



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Strojní fakulta

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Komplexní kontrola kvality geometrických specifikací produktu
s využitím CMM**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Václav Homoláč

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Praha 2015



Vysoká škola: ČVUT v Praze

Fakulta: strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Bc. Václava Homoláče

obor Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Komplexní kontrola kvality geometrických specifikací produktu s využitím CMM

Název anglicky: Comprehensive quality control of geometrical product specifications using CMM

Zásady pro vypracování:

1. Souřadnicová měřicí technika pro měření dílů s vysokými požadavky na přesnost.
2. Analýza praktických předpisů pro přejímku ozubení dle ISO/TR 10064.
3. Možnosti měření ozubení na CMM s využitím softwaru Gear PRO.
4. Analýza GPS vybrané komplexní součásti pro letecký průmysl.



Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval zcela samostatně a za odborného vedení vedoucího diplomové práce. Všechny informační zdroje, ze kterých bylo čerpáno, jsou citovány v práci a uvedeny v kapitole zdroje informací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dne

.....

podpis



Mé poděkování patří Ing. Liboru Beránkovi Ph.D za cenné rady ohledně psaní odborných prací, poskytnutí některých materiálů, vstřícnost a ochotu při pomoci s tvorbou této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za psychickou a finanční podporu po dobu mého studia a ještě pánům Ing. Petru Mikešovi a Robinu Vaškovi při realizaci měření.



Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na kontrolu kvality geometrických specifikací produktu s využitím souřadnicové měřicí techniky. V úvodní části je uveden základní soubor geometrických tolerancí s popisem souřadnicových měřicích strojů určených pro měření součástí, kde jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost. Následuje rozbor norem týkajících se měření ozubení. V další části je věnována pozornost softwaru určenému pouze pro měření ozubení. Cílem této práce byla analýza geometrických specifikací produktu používaného v leteckém průmyslu při rozdílném způsobu upnutí součástí. Analýza byla provedena na základě porovnání naměřených hodnot a koeficientů způsobilosti měřidla.

Klíčová slova: Souřadnicová měřicí technika (CMM), upnutí, GPS, koeficienty způsobilosti měřidla, Gear PRO.

Abstract

The thesis is focused on quality control geometrical product specifications using coordinate measuring machines. In the first part, the basic set of geometrical tolerances is introduced along with a description of coordinate measuring machines suitable for component measurements with high demands on accuracy. Consequently, standards related to the gear inspection issue are analyzed. The next part deals with software designated for gear inspection. The thesis in general is focused on analysis of geometric specifications of a product used in the aerospace industry in a different clamping of component. That was executed by comparing measured values and coefficients of gauge capability.

Key Words: Coordinate measuring machine (CMM), clamping, GPS, coefficients of gauge capability, Gear PRO.



Obsah

1. Úvod	8
2. Geometrické specifikace produktu (GPS)	9
3. Souřadnicová měřicí technika (CMM)	12
3.1. Druhy konstrukcí souřadnicových měřicích strojů.....	12
3.2. Snímací systémy souřadnicového měřicího stroje.....	13
3.3. CMM pro měření dílů s vysokými požadavky na přesnost.....	14
3.3.1. CMM stroje s vysokou přesností měření.....	14
3.3.2. Snímací systémy pro přesné měření.....	16
4. Definice a mezní úchytky vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola	18
4.1. Jednotlivé úchytky vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola.....	18
4.1.1. Úchytky roztečí	18
4.1.2. Úchytky sklonu zubu.....	19
4.1.3. Úchytky profilu	21
4.2. Soustava přesnosti ISO pro čelní ozubená kola.....	23
4.3. Rovnice pro výpočet tolerancí jednotlivých úchytek	24
4.4. Předpoklady pro měření.....	25
5. Analýza praktických předpisů pro přejímku ozubení dle ISO/TR 10064.....	27
5.1. Přejímka vztahující se k radiálním kinematickým úchytkám, obvodovému házení, tloušťce zubu a boční vůli	27
5.1.1. Měření radiálních kinematických úchytek	27
5.1.2. Měření obvodového házení	28
5.1.3. Měření tloušťky zubu, rozpětí a rozměru zubu nad kuličkami nebo válečky	31
5.2. Přejímka vztahující se k tělesům ozubených kol, osové vzdálenosti hřidelů	37
5.2.1. Přesnost polotovarů ozubených kol.....	37
5.2.2. Vztahy mezi výchozími a funkčními osami	37
5.3. Přejímka vztahující se k textuře povrchu a kontrolní předloze pro dotyk zubu	40
5.3.1. Definice parametrů textury povrchu	40
5.3.2. Termíny a značky uváděné ve výkresové dokumentaci.....	43
5.3.3. Měřicí zařízení.....	43
5.3.4. Měření drsnosti povrchu boků zubu ozubeného kola.....	46
5.3.5. Vyhodnocení výsledků měření.....	47
5.3.6. Přípustné hodnoty parametrů	47



5.4.	Přejímka vztahující pro hodnocení měřidel ozubených kol	49
5.4.1.	Postupy hodnocení souřadnicových měřicích strojů	49
6.	Softwarová podpora pro kontrolu ozubení	52
6.1.	Funkční rozsah kontroly v programu Gear Pro involute	53
6.2.	Příprava měření v programu Gear Pro involute.....	54
7.	Analýza GPS součásti z leteckého průmyslu	59
7.1.	Latecoere Czech Republic s.r.o.	59
7.1.1.	Výrobní program společnosti	60
7.2.	Postup tvorby plánu měření na CMM	62
7.2.1.	Popis součásti a rozbor měřených charakteristik z výkresové dokumentace.....	63
7.2.2.	Upnutí součásti	64
7.2.3.	Konfigurace snímacího systému	64
7.2.4.	Postup tvorby plánu měření.....	66
7.2.5.	Koeficienty způsobilosti měřidla	68
7.2.6.	Analýza měřených charakteristik	69
7.2.7.	Celkové zhodnocení výsledků.....	75
8.	Závěr	76



1. Úvod

Vzhledem k neustále rostoucím požadavkům na přesnost výrobků se zvyšuje intenzita rozvoje CNC obráběcích strojů, což s sebou nese i vyšší nároky na přesnou kontrolu kvality výroby. S tím souvisí nepřetržitý vývoj souřadnicové měřicí techniky, která musí s tímto trendem udržet krok. Složité díly, které jsou použity v automobilovém a leteckém průmyslu (např. skříně převodovek, lopatky turbín, ozubená kola, atd.), jsou vyráběny jako vysoce přesné komponenty s vysokými požadavky na geometrické tolerance. Nejefektivněji se tyto díly dají kontrolovat právě na souřadnicových měřicích strojích, které zaručují vysokou přesnost, rychlost a opakovatelnost měření.

V této diplomové práci se budu zabývat měřením víceúhlového drážkovaného hřídele používaného v leteckém průmyslu s následnou analýzou geometrických specifikací produktu. V úvodu práce uvedu základní systém geometrických tolerancí, včetně popisu možností dnešní souřadnicové měřicí techniky pro výrobky, na které jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost. Jelikož díl určený k analýze obsahuje nejen základní geometrii, ale i speciální geometrii (evolventní drážkování), na kterou se vztahují stejná pravidla jako na měření ozubení, bude následovat podrobný rozbor norem zaměřující se na problematiku měření ozubených kol. Jak už je zvykem, speciální geometrie vyžaduje speciální software, proto bude následovat popis softwaru určeného pro měření ozubení.

V praktické části provedu analýzu daného komponentu ve spolupráci s firmou Latecoere Czech Republic s.r.o. a s Měrovým střediskem Carl Zeiss při ČVUT. Analýza bude provedena na základě rozdílného upnutí a opakovaného měření. Následné výsledky a koeficienty způsobilosti měřidla budou pak vzájemně porovnány, neboť nesprávné upnutí může mít vliv jak na výsledek měření, tak i na celý výrobní proces podniku.



2. Geometrické specifikace produktu (GPS)

V celosvětově obchodně – průmyslové globalizaci roste potřeba jednotlivých základních požadavků na systém konstruování, výroby a ověřování výrobků. Existuje celá řada norem, které se týkají řetězce konstrukce – výroba – stanovení jednotných pravidel – ověření výsledků. Soubor norem s určitou návazností, který se vztahuje k výše uvedenému systému, se nazývá „Geometrical Product Specifications“ (Geometrické specifikace produktu se zkratkou GPS) [1].

Soustava GPS zahrnuje požadavky na rozměrové a geometrické (tvarové) tolerance výrobků, které jsou jednoznačně předepsány ve výkresové dokumentaci. V dnešní době je 108 norem, které se zabývají geometrickými specifikacemi produktu, počínaje slovníkem a definicemi, následují jednotlivé kapitoly k určité problematice, jako jsou např. jednotlivé charakteristiky geometrického tolerování, způsoby kótování a tolerování GPS, pravidla pro prokázání shody a neshody se specifikacemi, stanovení nejistot měření, struktura a textura povrchu výrobku, měřicí a kalibrační zařízení, filtrace, přijímací a periodické zkoušky CMM a podobně. V oblasti geometrických tolerancí je jednou ze základních norem ČSN EN ISO 1101 [1, 2].

Tato norma definuje tolerance tvaru, orientace, umístění a házení, jednotlivé značky a způsob značení ve výkresové dokumentaci a hlavně vysvětlení jednotlivých charakteristik. Geometrické tolerance se předepisují proto, neboť je prakticky nemožné vyrobit naprosto přesně dokonalé výrobky, jelikož ve výrobě působí různé vlivy jako např. vibrace, opotřebení nástroje atd., které dokonalou výrobu neumožňují. Geometrie těchto vyrobených součástí se odlišuje od ideálního tvaru, proto se tyto tolerance rozdělují na více druhů charakteristik. Přehled geometrických tolerancí a jejich charakteristik podle ISO 1101 je uveden v tabulce 1.

Tyto tolerance se vztahují ke všem výrobkům, ovšem u některých součástí, kde je jejich tvar složitější např. ozubená kola, jsou i další požadavky, které musí být zkontrolovány (např. úchyly čelní rozteče, profilu, sklonu zubu atd.). Funkčnost ozubených kol je výrazně ovlivněna kvalitou, kde jakákoliv nepřesnost na ozubení zejména na profilu nebo sklonu zubu vede k nerovnoměrnosti záběru. Ovšem i tohle je možné zkontrolovat ať už na jednoúčelových měřicích strojích, nebo na souřadnicové měřicí technice (CMM). Definice jednotlivých úchylek a postupy měření pro jejich kontrolu jsou stanoveny v normě ISO 1328 – 1, která také spadá pod soubor norem zabývajících se GPS a je popsána v kapitole 4.



Tabulka 1: Definice základního systému geometrických toleranci podle ISO 1101[2]

Tolerance	Charakteristiky	Značka	Základna je nutná
Tvar	Přímost		ne
	Rovinnost		
	Kruhovitost		
	Válcovitost		
	Profil libovolné čáry		
	Profil libovolné plochy		
Orientace	Rovnoběžnost		ano
	Kolmost		
	Sklon		
	Profil libovolné čáry		
	Profil libovolné plochy		
Umístění	Poloha		ano/ne
	Soustřednost (středů)		ano
	Souosost (os)		
	Souměrnost		
	Profil libovolné čáry		
	Profil libovolné plochy		
Házení	Obvodové házení		ano
	Celkové házení		



V následující tabulce 2 jsou uvedeny značky doplňující systém označování geometrických tolerancí uváděných v tolerančních rámečcích.

Tabulka 2: Doplňkové značky GPS [2]

Popis	Značka
Teoreticky správný rozměr	50
Posunuté toleranční pole	Ⓟ
Maximum materiálu – minimum materiálu	Ⓜ Ⓛ
Netuhý prvek – volný stav	ⓕ
Obalový prvek	ⓔ
Společné toleranční pole	CZ
Malý – velký – střední průměr (např. závitu)	LD MD PD
Přímkový prvek	LE
Nekonvexní prvek	NC
Ve všech řezech	ACS

Dříve se pro kontrolu geometrických tolerancí využívaly především jednoúčelové měřicí stroje určené pro danou součást. Ovšem při změně výroby byla obměna měrové kontroly finančně i časově náročná. Proto se postupně začalo přecházet k souřadnicové měřicí technice (CMM), která se pohotově přizpůsobí na změnu výroby a lze tyto specifikace kontrolovat velice rychle a efektivně.



3. Souřadnicová měřicí technika (CMM)

Na současném trhu je k dostání několik druhů souřadnicové měřicí techniky, ať už se jedná o klasické 3D měřicí stroje s kartézským uspořádáním, které jsou široce zastoupeny v našem průmyslu, nebo mobilní ruční zařízení s nekartézským uspořádáním. Dále se budu zabývat pouze souřadnicovou měřicí technikou s kartézským uspořádáním, poněvadž právě tyto typy se používají pro ty nejpřesnější aplikace s vysokými požadavky na přesnost.

3.1. Druhy konstrukcí souřadnicových měřicích strojů

Kartézsky uspořádané souřadnicové měřicí stroje se rozdělují do čtyř základních konstrukčních skupin.

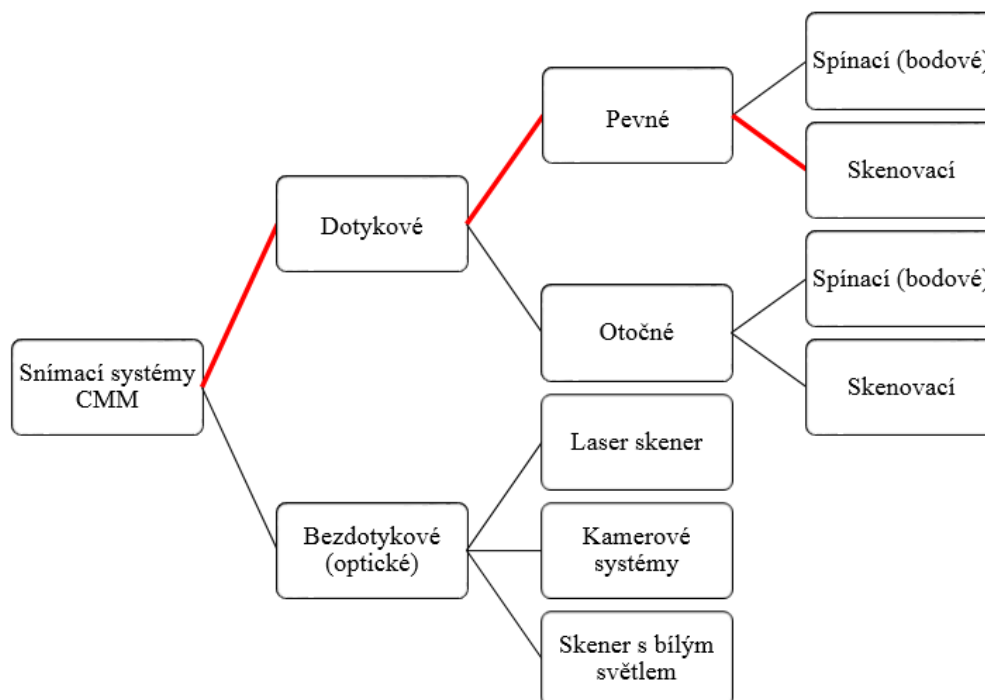
- **Výložníkový CMM “*Cantilever measuring machine*“**
Pinola se pohybuje po výložníku určité délky, kde tato délka určuje rozsah měření ve směru Y. Pro zajištění dostatečně tuhé konstrukce, by neměl být výložník příliš dlouhý.
- **Mostový CMM “*Bridge-type measuring machine*“**
Stroj této konstrukce se skládá z pohyblivého mostu, který zajišťuje veškerý pohyb snímacího systému okolo výrobku. Díky pevné a tuhé konstrukci, umožňují tyto stroje velmi přesné měření a jsou využívány především v metrologických laboratořích.
- **Portálový CMM “*Gantry measuring machine*“**
Portálové konstrukce CMM jsou charakterizovány především svou mohutností a velikostí pracovního rozsahu. Tyto typy konstrukce jsou určeny pro měření velmi rozměrných součástí.
- **Sloupový s vodorovným ramenem “*Horizontal-Arm CMMs*“**
Základním konstrukčním prvkem je sloup, po kterém se pohybuje měřicí rameno, na jehož konci je umístěna měřicí pinola. Stroje této konstrukce se využívají spíše ve výrobě jako kontrolní bod výroby.



Obrázek 1: a) Výložníkový CMM b) Mostový CMM c) Portálový CMM d) Sloupový s vodorovným ramenem [3]

3.2. Snímací systémy souřadnicového měřicího stroje

Důležitou částí každého CMM stroje je snímací systém, který slouží ke snímání bodů. Snímací systémy se rozdělují na dva druhy, a to buď dotykové, nebo optické (obrázek 2). Jelikož se budu zabývat měřením tvarově složitých součástí s vysokými požadavky na přesnost, jsou pro tuto aplikaci vhodné pouze dotykové snímací systémy, které mají při srovnání s optickými snímači daleko vyšší přesnost měření z hlediska opakovatelnosti. Optické snímací systémy jsou vhodné pro měření dílů s velmi malými nebo dvourozměrnými geometrickými prvky a pro součásti vyrobené z měkkých materiálů jako pryž nebo plast, kde by při dotykovém snímání mohlo dojít k průhybu měřené součásti, což by vedlo k nepřesným výsledkům měření.



Obrázek 2: Schéma snímacích systémů CMM

3.3. CMM pro měření dílů s vysokými požadavky na přesnost

Vzhledem k neustále rostoucím požadavkům na přesnost výrobků je i kontrola kvality nucena používat nových moderních technologií. To nepřimo úměrně souvisí s nepřetržitým progresem souřadnicové měřicí techniky. Právě tato technika je nejhojněji zastoupena ve strojním průmyslu pro kontrolu vysoce přesných dílů.

3.3.1. CMM stroje s vysokou přesností měření

Pro ty nejpřesnější aplikace souřadnicového měření jsem provedl výběr těchto "Hi - Tech" strojů od dvou největších výrobců na světě. První dva stroje jsou od společnosti Zeiss a další dva od Hexagon Metrology.

V případě strojního zařízení společnosti Zeiss jde o mostové konstrukce CMM stroje (Xenos a Prismo Navigator). Stroj Xenos je vysoce přesné zařízení hodící se spíše do laboratorních podmínek ke kalibračním účelům a lze ho osadit aktivním skenovacím systémem Vast Gold. Prismo Navigator je rovněž velmi přesné zařízení, které má ale větší možnosti z hlediska osazení snímacími systémy. Tento stroj lze osadit jak aktivním snímacím systémem Vast (ve všech verzích Gold), polohovacími snímači typu RDS, tak i optickými senzory řady LineScan či ViScan. Poslední možností osazení pro stroje Prismo je volba systému Zeiss Rotos, který měří drsnost povrchu [4, 5].



Technické parametry stroje

Přesnost MPE_E	$0,5 + L/500$ [μm]
------------------	---------------------------------

Technické parametry stroje

Přesnost MPE_E	$0,3 + L/1000$ [μm]
------------------	----------------------------------

Obrázek 3: Prismo Navigator CMM (vlevo), Xenos CMM (vpravo) [4, 5]

Mezi nejpřesnější CMM stroje od společnosti Hexagon Metrology patří stroje Leitz Infinity a Leitz Reference. Poslední jmenovaný je podobně jako stroj Xenos vhodný spíše do laboratorních podmínek ke kalibračním účelům. V případě stroje Infinity, jde rovněž o velmi přesné zařízení, které je konstrukčně provedeno s pevným portálem a pohyblivým stolem. Lze ho osadit veškerými dostupnými snímacími systémy společnosti Hexagon Metrology. Jde tedy jak o dotykové pevné snímací systémy, tak o systémy optické pro měření složitých 3D ploch [6, 7].



Obrázek 4: Leitz Infinity CMM (vlevo), Leitz Reference HP CMM (vpravo) [6, 7]

3.3.2. Snímací systémy pro přesné měření

Volba snímacího systému je velmi důležitá. Při špatné volbě můžeme degradovat výkonost celého stroje, do kterého byla vynaložena nemalá investice. Nejproduktivnějším a zároveň nejpresnějším dotykovým snímacím systémem společnosti Zeiss, je systém Vast Gold. Jde o aktivní vysokorychlostní skenovací systém, na který můžeme upevnit snímače dlouhé až 800 mm o hmotnosti 600g. To umožňuje měření v nejnáročnějších reálných podmínkách. Nejpresnějším dotykovým snímacím systémem z řady Hexagon Metrology je systém LSP-S4. Jedná se o vysokorychlostní skenovací snímací systém, který můžeme osadit snímači o až délce 800 mm, ale oproti systému Vast zde můžeme použít hmotnost až 1000g, při zachování stejné přesnosti. Do výběru nejpresnějších dotykových snímacích systémů na trhu jsem zařadil i jeden od společnosti Renishaw. Jedná se o skenovací snímací systém SP – 80, který je určen pro vysokou přesnost měření. Společnost Gleason, která je zaměřena na výrobu a kontrolu ozubení, používá právě tento skenovací systém na jejich jednoúčelových strojích pro kontrolu ozubení [8, 9, 10].



Obrázek 5: a) VAST gold b) LSP – S4 c) SP – 80 [8, 9, 10]

Jak již bylo zmíněno, optické snímací systémy, ať už se jedná o kamerové snímací systémy nebo laser skenery jsou spíše vhodné pro kontrolu snadno deformovatelných součástí, nebo takových součástí, které neumožňují kontaktní měření, jako jsou plošné spoje atd. Proto jsem na ukázkou provedl výběr nejpresnějších optických snímacích systémů. První dva snímače jsou od společnosti Zeiss, kdežto další dva snímače od Hexagon Metrology (obrázek 6).



Obrázek 6: a) LineScan b) ViScan c) HP-C-VE Vision Sensor d) Precitec LR [11, 12]

Na ozubených kolech je mnoho parametrů, které lze kontrolovat při použití různých měřicích zařízení. Pro nejpreciznější a nejrychlejší kontrolu především v sériové a hromadné výrobě se používá souřadnicová měřicí technika, ovšem jsou i obyčejná komunální měřidla, které dokáží změřit základní parametry ozubení. O způsobech měření a parametrech ozubení, které lze kontrolovat pojednává technická zpráva ISO/TR 10064. Součást, která mi byla vybrána pro analýzu, obsahuje základní geometrii, ale i speciální geometrii, která je nad rámec normy ISO 1101 a je podrobně popsána v normě ISO/DIS 1328 – 1.



4. Definice a mezní úchytky vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola

Obsahem normy ISO/DIS 1328-1 vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola jsou definice, podmínky měření a výpočty odchylek týkajících se stejnohlých boků zubů.

4.1. Jednotlivé úchytky vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola

V této části budou definovány a vysvětleny jednotlivé úchytky vztahující se na stejnohlé boky zubů ozubeného kola [13, 14].

4.1.1. Úchytky roztečí

- **Jednotlivá úchytky čelní rozteče (f_{pi})**

Algebraický rozdíl mezi skutečnou a teoretickou délkou rozteče v čelní rovině na kružnici se středem na ose ozubení, která prochází přibližně středem výšky zubu (viz obrázek 7).

- **Úchytky čelní rozteče (f_p)**

Maximální absolutní hodnota ze všech naměřených jednotlivých úchylek čelní rozteče:

$$f_p = \max |f_{pi}| \quad (1)$$

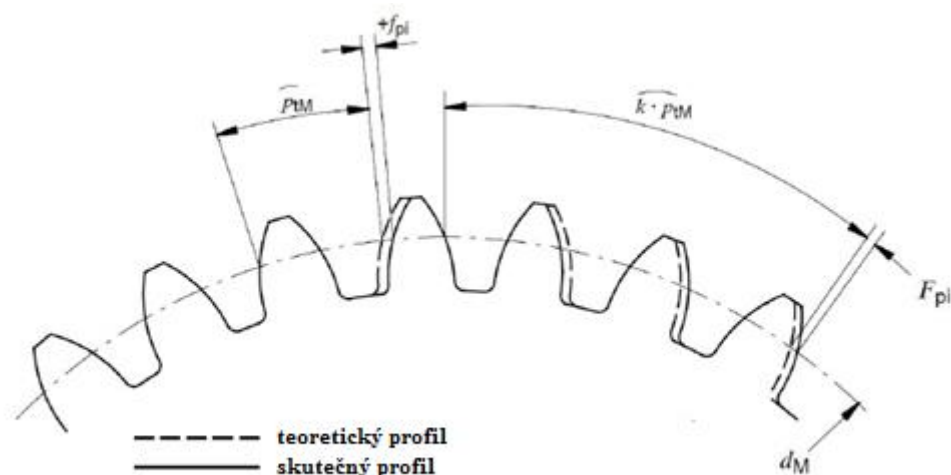
- **Součtová úchytky (i) roztečí kola (F_{pi})**

Algebraický rozdíl mezi skutečnou a teoretickou délkou oblouku o (i) roztečích v čelní rovině na kružnici se středem na ose ozubení, která prochází přibližně středem výšky zubu.

