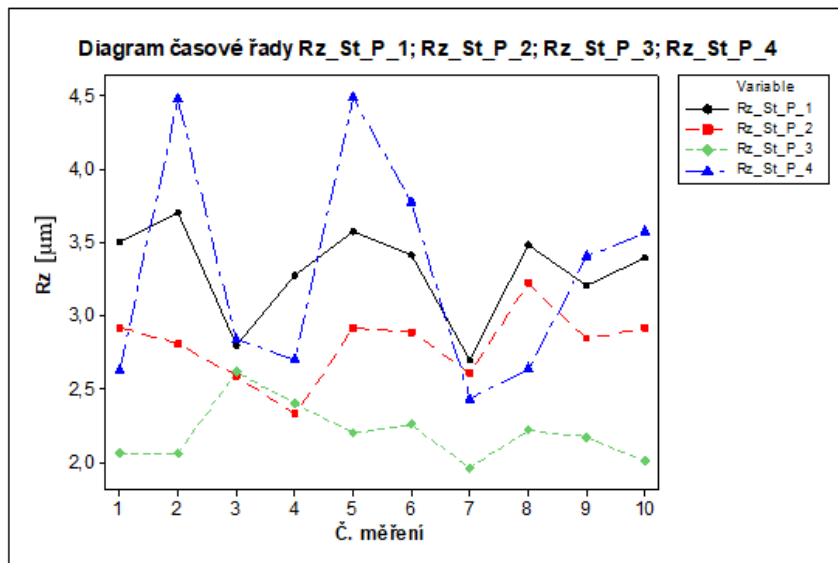
Obrázek 41 Diagram časové řady parametru Ra středního použitého kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Ra středně velkého použitého kola. Drsnost těchto vybraných ploch na středně velkém kole vykazují podobnou drsnost v rozmezí $Ra = 0,622 \mu\text{m}$ (č. 2) až $Ra = 0,663 \mu\text{m}$ (č. 1).

7.6.8 Porovnání parametru Rz pro střední ozubené kolo použité



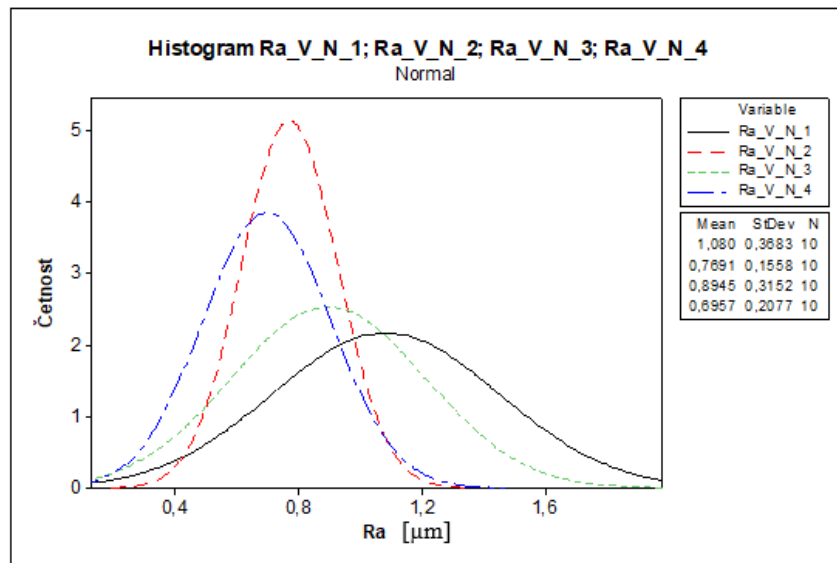
Obrázek 42 Histogram parametru Rz středního použitého kola



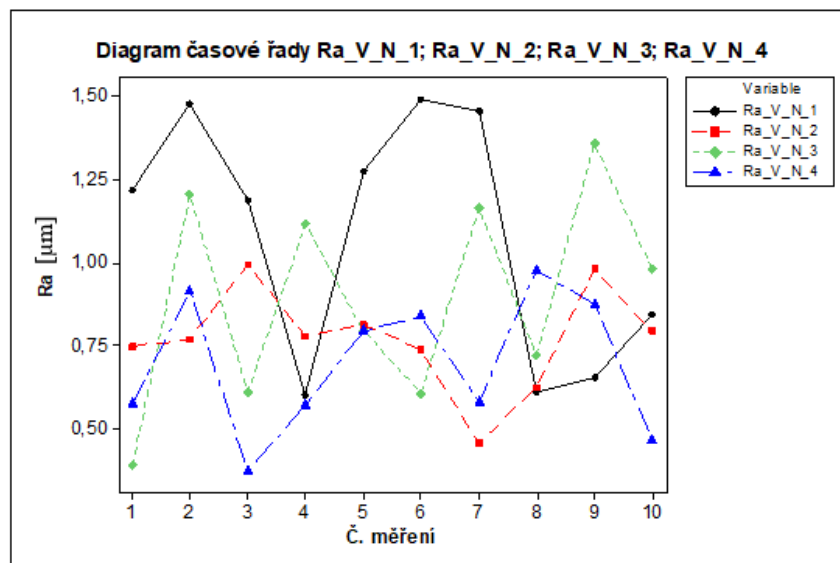
Obrázek 43 Diagram časové řady parametru Rz středního použitého kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Rz středně velkého použitého kola. Nejmenší hodnota největší výšky profilu vykazovalo místo č. 3 ($Rz = 2,199 \mu m$).

7.6.9 Porovnání parametru Ra pro velké ozubené kolo nové



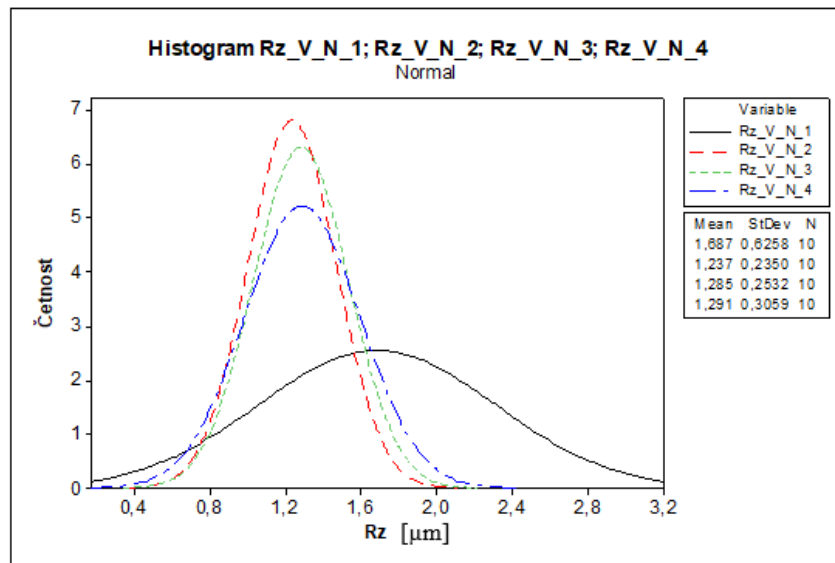
Obrázek 44 Histogram parametru Ra velkého nového kola