- **Součtová úchytky roztečí kola (F_p)**

Součtová úchytky stanovená pro celý obvod ozubeného kola na stejnohlých bocích zubů kola (viz obrázek 7) se vypočítá následovně:

$$F_p = \max F_{pi} - \min F_{pi} \quad (2)$$



Obrázek 7: Úchylky čelních roztečí [13]

4.1.2. Úchylky sklonu zubu

Jedná se o úchylku mezi teoretickou a skutečnou boční křivkou zubu měřená ve směru tečny základního válce evolventní čelního kola [13, 14].

- **Úchylka sklonu zubu (F_{β})**

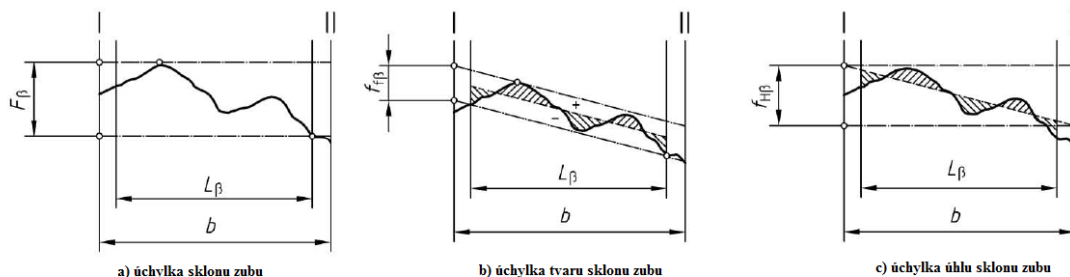
Vzdálenost mezi dvěma ekvidistantními teoretickými bočními křivkami zubu, které omezují skutečnou boční křivku v rozsahu jejího vyhodnocení L_{β} (viz obrázek 8).

- **Úchylka tvaru sklonu zubu ($f_{f\beta}$)**

Vzdálenost mezi dvěma ekvidistantními středními bočními křivkami zubu, které jsou umístěny v konstantní vzdálenosti od střední boční křivky zubu, tak že omezují skutečnou boční křivku zubu v rozsahu L_{β} (viz obrázek 8).

- **Úchylka úhlu sklonu zubu ($f_{H\beta}$)**

Vzdálenost dvou průsečíků teoretických bočních křivek boku zubu se střední boční křivkou zubu v koncových bodech rozsahu L_{β} (viz obrázek 8).



Obrázek 8: Jednotlivé úchylky sklonu zuby [13]

Vysvětlivky k obrázku:

Délka boční křivky zuby (b)

Délka, která je rovná šířce ozubení bez sražení nebo zaoblení

Délka vyhodnocení boční křivky zuby (L_{β})

Jedná se o délku boční křivky zuby, která je zkrácená na každém konci o menší hodnotu z následujících dvou hodnot: 5% šířky ozubení nebo délky rovnu jednomu modulu.

Teoretická boční křivka zuby

Boční křivka stanovená na základě konstrukčních požadavků

Střední boční křivka zuby

Křivka získaná nahrazením pořadnic skutečné boční křivky zuby pořadnicemi přímky. Tato křivka se určí pomocí metody nejmenších čtverců a to tak, že v rozsahu vyhodnocení boční křivky zuby, je součet čtverců pořadnic úchylek skutečné a střední boční křivky zuby minimální.

4.1.3. Úchylky profilu

Jedná se o úchylku mezi skutečným a teoretickým profilem, která je se měří v čelní rovině na normále evolventy [13, 14].

- **Úchylka profilu (F_α)**

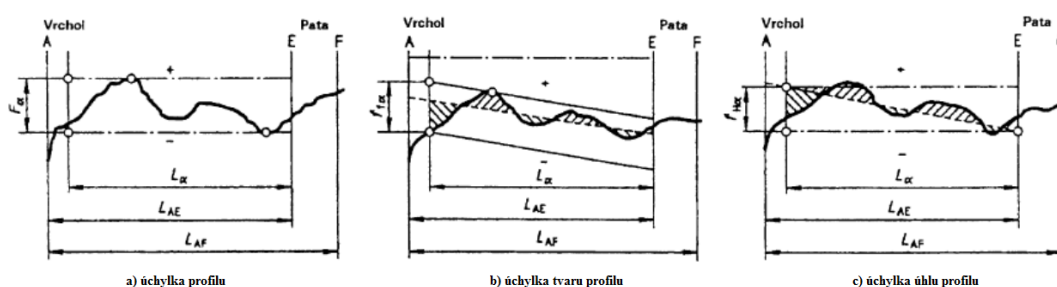
Vzdálenost mezi dvěma ekvidistantami teoretického profilu, mezi kterými je skutečný profil a to v rozmezí rozsahu vyhodnocovací délky L_α (viz obrázek 9).

- **Úchylka tvaru profilu ($f_{f\alpha}$)**

Vzdálenost mezi dvěma ekvidistantami středního profilu, které jsou umístěny v konstantní vzdálenosti od středního profilu tak, aby zahrnuly skutečný profil v rozsahu délky L_α (viz obrázek 9).

- **Úchylka úhlu profilu ($f_{H\alpha}$)**

Vzdálenost mezi dvěma ekvidistantami teoretického profilu, které protínají střední profil v koncových bodech rozsahu vyhodnocení L_α (viz obrázek 9).



Obrázek 9: Jednotlivé úchylky profilu [14]

Vysvětlivky k obrázku:

Použitelná délka profilu (L_{AF})

Vzdálenost mezi dvěma body profilu zubu, které jsou určeny tečnami k základní kružnici, z nichž jedna se vyskytuje v poloze vnější hranice a druhá v poloze vnitřní hranice použitelného profilu. V závislosti na provedení je použitelná délka profilu omezena vrcholem zubu, počátkem sražení nebo zaoblení hlavy zubu (A). Směrem k patě zubu je použitelná délka omezena buď počátkem přechodu boku zubu do paty, nebo počátkem podříznutí (bod F).



Činná délka profilu (L_{AE})

Část použitelné délky profilu, která je vztažena k činnému profilu:

- směrem k vrcholu zubu je činná délka profilu omezena stejným způsobem jako použitelná délka profilu (bod A)
- směrem k patě zubu činná délka končí koncovým bodem E, jedná se o místo efektivního dotyku se spoluzabírajícím evolventním čelním kolem (začátek činného profilu)
- jestliže není spoluzabírající evolventní čelní kolo známé, bod E je začátkem činného profilu vloženého hřebenu, který má rozměry zubu normalizovaného základního profilu

Rozsah vyhodnocení profilu (L_α)

Část použitelné délky profilu, která je rozhodující pro vymezení mezních úchylek, v souladu s příslušným stupněm přesnosti. Pokud není stanoveno jinak, tak je tato délka rovna 92% činné délky profilu L_{AE} včetně bodu E.

Teoretický profil

Jedná se o profil stanovený na základě konstrukčních požadavků, pokud není stanoveno jinak, je to profil v čelní rovině.

Střední profil měřeného boku

Profil určený nahrazením pořadnic skutečného profilu pořadnicemi odpovídající přímce. Opět se tohoto řešení dosáhlo pomocí metody nejmenších čtverců a to tak, že v rozsahu vyhodnocení profilu je součet čtverců pořadnic úchylek skutečného a středního profilu minimální.



4.2. Soustava přesnosti ISO pro čelní ozubená kola

Soustava přesnosti ISO pro ozubená kola obsahuje 10 stupňů přesnosti, z nichž 2 je nejvyšší a 11 nejnižší stupeň. Pokud je ve výkresové dokumentaci požadován údaj o přesnosti, v tabulce 3 jsou znázorněny parametry, které je třeba zkontrolovat. Jakmile se jedná o vyšší třídu přesnosti, roste i počet parametrů, které je nutné zkontrolovat [13].

Rozsahy parametrů ozubených kol, pro které můžeme třídu přesnosti určit:

- $5 \leq z \leq 1000$ nebo $15000/m_n$
- $5 \text{ mm} \leq d \leq 15\,000 \text{ mm}$
- $0,5 \text{ mm} \leq m_n \leq 70 \text{ mm}$
- $4 \text{ mm} \leq b \leq 1200 \text{ mm}$
- $\beta \leq 45^\circ$

Tabulka 3: Doporučené parametry pro kontrolu ozubení v závislosti na stupni přesnosti [13]

Referenční průměr ozubeného kola [mm]	Skupina přesnosti	Stupeň přesnosti	Minimální přípustné parametry	
			Výchozí parametry	Alternativní parametry
$d \leq 4000$	Nízká	10-11	$F_p, f_p, s, F_\alpha, F_\beta$	$s, c_p^b, F_i''^a, f_i''^d$
	Střední	7-9	$F_p, f_p, s, F_\alpha, F_\beta$	c_p^b, F_{is}, s, f_{is}
	Vysoká	2-6	F_p, f_p, s $F_\alpha, f_{f\alpha}, f_{H\alpha}$ $F_\beta, f_{f\beta}, f_{H\beta}$	c_p^b, F_{is}, s, f_{is}
$d > 4000$		7-11	$F_p, f_p, s, F_\alpha, F_\beta$	F_p, f_p, s, c_p^b

Toleranci pro daný parametr vypočítáme dle rovnic 3 – 10 a porovnáme s naměřenou hodnotou. U výpočtů jednotlivých úchylek se musí respektovat pravidla zaokrouhlování:

- pokud je vypočtená hodnota větší než $10 \mu\text{m}$, zaokrouhlení je na nejbližší celé číslo
- pokud je větší než $5 \mu\text{m}$ a menší než $10 \mu\text{m}$, zaokrouhlení je na nejbližší $0,5 \mu\text{m}$ celočíselnou hodnotu
- pokud je menší než $5 \mu\text{m}$, zaokrouhlení je na nejbližší $0,1 \mu\text{m}$ celočíselnou hodnotu



V tabulce 4 je znázorněn způsob měření a počet minimálních požadavků měření, které je nutno dodržet pro stanovení určité veličiny.

Tabulka 4: Přehled způsobu měření s minimálními požadavky pro danou veličinu [13]

Veličina	Způsob měření	Minimální požadavky na měření
Součtová úchylka roztečí (F_p)	Dvě sondy Jedna sonda	Všechny zuby Všechny zuby
Úchylka čelní rozteče (f_p)	Dvě sondy Jedna sonda	Všechny zuby Všechny zuby
Úchylka profilu (F_α) Úchylka tvaru profilu ($f_{f\alpha}$) Úchylka úhlu profilu ($f_{H\alpha}$)	Profil test	3 zuby
Úchylka profilu (F_β) Úchylka tvaru profilu ($f_{f\beta}$) Úchylka úhlu profilu ($f_{H\beta}$)	Helix test	3 zuby
Tloušťka zubu (s)	Posuvné měřidlo (přes zuby) Měřidlo tloušťky (zuboměr) Přes kuličky nebo válečky Kinematické měření	2 místa dotyku 3 zuby 2 místa dotyku Všechny zuby

4.3. Rovnice pro výpočet tolerancí jednotlivých úchylek

Úchylky čelní rozteče

Tolerance úchylky čelní rozteče (f_{pT})

$$f_{pT} = (0,001d + 0,4 \cdot m_n + 5) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)^1} \quad (3)$$

Tolerance součtové úchylky čelní rozteče (F_{pT})

$$F_{pT} = (0,002d + 0,55 \cdot \sqrt{d} + 0,7 \cdot m_n + 12) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \quad (4)$$

Úchylky profilu

Tolerance úchylky úhlu profilu ($f_{H\alpha T}$)

$$f_{H\alpha T} = (0,4 \cdot m_n + 0,001 \cdot d + 4) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \quad (5)$$

¹ A – stupeň požadované přesnosti

**Tolerance úchylky tvaru profilu ($f_{f\alpha T}$)**

$$f_{f\alpha T} = (0,55 \cdot m_n + 5) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \quad (6)$$

Celková tolerance úchylky tvaru profilu ($F_{\alpha T}$)

$$F_{\alpha T} = \sqrt{f_{H\alpha T}^2 + f_{f\alpha T}^2} \quad (7)$$

Úchylky sklonu zubu**Tolerance úchylky úhlu sklonu zubu ($f_{H\beta T}$)**

$$f_{H\beta T} = (0,05 \cdot \sqrt{d} + 0,35 \cdot \sqrt{b} + 4) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \quad (8)$$

Tolerance úchylky tvaru sklonu zubu ($f_{f\beta T}$)

$$f_{f\beta T} = (0,07 \cdot \sqrt{d} + 0,45 \cdot \sqrt{b} + 4) \cdot (\sqrt{2})^{(A-5)} \quad (9)$$

Celková tolerance úchylky sklonu zubu ($F_{\beta T}$)

$$F_{\beta T} = \sqrt{f_{H\beta T}^2 + f_{f\beta T}^2} \quad (10)$$

4.4. Předpoklady pro měření

Výchozí osa

Stanovení úchylky profilu, sklonu zubu a čelní rozteče vyžaduje definovanou osu rotace (výchozí osa), která je popsána v kapitole 5. 2, vztahující se k normě ISO/TR 10064 – 3. Při měření geometrie zubu se výsledky měření a příslušené tolerance vztahují k výchozí ose [13].

Směr měření

Měření tvaru nebo polohy může být měřeno ve směru kolmém k měřené ploše, nakloněné v určitém úhlu, nebo podél oblouku daného kruhu [13].



Určení tolerancí

Výpočet tolerancí pro danou úchylku podle rovnic 3 – 10 a následné porovnání s naměřenou hodnotou [13].

Průměr měření (d_M)

Stanovení průměru měření d_M . Jedná se o průměr kružnice, kde se snímací sonda při měření dotýká aktivních boku zubů. Většinou se tento průměr nachází ve středu výšky zubu. Jestliže d_M není stanoven, vypočítá se dle následujících vztahů [13]:

$$\text{Vnější ozubená kola: } d_M = d_a - 2 \cdot m_n \quad (11)$$

$$\text{Vnitřní ozubená kola: } d_M = d_a + 2 \cdot m_n \quad (12)$$

Filtrování dat

Jakýkoliv měřený povrch zubu bude vykazovat široké spektrum úchylek od stanoveného tvaru a boku zubu. Filtrování dat slouží k odstranění nežádoucích úchylek, které by zkreslovaly výsledek měření. Tato norma stanovuje správné nastavení filtru low-pass při měření úchylky profilu a sklonu zubu. Tento filtr pracuje na principu propustnosti vlnových délek, tzn., že z naměřených hodnot odstraňuje hodnoty o menší vlnové délce než je stanovená mezní hodnota vlnové délky [13].

Filtrace profilu – mezní hodnota filtru pro měření profilu (λ_α):

$$\lambda_\alpha = \frac{L_\alpha}{15} \text{ (větší než 0,25 mm)} \quad (13)$$

Filtrace sklonu zubu – mezní hodnota filtru pro měření sklonu zubu (λ_β):

$$\lambda_\beta = \frac{b}{30} \text{ (větší než } \lambda_\alpha) \quad (14)$$

Hustota bodů při snímání

Při měření profilu zubu by mělo být zahrnuto minimálně 150 bodů rovnoměrně rozmístěných po celé délce měření. Kdežto u měření sklonu zubu je potřeba minimálně 200, nebo 5 bodů na milimetr v měřené délce [13].



5. Analýza praktických předpisů pro přejímku ozubení dle ISO/TR 10064

Praktické předpisy pro přejímku ozubení dle ISO/TR 10064 se skládají ze šesti částí, kde každá část se zaměřuje na konkrétní problematiku. V podstatě se jedná o technickou normalizační informaci, která přejímá dokument informativního charakteru v tomhle případě technickou zprávu (TR) z evropských nebo mezinárodních normalizačních organizací.

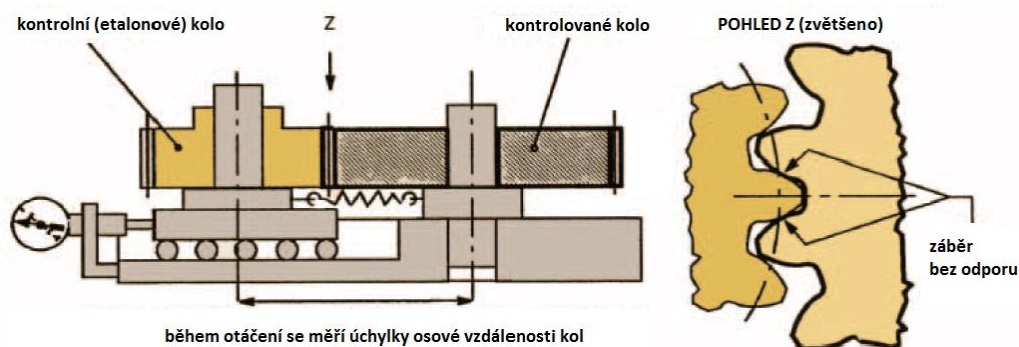
5.1. Přejímka vztahující se k radiálním kinematickým úchytkám, obvodovému házení, tloušťce zubu a boční vůli

Tato část technické zprávy určuje pravidla správné praxe vztahující se k radiálním kinematickým úchytkám, obvodového házení, tloušťky zubu a boční vůli čelních kol s evolventním ozubením.

5.1.1. Měření radiálních kinematických úchylek

Radiální kinematické úchytky jsou měřeny na zařízení, kde jsou páry kol sestaveny tak, že jedno ozubené kolo se nachází na pevné hřídeli a druhé je umístěno na hřídeli nesené pohyblivým vozíkem s pružinovým mechanismem. Tento mechanismus zajišťuje, aby ozubená kola byla držena radiálně v těsném záběru (obrázek 10). V průběhu měření jsou měřeny variace osové vzdálenosti, a je-li třeba, tak se vygeneruje graf [15].

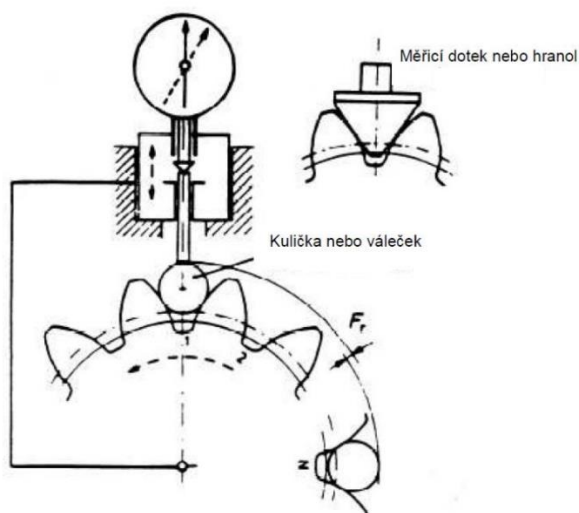
Pro většinu kontrolních případů jsou kontrolovaná ozubená kola zkoušena zkušebním (etalonovým) kolem. Většinou je vyžadováno, aby zkušební (etalonová) kola byla tak přesná, aby jejich vliv na radiální kinematické úchytky byl minimální. V takovém případě je postačující jeden záznam generovaný během jedné otáčky kontrolovaného ozubeného kola. Celková radiální kinematická úchytky kontrolovaného ozubeného kola je rovna maximální úchylce osové vzdálenosti v průběhu jedné otáčky [15].



Obrázek 10: Princip měření radiálních kinematických úchylek [16]

5.1.2. Měření obvodového házení

Obvodové házení F_r zubů kola se určuje k referenční ose ozubeného kola, a je to rozdíl mezi maximální a minimální radiální polohou snímací sondy (kulička, váleček atd.), která postupně najíždí do každé zubní mezery při rotaci ozubeného kola (obrázek 11). Velikost měřicího doteku se volí tak, aby snímací dotek kontaktoval boky na obou stranách zubní mezery přibližně na referenční kružnici [15].



Obrázek 11: Princip měření obvodového házení [15]

Jednoduchost tohoto měření nám umožňuje rozsáhlý výběr měřicího vybavení a stupně automatizace. Následuje popis několika metod, kterými lze změřit obvodové házení [15].



5.1.2.1. Měření s přerušovaným měřením zkoušeného ozubeného kola

Ozubené kolo je opakovaně ručně otáčeno a snímací hlava se postupně umísťuje do zubních mezer resp. do polohy pro měření zubních mezer a zaznamenává úchylky radiální polohy k základnímu radiálnímu usazení. Tato metoda se používá zejména pro malá ozubená kola [15].

5.1.2.2. Měření s nepřetržitě se otáčejícím vyráběným kolem

Měřicí dotek je v dotyku s oběma boky zubní mezery, a pohybuje se s rotací ozubeného kola po již přednastavené délce oblouku. Radiální úchylky jsou zaznamenávány buď v nejvyšším bodě oblouku, nebo v jiném pevném bodě při průchodu tímto obloukem. Tento typ měření se většinou používá pro měření velkých ozubených kol a toto měření je proveditelné na měřicích přístrojích i na výrobních strojích [15].

5.1.2.3. Aproximace obvodového házení z radiální kinematické úchylky

Obvodové házení lze aproximovat z měření radiální kinematické úchylky sledováním změny osové vzdálenosti v průběhu jedné otáčky zkoušeného ozubeného a zkušebního ozubeného kola na valivém upínacím zařízení (viz obrázek 10) [15].

5.1.2.4. Měření obvodového házení na souřadnicovém měřicím stroji

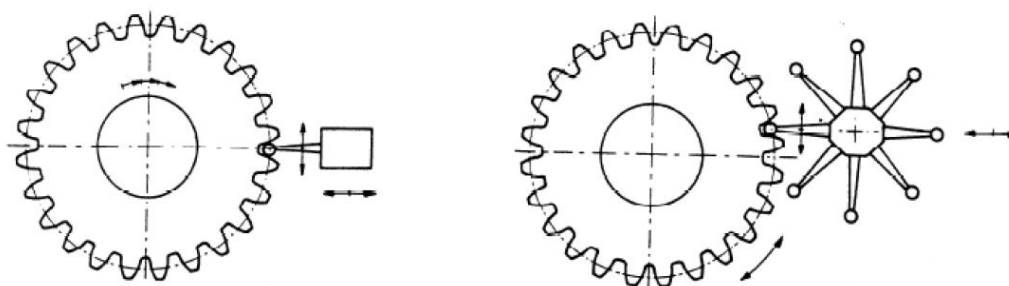
Při použití souřadnicového měřicího stroje lze měřit obvodové házení a rozteč zároveň. V následujících řádcích jsou popsány dvě metody, kterými to lze dosáhnout [15].

- **Měření dvoubokým odvalem**

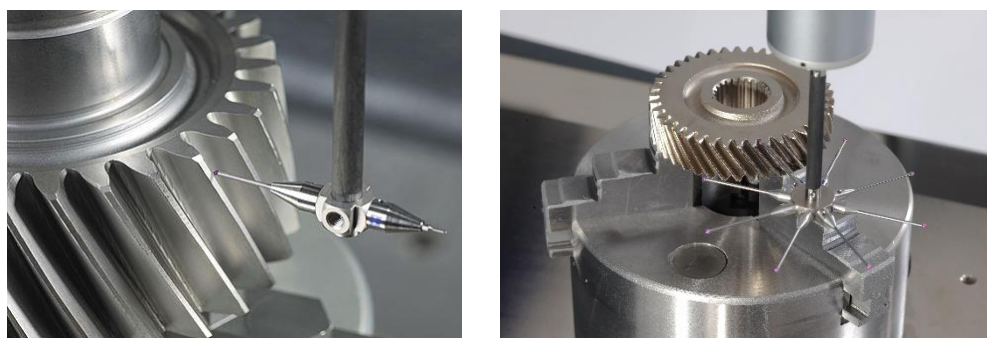
Jedná se o metodu zjišťování kombinovaných odchylek a házivosti. Principem měření je, že do mezery mezi zuby najede snímací sonda (kulička) vhodného průměru a setrvá tam do té doby, než se uskuteční dvouboký odval. Měření lze provádět buď s otočným stolem nebo bez něj, a to se sondou s paralelní osou nebo hvězdicovou snímací hlavou (obrázek 12). To vše záleží na parametrech zařízení a typem ozubeného kola. Jestliže se použije hvězdicová snímací hlava, je nutné kvůli podmínkám dotyku vždy volit osmi hvězdicovou sondu [15].

- **Měření s jednobokým odvalem**

Opět je do mezery mezi zuby vsunována snímací sonda, tentokrát s malým průměrem snímacího doteku. Levý a pravý bok jsou měřeny na měřicí kružnici. Při tomto způsobu měření se vypočítá poloha kuličky s daným průměrem. Toto měření lze zase provádět s otočným stolem, nebo bez něj se snímací hlavou s paralelní osou, anebo s osmi hvězdicovou snímací hlavou. Tato metoda se dá použít jak pro kontrolu správnosti smontovaných párů ozubených kol, tak i samostatných [15].



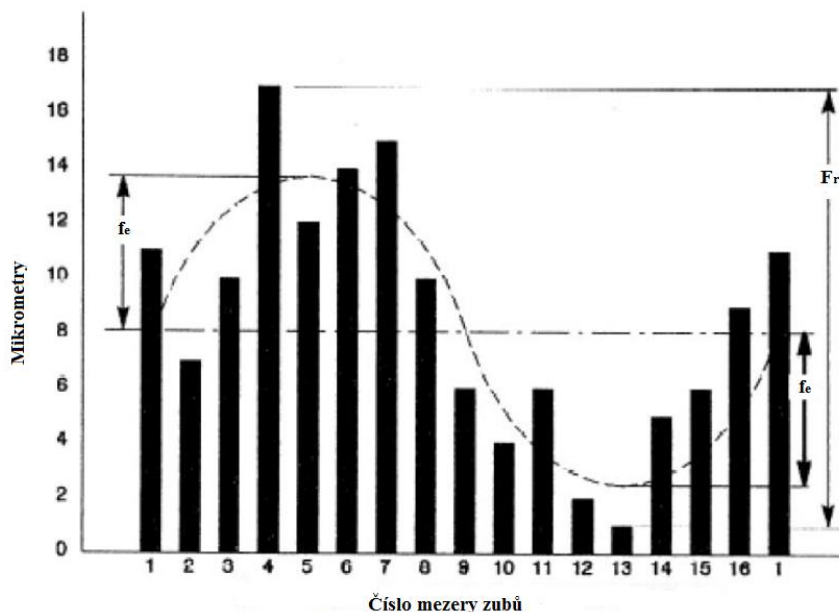
Obrázek 12: Paralelní a hvězdicová snímací hlava [15]



Obrázek 13: Ukázka paralelní a hvězdicové snímací hlavy v praxi [17, 18]

5.1.2.5. Vyhodnocení házení F_r

Jestliže je házení F_r vztaženo k ose ozubeného kola, tak se rovná aritmetickému rozdílu mezi maximálními a minimálními hodnotami radiálními úchylky. Skládá se zhruba z dvojnásobné hodnoty excentricity f_e spolu s přičtenými účinky rozteče a úchylek profilu ozubeného kola (obrázek 14). Na grafu znázorňujícím měření házení níže, je sinusová křivka, která zobrazuje excentricitu zubů ve vztahu k referenční ose o velikosti f_e [15].

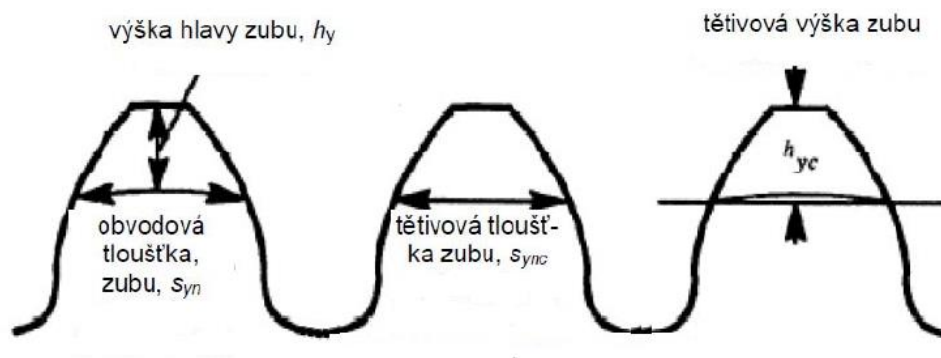


Obrázek 14: Graf házení ozubeného kola s 16ti zuby [15]

5.1.3. Měření tloušťky zubu, rozpětí a rozměru zubu nad kuličkami nebo válečky

Tloušťka zubu může být zjištěna pomocí několika měření mezi dvěma body nebo dvěma velmi krátkými čarami dotyku. Typ a umístění těchto dotyků je dán způsobem měření, ať už se jedná o posuvné měřidlo, kuličky, válečky nebo měřidlo tloušťky (zuboměr) a vlivem základních úchylek. Naměřená tloušťka lze použít k vyhodnocení celého zubu, nebo dokonce všech zubů na daném kole. Kontrola tloušťky zubu je nesmírně důležitá, má-li se zajistit, aby určitá dvě spoluzabírající ozubená kola pracovala s určenou boční vůlí. Boční vůlí se rozumí mezera mezi nepracovními boky zubů dvou spoluzabírajících kol, pokud jsou v dotyku jejich pracovní boky. V některých případech není snadné kvůli modifikacím hlavy zubu zjišťovat tloušťku zubu na referenčním průměru d , takže vzorce udávají tloušťku s pro libovolný průměr d_y [15].

$$\text{Doporučený výběr: } d_y = d + 2m_n x \quad (15)$$



Obrázek 15: Výška hlavy a tětivová tloušťka zubu [15]

5.1.3.1. Měření tloušťky zubu pomocí měřidla tloušťky (zuboměru)

Měřidlo tloušťky lze použít pouze pro měření vnějšího ozubení, nikoliv vnitřního. Výhodou měření tětivové tloušťky zubu při použití měřidla tloušťky spočívá v jeho jednoduchosti a přenosnosti, ovšem je potřeba zkušeného operátora. V naměřené tloušťce nejsou započítány povolené hodnoty boční vůle, takže nominální hodnotu je nutné zmenšit o přípustnou horní a dolní hodnotu E_{syns} a E_{syni} [15].

Vzorce pro výpočet:

obvodové tloušťky zubu:

$$s_{yn} = s_{yt} \cdot \cos\beta_y \quad (16)$$

tětivová tloušťka zubu:

$$s_{ync} = d_{yn} \cdot \sin\left(\frac{s_{yn}}{d_{yn}} \cdot \frac{180}{\pi}\right) \quad (17)$$

výška hlavy zubu:

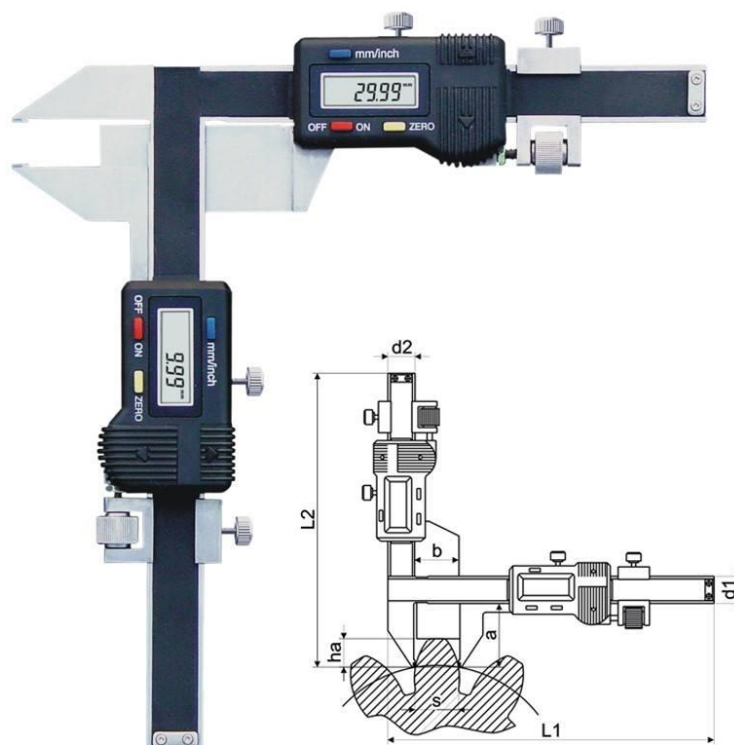
$$h_y = \frac{d_a - d_y}{2} \quad (18)$$

tětivová výška zubu:

$$h_{yc} = h_y + \frac{d_n}{2} \cdot \left[1 - \cos \left(\frac{s_{yn}}{d_{yn}} \cdot \frac{180}{\pi} \right) \right] \quad (19)$$

výpočet dolní a horní přípustné hodnoty boční vůle:

$$E_{syni} = E_{syns} = \frac{\cos \alpha_n}{\cos \alpha_{yn}} \quad (20)$$

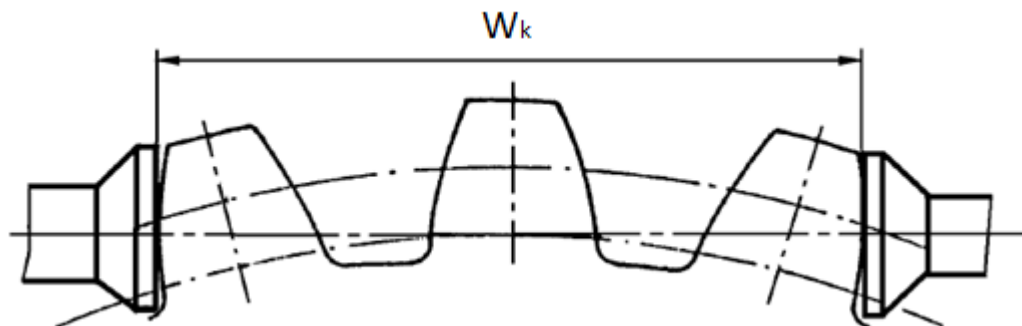


Obrázek 16: Měření tětivové tloušťky zubu s použitím digitálního měřidla tloušťky (zuboměru) [19]

5.1.3.2. Měření tloušťky přes zuby

Při měření tloušťky zubu čelních ozubených kol, ať už s přímými nebo šikmými zuby přes několik zubů (minimálně dva zuby) je nejrozšířenější metodou pro přímé stanovení boční vůle. Měření lze provést několika měřidly, jako jsou např. talířový mikrometr, posuvný měřítko atd. Jmenovitá hodnota rozměru přes zuby W_k a počet zubů, přes který se měří, se určí podle modulu, počtu zubů a úhlu záběru. Rozměr přes zuby se měří na tečně k základní kružnici, jak je vidět na obrázku 17. Opět v nominální hodnotě W_k nejsou obsaženy povolené hodnoty boční

vůle, takže je nutné nominální hodnotu zmenšit o přípustnou horní a dolní velikost E_{bns} a E_{bni} . Výhodami tohoto měření je, že se jedná o jednoduché měřidlo a lze měřit ve výrobě přímo na stroji [15, 16].



Obrázek 17: Kontrola rozměru přes zuby

Vzorce pro výpočet čelních ozubených kol s přímými zuby:

Rozměr přes zuby W_k :

$$W_k = m \cdot \cos \alpha \cdot [\pi \cdot (k - 0,5) + z \cdot (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{arcc} \alpha)] \quad (21)$$

Počet zubů, přes které se měří, pro normální ozubení ($\alpha = 20^\circ$)

$$k = \frac{\alpha}{180} \cdot z + 0,5 \quad (22)$$

Vzorec pro výpočet čelních ozubených kol se šikmými zuby:

Tento způsob kontroly lze použít pouze tehdy, je-li šířka ozubení $b > W_k \cdot \sin \beta$

Rozměr přes zuby W_k :

$$W_k = m \cdot [\pi \cdot \cos \alpha \cdot (k - 0,5) + z \cdot \cos \alpha_n \cdot \operatorname{inv} \alpha_t] \quad (23)$$

Počet zubů, přes které se měří, pro normální ozubení ($\alpha = 20^\circ$)

$$k = \frac{z \cdot \alpha_n^0}{180 \cdot \cos \beta \cdot \cos^2 \beta_b} \quad (24)$$

Vzorec pro výpočet E_{bns} a E_{bni} :

$$E_{bns} = E_{bni} = \cos\alpha_n \quad (25)$$

Pro ozubená kola s vnějším ozubením:

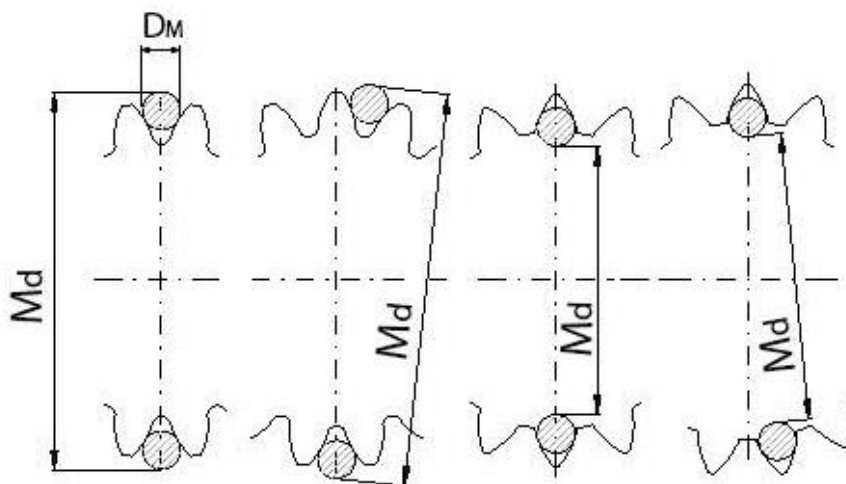
$$W_k + E_{bni} \leq W_k \leq W_k + E_{bns} \quad (26)$$

Pro ozubená kola s vnitřním ozubením:

$$W_k - E_{bni} \leq W_k \leq W_k - E_{bns} \quad (27)$$

5.1.3.3. Řízení tloušťky zubu určením vzdáleností mezi kuličkami nebo válečky

Jestliže je čelní šířka ozubeného kola se šikmými zuby příliš malá a nedá se měřit rozpětí zubů, lze realizovat nepřímé zjištění tloušťky zubů měřením vzdáleností nad nebo mezi dvěma kuličkami (válečky). Tyto kuličky (válečky) jsou umístěny v mezerách zubů, které jsou co nejbližší opačné poloze na průměru (obrázek 18). Tato měřicí metoda je vhodná jak pro vnitřní, tak i pro vnější ozubení. Rozměr kuliček nebo válečků D_M se spočítá a následně zvolí z tabulky normalizovaných průměrů hrotů. Stejně jako u předchozích dvou metod, hodnota vzdálenosti nad kuličkami, nebo válečky M_d nezahrnuje povolené hodnoty boční vůle, tudíž je nutné hodnotu M_d zmenšit o velikost horní a dolní úchytky E_{yns} a E_{yni} [15].



Obrázek 18: Vzdálenost M_d mezi kuličkami u čelních ozubených kol

**Vzorce pro výpočet vzdálenosti nad kuličkami nebo válečky M_d :**

Pro ozubená kola s vnějším ozubením se sudým počtem zubů:

$$M_d = \frac{m_n \cdot z \cdot \cos \alpha_t}{\cos \beta \cdot \cos \alpha_{Mt}} + D_M \quad (28)$$

Pro ozubená kola s vnitřním ozubením se sudým počtem zubů:

$$M_d = \frac{m_n \cdot z \cdot \cos \alpha_t}{\cos \beta \cdot \cos \alpha_{Mt}} - D_M \quad (29)$$

Pro ozubená kola s vnějším ozubením s lichým počtem zubů:

$$M_d = \frac{m_n \cdot z \cdot \cos \alpha_t}{\cos \beta \cdot \cos \alpha_{Mt}} \cdot \cos \left(\frac{90}{z} \right) + D_M \quad (30)$$

Pro ozubená kola s vnitřním ozubením s lichým počtem zubů:

$$M_d = \frac{m_n \cdot z \cdot \cos \alpha_t}{\cos \beta \cdot \cos \alpha_{Mt}} \cdot \cos \left(\frac{90}{z} \right) - D_M \quad (31)$$

Vzorce pro výpočet horní a dolní úchytky $E_{y_{ns}}$ a $E_{y_{ni}}$:

Pro sudý počet zubů:

$$E_{y_{ns}} = E_{y_{ni}} = \frac{\cos \alpha_t}{\sin \alpha_{Mt} \cdot \cos \beta_b} \quad (32)$$

Pro lichý počet zubů:

$$E_{y_{ns}} = E_{y_{ni}} = \frac{\cos \alpha_t}{\sin \alpha_{Mt} \cdot \cos \beta_b} \cdot \cos \left(\frac{90}{z} \right) \quad (33)$$



5.1.3.4. Měření tloušťky zubů s radiálním kinematickým měřením

Metoda měření tloušťky zubu spolu s radiálním kinematickým měřením má jednu velkou kladnou vlastnost a to, že se současně měří i funkční tloušťka zubu, která obsahuje všechny úchyly zubu. Princip této metody spočívá, že se naměří každý zub ozubeného kola v jedné operaci. Ve srovnání je to mnohem rychlejší metoda než při vícenásobném měření ostatními metodami. Tento způsob se aplikuje pouze pro malá a středně velká ozubená kola [15].

5.2. Přejímka vztahující se k tělesům ozubených kol, osové vzdálenosti hřídelů

Tato přejímka přináší informace týkající se doporučených hodnot pro rozměrové úchyly polotovarů a stanovení os ozubeného kola. Já se budu věnovat pouze části jak správně stanovit výchozí osu ozubeného kola.

5.2.1. Přesnost polotovarů ozubených kol

Tato kapitola se věnuje správnosti výběru specifikací výchozích os výchozích povrchů, které je určují, a ostatních sdružených výchozích povrchů. Výchozí povrchy jsou ty, které jsou použity k určení výchozí osy. Výchozí osa určuje všechny detaily ozubeného kola, především rozteč, profil a toleranci sklonu. Tato osa je určena středy výchozích povrchů [20].

Číselné hodnoty parametrů sdružených s přesností zubů kol, jako je úchylna profilu, přidružená úchylna rozteče atd. mají význam pouze tehdy, vztahují-li se ke konkrétní ose rotace. Dojde-li ke změně osy, kolem které ozubené kolo během měření rotuje, potom se změní i naměřené hodnoty těchto parametrů. Z toho vyplývá, že výkresy ozubeného kola musejí určovat výchozí osu, která je určena pro specifikované tolerance zubů a ve skutečnosti i pro geometrii ozubeného kola jako celku [20].

5.2.2. Vztahy mezi výchozími a funkčními osami

Výchozí osa je ta, kterou výrobce (konstruktér), popřípadě kontrola použije k určení geometrie zubů kola a jednotlivých součástí. Především je to zodpovědnost konstruktéra, že výchozí osa bude určena s dostatečnou srozumitelností a přesností, tak aby se zajistilo splnění požadavků na ozubené kolo, právě ve vztahu k funkční ose. Většinou se toho dosáhne tím, že se výchozí osa zvolí tak, aby splývala s funkční osou.

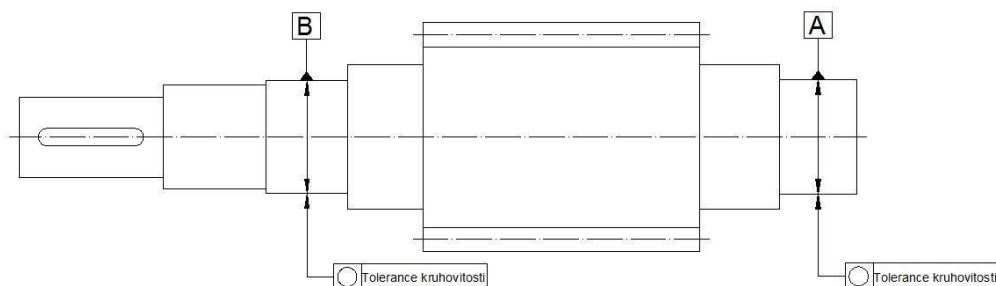
Obecně však bude nutné určit výchozí osu pomocí vhodných tolerancí, a následně určit její vztah ke všem ostatním osám (funkční a některé výrobní osy). Funkční osa ozubeného kola je osa, kolem které se ozubené kolo při své funkci otáčí. Tato osa je určena středy funkčních montážních povrchů a má význam pouze tehdy, pokud je vzata úplná montážní sestava ložisek. Funkční montážní povrchy jsou povrchy, které se používají k montáži ozubeného kola [20].

5.2.2.1. Stanovení výchozí osy

Výchozí osa součásti je určena pomocí výchozích povrchů a celkem existují čtyři metody jak určit tuto osu.

1) Metoda 1 – Výchozí osa určena dvěma krátkými výchozími povrchy

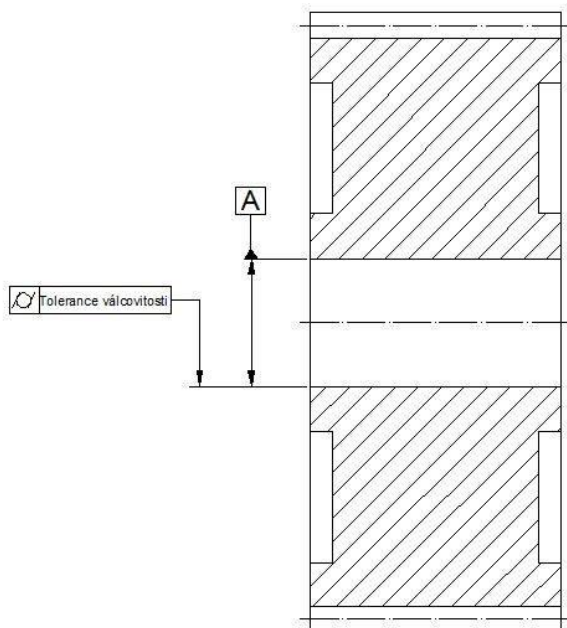
“Dva body na ose jsou určeny jako středy určených kružnic na dvou “krátkých” válcových nebo kuželových výchozích površích, jak je vidět na obrázku 19 [20].”



Obrázek 19: Výchozí osa určena dvěma krátkými výchozími povrchy [20]

2) Metoda 2 – Výchozí osa určena jedním dlouhým výchozím povrchem

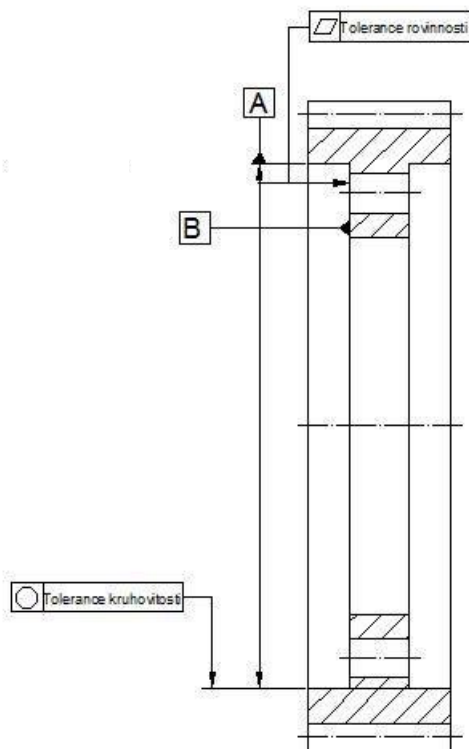
“Poloha a směr osy jsou obojí určeny jedním “dlouhým” válcovým nebo kuželovým výchozím povrchem, jak je znázorněno na obrázku 20. Osa děr může být vhodně realizována osou vloženého upínacího trnu, správně vsazeného [20].”



Obrázek 20: Výchozí osa určena jedním dlouhým výchozím povrchem [20]

3) Metoda 3 – Výchozí osa určena jedním válcovým povrchem a jedním čelem

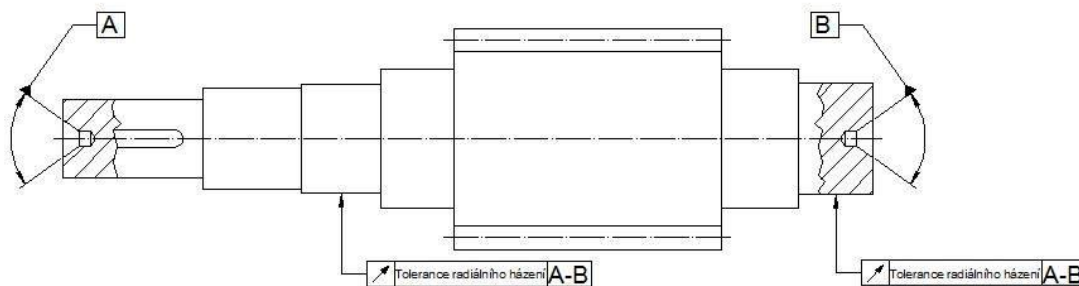
“Poloha osy je určena středem kružnice na “krátkém” válcovém povrchu a její směr výchozím čelem kolmým k této ose, jak je na obrázku 21 [20].”



Obrázek 21: Výchozí osa určena jedním válcovým povrchem a jedním čelem [20]

4) Metoda 4 – Použití středu děr

Tato metoda je běžná pro práci s ozubenými koly, která jsou spojena s hřídelí. Cílem je montovat je mezi středy děr v průběhu výroby a kontroly, kde středy těchto děr určují výchozí osu (obrázek 22). Obě tolerance ozubených kol a montážních (ložiskových) povrchů je nutné určit k výchozí ose [20].