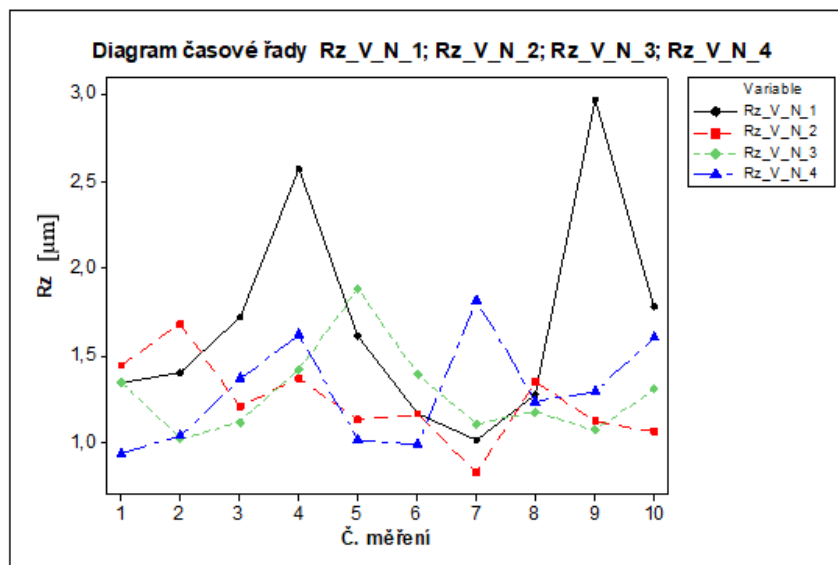
Obrázek 45 Diagram časové řady parametru Ra velkého nového kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Ra velkého nového kola. Drsnost tohoto kola dosahuje až $Ra = 1,080 \mu\text{m}$ na vybrané ploše č. 1. Druhá největší drsnost byla naměřena na části č. 3 ($Ra = 0,895 \mu\text{m}$). Nejmenší Ra vykazovala část č. 4 ($Ra = 0,696 \mu\text{m}$).

7.6.10 Porovnání parametru Rz pro velké ozubené kolo nové



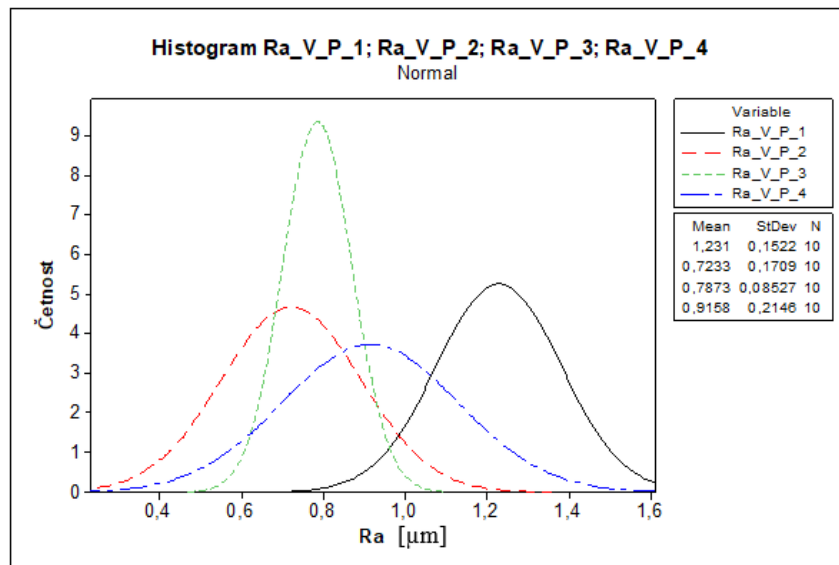
Obrázek 46 Histogram parametru Rz velkého nového kola



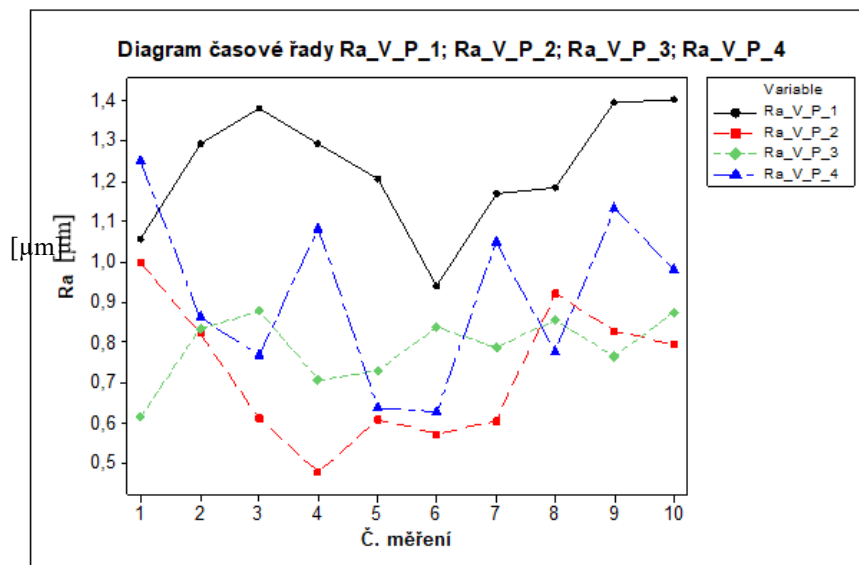
Obrázek 47 Diagram časové řady parametru Rz velkého nového kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Rz velkého nového kola. Podobné hodnoty největší výšky profilu vykazovalo místo č. 2 ($Rz = 1,237 \mu\text{m}$), č. 3 ($Rz = 1,285 \mu\text{m}$) a č. 4 ($Rz = 1,291 \mu\text{m}$). Plocha označena č. 1 vykazovala největší hodnotu největší výšky profilu $Rz = 1,887 \mu\text{m}$.