Obrázek 22: Výchozí osa určena středy děr [20]

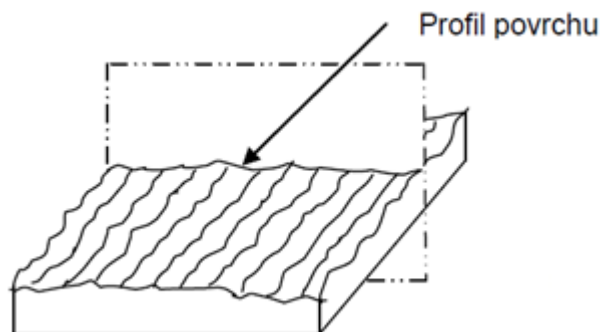
5.3. Přejímka vztahující se k textuře povrchu a kontrolní předloze pro dotyk zubu

Tato přejímka poskytuje informace pro měření drsnosti povrchu a pásma dotyku zubu ozubeného kola.

5.3.1. Definice parametrů textury povrchu

Povrch součástí se skládá ze základního profilu (parametr P), který se dále dělí na profil drsnosti (parametr R) a profil vlnitosti (parametr W). Pro vyhodnocení jednotlivých parametrů se používají filtry (vlnové délky). V následujících řádcích budou popsány základní termíny textury povrchu [21].

Profil povrchu – průsečnice skutečného povrchu a roviny kolmé k rovině skutečného povrchu viz obrázek 23.



Obrázek 23: Profil povrchu [21]

Profil základní – profil, který je odvozený z profilu povrchu potlačením krátkovlnných složek povrchu filtrem λ_S

Profil drsnosti – tento profil je odvozen ze základního povrchu potlačením dlouhovlnných složek pomocí filtru λ_C

Profil vlnitosti – periodická část dlouhé složky vlny po použití filtru λ_C a λ_f

Základní parametry struktury povrchu:

R – parametr určen z profilu drsnosti

W – parametr určen z profilu vlnitosti

P – parametr určen ze základního profilu

Filtry profilu:

λ_S – definuje rozmezí mezi drsností a kratšími složkami vln na povrchu

λ_C – definuje rozmezí mezi drsností a vlnitostí

λ_f – definuje rozmezí mezi drsností a delšími složkami vln na povrchu

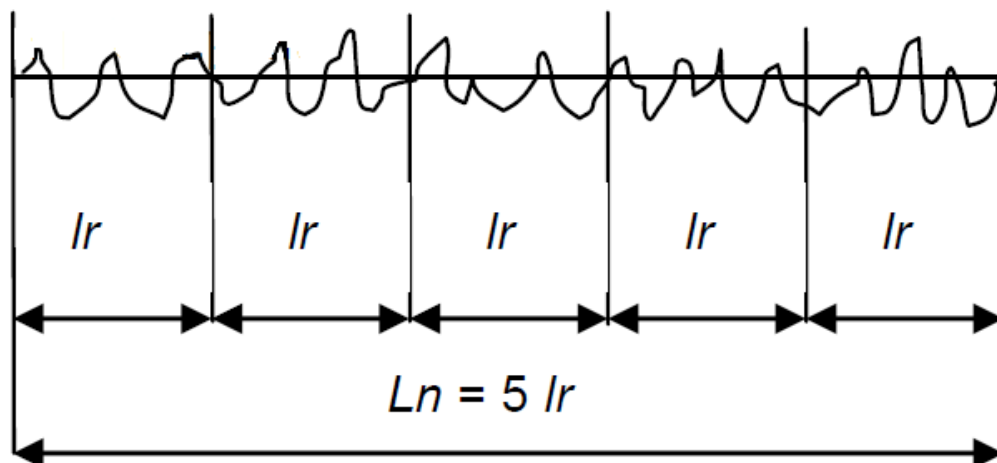
Základní délky:

l_r – základní délka pro R parametry se rovná vlnové délce dlouhovlnného filtru λ_C

l_w – základní délka pro W parametry se rovná vlnové délce filtru λ_f

l_p – základní délka pro P parametry se rovná vyhodnocované délce l_n

l_n – vyhodnocovaná délka pro profil R obsahuje implicitně pět základních délek l_r , jiný počet musí být předepsán.

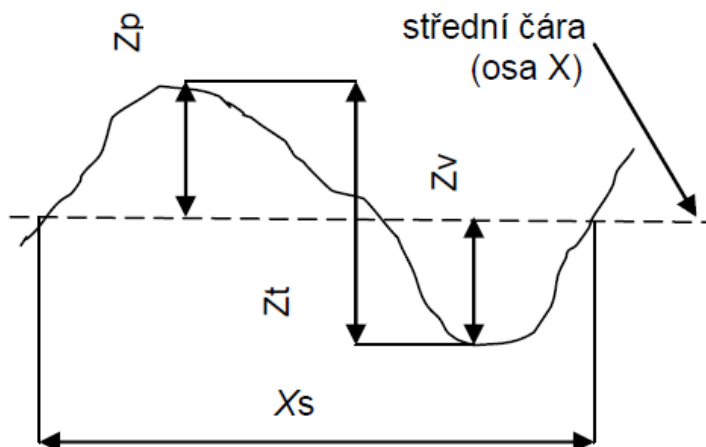


Obrázek 24: Vyhodnocovaná délka [21]

Vyhodnocovaná délka pro profil W není předepsána a je nutný jí stanovit, naopak pro profil P se vyhodnocovaná délka rovná celkové délce předepsaného prvku.

Základní prvky profilu:

Prvek profilu - výstupek profilu a přilehlá prohlubeň



Obrázek 25: Základní prvky profilu [21]

Vysvětlivky k obrázku:

Z_p – výška výstupku profilu (největší vzdálenost bodu profilu od osy X)

Z_v – hloubka prohlubně profilu (nejnižší vzdálenost bodu profilu od osy X)

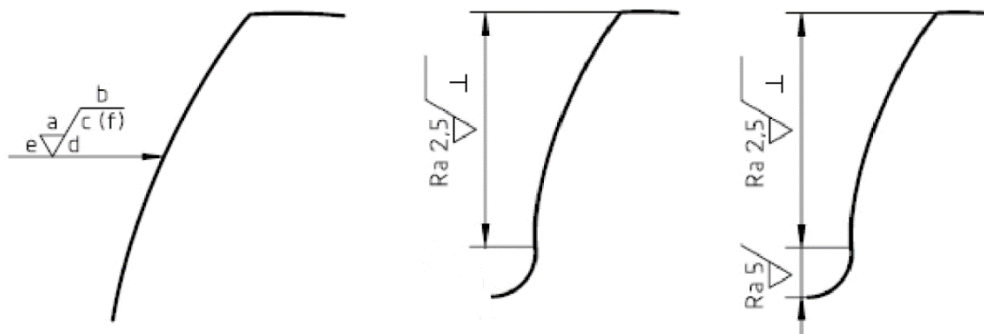
Z_t – výška prvku profilu (součet výšky výstupku a hloubky prohlubně)

X_s – šířka prvku profilu (délka úseku osy X protínající prvek profilu)

Střední čára – referenční čára, ze které se měří profil souřadnice $Z(x)$

5.3.2. Termíny a značky uváděné ve výkresové dokumentaci

Jestliže jsou stanoveny nebo požadovány provozní a návrhové požadavky na danou hodnotu drsnosti povrchu, je nutné jí uvádět ve výkresu, jak je znázorněno na obrázku 26 [22].



Obrázek 26: Značení drsnosti zubu ve výkresové dokumentaci [22]

5.3.3. Měřicí zařízení

Pro měření drsnosti je běžně používáno zařízení s měřicím dotykem, které může být provedeno v několika variantách [22]:

- jedna nebo dvě ližiny posouvající se po měřeném povrchu (přístroj s přímkou v referenční rovině)
- ližiny umožňující pohyb v referenční rovině, kde tato rovina udává základní povrch
- programovatelný a nastavitelný generátor referenčních čar ve spojení s protiskluzovým čidlem, tato varianta je například realizována souřadnicovým měřicím strojem
- posouzení tvaru, drsnosti a vlnitosti pomocí pohybu ližin a přímé údaje kombinované s velkým měřicím rozsahem

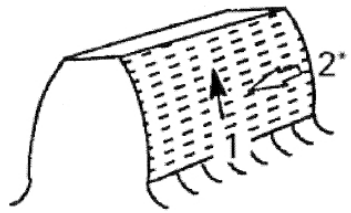
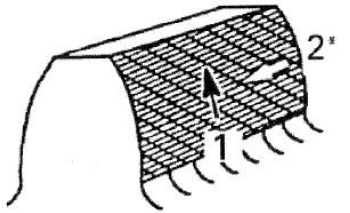
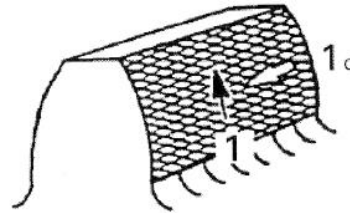
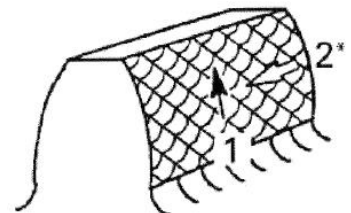
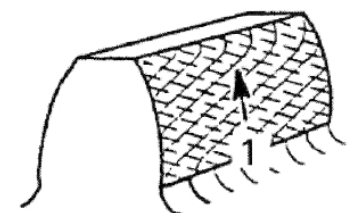
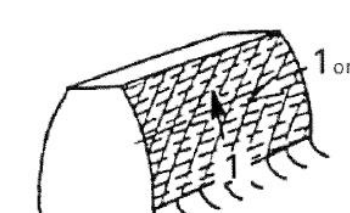
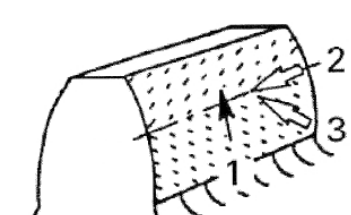
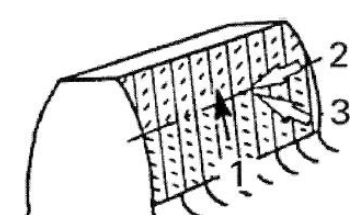
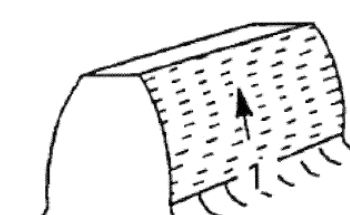
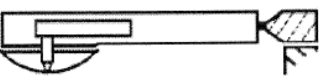
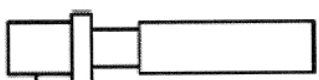
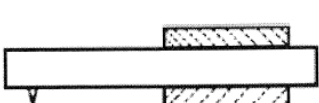

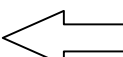
Podle ustanovení norem by měl být poloměr vrcholu hrotu snímacího doteku do 2, 5 nebo 10 μm a úhel snímání 60 nebo 90°. Protokol s vyhodnocením měření povrchu by měl také udávat poloměr hrotu a úhel snímacího doteku [22]. Na obrázku 27 je znázorněno zařízení pro měření drsnosti povrchu od společnosti Mahr, které se nachází v Měrovém středisku Carl Zeiss při ČVUT a ukázka měření drsnosti povrchu hlavové kružnice šikmého evolventního ozubení.



Obrázek 27: Měřicí zařízení drsnosti povrchu a ukázka měření drsnosti povrchu hlavové kružnice

V tabulce 5 jsou znázorněny prvky přístrojů a doporučené směry pohybu měření ke vztahu dané technologii obrábění.


Tabulka 5: Prvky přístrojů a směry pohybů měření ve vztahu k obrábění [22]

Broušení (indexovaný tvar)	Broušení (průběžný tvar)	Broušení (křížkovaný tvar)
		
Frézování	Obrážení	Ševingování (ponorné)
		
Honování (externí)	Ševingování (konvenční)	Honování (interní)
		
Směr příčný	Typ přístroje	
1 a 3	Nástroj s vedením	Bočně upevněné vedení 
2		Čelně upevněné vedení 
2*	Nástroj s referenčním kalibrem 	
	Přednostní směr pohybu měření pro stanovení Rz, Ra, Rk	
	Přednostní směr pohybu měření pro stanovení dalších informací jako výšky malých značek posuvu	



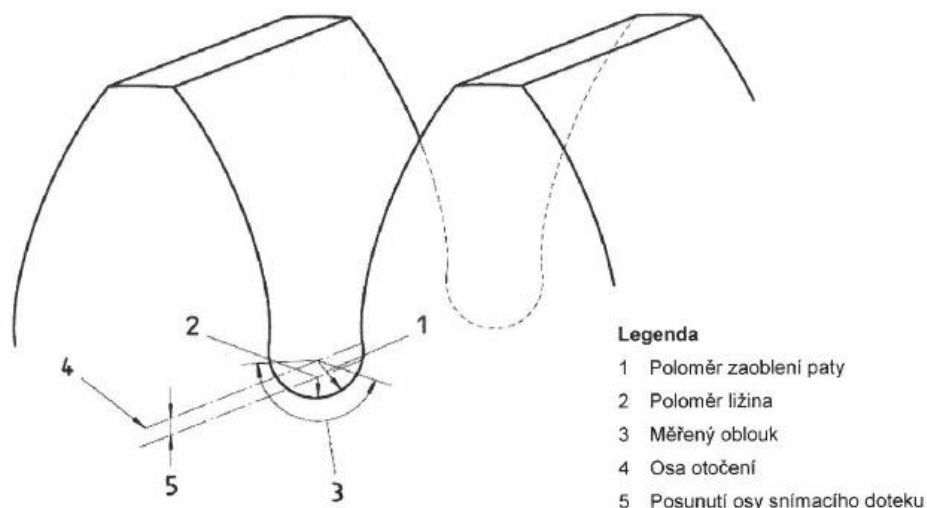
Pro měření drsnosti a vlnitosti je bezpodmínečnou podmínkou použití protiskluzových čidel a filtrů s přednastavenými cut-off, které budou vylučovat dlouhé nebo krátké vlny složek profilu povrchu. V tabulce 6 jsou stanoveny normalizované cut-off pro daný modul a pracovní výšku zubu [22].

Tabulka 6: Filtrování a vlnitost cut-off [22]

Modul [mm]	Normalizovaná pracovní výška zubu [mm]	Normalizovaná cut-off [mm]	Počet Cut-off na pracovní výšce zubu
1,5	3	0,250	12
2	4	0,250	16
2,5	5	0,250	20
3	6	0,250	24
4	8	0,800	10
5	10	0,800	12
6	12	0,800	15
7	14	0,800	17
8	16	0,800	20
9	18	0,800	22
10	20	0,800	25
11	22	0,800	27
12	24	0,800	30
16	32	2,500	13
20	40	2,500	16
25	50	2,500	20
50	100	8,000	12

5.3.4. Měření drsnosti povrchu boků zubu ozubeného kola

Drsnost povrchu boku zubů se většinou měří na měřicím zařízení se snímacím dotykem popsaném a znázorněném v kapitole 5.3.3. Při měření drsnosti nebo vlnitosti je nutné použít protiskluzové čidla a filtry, které budou potlačovat dlouhé nebo krátké vlny složek profilu povrchu. Důkladně by měl být vybrán i poloměr snímacího doteku, jinak by mohlo být měření chybné. Během samotného měření drsnosti má být dráha dotykového hrotu kolmá na měřený povrch, proto vzhledem k zakřivení povrchu zubu je nutné udržovat dotykový hrot co nejbližší k měřenému povrchu. Jestliže se měří drsnost povrchu zaoblení paty zubu přechodového poloměru ozubeného kola, je zapotřebí zvolit speciální metody měření. Jedna taková metoda je zobrazena na obrázku 28. Snímací hrot umístěn na otočném vřetenu s poloměrem menším než je poloměr zaoblení paty zubu opisuje kruhový oblouk a zaznamenává hodnoty. Pomocí příslušného softwaru se vyhodnotí drsnost povrchu [22].



Obrázek 28: Měření drsnosti patního přechodového poloměru [22]

5.3.5. Vyhodnocení výsledků měření

Naměřené hodnoty drsnosti lze porovnat se stanovenými přípustnými hodnotami. Hodnota jednotlivých parametrů je většinou stanovena jako průměr hodnot ze sousedních měřených délek podél profilu. Ale je třeba brát v potaz, že se drsnost povrchu může změnit systematicky podél průběhu boku ozubeného kola. Z tohoto důvodu je vhodné stanovení hodnoty drsnosti pro jednotlivé sousedící délky vzorků. Aby se zlepšila statistická nejistota, je možné vypočítat hodnotu aritmetického průměru z několika paralelních drah. Nejlepších výsledků lze dosáhnout, když je profil měřen bez smyku vůči referenčnímu vzorku. To je případ s vybavením pod bodem b a d v kapitole 5.3.3. Jestliže jsou profily zubů příliš malé pro vyhodnocení měření na pěti přilehlých délkách vzorkování, tak se provádí měření na jednotlivých zubech přes jednu měřenou délku [22].

5.3.6. Přípustné hodnoty parametrů

Zjištěné hodnoty parametrů musí být srovnatelné se stanovenými přípustnými hodnotami. Stanovené hodnoty R_a a R_z by měly být vybrány z tabulek 7 a 8. Můžeme použít pouze jednu hodnotu, nikoliv obě na stejnou část [22].



Tabulka 7: Doporučené mezní hodnoty pro aritmetický průměr úchylky Ra [22]

Třída	Ra[μm]		
	Modul [mm]		
	$m < 6$	$6 \leq m \leq 25$	$m > 25$
1		0,04	
2		0,08	
3		0,16	
4		0,32	
5	0,5	0,63	0,80
6	0,8	1	1,25
7	1,25	1,6	2,0
8	2,0	2,5	3,2
9	3,2	4	5,0
10	5,0	6,3	8,0
11	10	12,5	16
12	20	25	32

Tabulka 8: Doporučené mezní hodnoty pro deset nepravidelností bodů výšky Rz [22]

Třída	Rz[μm]		
	Modul [mm]		
	$m < 6$	$6 \leq m \leq 25$	$m > 25$
1		0,25	
2		0,50	
3		1	
4		2	
5	3,2	4	5
6	5	6,3	8
7	8	10,0	12,5
8	12,5	16	20
9	20	25	32
10	32	40	50
11	63	80	100
12	125	160	200

Pozn. Mezi třídami přesnosti ozubených kol uvedených v normě ISO 1328-1 a třídami drsnosti uvedených výše v tabulkách 7 a 8 neexistuje žádné spojení.



5.4. Přejímka vztahující pro hodnocení měřidel ozubených kol

Tato přejímka se vztahuje k hodnocení měřidel ozubených kol a obsahuje informace o zkouškách měřicích zařízení, vlivech ovlivňující měření, postupy filtrace, artefáciích na kterých se zkoušky provádějí a v neposlední řadě návody pro určení nejistoty měření.

Přesnost měřidel používaných pro měření ozubených kol je ovlivňována několika faktory, mezi které patří kolmost a rovnoběžnost přístrojového vedení navzájem, otočný stůl, přímmost vedení, lineární chyby polohy a chyby úhlového pohybu (kymácení kolem příčné osy, valení, vybočování) pohybových částí přístroje. Na přesnost měřidel mohou mít nepříznivý vliv také chyby způsobené elektrickými díly, stupnicemi, ovládacími prvky a softwarem. Existuje hned několik způsobů k určení těchto chyb, ale jelikož je moje práce zaměřená na měření ozubení při použití CMM, tak uvedu pouze postupy hodnocení souřadnicových měřicích strojů [23].

5.4.1. Postupy hodnocení souřadnicových měřicích strojů

Měření ozubených kol lze na souřadnicovém měřicím stroji měřit jak s otočným stolem, tak i bez otočného stolu, při použití speciálního softwaru pro měření ozubení. Osa ozubeného kola se dá určit pomocí měření čepu ložiska nebo jiné přesně vyrobené součásti a použije se pro další měření [23].

5.4.1.1. Zkouška technického stavu podle ISO 10360

V této normě jsou stanoveny přejímací a periodické zkoušky, podle kterých se zjišťuje technický stav stroje. Ověřování se provádí pomocí etalonů v podobě základních měrek a přesnými kalibrovanými koulemi, většinou o průměru 25 nebo 30 mm. Jsou specifikovány tyto tři zkoušky [23]:

➤ Objemové měření úchylek délky E (obrázek 29)

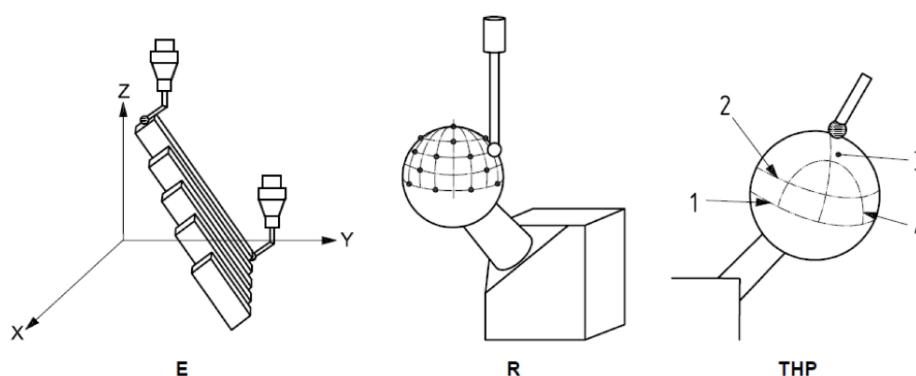
Pro tuto zkoušku je nutné, aby byla řada 5 kalibrovaných základních měrek proměřena třikrát v sedmi polohách s dvěma kontakty na každou měrku. Orientace měrek může být v libovolném směru v prostoru (objemové měření). Všech 105 měření musí být v toleranci 100% [23].

➤ **Objemové měření úchylek snímací hlavy R (obrázek 29)**

Pro provedení zkoušky R se musí změřit velmi přesně vyrobená polokoule ve 25 rovnoměrně rozdělených jednotlivých naměřených bodech. Všechny tyto naměřené body se musí použít pro vyhodnocení. Celková měřená úchylka tvaru je objemová nejistota měření R [23].

➤ **Objemové měření úchylek skenování THP (obrázek 29)**

Jedná se o podobnou zkoušku jako R, ale namísto bodového měření se musí provést skenování několika křivek [23].

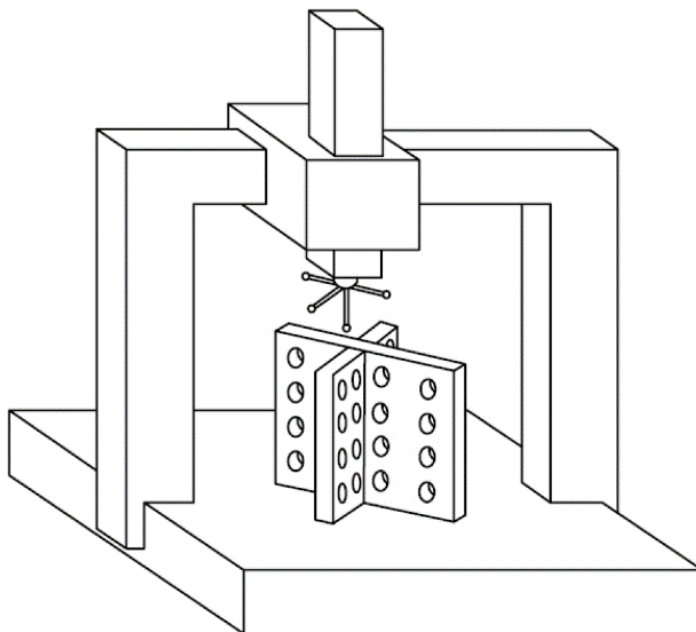


Obrázek 29: CMM zkouška objemového měření [23]

Zkoušky THP a R jsou více ovlivňovány technickým stavem snímacího systému, kdežto zkouška E zahrnuje jak snímací systém, tak i celkovou přesnost systému. Ovšem nejsou to jenom tyto tři zkoušky, které lze použít pro zjištění technického stavu stroje, jako alternativa se ke kontrole přesnosti souřadnicového měřicího stroje obvykle používá deska s koulemi [23].

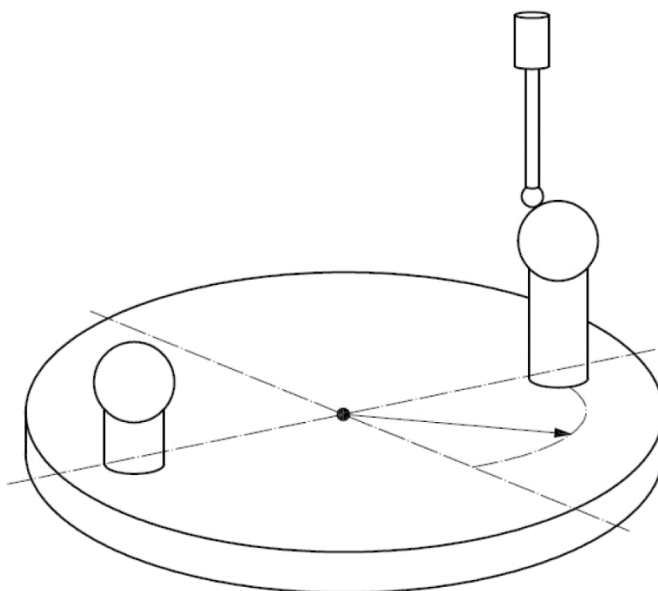
➤ **Zkouška deskou s koulemi**

Deska vyrobená z oceli nebo jiného materiálu, na které jsou rozmístěny do pravoúhlého tvaru velmi přesné koule (obrázek 30). Pomocí speciálního softwaru je poloha jednotlivých koulí automaticky měřena a zároveň porovnávána s kalibrovanými polohami. Deska s koulemi může být v měřicím prostoru stroje umístěna v různých orientacích např. rovnoběžně se souřadnicemi nebo diagonálně [23].