7.6.11 Porovnání parametru Ra pro velké ozubené kolo použité



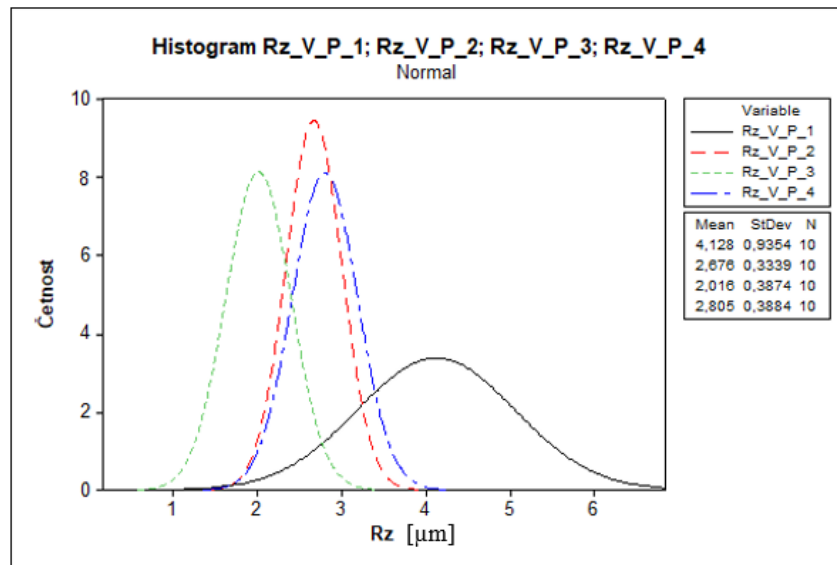
Obrázek 48 Histogram parametru Ra velkého použitého kola



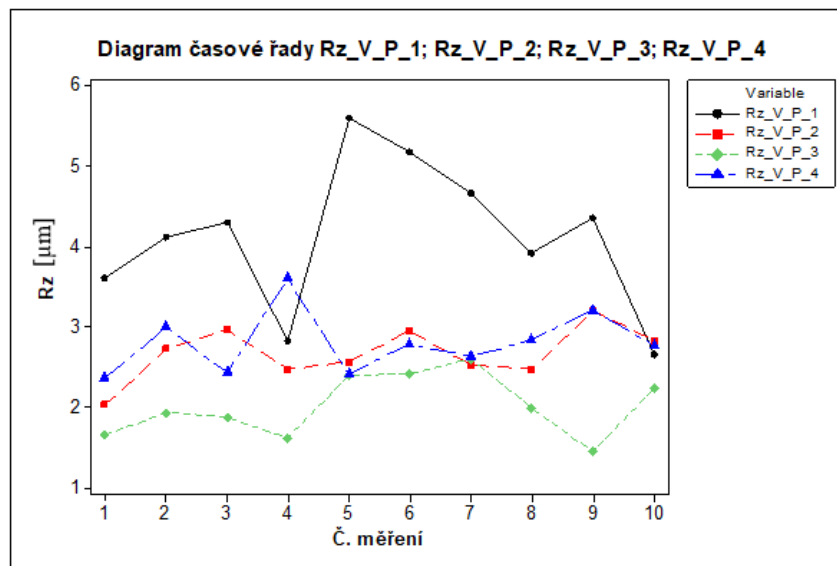
Obrázek 49 Diagram časové řady parametru Ra velkého použitého kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Ra velkého použitého kola. Drsnost tohoto kola dosahuje až $Ra = 1,231 \mu\text{m}$ na vybrané ploše č. 1. Druhá největší drsnost byla naměřena na části č. 4 ($Ra = 0,916 \mu\text{m}$). Nejmenší Ra vykazovala část č. 2 ($Ra = 0,723 \mu\text{m}$).

7.6.12 Porovnání parametru Rz pro velké ozubené kolo použité



Obrázek 50 Histogram parametru Rz velkého použitého kola



Obrázek 51 Diagram časové řady parametru Rz velkého použitého kola

Na histogramu lze pozorovat parametr drsnosti povrchu Rz velkého použitého kola. Podobné hodnoty největší výšky profilu vykazovalo místo č. 2 ($Rz = 2,676 \mu\text{m}$) a č. 4 ($Rz = 2,805 \mu\text{m}$). Plocha označena č. 1 vykazovala největší hodnotu největší výšky profilu $Rz = 4,128 \mu\text{m}$. Naopak na místě č. 3 byla naměřena největší výška profilu $Rz = 2,016 \mu\text{m}$.

7.7 ANOVA

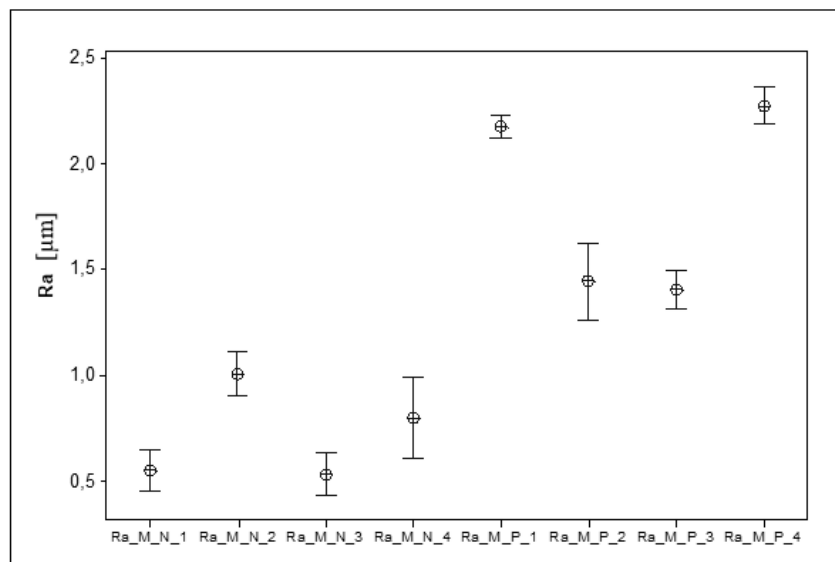
Na posouzení podobnosti drsností byla zpracována jednocestná ANOVA programu MINITAB 14. Pro porovnání bylo použito 10 řezů ve čtyřech místech plochy nového a použitého ozubeného kola. Parametry testu jsou stanoveny na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Dále byla stanovena nulová hypotéza o podobnosti rozptylů. Naproti H_0 byla stanovena hypotéza alternativní, minimálně jeden z rozptylů se statisticky významně liší. Pro názornost byly vytvořeny intervalové grafy.

7.7.1 ANOVA - Ra malého nového a použitého ozubeného kola

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	7	32,5312	4,6473	156,77	0,000
Error	72	2,1344	0,0296		
Total	79	34,6655			

S = 0,1722 R-Sq = 93,84% R-Sq(adj) = 93,24%

Level	N	Mean	StDev	
Ra_M_N_1	10	0,5486	0,1348	(-*-)
Ra_M_N_2	10	1,0062	0,1449	(-*-)
Ra_M_N_3	10	0,5301	0,1400	(--*-)
Ra_M_N_4	10	0,7972	0,2749	(-*-)
Ra_M_P_1	10	2,1789	0,0805	(--*-)
Ra_M_P_2	10	1,4457	0,2574	(-*-)
Ra_M_P_3	10	1,4041	0,1232	(-*-)
Ra_M_P_4	10	2,2786	0,1221	(--*-)



Obrázek 52 Intervalový graf pro parametr Ra malého kola

Hodnota P = 0,000 udává podobnost souborů sledovaných parametrů. Hypotéza nulová je tedy zamítnuta ve prospěch hypotézy alternativní na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

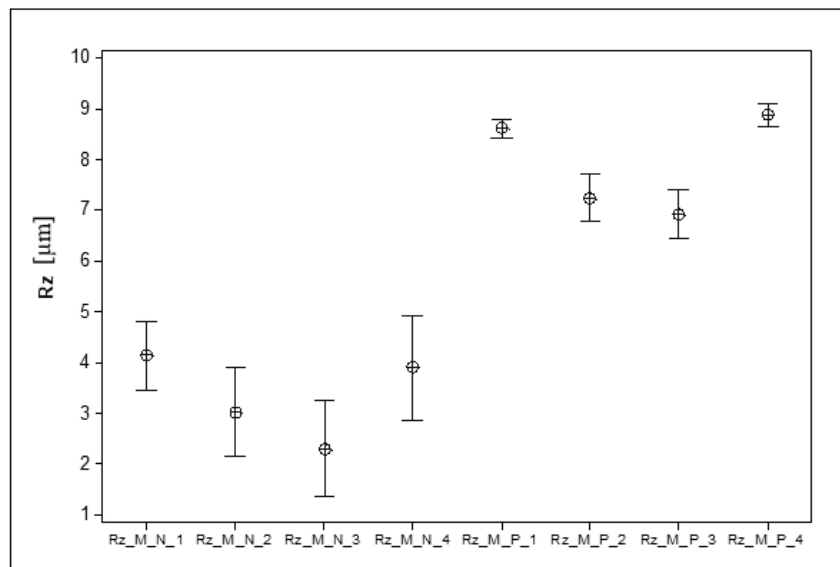
Pomocí ANOVY byla zjištěna odlišnost souborů, pro názornost odlišností byl zpracován intervalový graf, na kterém lze pozorovat různé drsnosti na místech plochy malého ozubeného kola. Použité kolo vykazuje místech č. 1 a č. 4. výrazně vyšší hodnotu parametru Ra oproti místu č. 2 a č. 3.

7.7.2 ANOVA - Rz malého nového a použitého ozubeného kola

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	7	467,267	66,752	72,57	0,000
Error	72	66,230	0,920		
Total	79	533,497			

S = 0,9591 R-Sq = 87,59% R-Sq(adj) = 86,38%

Level	N	Mean	StDev
Rz_M_N_1	10	4,1289	0,9619
Rz_M_N_2	10	3,0278	1,2479
Rz_M_N_3	10	2,3052	1,3290
Rz_M_N_4	10	3,9049	1,4301
Rz_M_P_1	10	8,6131	0,2633
Rz_M_P_2	10	7,2347	0,6669
Rz_M_P_3	10	6,9297	0,6826
Rz_M_P_4	10	8,8717	0,2914



Obrázek 53 Intervalový graf pro parametr malého kola

Hodnota P = 0,000 udává podobnost souborů sledovaných parametrů. Hypotéza nulová je tedy zamítnuta ve prospěch hypotézy alternativní na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

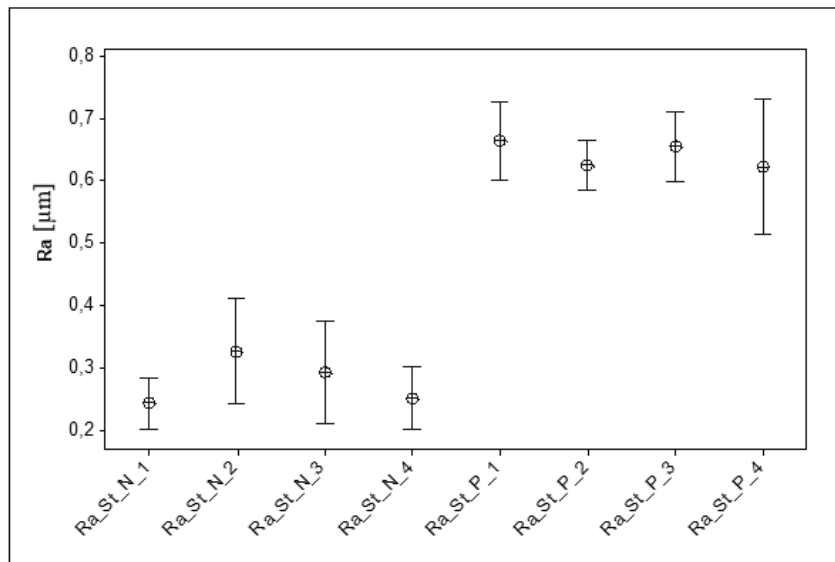
Pomocí ANOVY byla zjištěna odlišnost souborů, pro názornost odlišností byl zpracován intervalový graf, na kterém lze pozorovat různé drsnosti na místech plochy malého ozubeného kola. Použité kolo vykazuje větší parametr drsnost Rz oproti ploše kola nového.