Obrázek 30: Zkouška deskou s koulemi [23]

U souřadnicových měřicích strojů, kde se měří ozubení pomocí otočného stolu, by se postupy kontroly technického stavu stroje také měly řídit podle normy ISO 10360 (obrázek 31) [23].



Obrázek 31: Zkušební otočný stůl [23]

6. Softwarová podpora pro kontrolu ozubení

Měření ozubení je problematická a specifická záležitost, která vyžaduje speciální jednoúčelový software. Například společnost Zeiss používá pro měření ozubení software Gear Pro, Hexagon metrology má k dispozici dva softwary, PC – DIMIS a Quindos Gears, Mitutoyo disponuje programem Gearpak atd. Z toho je patrné, že každá společnost spojená se souřadnicovým měřením má svůj speciální software pro měření této geometrie. Jelikož měření mé součásti, která je osazena drážkováním, na které se vztahují stejná pravidla měření jako na ozubení, bude měřena ve školícím a měrovém středisku Carl Zeiss, tak se dále budu zabývat pouze softwarem Gear Pro.

Jedná se o software pro kontrolu ozubených kol od společnosti Carl Zeiss, který je volitelnou opcí programu Calypso a je určen pro souřadnicové měřicí stroje s dotykovou skenovací hlavou. S programem Gear Pro jsme schopni kontrolovat téměř každý typ evolventního ozubení (drážkování) ať už vnější, nebo vnitřní. Tento program je dodáván v několika variantách a každá varianta je určena pro daný typ ozubení [24]:

- **Gear Pro involute** – pro čelní ozubená kola
- **Gear Pro bevel** – pro kuželová ozubená kola
- **Gear Pro worm** – pro šneky
- **Gear Pro rotor** – pro rotory (šroubové ozubení)
- **Gear Pro hob** – pro odvalovací frézy určené k výrobě evolventních čelních ozubených kol



Obrázek 32: Typy ozubených kol a speciálních geometrií, které lze měřit v SW Gear Pro [25]



Gear Pro lze použít pouze s měřicím softwarem Calypso, kde při samotném měření přistupuje k funkcím a datům programu Calypso. Ovšem některé funkce programu Gear Pro neobsahuje a je nutné je realizovat v Calypsu. Funkce, které nelze provést v programu Gear Pro [24]:

- kalibrace snímačů
- určení osy otočného stolu
- určení souřadného systému součásti (vyrovnání součásti)
- automatický průběh měření (CNC)

6.1. Funkční rozsah kontroly v programu Gear Pro involute

Pomocí programu Gear Pro involute lze provádět měření těchto parametrů ozubení [24]:

- profil
- sklon boku zubu
- rozteč
- patní kružnice
- hlavová kružnice

Měření rozteče lze provádět jako jednoboké či dvouboké, kdežto profil a sklon boku zubu lze provést v několika krocích jako měření řezů v různé úrovni.

Podle národních a mezinárodních norem jsou možná následující vyhodnocení [24]:

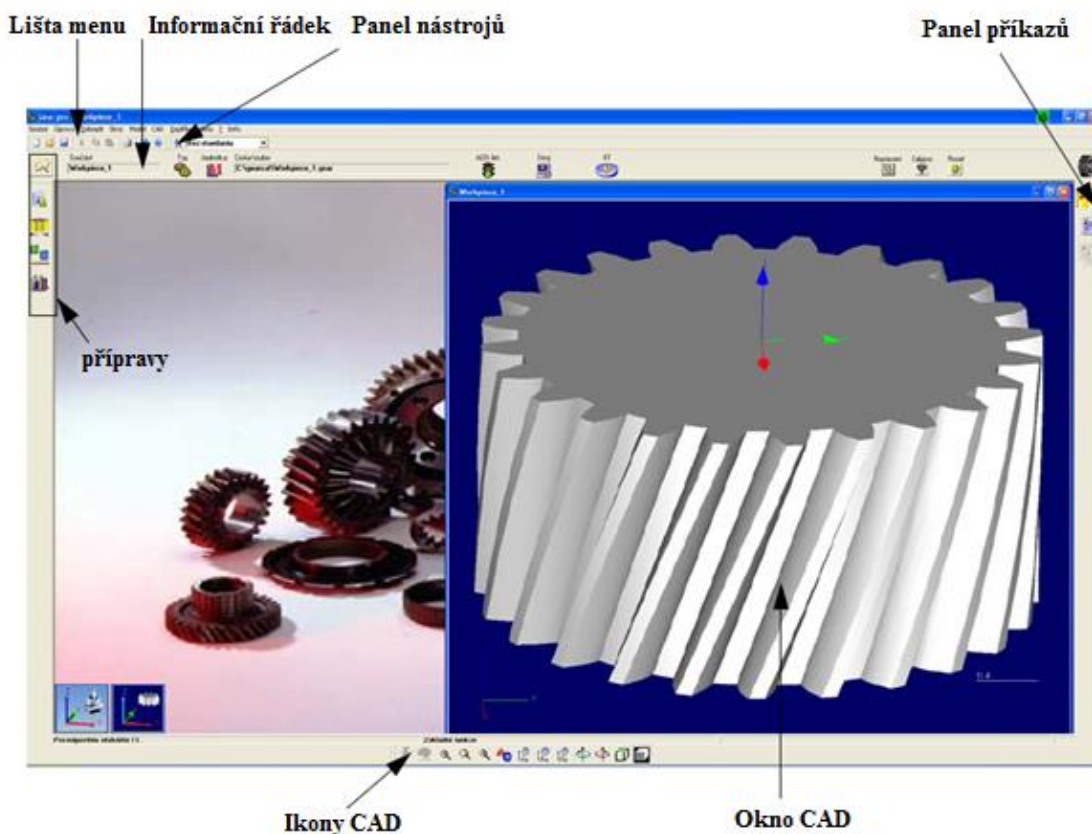
- standardní sklon boku a profil
- vyhodnocení soudkovitosti
- sražení
- K-diagramy (toleranční pásma)
- topografické vyhodnocení
- rozteč
- obvodové házení
- tloušťka zubu a její parametry (např. míra přes kuličky, válečky atd.)

Výsledky měření lze zobrazit buď na obrazovce, protokolu v tištěné podobě nebo ve formě souborů (PDF, qs – STAT, ASCII) v následující podobě [24]:

- standardní zobrazení – grafika pro profil/sklon zubu a dělení na různé formáty
- tabulkový seznam výsledků měření
- topografické zobrazení jako alternativa ke standardnímu zobrazení

6.2. Příprava měření v programu Gear Pro involute

Jakmile spustíme software Gear Pro zobrazí se pracovní okno, které je na obrázku 33. Na něm je vidět, že obsahuje klasickou lištu menu, informační řádek, panel nástrojů a příkazů, lištu přípravy, kde se definuje měření a nakonec CAD informace.

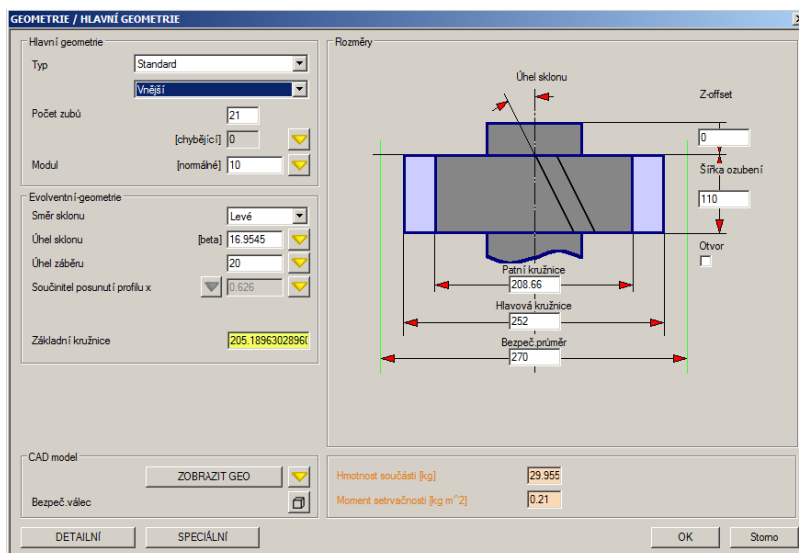


Obrázek 33: Úvodní okno softwaru Gear Pro involute

Postupná příprava a definice měření je následující:

1) *Načíst ozubení nebo zadat parametry ozubení*

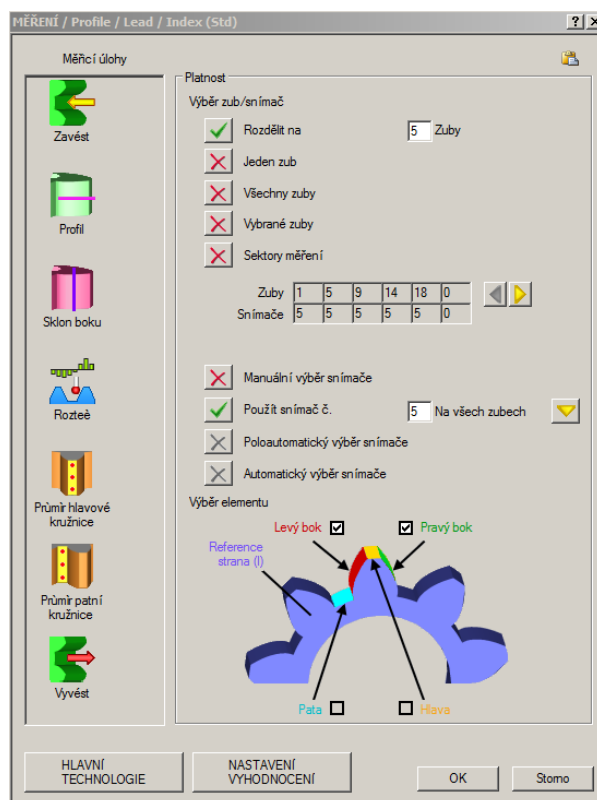
Jestliže není k dispozici model ozubeného kola, tak se pomocí údajů uvedených ve výkresové dokumentaci nadefinuje. Definiuje se pomocí základních parametrů ozubení jako je modul, počet zubů, průměr hlavové nebo patní kružnice a úhel záběru (obrázek 34). Po vyplnění těchto údajů se nám vygeneruje model, který slouží zejména pro vizuální kontrolu zadaných dat geometrie, pro samotné měření není tento model důležitý.



Obrázek 34: Definice základních parametrů ozubeného kola

2) Definovat průběh a vyhodnocení měření

V dalším kroku následuje zadávání dat pro zjetí a vyjetí snímače či nastavení měření charakteristik profilu, sklonu boku zubu, rozteče a hlavové nebo patní kružnice. Pro každou charakteristiku se musí zvolit, na kolika zubech měření proběhne, zdali se má změřit pravý nebo levý bok a u kružnic podle toho, která se bude měřit, se zvolí možnost buď hlava, nebo pata.

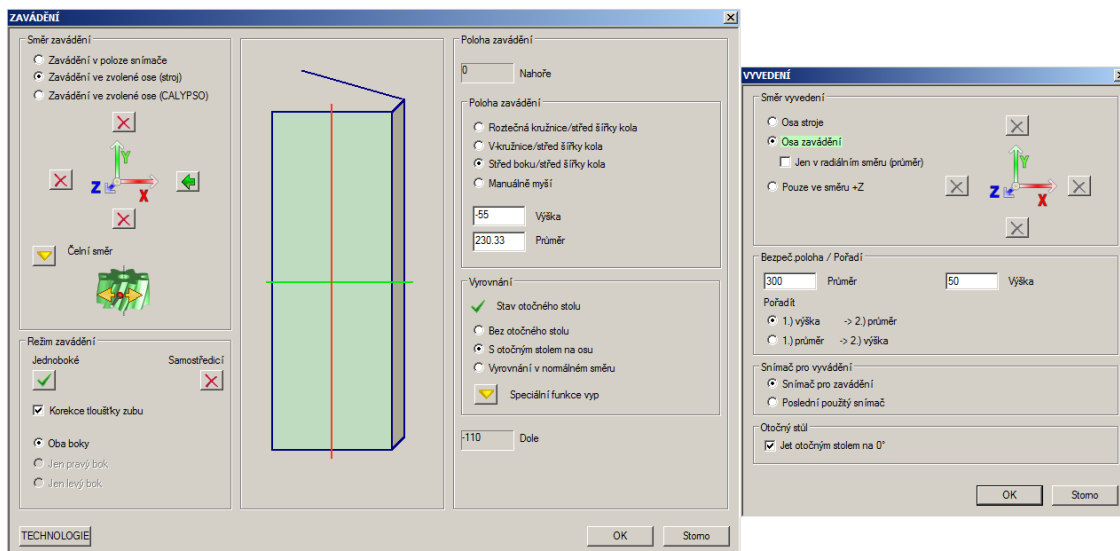


Obrázek 35: Definice měření



➤ *Zavádění a vyvádění snímače*

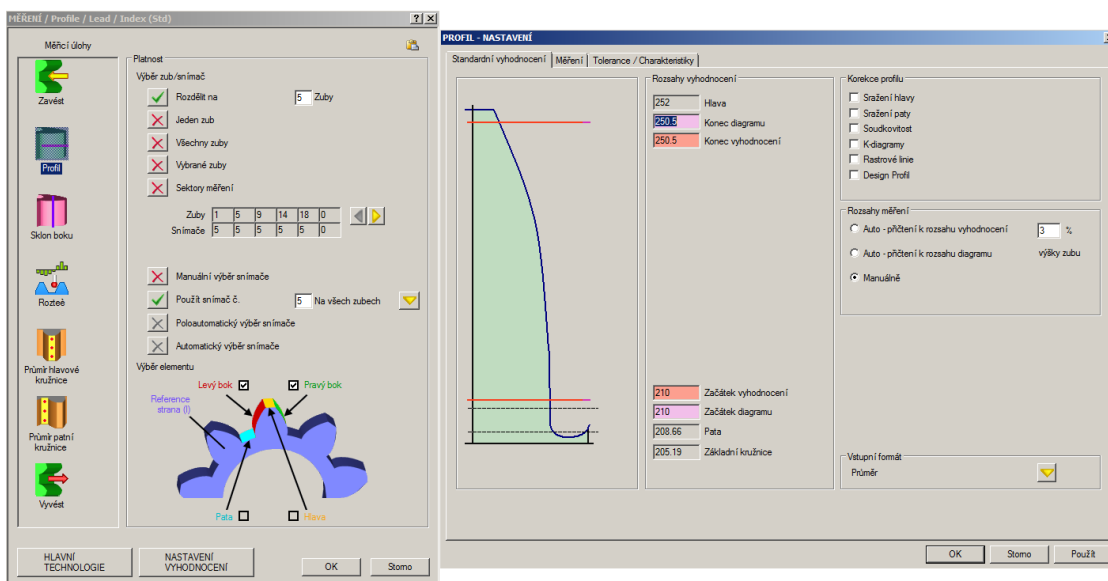
Definice zavádění snímače spočívá ve zvolení směru zajiť, v poloze zavádění (průměr a výška) a ve vyrovnání, kde se určí, zda se měří s otočným stolem nebo bez otočného stolu. Směr vyvedení se většinou volí stejný jako směr zajiť.



Obrázek 36: Definice zavádění a vyvádění snímače

➤ *Měření profilu*

Při měření profilu je nutné zvolit počet zubů (minimálně tři), na kterých proběhne měření a jestli se mají měřit oba boky zubu nebo pouze jeden bok. Následně se zvolí začátek a konec vyhodnocení/diagramu a určí se vzdálenost, ve které se bude měřit profil. V dalších položkách lze nastavit tolerance a charakteristiky, které mají být vyhodnoceny ve výstupním protokolu.

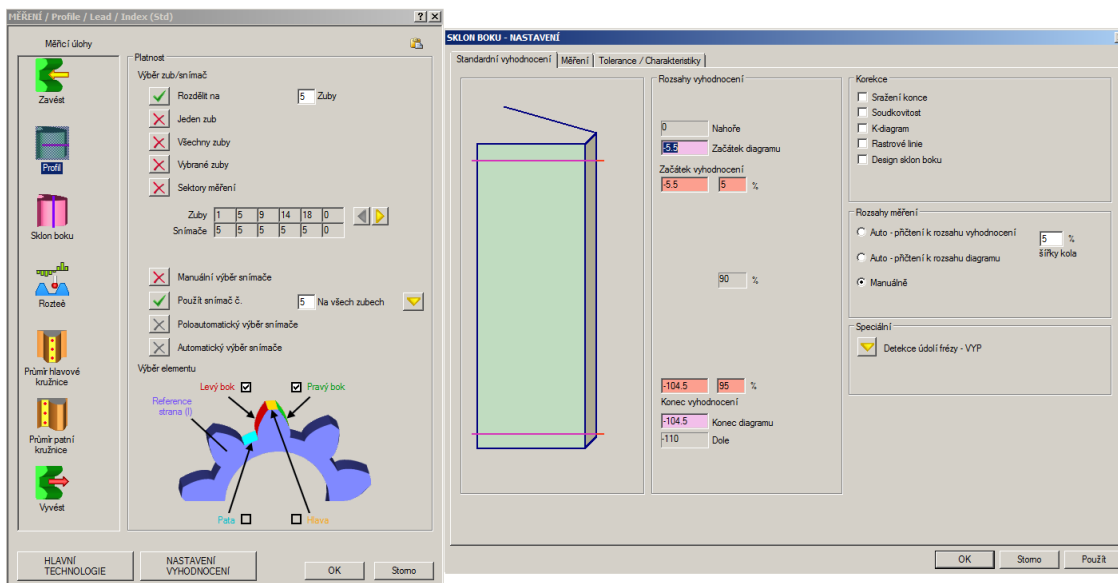


Obrázek 37: Definice měření profilu zubu



➤ *Měření sklonu boku zubu*

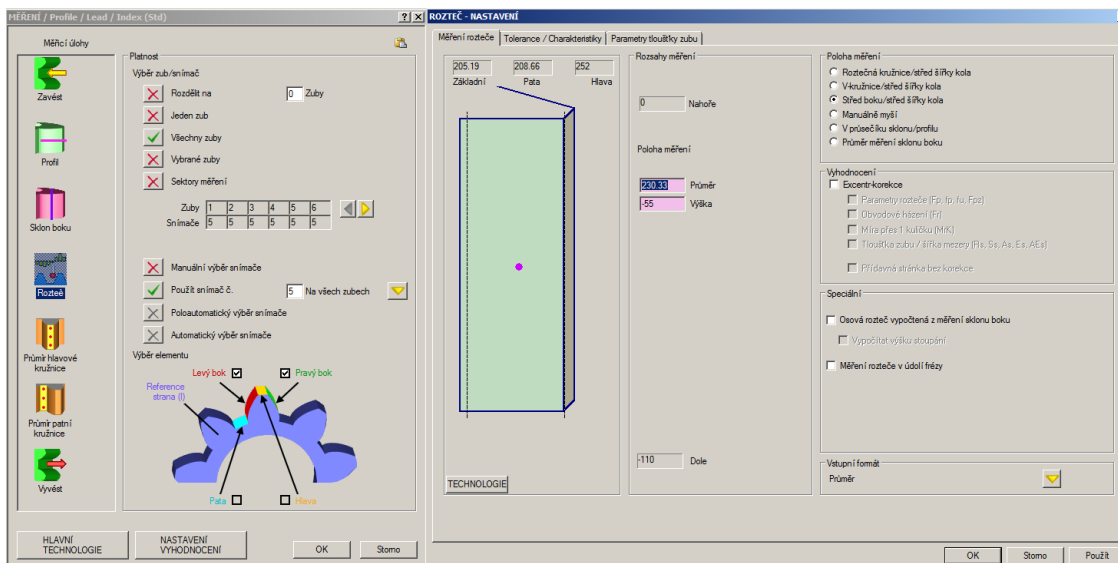
Při měření sklonu boku zubu platí stejná pravidla jako pro profil, určí se počet zubů a boky zubu pro měření, nastaví se začátek a konec vyhodnocení/diagramu a průměr na kterém se měření bude realizovat.



Obrázek 38: Definice měření sklonu boku zubu

➤ *Měření rozteče*

Opět velice podobné měření jako u předchozích dvou charakteristik, nastaví se poloha měření a zvolí se počet zubů. Ovšem pro vyhodnocení rozteče je nutné změřit všechny zuby, nestačí pouze tři, jako to bylo u předchozích dvou případů.

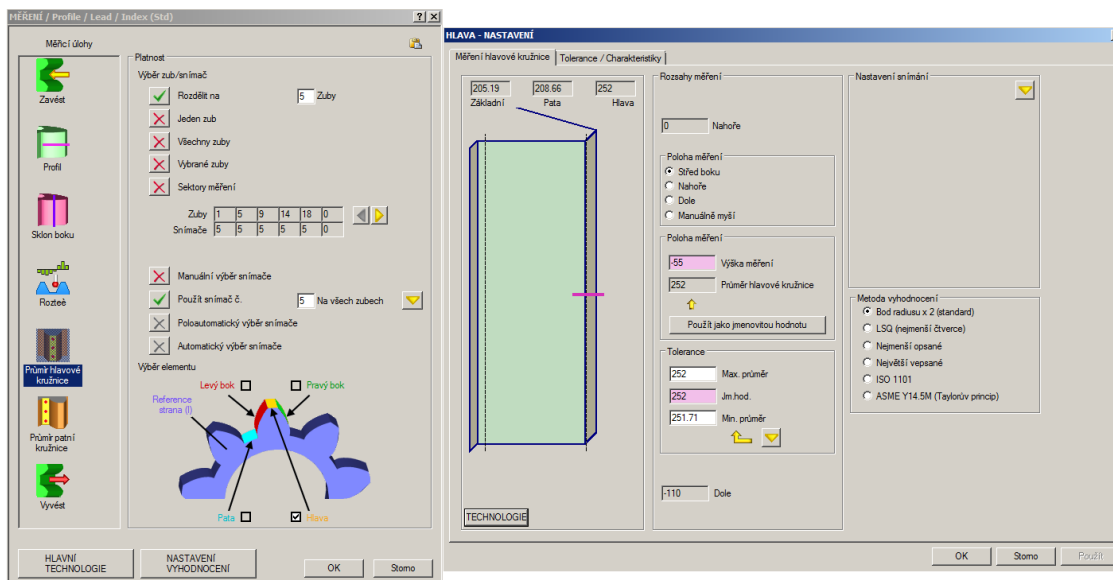


Obrázek 39: Definice měření rozteče

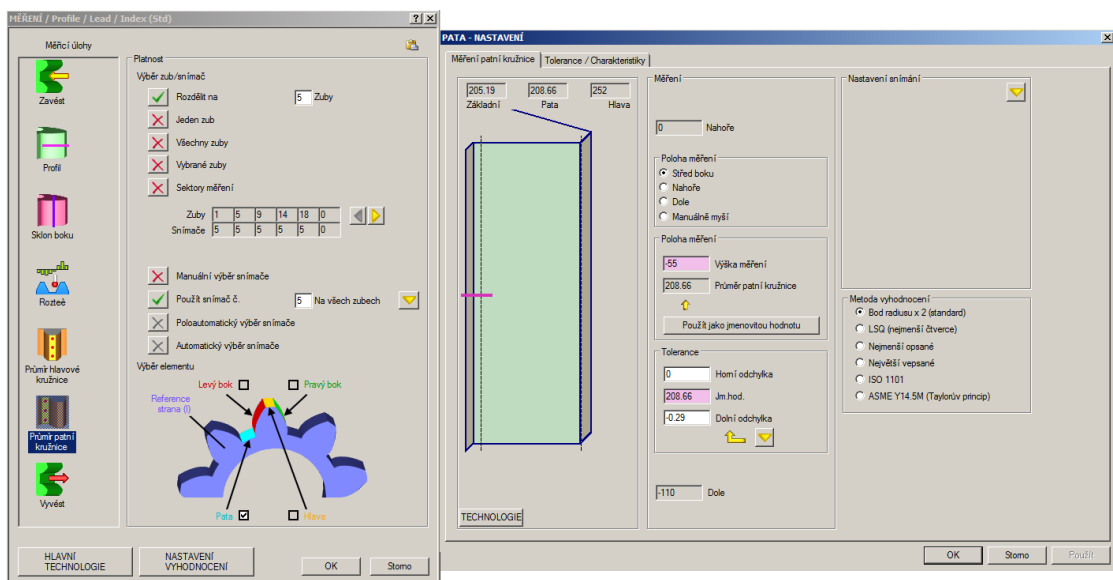


➤ Měření hlavové a patní kružnice

Zase se jedná o stejný princip nastavení měření jako u předešlých charakteristik, zvolí se počet zubů (pro největší přesnost se doporučují všechny zuby, ale není to podmínkou), určí se poloha měření a nastaví se tolerance a charakteristiky do výstupního protokolu.