7.7.3 ANOVA - Ra středního nového a použitého ozubeného kola

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	7	2,69128	0,38447	41,42	0,000
Error	72	0,66840	0,00928		
Total	79	3,35968			

S = 0,09635 R-Sq = 80,11% R-Sq(adj) = 78,17%

Level	N	Mean	StDev	
Ra_St_N_1	10	0,24220	0,05634	(---*---)
Ra_St_N_2	10	0,32570	0,11941	(---*---)
Ra_St_N_3	10	0,29280	0,11413	(---*---)
Ra_St_N_4	10	0,25060	0,07105	(---*---)
Ra_St_P_1	10	0,66250	0,08546	(---*---)
Ra_St_P_2	10	0,62430	0,05574	(---*---)
Ra_St_P_3	10	0,65410	0,07760	(---*---)
Ra_St_P_4	10	0,62180	0,14942	(---*---)



Obrázek 54 Intervalový graf pro parametr středního kola

Hodnota $P = 0,000$ udává podobnost souborů sledovaných parametrů. Hypotéza nulová je tedy zamítnuta ve prospěch hypotézy alternativní na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

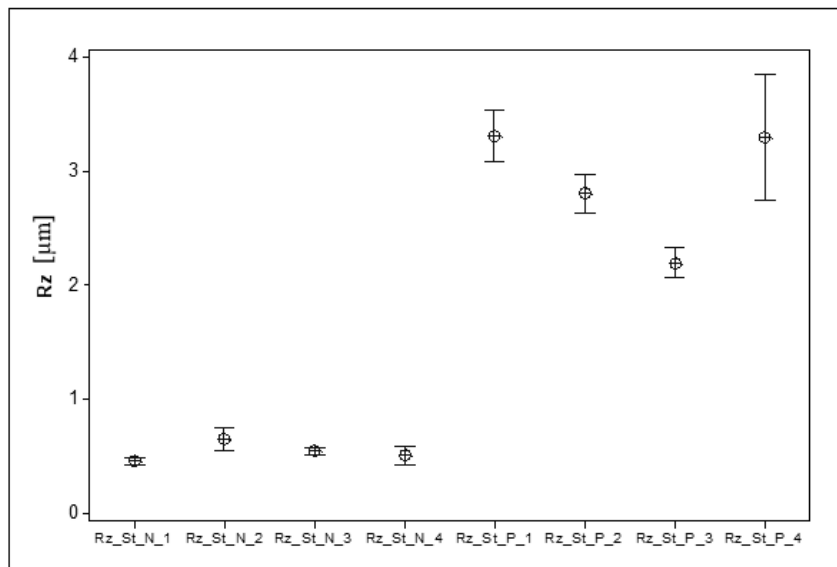
Pomocí ANOVY byla zjištěna odlišnost souborů, pro názornost odlišností byl zpracován intervalový graf, na kterém lze pozorovat různé drsnosti na místech plochy ozubeného středně velkého kola. Na ploše celého nového ozubeného kola byla naměřena podobná hodnota parametru Ra. Podobnou, ale vyšší, drsnost vykazují i 4 místa použitého ozubeného kola.

7.7.4 ANOVA - Rz středního nového a použitého ozubeného kola

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	7	2,69128	0,38447	41,42	0,000
Error	72	0,66840	0,00928		
Total	79	3,35968			

S = 0,09635 R-Sq = 80,11% R-Sq(adj) = 78,17%

Level	N	Mean	StDev	
Ra_St_N_1	10	0,24220	0,05634	(---*---)
Ra_St_N_2	10	0,32570	0,11941	(---*---)
Ra_St_N_3	10	0,29280	0,11413	(---*---)
Ra_St_N_4	10	0,25060	0,07105	(---*---)
Ra_St_P_1	10	0,66250	0,08546	(---*---)
Ra_St_P_2	10	0,62430	0,05574	(---*---)
Ra_St_P_3	10	0,65410	0,07760	(---*---)
Ra_St_P_4	10	0,62180	0,14942	(---*---)



Obrázek 55 Intervalový graf pro parametr Rz středního kola

Hodnota P = 0,000 udává podobnost souborů sledovaných parametrů. Hypotéza nulová je tedy zamítnuta ve prospěch hypotézy alternativní na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

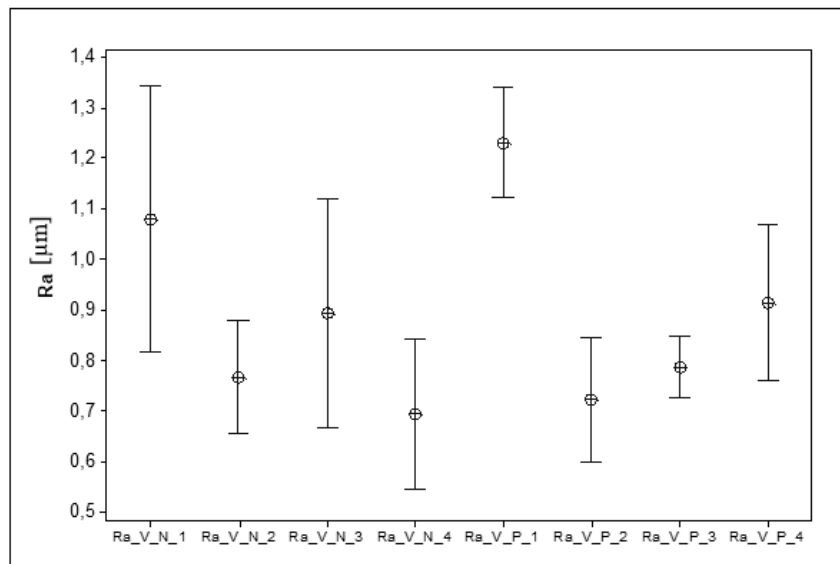
Pomocí ANOVY byla zjištěna odlišnost souborů, pro názornost odlišností byl zpracován intervalový graf, na kterém lze pozorovat různé drsnosti na místech plochy ozubeného kola. Hodnoty Rz na novém ozubeném kole mají malou odlišnost, naopak na použitém kole parametr Rz vzrostl výrazně a hodnoty na použitém kole nejsou příliš shodné.