Obrázek 40: Definice měření hlavové kružnice ozubeného kola



Obrázek 41: Definice měření patní kružnice ozubeného kola

3) Definovat prezentaci

V posledním kroku se nastavuje formát prezentačního protokolu. Můžeme nastavit tabulkový seznam naměřených hodnot nebo topografický výstup jednotlivých charakteristik atd.



7. Analýza GPS součásti z leteckého průmyslu

Pro komplexní analýzu geometrických specifikací produktu byla vybrána hřídel s vnějším drážkováním od společnosti Latecoere Czech Republic s.r.o., která se používá v leteckém průmyslu. Mým úkolem bude porovnat měření z hlediska upnutí součásti, neboť ve společnosti Latecoere upínají součást do sklíčidla otočeného stolu podélně, kde může docházet vlastní vahou součásti k průhybu a tím i k znehodnocení výsledků měření. Vlastní měření proběhne v Měrovém a školicím středisku Carl Zeiss na Fakultě strojní ČVUT v Praze, kde se součást umístí opět do sklíčidla otočného stolu, ale v tomto případě na výšku, kde nemůže docházet k průhybu dílu vlastní vahou. Porovnání naměřených hodnot budu vyhodnocovat pomocí koeficientů způsobilosti měřidla. Pro vlastní analýzu zvolím převážně charakteristiky měřené na drážkování a dvě charakteristiky na hřídeli.

7.1. Latecoere Czech Republic s.r.o.

Společnost Latecoere Czech Republic s.r.o. historicky navazuje na firmu Letov a je součástí francouzské společnosti Groupe Latecoere. Hlavní centrála podniku se nachází ve městě Toulouse v jižní Francii, a je považována za nejvýznamnější středisko leteckého a kosmického průmyslu v Evropě. V současné době společnost vyrábí a dodává své produkty předním světovým výrobcům letadel a to firmám jako je Airbus, Embraer, Boeing a Dassault [26].

Strukturu výrobních technologií podniku lze rozdělit do třech hlavních výrobních úseků:

- 1) Výroba kovových dílů a kinematických podsestav včetně povrchových úprav
- 2) Výroba dílů z kompozitních materiálů zahrnující také výrobu montážních podsestav, které obsahují kompozitní díly
- 3) Oddělení finálních montáží

7.1.1. Výrobní program společnosti

- 1) Výroba dílů a sestav mechanismů dveří s následnou montáží kompletních pasažérských dveří pro letouny Airbus A320 Family, které se dodávají přímo na montážní linku společnosti Airbus v Saint Nazaire ve Francii [26].



Obrázek 42: Pasažérské dveře letadla Airbus A320 [26]

- 2) Výroba dílů a sestav mechanismů dveří s průběžnou montáží dveří horní paluby a zavazadlového prostoru včetně instalace dveřních mechanismů pro letoun Airbus A380, které se následně posílají na finální montáž do mateřské společnosti v Toulouse [26].



Obrázek 43: Kostra dveří horní paluby a zavazadlového prostoru [26]

- 3) Výroba dílů a sestav mechanismů dveří a montáž kompletních dveří pro cestující, servisní, nákladové a nouzové dveře pro letouny Embraer ERJ 170/175/190/195. Které následně putují na montážní linku společnosti Embraer do Brazílie [26].



Obrázek 44: Dveře letadel Embraer [26]



- 4) Výroba kompozitních potahů, kovových dílů a dílů kostry dveří. Provádění montáže podsestav koster dveří a podmontáže mechanismů pasažérských dveří letadla Boeing B787. K finalizaci se doposílají do mateřské společnosti [26].



Obrázek 45: Kovové díly kostry dveří letadla Boeing B787 [26]

- 5) Výroba dílů a mechanismů servisních a zavazadlových dveří s následnou montáží včetně instalace mechanismů pro letoun Dassault Falcon F7X. Opět se ke kompletní finalizaci dodávají do mateřské společnosti [26].



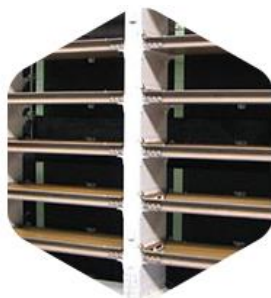
Obrázek 46: Kostra dveří letadla Dassault Falcon F7X [26]

- 6) Výroba a montáž skříní palubní elektroniky pro Airbus A380. V rámci Groupe Latecoere probíhá další finalizace [26].



Obrázek 47: Skříně palubní elektroniky letadla Airbus A380 [26]

- 7) Výroba dílů a montáž skříní pro instalaci palubní elektroniky pro letoun Airbus A400M. Opět další finalizace probíhá v rámci dalších společností [26].



Obrázek 48: Skříně palubní elektroniky letadla Airbus A400M [26]

- 8) Výroba kovových a kompozitních dílů včetně drobných podmontáží pro sestavu střední kýlové části trupu letounu Airbus A350, která je posílaná na finální montáž do podniku Airbus v Nantes ve Francii [26].



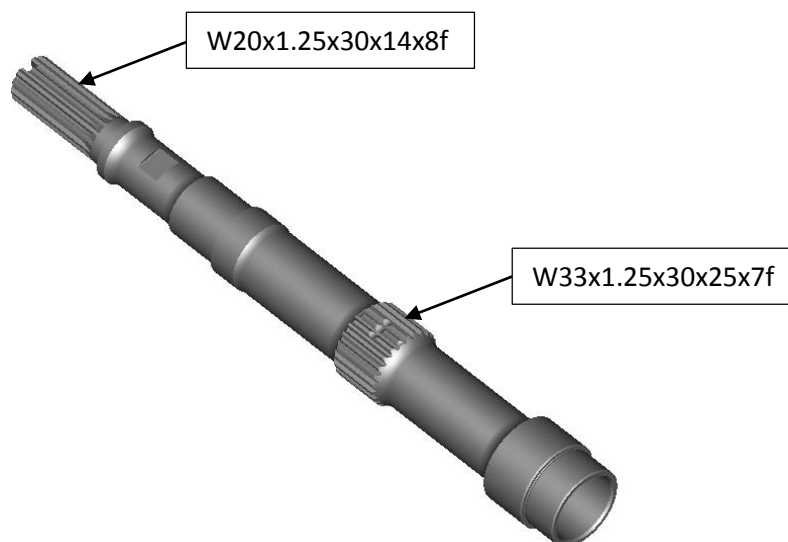
Obrázek 49: Díly pro letadlo Airbus A350 [26]

7.2. Postup tvorby plánu měření na CMM

Samotná tvorba plánu měření je rozvržena do několika bodů, počínaje analýzou výkresové dokumentace až po tvorbu protokolů o měření. Na základě analýzy výkresu se zvolí vhodné upnutí součástí a sestaví se takové konfigurace snímačů, pomocí kterých dokážeme změřit všechny požadované charakteristiky. Poté už se může začít vytvářet samotný program s následnou definicí výstupních protokolů.

7.2.1. Popis součásti a rozbor měřených charakteristik z výkresové dokumentace

Jedná se o dutý vícestupňový hřídel vyrobený z titanové slitiny TiAl6V4, který je osazený na dvou místech vnějším evolventním drážkováním (obrázek 50). Tato součást je produktem leteckého průmyslu a její využití se nachází ve dveřním mechanismu dopravního letadla.

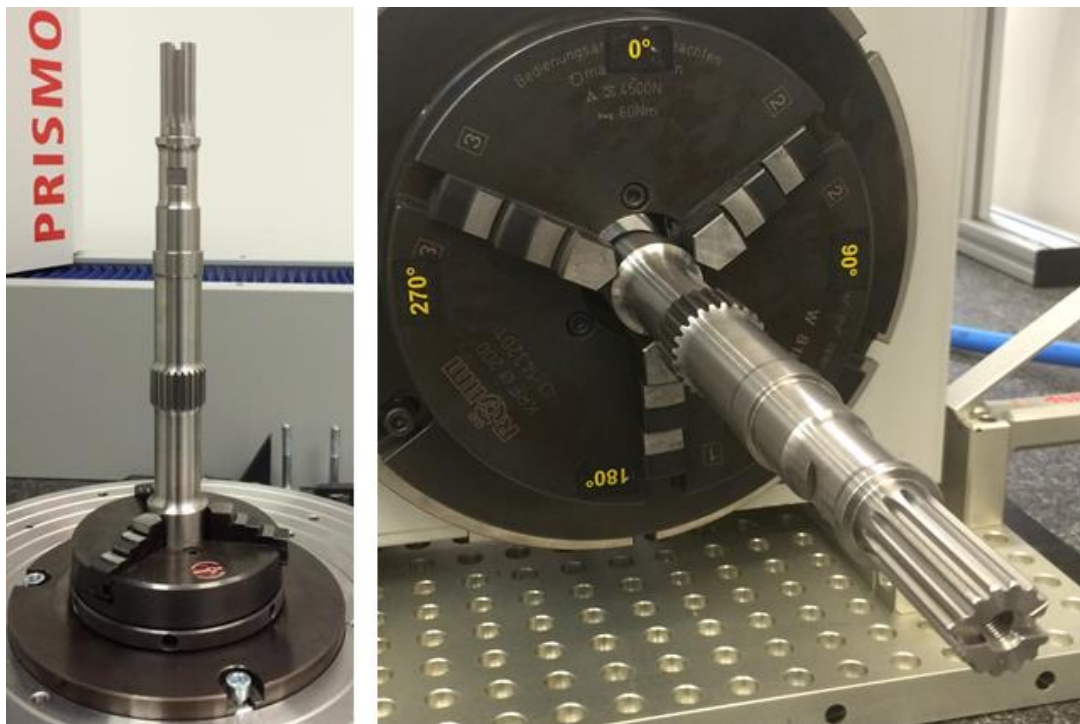


Obrázek 50: Vybraná součást k analýze

Podle výkresové dokumentace se na součásti vyskytují převážně průměry kružnic, několik délkových a úhlových rozměrů a rádiusů. Ovšem k měření jich je určeno pouze minimum. Dále se na daném komponentu nachází geometrické požadavky na kruhovitost a speciální geometrické specifikace na evolventní drážkování jako jsou úchyly sklonu boku zubů, roztečí a profilů. A právě tyto specifikace jsou určeny ke kontrole.

7.2.2. Upnutí součásti

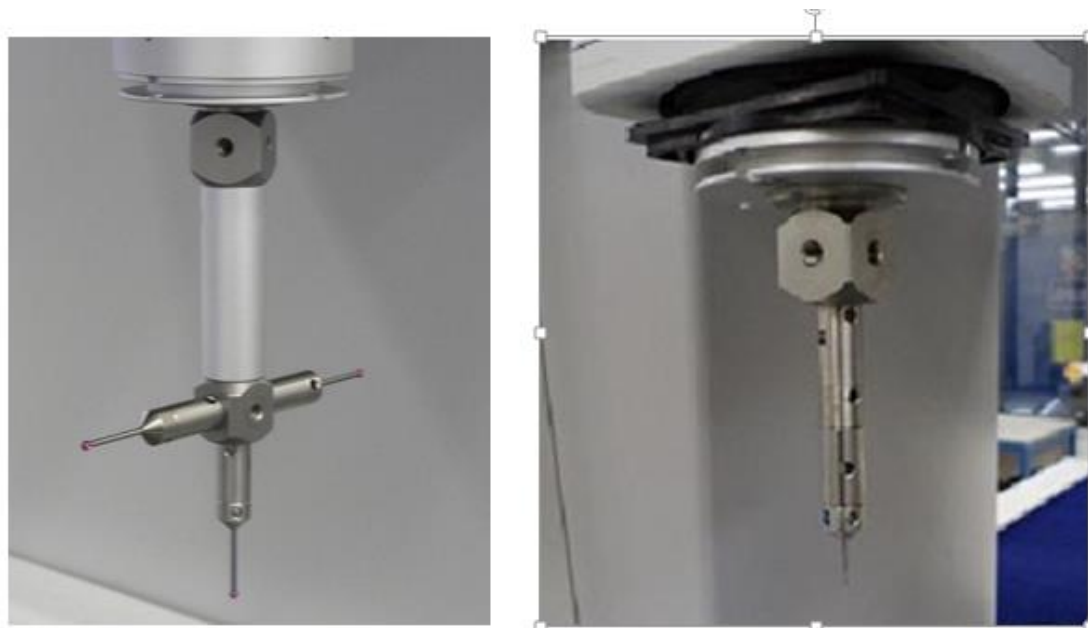
Jak již bylo popsáno v kapitole 7, v obou případech byla součást upnuta do sklíčidla otočného stolu za průměr 36,5 mm, ale v rozdílné poloze. Ukázky těchto dvou upnutí jsou znázorněny na obrázku 51.



Obrázek 51: Rozdílné upnutí součásti – vlevo ČVUT, vpravo Latecoere

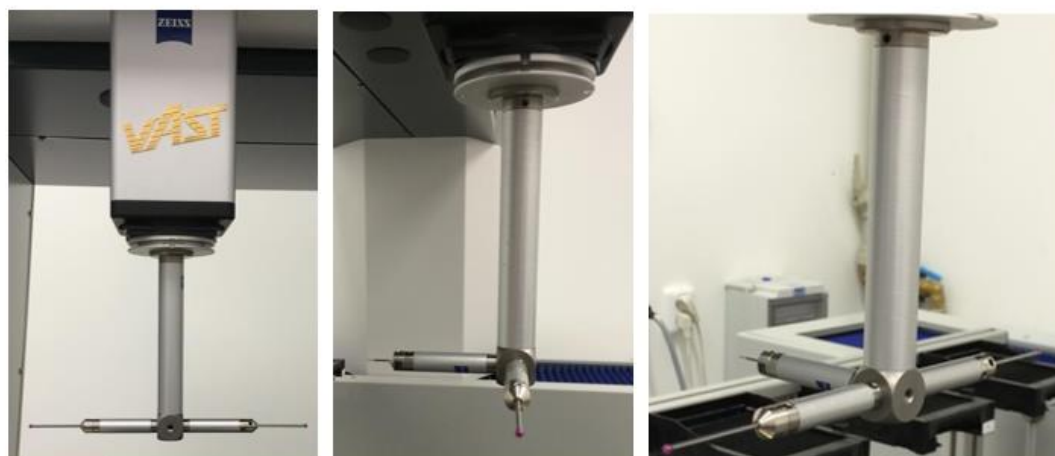
7.2.3. Konfigurace snímacího systému

Snímací systém je volen podle měřených charakteristik a způsobu upnutí součásti, který měl v tomto případě na konfiguraci snímačů největší vliv. V Latecoeru byla součást upnuta podélně a pro měření byly použity dvě konfigurace snímacích systémů (obrázek 52). První konfigurace byla sestavena ze tří snímačů s kuličkou o průměru 3 mm, zatímco druhá byla složena z jednoho snímače s kuličkou o průměru 0,6 mm, a byla použita pouze pro měření drážkování.



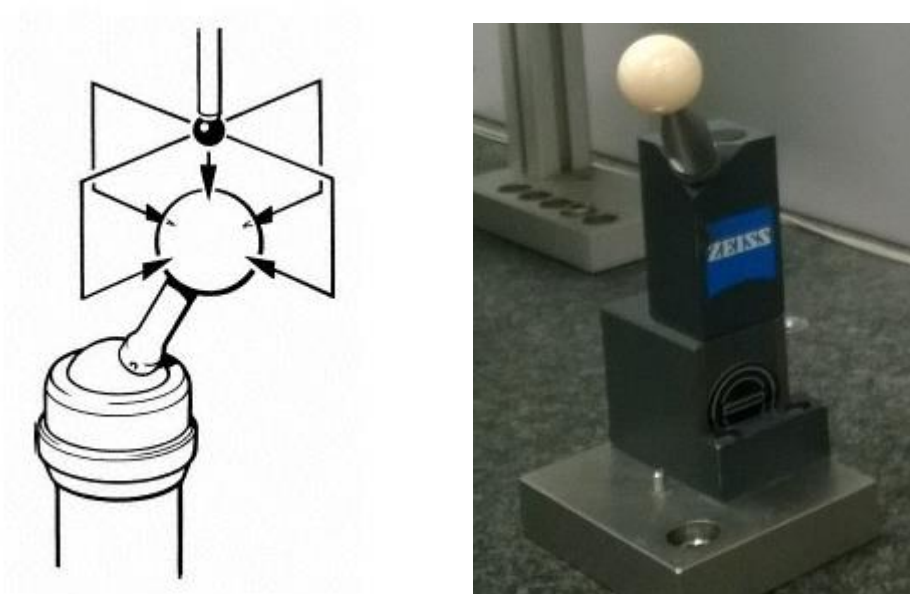
Obrázek 52: Konfigurace snímacích systémů v Latecoeru

V Měrovém středisku na ČVUT postačila pouze jedna konfigurace (obrázek 53), protože se k měření používaly dva snímače a to jeden ve směru X a druhý ve směru Y. Snímač ve směru X měřil základní rozměry na hřídeli, kdežto snímač ve směru Y byl určen pouze pro měření drážkování. Dále se muselo použít prodloužení o délce 100 mm, aby nedocházelo ke kolizi pinoly s měřeným dílem. Průměry kuliček jsou stejné jako u snímačů v Latecoeru.



Obrázek 53: Konfigurace snímacího systému na ČVUT

Před začátkem každého měření je nutné provést kalibraci konfigurací snímačů. Kalibrace se provádí na vysoce přesně vyrobené kouli o známém průměru (obrázek 54). Nejdříve referenční snímač zaměří kalibrační kouli a poté se kalibrují jednotlivé snímače. Počet sejmutí bodů na kouli závisí, pro jaké měření jsou snímače určeny, jestliže jsou určeny pouze pro měření samostatných bodů, snímací dotek je kalibrován 5-6 body na kalibrační kouli. Pro skenovací měření se snímá bodů mnohem více.



Obrázek 54: Kalibrační koule

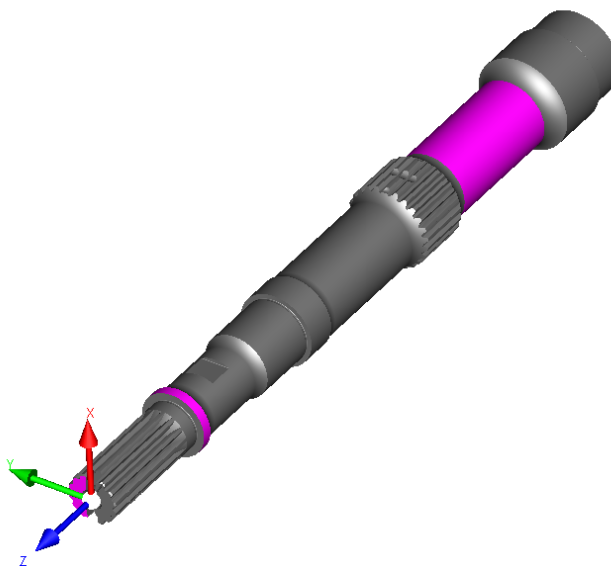
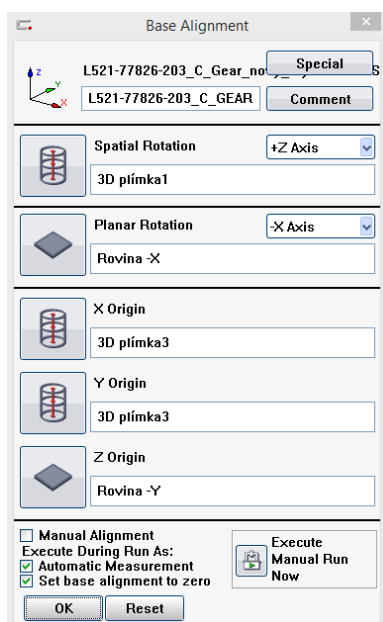
7.2.4. Postup tvorby plánu měření

Kompletní plán měření byl zhotoven firmou Latecoere a stejný program byl použit i pro měření v Měrovém středisku při ČVUT, aby bylo porovnání naměřených hodnot co možná nejpřesnější a nejvěrohodnější. Kvůli rozdílnému upnutí bylo nutné navrhnout novou konfiguraci snímačů a modifikovat plán měření, aby s touto skutečností počítal. Na závěr jsem se věnoval návrhům úprav strategií měření s ohledem na možnosti nových moderních snímacích systémů. Jelikož probíhalo měření v obou případech na souřadnicových měřicích strojích od společnosti Carl Zeiss, tak byl pro tvorbu plánu měření použit software Calypso 5.6 od téže firmy.

7.2.4.1. Vyrovnání součásti

Prvním krokem při každé tvorbě plánu měření v Calypsu je vyrovnání součásti (zavedení lokálního souřadnicového systému), to slouží k ustavení a upřesnění polohy měřeného komponentu v pracovním prostoru stroje. Ovšem jestli se měří s otočným stolem, je nutné jako první vyrovnat osu otočného stolu a teprve potom se může přejít k samotnému vyrovnání součásti.

U vybrané součásti určené k analýze bylo vyrovnání provedeno následovně. V prvním kroku bylo zapotřebí určit polohu měřeného dílu v prostoru, toho se docílilo pomocí zkonstruované 3D přímky ze dvou válců, která kopíruje rotační osu součásti. Tato přímka určuje natočení dílu v prostoru a v tomto případě definuje orientaci součásti ve směru osy Z. V dalším kroku se musela zajistit přesná poloha počátku souřadného systému. Toho se dosáhlo definováním roviny čela, která přesně určila polohu součásti v celém pracovním objemu stroje. Posledním bodem byla definice úhlového natočení komponentu v pracovním prostoru stroje, které určí konečnou orientaci kartézského souřadného systému. To bylo provedeno zadáním terciálních referencí, kde je použita již zmíněná 3D přímka, která určuje nulový bod v ose X a Y a rovina definující nulový bod v ose Z (obrázek 55).



Obrázek 55: Vyrovnání součásti v softwaru Calypso



7.2.4.2. Výběr elementů pro vyhodnocení charakteristik a strategie měření

Po vyrovnání součásti následoval výběr elementů, ze kterých se vyhodnotí požadované charakteristiky. Jako elementy byly zvoleny kružnice a roviny, a každému z nich se nadeřinovala strategie snímání bodů a filtrace. U všech elementů byla zvolena strategie snímání pomocí několika bodů, což není zrovna ideální případ, obzvlášť když se z těchto elementů vyhodnocují geometrické tolerance. Vzhledem k parametrům CMM a použitého snímacího systému bych pro lepší popis geometrie samotného dílu doporučil zvolit strategii skenování bodů s rozstupem jednotlivých bodů 0,05 mm, což nám zajistí dostatečné množství bodů pro korektní aplikaci filtru.

Pro měření parametrů drážkování se v Calypsu zapne již zmíněný software Gear Pro involute, kde lze průběh měření těchto parametrů velice jednoduše nadeřinovat. Po nadeřinování měření v Gearu se opět přepne do softwarového prostředí Calypsa a spustí se celkové měření.

7.2.5. Koeficienty způsobilosti měřidla

Pro určení koeficientů způsobilosti měřidla se používají dva způsoby výpočtu. Jeden výpočet je stanovený firmou Bosch a ten druhý společností Ford. V obou způsobech je možné vztáhnout způsobilost měřidla k rozptylu procesu nebo k požadované šíři tolerančního pole. V tomhle případě je vztaženo určení koeficientů způsobilosti k šíři tolerančního pole [27].

Tabulka 9: Metody výpočtu koeficientů způsobilosti měřidla [27]

Ford (šířka pásma 15%)	Bosch (šířka pásma 20%)
$C_g = 0,15 \cdot \frac{T}{(6 \cdot s_a)}$	$C_g = 0,20 \cdot \frac{T}{(6 \cdot s_a)}$
$C_{gk} = \frac{((X_r + 0,075 \cdot T) - \bar{x})}{3 \cdot s_a}$	$C_{gk} = \frac{((X_r + 0,1 \cdot T) - \bar{x})}{3 \cdot s_a}$
$C_{gk} = \frac{(\bar{x} - (X_r - 0,075 \cdot T))}{3 \cdot s_a}$	$C_{gk} = \frac{(\bar{x} - (X_r - 0,1 \cdot T))}{3 \cdot s_a}$
Pro způsobilá měřidla je požadováno splnění nerovnosti	
$C_g > 1$	$C_g > 1,33$
$C_{gk} > 1$	$C_{gk} > 1,33$
C_g – uvažuje pouze opakovatelnost; C_{gk} – uvažuje opakovatelnost a strannost	

7.2.6. Analýza měřených charakteristik

První měření se uskutečnilo ve společnosti Latecoere na souřadnicovém měřicím stroji Prismo Navigator (obrázek 56), zatímco druhé měření proběhlo v Měrovém a školicím středisku Carl Zeiss při ČVUT na CMM stroji Prismo (obrázek 57). Oba stroje jsou dodány od společnosti Carl Zeiss. Pro vyhodnocení koeficientů způsobilosti měřidla se provedlo deset opakovaných měření. Jelikož jsem neměl k dispozici referenční hodnotu X_r , tak nebylo možné vyhodnotit koeficient C_{gk} , tak jsem se zaměřil na opakovatelnost procesů a vyhodnotil pouze koeficient C_g počítaný dle Forda. Na základě naměřených hodnot s následným porovnáním a výpočtem koeficientů způsobilosti měřidla bude vidět, zdali opravdu dochází k prohnutí součásti vlastní vahou nebo ne.