7.7.5 ANOVA - Ra velkého nového a použitého ozubeného kola

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	7	2,4393	0,3485	6,83	0,000
Error	72	3,6725	0,0510		
Total	79	6,1118			

S = 0,2258 R-Sq = 39,91% R-Sq(adj) = 34,07%

Level	N	Mean	StDev
Ra_V_N_1	10	1,0804	0,3683
Ra_V_N_2	10	0,7691	0,1558
Ra_V_N_3	10	0,8945	0,3152
Ra_V_N_4	10	0,6957	0,2077
Ra_V_P_1	10	1,2311	0,1522
Ra_V_P_2	10	0,7233	0,1709
Ra_V_P_3	10	0,7873	0,0853
Ra_V_P_4	10	0,9158	0,2146



Obrázek 56 Intervalový graf pro parametr Ra velkého kola

Hodnota $P = 0,000$ udává podobnost souborů sledovaných parametrů. Hypotéza nulová je tedy zamítnuta ve prospěch hypotézy alternativní na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

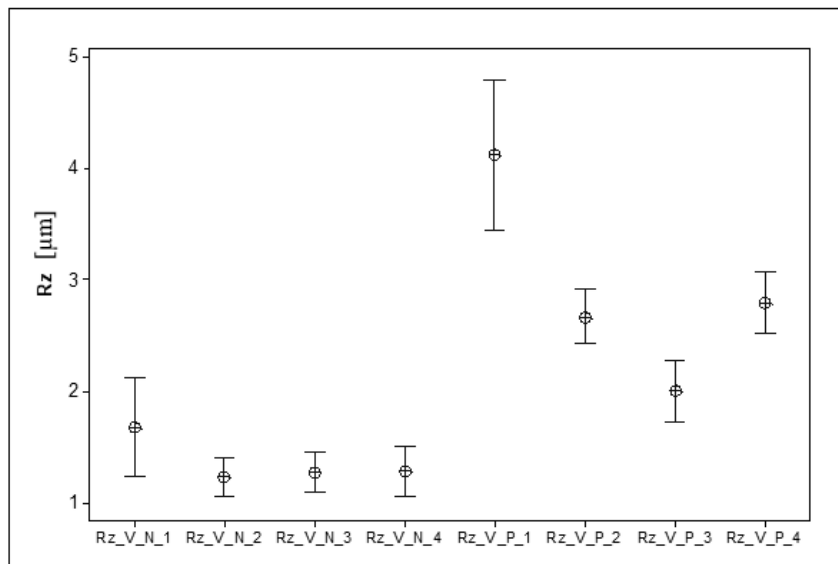
Pomocí ANOVY byla zjištěna odlišnost souborů, pro názornost odlišností byl zpracován intervalový graf, na kterém lze pozorovat různé drsnosti na místech plochy velkého ozubeného kola. Parametr drsnosti Ra na novém i použitém kole je podobný s velkým rozptylem hodnot.

7.7.6 ANOVA - Rz velkého nového a použitého ozubeného kola

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	7	71,661	10,237	43,29	0,000
Error	72	17,028	0,237		
Total	79	88,689			

S = 0,4863 R-Sq = 80,80% R-Sq(adj) = 78,93%

Level	N	Mean	StDev	
Rz_V_N_1	10	1,6873	0,6258	(--*--)
Rz_V_N_2	10	1,2374	0,2350	(--*--)
Rz_V_N_3	10	1,2850	0,2532	(--*--)
Rz_V_N_4	10	1,2912	0,3059	(--*--)
Rz_V_P_1	10	4,1275	0,9354	(--*--)
Rz_V_P_2	10	2,6755	0,3339	(--*--)
Rz_V_P_3	10	2,0158	0,3874	(--*--)
Rz_V_P_4	10	2,8053	0,3884	(--*--)



Obrázek 57 Intervalový graf pro parametr Rz velkého kola

Hodnota $P = 0,000$ udává podobnost souborů sledovaných parametrů. Hypotéza nulová je tedy zamítnuta ve prospěch hypotézy alternativní na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

Pomocí ANOVY byla zjištěna odlišnost souborů, pro názornost odlišností byl zpracován intervalový graf, na kterém lze pozorovat různé drsnosti na místech plochy velkého ozubeného kola. Parametr drsnosti Rz na novém vykazuje nižší hodnoty, než u kola použitého. V jednom místě (č. 1) použitého kola je parametr Rz výrazně vyšší oproti ostatním.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl návrh statistického hodnocení povrchu vyrobených ozubených kol převodovky s předepsanými požadavky na jakost povrchu a porovnání pomocí vícerozměrné statistiky s totožnými koly po absolvovaném závodě.

V teoretické části diplomové práce byly popsány způsoby skenování povrchu ve 2D a 3D, parametry pro hodnocení jakosti povrchu s náležitými normami, matematicko-statistické metody pro analýzu naměřených dat a vícerozměrnou statistickou analýzou. Na závěr byla okrajově přiblížena výroba a zpracování kol s požadovaným typem ozubením.

V praktické části byla naměřeny parametry drsnosti ozubených kol pomocí 3D profilometru ZIGO New Wiew 8000. Hodnocené parametry Ra a Rz byly podrobeny exploratorní datové analýze a následně hodnoceny pomocí metody ANOVA.

Pomocí exploratorní datové analýzy byly soubory dat podrobeny Anderson-Darlingovému testu normality a Grubbsovou metodou odhalení odlehlých hodnot. Z těchto testů vyplývá, že data pocházejí z normálního rozdělení a neobsahují odlehlé hodnoty jež by bylo nutné vyřadit ze souboru. Z histogramů je patrné, že na jednom ozubeném kole jsou v různých místech naměřeny odlišné drsnosti parametru Ra i Rz. Bylo zjištěno, že častým jevem jsou dva soubory dat drsnosti podobnější oproti souborům na protilehlé straně ozubeného kola. Tento jev může být způsoben již výrobní vadou a to házivostí kol. Tato vada se pak na použitých kolech projevila výrazněji na opotřebení.

Metodou ANOVA byla zjištěna odlišnost souborů parametrů Ra na nových a použitých kolech příslušné velikosti. Pro znázornění podobnosti souborů byly zpracovány intervalové grafy, na kterých lze sledovat vliv opotřebení na parametry Ra a Rz.