K analýze jsem vybral převážně charakteristiky měřeny v softwaru Gear Pro, tedy rozměry měřené na drážkování, ovšem bude znázorněno i porovnání dvou charakteristik měřených v Calypsu.



Obrázek 56: CMM Prismo Navigator v Latecoeru



Obrázek 57: CMM Prismo na ČVUT

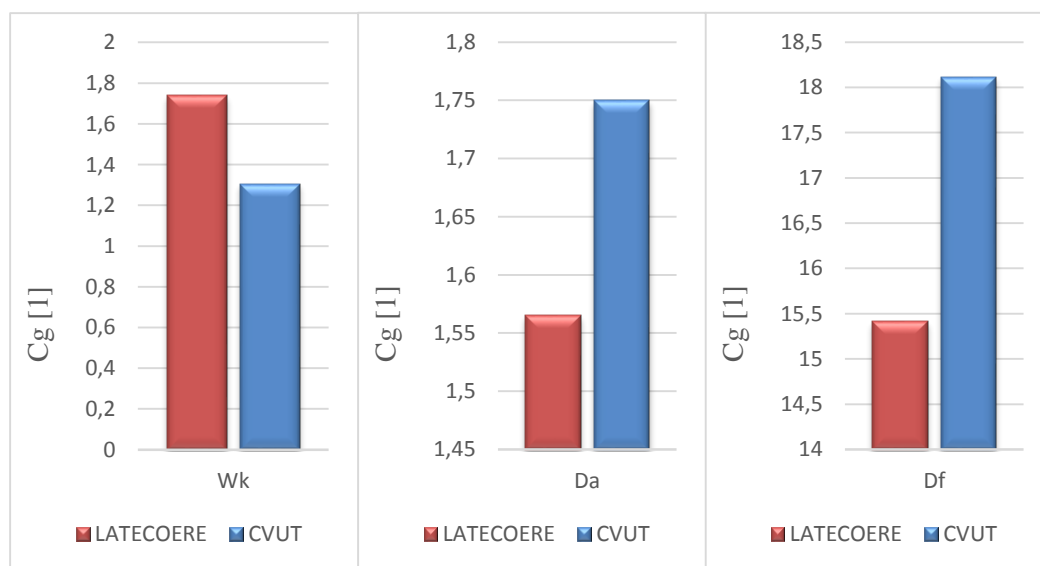


V tabulkách 10 a 11 jsou zaznamenány naměřené hodnoty z Latecoeru a ČVUT pro daný typ drážkování. Konkrétně se jedná o rozměry W_k (rozměr přes zuby), D_a a D_f (hlavová a patní kružnice). Dále jsou v těchto tabulkách uvedeny vypočítané koeficienty způsobilosti měřidla pro jednotlivé rozměry a veličiny, které byly použity k výpočtu. Na obrázcích 58 a 59 je znázorněno grafické porovnání koeficientů způsobilosti pro jednotlivé charakteristiky drážkování.

➤ **Drážkování W20x1,25x30x14x8f**

Tabulka 10: Naměřené a vypočtené hodnoty pro drážkování W20x1,25x30x14x8f

Počet měření	W20x1.25x30x14x8f					
	LATECOERE			ČVUT		
	W_k [mm]	D_a [mm]	D_f [mm]	W_k [mm]	D_a [mm]	D_f [mm]
1	9,829	19,732	16,983	9,831	19,739	16,988
2	9,828	19,731	16,982	9,831	19,738	16,988
3	9,828	19,732	16,982	9,830	19,738	16,988
4	9,828	19,731	16,982	9,830	19,738	16,987
5	9,828	19,731	16,982	9,830	19,738	16,987
6	9,828	19,731	16,982	9,830	19,738	16,987
7	9,828	19,732	16,981	9,830	19,738	16,987
8	9,828	19,732	16,982	9,830	19,738	16,987
9	9,828	19,732	16,983	9,830	19,738	16,987
10	9,828	19,731	16,982	9,830	19,737	16,987
Jmenovitá hodnota	9,879	19,75	17,25	9,879	19,75	17,25
T	0,022	0,033	0,35	0,022	0,033	0,35
C_g	1,739253	1,565327	15,41453	1,30444	1,750089	18,11422
s_a	0,000316	0,000527	0,000568	0,000422	0,000471	0,000483

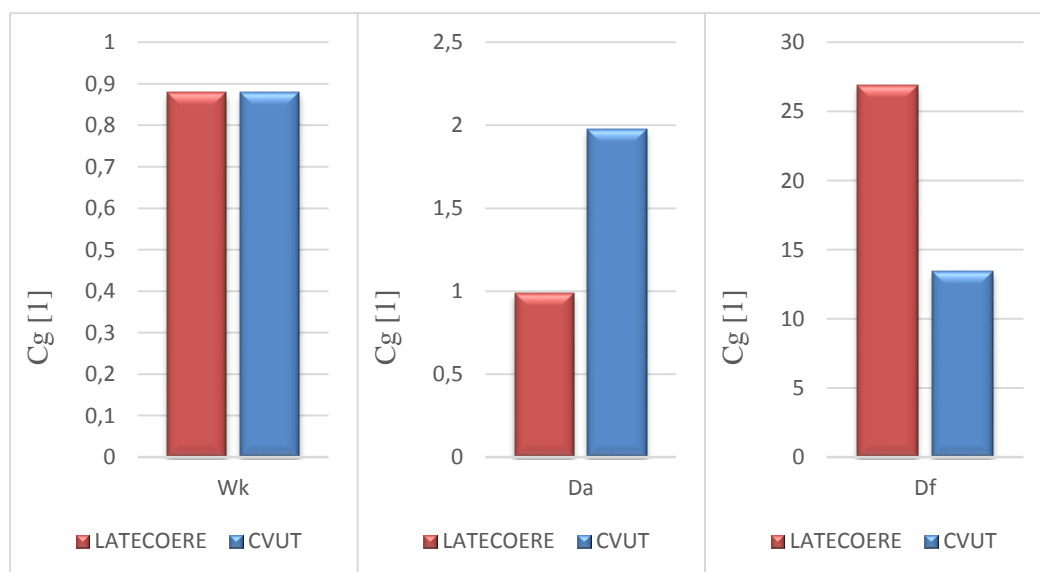


Obrázek 58: Grafické porovnání způsobilosti měřidla u drážkování W20x1,25x30x14x8f

➤ **Drážkování W33x1,25x30x25x7f**

Tabulka 11: Naměřené a vypočtené hodnoty pro drážkování W33x1,25x30x25x7f

Počet měření	W33x1.25x30x25x7f					
	LATECOERE			ČVUT		
	W _k [mm]	D _a [mm]	D _f [mm]	W _k [mm]	D _a [mm]	D _f [mm]
1	16,897	32,735	29,995	16,899	32,738	29,999
2	16,897	32,735	29,995	16,899	32,738	29,998
3	16,896	32,735	29,996	16,898	32,738	29,997
4	16,897	32,735	29,995	16,898	32,737	29,997
5	16,897	32,736	29,995	16,898	32,738	29,998
6	16,896	32,734	29,995	16,898	32,738	29,998
7	16,896	32,735	29,995	16,898	32,738	29,997
8	16,897	32,736	29,995	16,898	32,738	29,998
9	16,897	32,736	29,995	16,899	32,738	29,998
10	16,897	32,735	29,995	16,898	32,738	29,998
Jmenovitá hodnota	16,946	32,75	30,25	16,946	32,75	30,25
T	0,017	0,025	0,34	0,017	0,025	0,34
C_g	0,879834	0,988212	26,87936	0,879834	1,976424	13,43968
s_a	0,000483	0,000632	0,000316	0,000483	0,000316	0,000632



Obrázek 59: Grafické porovnání způsobilosti měřidla u drážkování W20x1,25x30x14x8f

Z porovnání naměřených hodnot je vidět, že hodnoty získané na ČVUT jsou větší v řádech mikrometrů oproti hodnotám z Latecoeru. To může být způsobeno variabilitou vnesenou operátorem při upínání součásti do sklíčidla, ale také i lehkým prohnutím součásti. Způsobilost měřidla pro rozměr W_k vyšla naprosto totožně v obou případech měření, ale nesplňuje podmínku nerovnosti pro způsobilé měřidlo. V případě měření hlavové a patní kružnice nesplňuje podmínky nerovnosti pouze



měřidlo v Latecoeru při měření hlavové kružnice Da, kde se nachází těsně pod hranicí způsobilosti.

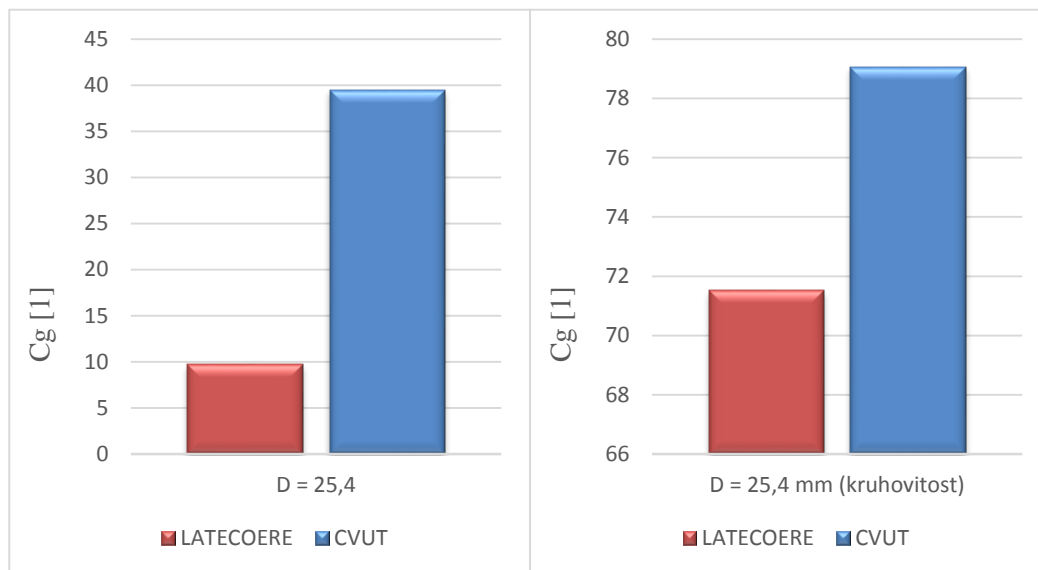
➤ **Rozměry měřené v Calypsu (průměr a kruhovitost)**

V tabulce 12 jsou zaznamenány hodnoty z Latecoeru a ČVUT měřené na hřídeli. Jedná se o průměr 25,4 mm a jeho kruhovitost, tedy rozměry měřené v Calypsu. Dále jsou uvedeny vypočítané koeficienty způsobilosti měřidla pro dva zmíněné rozměry a veličiny, které byly použity k výpočtu. Na obrázku 60 je znázorněno grafické porovnání koeficientů pro daný průměr a jeho kruhovitost.

Při vlastním měření na fakultě byl výstup protokolu pro rozměry měřené v Calypsu nastavený na čtyři desetinná místa, zatímco v Latecoeru je předdefinován na tři, tudíž se čtvrtá desetinná místa zaokrouhlují. Aby bylo možné vypočítat koeficient způsobilosti měřidla, musí existovat rozpětí naměřených hodnot, z nichž se stanoví směrodatná odchylka. Jelikož při měření v Latecoeru byly po zaokrouhlení všechny naměřené hodnoty pro kruhovitost stejné, tak jsem u tří hodnot přidal čtvrté desetinné místo, aby vzniklo rozpětí, ze kterého se vypočítala směrodatná odchylka.

Tabulka 12: Naměřené a vypočtené hodnoty pro průměr a kruhovitost

Počet měření	Rozměry měřené v Calypsu (průměr a kruhovitost)			
	LATECOERE		ČVUT	
	D = 25,4 [mm]	D = 25,4 (kruhovitost) [mm]	D = 25,4 [mm]	D = 25,4 (kruhovitost) [mm]
1	25,297	0,002	25,2983	0,0013
2	25,297	0,002	25,2983	0,0013
3	25,296	0,0021	25,2983	0,0013
4	25,296	0,002	25,2984	0,0014
5	25,296	0,0022	25,2984	0,0013
6	25,297	0,002	25,2983	0,0013
7	25,297	0,0021	25,2981	0,0013
8	25,296	0,002	25,2981	0,0012
9	25,296	0,002	25,2981	0,0012
10	25,296	0,002	25,2981	0,0012
Jmenovitá hodnota	25,4	0	25,4	0
T	0,2	0,2	0,2	0,2
C_g	9,68245837	71,50969419	39,52847075	79,0569415
S_a	0,0005164	0,00006992	0,00012649	0,00006325



Obrázek 60: Grafické porovnání způsobilosti měřidla u průměru a kruhovitosti

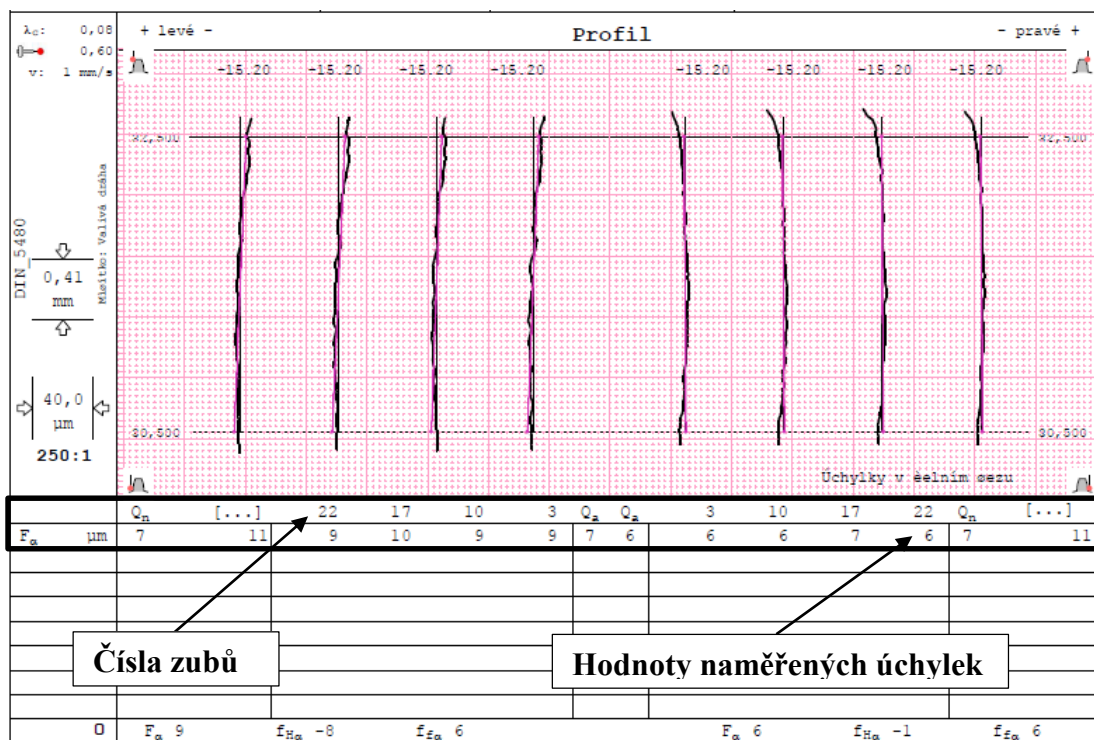
Z naměřených hodnot je znovu patrné, že výsledky získané na ČVUT jsou vyšší v rámci 1 – 2 μm , což může být opět způsobeno příčinami zmíněnými v předchozím případě. Z grafického porovnání koeficientů C_g je vidět, že ve všech případech jsou splněny podmínky nerovnosti pro způsobilost daného měřidla.

➤ Profil zubu

Při měření profilu zubu platí, že se musí uskutečnit minimálně na třech zubech, jak je popsáno v kapitole 4.2. V tomto případě proběhlo měření na čtyřech zubech, kde se měří pravý a levý bok zubu. Kvůli rozdílnému upnutí, jiné konfiguraci snímače a špatné organizaci měření se mi nepodařilo naměřit stejné zuby jako v Latecoeru, v důsledku čehož nemá smysl vyhodnocovat koeficienty způsobilosti měřidla. Porovnání výsledků měření v tomto případě bude vyhodnoceno na základě celkových průměrných hodnot.

Část z typického výstupního protokolu² ze softwaru Gear Pro involute je znázorněna na obrázku 61, kde jsou zaznamenány hodnoty naměřených úchylek profilu. Na základě tohoto obrázku bych podrobněji vysvětlil, co je myšleno porovnáním výsledků měření z celkových průměrných hodnot.

² Ukázkový výstupní protokol ze sw Gear Pro involute je uveden v příloze A



Obrázek 61: Část výstupního protokolu ze sw Gear Pro s naměřenými úchylkami pro profil zubu

Při jednom měření se zaznamená osm naměřených úchylek pro vybrané zuby, z nichž se vypočítá průměr. Ten samý postup se opakuje pro dalších devět měření. Dostaneme deset průměrných hodnot, ze kterých vypočítáme celkový průměr, a tento průměr bude výstupní hodnota pro porovnání.

Tento způsob porovnání jsem zvolil, kvůli již zmíněnému problému se zaměřením stejných zubů, ale i kvůli zaokrouhlování na celočíselné hodnoty. V mnoha případech vyšly naměřené úchylky ve všech deseti opakovaných měření stejně, tudíž se nemohla vypočítat směrodatná odchylka, která je potřebná pro stanovení koeficientu C_g .

Tabulka 13: Celkové průměrné hodnoty pro profil F_a

Měřeno	Profil F_a [μm]	
	W20x1.25x30x14x8f	W33x1.25x30x25x7f
LATECOERE	9,4	7,78
CVUT	8,51	7,94

Z hodnot celkových průměrů pro profil zubu je vidět, že na drážkování W20x1,25x30x14x8f, který je na opačném konci hřídele z hlediska upnutí, byl rozdíl téměř 1 μm .

7.2.7. Celkové zhodnocení výsledků

Při upnutí součásti podélně lze očekávat prohnutí hřídele vlastní vahou. Menší naměřené hodnoty v Latecoeru při srovnání s hodnotami ČVUT lze vysvětlit následovně. Při měření hřídele podélně zaznamenávala jejich konfigurace ve směru $-Z$ výsledné hodnoty měření menší právě o hodnotu prohnutí. Proto bych navrhl další dva experimenty, které by toto tvrzení mohly potvrdit.

V prvním případě bych navrhoval měřit přímost osy hřídele ve dvou polohách upnutí (svislá a vodorovná). Na průměrech (27,5; 25,438 a 22 mm) by se naskenovalo v určitých vzdálenostech několik kruhových řezů v úhlovém rozsahu 180°. Z těch by se zkonstruovala 3D přímka, pro kterou by se vyhodnotila přímost. A rozdíl mezi hodnotami přímosti ve svislé a vodorovné poloze by nám indikoval prohnutí součásti vlastní vahou.

V druhém experimentu by se jednalo o stejný způsob měření, který je rozepsán v této diplomové práci, ale pro měření v Latecoeru by se tentokrát použil snímač ve směru $+Z$, který by snímal body zespoda součásti. Výsledné hodnoty by měly vycházet v tomto případě větší z důvodu prohnutí dílu, protože by snímač měřil hodnoty vyšší právě o hodnotu prohnutí. Po zprůměrování naměřených hodnot shora a zespoda součásti a jejich následný rozdíl, by udával hodnotu prohnutí.



8. Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na komplexní kontrolu kvality geometrických specifikací produktu. Slovem komplexní je v rámci této práce myšleno ověřování geometrických specifikací, které jsou nad rámec základního systému geometrického tolerování a vyskytují se na speciálních geometriích, v tomto případě na evolventním drážkování.

V úvodní části jsem stručně popsal soustavu geometrických specifikací produktu (GPS), která zahrnuje požadavky na rozměrové a geometrické tolerance výrobků. Hlavní normou v oblasti GPS je ISO 1011, která definuje toleranci tvaru, orientace, umístění a házení.

Následně jsem představil zařízení, na kterém se tyto specifikace dají velmi rychle a efektivně kontrolovat. Jednalo se o souřadnicovou měřicí techniku, pro kterou jsem uvedl základní konstrukční uspořádání CMM strojů s dnešními možnostmi snímacích systémů. Jelikož se součást, která byla vybrána k analýze, používá v leteckém průmyslu, kde jsou kladeny velmi vysoké požadavky na přesnost a kvalitu výroby, zaměřil jsem se na CMM stroje a snímací systémy použitelné pro vysoce přesné aplikace. Výběr jsem provedl od dvou největších výrobců na světě, konkrétně od firmy Carl Zeiss a Hexagon metrology. U snímacích systémů jsem uvedl jeden i od společnosti Renishaw, který je využíván u výrobce specializovaných CMM pro kontrolu ozubení společnosti Gleason.

Jak již bylo několikrát zmíněno, na měření evolventního drážkování se vztahují stejná pravidla jako pro ozubení. Proto je v další části uveden rozbor normy ISO/DIS 1328-1, která se vztahuje na mezní úchyly stejnolehlých boků zubu ozubeného kola. Jedná se právě o geometrické specifikace typické pro ozubení, jako jsou např. úchyly profilu a sklonu zubu, které jsou nad rámec základního rozdělení podle ISO 1101. Následuje analýza praktických předpisů pro přejímku ozubení dle ISO/TR 10064, která pokrývá kontrolu ozubení všemi dostupnými technologiemi. Dále jsou v této přejímce uvedeny informace týkající se měření drsnosti povrchu boku zubu a postupy hodnocení měřidel ozubených kol, kde jsem se zaměřil pouze na souřadnicové měřicí stroje, protože i měření bylo provedeno na těchto strojích.



V poslední kapitole teoretické části jsem se věnoval softwaru určenému pro kontrolu ozubení. Jelikož měření v obou případech proběhlo na souřadnicových měřicích strojích od firmy Carl Zeiss, zaměřil jsem se pouze na software Gear Pro involute, který je určený pro kontrolu čelních ozubených kol a je dodáván právě touto společností. V dalších podkapitolách jsem rozepsal funkční rozsah kontroly a pomocí obrázků převzatých přímo z programu, jsem nastínil přípravu plánu měření ve zmíněném softwaru.

Cílem práce byla analýza praktických prepisů pro přejímku ozubení a provedení porovnávacího měření drážkovaného hřídele z hlediska upnutí ve dvou metrologických laboratořích. První měření proběhlo ve společnosti Latecoere Czech Republic s.r.o., kde byla součást upnuta do sklíčidla otočného stolu podélně. Druhé měření proběhlo v Měrovém a školicím středisku Carl Zeiss při ČVUT, kde byla komponenta také upnuta do sklíčidla otočného stolu, ale tentokrát na výšku. V obou případech se použil stejný plán měření, aby měření probíhalo v naprosto totožných podmínkách, a výsledky byly přesněji porovnatelné. Provedlo se 10 opakovaných měření pro každý způsob upnutí, kde jedno měření trvalo 45 minut. Při porovnání výsledků jsem zjistil, že průměry hlavové kružnice evolventního drážkování se lišily řádově až o 7 μm , z toho bylo možné vyvození prohnutí součásti. Pro přesnější analýzu jsem navrhl další dva experimenty, které toto tvrzení buď potvrdí, nebo vyvrátí.

V prvním případě by se jednalo o měření přímosti osy hřídele ve svislé a vodorovné poloze upnutí. A rozdíl mezi hodnotami přímosti v daných polohách by nám indikoval prohnutí součásti. Ve druhém experimentu by šlo o stejný způsob měření, jako je popsán v této diplomové práci, ale při měření v Latecoeru by se tentokrát použil snímač +Z, který by snímal body zespoda součásti. Po zprůměrování naměřených hodnot shora a zespoda součásti by jejich následný rozdíl udával hodnotu prohnutí.