Na základě výsledků statistické a grafické analýzy lze tvrdit, že opotřebení kol má značný vliv na jakost povrchu. V případě středně velkého kola vykazovalo měření nižší parametr drsnosti, než je požadováno výkresovou dokumentací dílu i kolo opotřebené. U velkého kola lze uvažovat o tom, že se jedná o kolo repasované, protože se drsnost na novém a použitém kole příliš neliší. Ovšem ani nové kolo nedosahuje požadovaných vlastností jakosti povrchu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LEACH. *Introduction to Surface Topography* [online]. Berlin, 2013. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-36458-7_1
- [2] STOUT, KEN J; BLUNT, LIAM. *Three Dimensional Surface Topography*. London, 2000. ISBN 9781857180268.
- [3] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0672-x.
- [4] Stylus Profilometry. *NanoScienceInstruments* [online]. 2012. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/optical-profilometry/stylus/>
- [5] *Surface roughness measurement of additive manufactured parts using focus variation microscopy and structured light system* [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/331984194>
- [6] YI ZHENG. *Similarity evaluation of topography measurement results by different optical metrology technologies for additive manufactured parts* [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143816619308991>
- [7] ŁUKIANOWICZ. *OPTICAL SYSTEM FOR MEASUREMENT OF SURFACE FORM AND ROUGHNESS* [online]. 2001. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/283438034>
- [8] ČSN EN ISO 4287 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda Termíny, definice, a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [9] WHITEHOUSE, David. *Surfaces and their Measurement*. 2002. Butterworth-Heinemann. ISBN 9780080518237.

- [10] GÖRÖG, A., SAMARDŽIOVÁ, M. *Metrology and quality of technological processes*. Trnava, 2016. ISBN 978-80-8096-225-8.
- [11] ČSN EN ISO 25178-2 *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [12] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2196-8.
- [13] PATA, Vladimír a Milena KUBIŠOVÁ. *Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2018. ISBN 978-80-7454-740-9
- [14] TRIPEPI, G. a KJ JAGER. *Linear and logistic regression analysis* [online]. 2008. Dostupné také z: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000254085100006>
- [15] MELOUN, M., J. MILITKÝ. *Statistická analýza experimentálních dat*. 2. Praha: Akademie věd České republiky, 2004. ISBN 80-200-1254-0.
- [16] ZDENĚK R. NEŠPOR. *Analýza statistická mnohorozměrná* [online]. Sociologický ústav AV ČR, 2017. Dostupné z: https://encyklopedie.soc.cas.cz/w/analyza_statisticka_mnohorozmerna
- [17] GALARNYK, Michael. *Understanding Boxplots* [online]. 2018. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/understanding-boxplots-5e2df7bcbd51>
- [18] United States Inflation Rate United States Inflation Rate [online]. 2022. Dostupné z: <https://tradingeconomics.com/united-states/inflation-cpi>
- [19] WHITEHOUSE, David. *Handbook of surface and nanometrology*. 2. CRC Press, 2011, 999 s. ISBN 978-142-0082-012.
- [20] PATA, Vladimír. *Přednášky Statistické zpracování naměřených dat*

- [21] JÄNTSCHI, Lorentz a Sorana D. BOLBOACĂ. *Computation of Probability Associated with Anderson–Darling Statistic. Mathematics* [online]. 2018. Dostupné z: doi:10.3390/math6060088
- [22] SHIRYAEVA, L. K. *On distribution of Grubbs' statistics in case of normal sample with outlier. Russian Mathematics* [online]. 2017. ISSN 1066-369X. Dostupné z: doi:10.3103/S1066369X17040107
- [23] SOUKUP, Petr. *Nesprávná užívání statistické významnosti a jejich možná řešení* [online]. Fakulta sociálních věd, Univerzita Karlova v Praze 2010, 77 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <http://dav.soc.cas.cz/issue/3-data-a-vyzkum-2-2010/6>
- [24] HARRELL, Frank E. *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic and Ordinal Regression, and Survival Analysis*. Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-19425-7.
- [25] PATA, Vladimír. *Moderní způsoby hodnocení drsnosti strojírenských povrchů na bázi matematické statistiky*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, [2019]. 62 s. ISBN 978-80-7454-829-1
- [26] BAUCKHAGE, Ch. a T. DONG. *A Tutorial on Principal Component Analysis* [online]. University of Bonn. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/326541038>
- [27] BOCK, Tim. *What is a Dendrogram?* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.displayr.com/what-is-dendrogram/>
- [28] TARLOW, Kevin R. *Teaching principles of inference with ANOVA* [online]. 2015 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: doi:doi/10.1111/test.12085
- [29] ČSN EN ISO 4288 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Český normalizační institut, 1999.

- [30] ČSN EN ISO 12085 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Parametry metody motif*. Český normalizační institut, 1999.
- [31] DWIVEDI, Kamal. *Different Types of Gears and Their Uses* [online]. 2021 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.mechical.com/2021/04/types-of-gears.html>
- [32] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. 5. přeprac. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-030-0426-8
- [33] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*, 2005. ISBN 978-80-7183-337-6
- [34] BRYNJOLFSSON, Erik. *Druhý věk strojů: práce, pokrok a prosperita v éře špičkových technologií*. V Brně: Jan Melvil Publishing, 2015. Pod povrchem. ISBN 978-80-87270-71-4
- [35] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2
- [36] MRKVICA, Ivan. *Speciální technologie: výroba ozubených kol I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-1931-0
- [37] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění: výroba ozubených kol I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8
- [38] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. Vyd. 5. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-839-7.
- [39] ZYGO *New View 8000* [online]. Connecticut: Metek, 2015. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/data/ke-stazeni/NewView%208000%20Bro%C5%BEura-d573.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Plocha
ANOVA	Analysis of variance
CLA	Chromatic Lenght Aberration
Cr	Chrom
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
H ₀	Hypotéza nulová
H _A	Hypotéza alternativní
HRC	Jednotka tvrdosti
IQR	Interkvartilové rozpětí
ISO	Mezinárodní norma
l	Délka
ln	Vyhodnocovaná délka
lp	Základní délka
m.s ⁻¹	Metry za sekundu
mm	Milimetry
Mo	Molybden
N	Počet
Ni	Nikl
P	Hodnota
PCA	Principal Component Analysis
Pmr	Materiálový poměr profilu vypočítaný ze základního profilu
PSm	Průměrná šířka prvků profilu vypočítaná ze základního profilu
Pz	Největší výška profilu vypočítaná z profilu drsnosti
Q1	Dolní (první) kvartil