Zdroje informací

- [1] PEŠIČKA, Ladislav, SKOPAL Jaroslav a BERÁNEK Libor. Geometrické prvky. *Rozměrové a geometrické specifikace produktů (GPS): Část 3: Požadavky na geometrické tolerování strojírenských součástí podle mezinárodních norem v technické praxi*. 2010.
- [2] ČSN EN ISO 1101. *Geometrické specifikace výrobků (GPS): Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2006.
- [3] BERÁNEK, Libor. ČVUT - FAKULTA STROJNÍ. *Konstrukce CMM s kartézsky uspořádaným souřadnicovým systémem*. 2014.
- [4] Průmyslová metrologie. *Zeiss Česká Republika* [online]. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/produkty/systemy/bridge-type-cmms/xenos.html
- [5] Průmyslová metrologie. *Zeiss Česká Republika* [online]. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo-navigator.html
- [6] SMS - malé a středně velké: Leitz Infinity. *Hexagon Metrology* [online]. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://www.hexagonmetrology.cz/Leitz-Infinity_126.htm#.VTeEuyHtmkp
- [7] SMS - malé a středně velké: Leitz Reference HP. *Hexagon Metrology* [online]. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://www.hexagonmetrology.cz/Leitz-Reference-HP_127.htm#.VTdwriHtmkp
- [8] Průmyslová metrologie. *Zeiss Česká Republika* [online]. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/produkty/senzory/vast-gold.html
- [9] Skenovací sondy: LSP – S4. *Hexagon Metrology* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://www.hexagonmetrology.cz/LSP-S4_708.htm#.VTdz9SHtmko
- [10] Mitutoyo UK. *Mitutoyo UK: SP - 80 ScanningProbe* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.mitutoyo.co.uk/coordinate-measuring-machines/probes/191-000-387>



- [11] Dotykové a optické senzory. 2015. *Zeiss* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/produkty/senzory.html
- [12] Bezkontaktní snímače. 2015. *Hexagon Metrology* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.hexagonmetrology.cz/Bezkontaktni-snimace_533.htm#.VU9T9Pntmkr
- [13] ISO/DIS 1328-1. *Cylindricalgears - ISO systemofflank tolerance classification - Part 1: Definitions and allowablevaluesofdeviationsrelevant to flanksofgearteeth*. Switzerland: International Organizationforstandardization, 2011.
- [14] ČSN ISO 1328-1 (01 4682). *Čelní ozubená kola - Soustava přesnosti ISO - část 1: Definice a mezní úchytky vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola*. První vydání. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [15] 01 4671 - TNI ISO/TR 10064-2. *Praktické předpisy pro přejímku - Část 2: Přejímka vztahující se k radiálním kinematickým úchytkám, obvodovému házení, tloušťce zubu a boční vůli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [16] Kontrola ozubených kol. *Měření ozubených kol* [online]. 2013 [cit. 2015-06-10]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/ozubena_kola.pdf
- [17] Metrology and Test Equipment. *Direct Industry* [online]. 2013 [cit. 2015-06-10]. Dostupné z: <http://news.directindustry.com/press/carl-zeiss-industrielle-messtechnik-gmbh/zeiss-duramax-as-gear-wheel-measuring-machine-rotary-table-5693-401195.html>
- [18] Industrial metrology. *Carl Zeiss* [online]. 2015 [cit. 2015-06-10]. Dostupné z: http://www.zeiss.com/corporate/en_de/media-forum/press-photos/products/industrial-metrology.html
- [19] Measuring Instruments. *Tresna Instrument* [online]. 2012 [cit. 2015-06-10]. Dostupné z: http://www.tresnainstrument.com/measuring_instrument_images/special_calipers/d/special_calipers_sc21.jpg
- [20] 01 4671 - TNI ISO/TR 10064-3. *Praktické předpisy pro přejímku - Část 3: Doporučení vztahující se k tělesům ozubených kol, osové vzdálenosti hřidelů a rovnoběžnosti os*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.



- [21] PEŠIČKA, Ladislav, SKOPAL Jaroslav a BERÁNEK Libor. Výběr základních termínů textury povrchu. *Rozměrové a geometrické specifikace produktů (GPS): Část 10: Textura povrchu strojních součástí. Parametry profilu drsnosti, vlnitosti a základního profilu*. 2010.
- [22] 01 4671 - TNI ISO/TR 10064-4. *Praktické předpisy pro přejímku - Část 4: Doporučení vztahující se k textuře povrchu a kontrolní předloze pro dotyk zubu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [23] 01 4671 - TNI ISO/TR 10064-5. *Praktické předpisy pro přejímku - Část 5: Doporučení pro hodnocení měřidel ozubených kol*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [24] CARL ZEISS. *Gear Pro Involute: Software pro kontrolu ozubení - návod k obsluze*. Německo, 2007.
- [25] Direct industry: The online industrialexhibition. 2015. *Metrology software GEAR PRO* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/carl-zeiss-industrielle-messtechnik-gmbh/metrology-software-5693-590731.html>
- [26] Latecoere Czech Republic. *O společnosti* [online]. 2015 [cit. 2015-06-11]. Dostupné z: <http://www.latecoere.cz/>
- [27] HOMOLÁČ, Václav. *Vytvoření plánu měření pro kontrolu kvality vybrané součásti*. Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek Ph.D.



Seznam Obrázků

Obrázek 1: a) Výložníkový CMM b) Mostový CMM c) Portálový CMM d) Sloupový s vodorovným ramenem [3]	13
Obrázek 2: Schéma snímacích systémů CMM	13
Obrázek 3: Prismo Navigator CMM (vlevo), Xenos CMM (vpravo) [4, 5]	14
Obrázek 4: Leitz Infinity CMM (vlevo), Leitz Reference HP CMM (vpravo) [6, 7]	15
Obrázek 5: a) VAST gold b) LSP – S4 c) SP – 80 [8, 9, 10]	16
Obrázek 6: a) LineScan b) ViScan c) HP-C-VE Vision Sensor d) Precitec LR [11, 12]	17
Obrázek 7: Úchyly čelních roztečí [13]	19
Obrázek 8: Jednotlivé úchyly sklonu zubu [13]	20
Obrázek 9: Jednotlivé úchyly profilu [14]	21
Obrázek 10: Princip měření radiálních kinematických úchylek [16]	28
Obrázek 11: Princip měření obvodového házení [15]	28
Obrázek 12: Paralelní a hvězdicová snímací hlava [15]	30
Obrázek 13: Ukázka paralelní a hvězdicové snímací hlavy v praxi [17, 18]	30
Obrázek 14: Graf házení ozubeného kola s 16ti zuby [15]	31
Obrázek 15: Výška hlavy a tětíková tloušťka zubu [15]	32
Obrázek 16: Měření tětíkové tloušťky zubu s použitím digitálního měřidla tloušťky (zuboměru) [19]	33
Obrázek 17: Kontrola rozměru přes zuby	34
Obrázek 18: Vzdálenost M_d mezi kuličkami u čelních ozubených kol	35
Obrázek 19: Výchozí osa určena dvěma krátkými výchozími povrchy [20]	38
Obrázek 20: Výchozí osa určena jedním dlouhým výchozím povrchem [20]	39
Obrázek 21: Výchozí osa určena jedním válcovým povrchem a jedním čelem [20]	39
Obrázek 22: Výchozí osa určena středy děr [20]	40
Obrázek 23: Profil povrchu [21]	41
Obrázek 24: Vyhodnocovaná délka [21]	42
Obrázek 25: Základní prvky profilu [21]	42
Obrázek 26: Značení drsnosti zubu ve výkresové dokumentaci [22]	43
Obrázek 27: Měřicí zařízení drsnosti povrchu a ukázka měření drsnosti povrchu hlavové kružnice	44
Obrázek 28: Měření drsnosti patního přechodového poloměru [22]	47
Obrázek 29: CMM zkouška objemového měření [23]	50
Obrázek 30: Zkouška deskou s koulemi [23]	51
Obrázek 31: Zkušební otočný stůl [23]	51
Obrázek 32: Typy ozubených kol a speciálních geometrií, které lze měřit v SW Gear Pro [25]	52
Obrázek 33: Úvodní okno softwaru Gear Pro involute	54
Obrázek 34: Definice základních parametrů ozubeného kola	55
Obrázek 35: Definice měření	55
Obrázek 36: Definice zavádění a vyvádění snímače	56
Obrázek 37: Definice měření profilu zubu	56



Obrázek 38: Definice měření sklonu boku zubu	57
Obrázek 39: Definice měření rozteče	57
Obrázek 40: Definice měření hlavové kružnice ozubeného kola	58
Obrázek 41: Definice měření patní kružnice ozubeného kola	58
Obrázek 42: Pasažérské dveře letadla Airbus A320 [26]	60
Obrázek 43: Kostra dveří horní paluby a zavazadlového prostoru [26]	60
Obrázek 44: Dveře letadel Embraer [26]	60
Obrázek 45: Kovové díly kostry dveří letadla Boeing B787 [26]	61
Obrázek 46: Kostra dveří letadla Dassault Falcon F7X [26]	61
Obrázek 47: Skříň palubní elektroniky letadla Airbus A380 [26]	61
Obrázek 48: Skříň palubní elektroniky letadla Airbus A400M [26]	62
Obrázek 49: Díly pro letadlo Airbus A350 [26]	62
Obrázek 50: Vybraná součást k analýze	63
Obrázek 51: Rozdílné upnutí součásti – vlevo ČVUT, vpravo Latecoere	64
Obrázek 52: Konfigurace snímacích systémů v Latecoeru	65
Obrázek 53: Konfigurace snímacího systému na ČVUT	65
Obrázek 54: Kalibrační koule	66
Obrázek 55: Vyrovnání součásti v softwaru Calypso	67
Obrázek 56: CMM Prismo Navigator v Latecoeru	69
Obrázek 57: CMM Prismo na ČVUT	69
Obrázek 58: Grafické porovnání způsobilosti měřidla u drážkování W20x1,25x30x14x8f....	70
Obrázek 59: Grafické porovnání způsobilosti měřidla u drážkování W20x1,25x30x14x8f....	71
Obrázek 60: Grafické porovnání způsobilosti měřidla u průměru a kruhovitosti	73
Obrázek 61: Část výstupního protokolu ze sw Gear Pro s naměřenými úchyly pro profil zubu	74



Seznam tabulek

Tabulka 1: Definice základního systému geometrických toleranci podle ISO 1101[2]	10
Tabulka 2: Doplnkové značky GPS [2].....	11
Tabulka 3: Doporučené parametry pro kontrolu ozubení v závislosti na stupni přesnosti [13]	23
Tabulka 4: Přehled způsobu měření s minimálními požadavky pro danou veličinu [13].....	24
Tabulka 5: Prvky přístrojů a směry pohybů měření ve vztahu k obrábění [22].....	45
Tabulka 6: Filtrování a vlnitost cut-off [22].....	46
Tabulka 7: Doporučené mezní hodnoty pro aritmetický průměr úchylky Ra [22]	48
Tabulka 8: Doporučené mezní hodnoty pro deset nepravidelností bodů výšky Rz [22]	48
Tabulka 9: Metody výpočtu koeficientů způsobilosti měřidla.....	68
Tabulka 10: Naměřené a vypočtené hodnoty pro drážkování W20x1,25x30x14x8f.....	70
Tabulka 11: Naměřené a vypočtené hodnoty pro drážkování W33x1,25x30x25x7f.....	71
Tabulka 12: Naměřené a vypočtené hodnoty pro průměr a kruhovitost	72
Tabulka 13: Celkové průměrné hodnoty pro profil $F\alpha$ a sklon boku $F\beta$	75

**Seznam použitých zkratk a symbolů**

Značka	Název	Jednotka
f_{pi}	jednotlivá úchylka čelní rozteče	[mm]
f_p	úchylka čelní rozteče	[mm]
F_{pi}	součtová úchylka jednotlivých roztečí	[mm]
F_p	celková součtová úchylka roztečí kola	[mm]
F_β	úchylka sklonu zubu	[mm]
$f_{f\beta}$	úchylka tvaru sklonu zubu	[mm]
$f_{H\beta}$	úchylka úhlu sklonu zubu	[mm]
b	délka boční křivky zubu (šířka ozubení)	[mm]
L_β	délka vyhodnocení boční křivky zubu	[mm]
F_α	úchylka profilu	[mm]
$f_{f\alpha}$	úchylka tvaru profilu	[mm]
$f_{H\alpha}$	úchylka úhlu profilu	[mm]
L_{AF}	použitelná délka profilu	[mm]
L_{AE}	činná délka profilu	[mm]
L_α	rozsah vyhodnocení profilu	[mm]
z	počet zubů	[mm]
d	průměr ozubeného kola	[mm]
m_n	normální modul	[mm]
b	dolní index (základna)	[1]
β	úhel sklonu	[°]
f_{pT}	tolerance úchylky čelní rozteče	[mm]
F_{pT}	tolerance součtové úchylky čelní rozteče	[mm]
$f_{H\alpha T}$	tolerance úchylky úhlu profilu	[mm]
$f_{f\alpha T}$	tolerance úchylky tvaru profilu	[mm]
W_k	rozměr přes zuby	[mm]
k	počet zubů, přes které se měří	[1]
α_t	čelní úhel záběru	[°]
s	tloušťka zubu	[mm]



$F_{\alpha T}$	celková tolerance úchylky tvaru profilu	[mm]
$f_{H\beta T}$	tolerance úchylky úhlu sklonu zubu	[mm]
$f_{f\beta T}$	tolerance úchylky tvaru sklonu zubu	[mm]
$F_{\beta T}$	celková tolerance úchylky sklonu zubu	[mm]
F_{β}	úchylka sklonu zubu	[mm]
$f_{f\beta}$	úchylka tvaru sklonu zubu	[mm]
$f_{H\beta}$	úchylka úhlu sklonu zubu	[mm]
d_M	průměr měření	[mm]
d_a	hlavový průměr	[mm]
d_f	patní průměr	[mm]
λ_{α}	mezní hodnota vlnové délky pro profil	[mm]
λ_{β}	mezní hodnota vlnové délky pro sklon zubu	[mm]
F_r	obvodové házení	[μm]
d_y	libovolný průměr	[mm]
x	činitel posunu profilu	[1]
s_{yn}	obvodová tloušťka zubu	[mm]
h_y	výška hlavy zubu	[mm]
s_{ync}	tětivová tloušťka zubu	[mm]
h_{yc}	tětivová výška zubu	[mm]
E_{sni}	dolní přípustná hodnota tloušťky	[mm]
E_{sns}	horní přípustná hodnota tloušťky	[mm]
y	značka dolního indexu (libovolný průměr)	[1]
a_n	normální úhel záběru	[°]
D_M	průměr kuličky nebo válečku	[mm]
M_d	rozměr přes kuličky nebo válečky	[mm]
α_{Mt}	úhel záběru v čelní rovině	[°]
λ_s	rozmezí mezi drsnostmi a kratšími složkami vln povrchu	[mm]
λ_c	rozmezí mezi drsnostmi a vlnitostí	[mm]
λ_f	rozmezí mezi drsnostmi a delšími složkami vln povrchu	[mm]
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu	[μm]
Rz	Největší výška profilu povrchu	[μm]

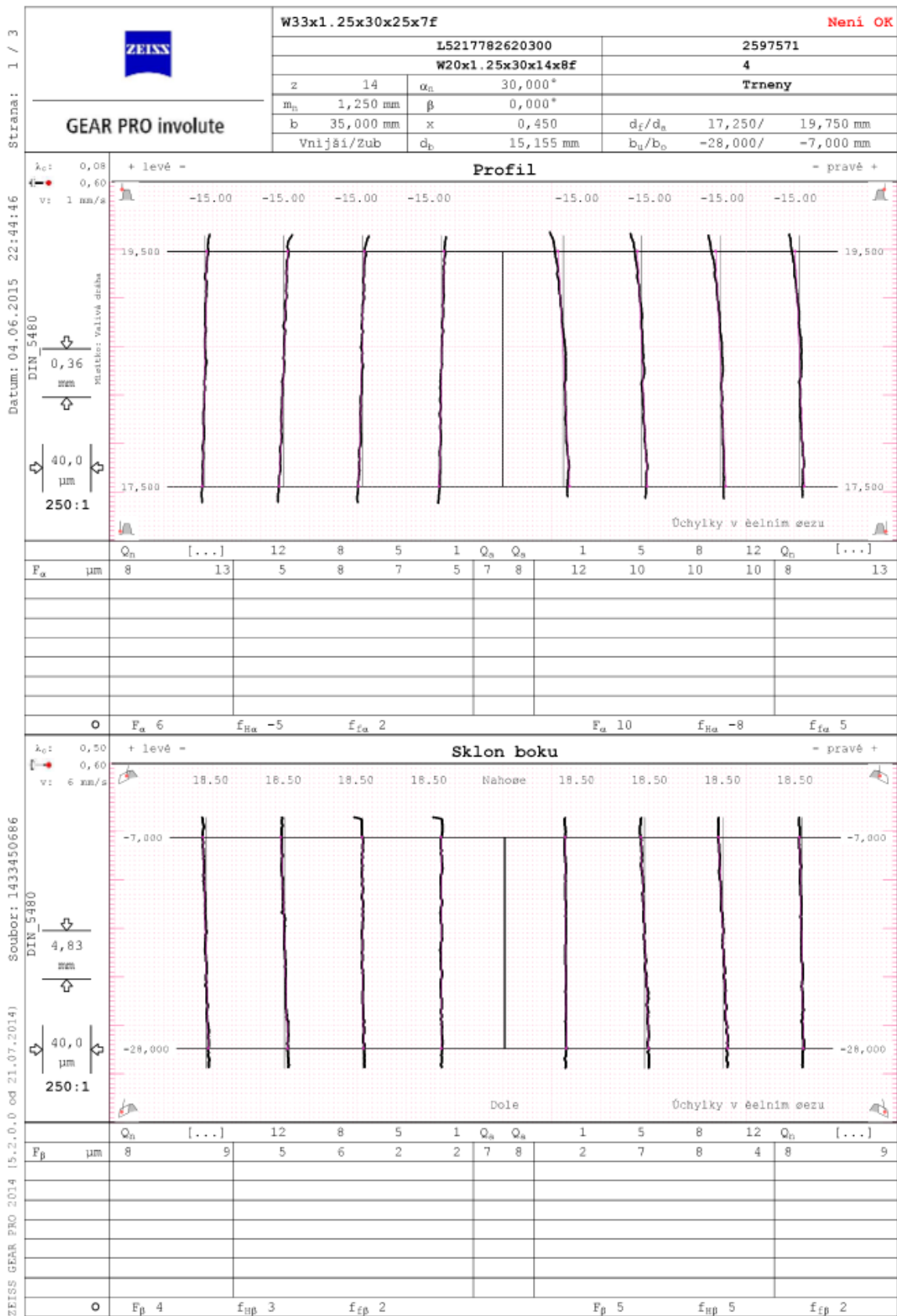


C_g	koeficient způsobilosti	[1]
C_{gk}	koeficient způsobilosti	[1]
T	rozsah tolerančního pole	[mm]
s_a	směrodatná odchylka hodnot	[mm]
\bar{x}	průměrná hodnota naměřených hodnot	[mm]
X_r	referenční hodnota	[mm]
CMM	souřadnicová měřicí technika	
GPS	geometrické specifikace produktu	
3D	trojrozměrný	
SW	software	
CAD	počítačem podporované konstruování	
CNC	počítačem řízený stroj	



Příloha A

DIN 5480 - Dobrá strana má prioritu.





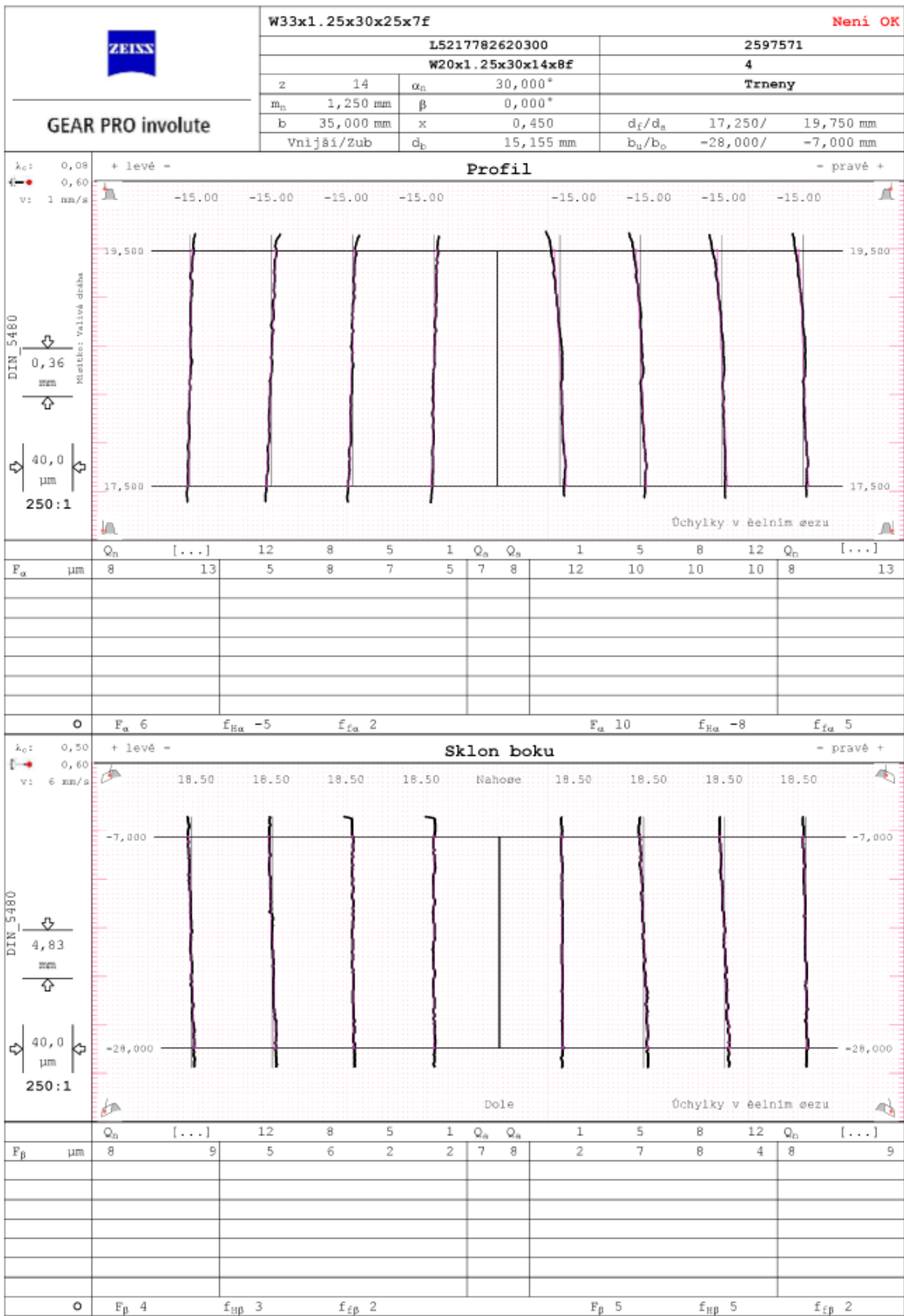
DIN 5480 - Dobrá strana má prioritu.

Strana: 1 / 3

Datum: 04.06.2015 22:44:46

Soubor: 1433450686

ZEISS GEAR PRO 2014 (5.2.0.0 od 21.07.2014)



Formulace.mech1 3.2.0.713
Vyhodnoc.mech1 3.2.0.812 (involute)

A4_std2_spline.fzm




DIN 5480 - Dobrá strana má prioritu.


Strana: 3 / 3

Datum: 04.06.2015 22:44:46

Soubor: 1433450686

ZEISS GEAR PRO 2014 (5.2.0.0 od 21.07.2014)

 GEAR PRO involute	W33x1.25x30x25x7f		Není OK		
	L5217782620300		2597571		
	W20x1.25x30x14x8f		4		
	z	14	α_n	30,000°	Trneny
	m_n	1,250 mm	β	0,000°	
b	35,000 mm	x	0,450	d_f/d_a 17,250/ 19,750 mm	
Vnitřní/Zub	d_b	15,155 mm	b_q/b_o	-28,000/ -7,000 mm	

<p>0,60</p> <p>100,0 μm</p> <p>100:1</p>	Měření kružnice		Pata	
	-15,000		-15,000	
				
	DIN_ISO_286 h11 - (uživat. def.) Není OK		DIN_5480 11a - (uživat. def.) OK	
	[...]		[...]	
	$D_a \text{ max}$	19,750	19,717/19,750	$D_f \text{ max}$ 16,999 16,900/17,250
	$D_a \text{ min}$	19,731	19,717/19,750	$D_f \text{ min}$ 16,975 16,900/17,250
	$D_a \text{ mean}$	19,739	19,717/19,750	$D_f \text{ mean}$ 16,988 16,900/17,250
	R_{aD}	0,020		R_{fD} 0,024

A4_atd2_spline.frm

Formulár modul 3.2.0.101

Vyhodnocení modul 3.2.0.012 (involute)