Q2	Druhý kvartil
Q3	Horní kvartil
Ra	Střední odchylka profilu
Rc	Průměrná výška profilu
Rku	Špičatost profilu
Rmr	Materiálový poměr profilu vypočítaný z profilu drsnosti
Rp	Největší výška výstupku profilu
Rq	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
Rt	Celková výška profilu
Rv	Hloubka největší prohlubně profilu
Rz	Největší výška profilu
Sa	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
Sal	Délka autokorelace
Sdq	Základ průměrného čtverce gradientu
Sdr	Poměr rozvinuté mezifázové plochy
Sku	Špičatost
Smc	Opačný poměr plochy materiálu omezené stupnicí povrchu
Smr	Poměr plochy materiálu omezené stupnicí povrchu
Sp	Maximální výška píku
Sq	Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
Ssk	Šikmost
Std	Směr textury omezené stupnice povrchu
Str	Poměr aspektu textury
Vm	Objem materiálu
Wmr	Materiálový poměr profilu vypočítaný z profilu vlnitosti
Wz	Největší výška profilu

X	Osa X
x	Proměnná
Xs	Šířka prvku profilu
Y	Osa Y
Z	Osa Z
Zp	Největší výška
Zt	Průměrná hodnota výšek
Zv	Největší hloubka
α	Hladina významnosti
β	Beta
λ	Vlnová délka
λ_c	Filtr profilu rozhraní mezi drsností a vlnitostí
λ_f	Filtr profilu rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln
λ_s	Filtr profilu rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln
ξ	Náhodný skalár
σ	Sigma
%	Procento
<	Menší
\neq	Nerovná se
>	Větší
$\sqrt{\quad}$	Odmocnina
\int	Integrál
$^\circ$	Stupeň
μm	Mikrometry
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma kontaktního profilometru [4]	13
Obrázek 2 Shéma laserového bezkontaktního měření drsnosti povrchu [7].....	14
Obrázek 3 Profil povrchu [8]	17
Obrázek 4 Přenosová charakteristika profilových filtrů [8]	17
Obrázek 5 Drsnost povrchu [9].....	18
Obrázek 6 Profil vlnitosti povrchu [9]	18
Obrázek 7 Tvar profilu povrchu s odfiltrovanou drsností a vlnitostí [9].....	18
Obrázek 8 Parametr střední čáry [9]	19
Obrázek 9 Největší výška profilu [8].....	20
Obrázek 10 Různé tvary profilu se stejnou hodnotou Ra [10]	20
Obrázek 11 Znázornění základní délky [8].....	21
Obrázek 12 Křivka materiálového poměru [8]	22
Obrázek 13 Příklad použití časové řady – míra inflace v závislosti na čase [18].....	27
Obrázek 14 Výsledek testu hypotéz [20]	29
Obrázek 15 Schéma analýzy PCA [12]	31
Obrázek 16 Data seskupeny do dendogramu [27]	32
Obrázek 17 Typy ozubených kol [32]	37
Obrázek 18 Drsnost povrchu ozubených kol dle typu zpracování [38].....	42
Obrázek 19 Profilometr Zygo [39]	46
Obrázek 20 Označené ozubené kolo	47
Obrázek 21 3D model povrchu	47
Obrázek 22 Profil řezu naskenované 3D plochy s naměřenými parametry.....	48
Obrázek 23 Část výkresové dokumentace malého ozubeného kola	48
Obrázek 24 Část výkresové dokumentace středního ozubeného kola	49
Obrázek 25 Část výkresové dokumentace velkého ozubeného kola	49
Obrázek 26 Sumarizace souboru dat parametru Ra na malém použitém kole	52
Obrázek 27 Diagram odlehlých hodnot parametru Ra na malém použitém kole.....	53
Obrázek 28 Histogram parametru Ra malého nového kola	56
Obrázek 29 Digram časové řady parametru Ra malého nového kola.....	56
Obrázek 30 Histogram parametru Rz malého nového kola	57
Obrázek 31 Digram časové řady parametru Rz malého nového kola.....	57
Obrázek 32 Histogram parametru Ra malého použitého kola	58
Obrázek 33 Digram časové řady parametru Ra malého použitého kola.....	58
Obrázek 34 Histogram parametru Rz malého použitého kola	59

Obrázek 35 Digram časové řady parametru Rz malého použitého kola.....	59
Obrázek 36 Histogram parametru Ra středního nového kola.....	60
Obrázek 37 Digram časové řady parametru Ra středního nového kola	60
Obrázek 38 Histogram parametru Rz středního nového kola.....	61
Obrázek 39 Digram časové řady parametru Rz středního nového kola	61
Obrázek 40 Histogram parametru Ra středního použitého kola.....	62
Obrázek 41 Digram časové řady parametru Ra středního použitého kola	62
Obrázek 42 Histogram parametru Rz středního použitého kola.....	63
Obrázek 43 Digram časové řady parametru Rz středního použitého kola	63
Obrázek 44 Histogram parametru Ra velkého nového kola	64
Obrázek 45 Digram časové řady parametru Ra velkého nového kola.....	64
Obrázek 46 Histogram parametru Rz velkého nového kola	65
Obrázek 47 Digram časové řady parametru Rz velkého nového kola.....	65
Obrázek 48 Histogram parametru Ra velkého použitého kola	66
Obrázek 49 Digram časové řady parametru Ra velkého použitého kola.....	66
Obrázek 50 Histogram parametru Rz velkého použitého kola	67
Obrázek 51 Digram časové řady parametru Rz velkého použitého kola.....	67
Obrázek 52 Intervalový graf pro parametr Ra malého kola	68
Obrázek 53 Intervalový graf pro parametr malého kola.....	69
Obrázek 54 Intervalový graf pro parametr středního kola.....	70
Obrázek 55 Intervalový graf pro parametr Rz středního kola	71
Obrázek 56 Intervalový graf pro parametr Ra velkého kola	72
Obrázek 57 Intervalový graf pro parametr Rz velkého kola	73

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Naměřené parametry Ra a Rz na malém novém kole.....	50
Tabulka 2 Naměřené parametry Ra a Rz na malém použitém kole.....	50
Tabulka 3 Naměřené parametry Ra a Rz na středně velkém novém kole	50
Tabulka 4 Naměřené parametry Ra a Rz na středně velkém použitém kole	51
Tabulka 5 Naměřené parametry Ra a Rz na velkém novém kole.....	51
Tabulka 6 Naměřené parametry Ra a Rz na velkém použitém kole.....	51
Tabulka 7 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz malého nového kola.....	53
Tabulka 8 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz malého použitého kola.....	54
Tabulka 9 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz středního nového kola	54
Tabulka 10 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz středního použitého kola	54
Tabulka 11 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz velkého nového kola.....	55
Tabulka 12 Eploratorní analýza parametrů Ra a Rz velkého použitého kola.....	55