

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



*Vliv rozložení matice jmenovitých hodnot na přesnost měření
kuželového ozubení na CMM*

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Urban

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

PETRA ŽDÁNSKÁ

Praha 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Žďánská** Jméno: **Petra** Osobní číslo: **457264**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv rozložení matice jmenovitých hodnot na přesnost měření kuželového ozubení na CMM

Název bakalářské práce anglicky:

Effect of nominal value distribution on the accuracy of bevel gears on the CMM

Pokyny pro vypracování:

1. Definice a oblast použití kuželových ozubených kol
2. Přehled základních geometrických parametrů
3. Parametry určující kvalitu výroby ozubených kol
4. Provedení porovnávacího měření kuželového kola na CMM s odlišnou maticí jmenovitých hodnot

Seznam doporučené literatury:

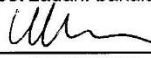
Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Urban, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

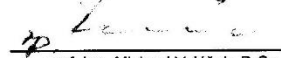
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Jan Urban
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

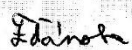

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

24. 4. 2018

Datum převzetí zadání



Podpis studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně za použití podkladů uvedených v seznamu na konci této práce.

V Praze dne

.....

Petra Žďánská

Poděkování

Chtěla bych poděkovat panu Ing. Janu Urbanovi za odborné rady, připomínky a také za jeho ochotu i laskavost.

Velké díky patří také společnosti ŠKODA AUTO a.s., že jsem mohla tuto bakalářskou práci vypracovávat za pomoci odborných konzultací ve firmě pod vedením Ing. Ondřeje Košťáka.

Dále děkuji za cenné rady panu Ing. Kamilu Větrovcovi a jeho celé firmě GEARTEC.CZ, s.r.o. za vstřícnost a vysvětlení principu kontroly kuželových ozubených kol.

Také děkuji mé rodině za psychickou a finanční podporu při studiích.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku kontroly kuželových ozubených kol. V úvodu je uvedena základní definice a rozdělení ozubených mechanismů. Následně je pozornost věnována možnostem kontroly kuželového ozubení včetně uvedení základních znaků kvality a geometrie ozubení. V bakalářské práci nemůže také chybět rozdělení současných zařízení, na kterých se kuželová kola s přímými zuby kontrolují.

V experimentální části je soustředěna pozornost na kontrolu kuželových ozubených kol na souřadnicovém měřicím stroji, a to konkrétně na stroji od společnosti Zeiss. Na tomto stroji byl sledován vliv rozložení matice jmenovitých bodů měřeného zubu na výslednou přesnost měření. Cílem je tedy zjistit, zda má různý rozměr matice jmenovitých bodů vliv na základní sledované parametry jakosti kuželového ozubeného kola.

Klíčová slova

kuželové kolo, ozubené kolo, metrologie, kontrola, ozubení, geometrické parametry

Abstract

This bachelor's thesis explores the issue of quality control of conical gears. The introduction discusses the general definition and classification of the geared mechanisms. Further attention is given to the different methods of quality control of the conical gears, while introducing the basic metrics for quality and geometry of these mechanisms. The classification of the quality control tools is also shown.

The experimental part of the thesis focuses on the coordinate measuring machine of the quality control methods, namely on the use of the machine manufactured by the Zeiss company. Using this machine we observed the influence of the distribution of matrix nominal points of the measured gear on the precision of measurement. The goal is to determine whether the size of the matrix influences the basic measured parameters of quality of the conical gear.

Key words

bevel gears, gear, metrology, control, gearing, geometric parameters

Obsah

Seznam použitých značek.....	7
Úvod.....	8
1. Rozdělení ozubených převodů.....	10
1.1. Čelní kola.....	11
1.1.1. Vnější a vnitřní kola	11
1.1.2. Kola s přímými a šikmými zuby	12
1.2. Kuželová kola	12
1.2.1. Kuželové ozubení s přímými zuby	13
1.2.2. Kuželové ozubení se šikmými zuby	13
1.2.3. Kuželové ozubení se zakřivenými (spirálními) zuby	14
1.3. Šneková kola	16
2 Geometrie kuželového ozubení s přímými zuby.....	18
2.1. Názvosloví kuželového kola	18
2.2. Druhy ozubených věnců	22
3. Měření vyhodnocovacích parametrů kuželového ozubeného kola	24
3.1 Měření pomocí komunálních měřidel	24
3.2. Metoda jednobokého a dvoubokého odvalu	25
3.2.1. Metoda jednobokého odvalu	25
3.2.2. Metoda dvoubokého odvalu	27
3.3. Souřadnicové měřicí stroje	28
3.3.1. Snímací hlavy	29
3.3.2. Dělení souřadnicových měřicích strojů	31
3.4. Zkušební přípravek na kontrolu kol	34
4. Představení společnosti ŠKODA AUTO a.s.....	35
5. Kontrola kvality ve Škoda Auto a.s.	36
5.1. SW Zeiss Calypso	36
5.2. Nadstavba GEAR PRO	38
6. Příprava měření	40
6.1. Konstrukce a kalibrace snímače	40
6.2. Upnutí	41

7. Tvorba plánů měření.....	43
7.1. Postup.....	43
8. Vyhodnocení.....	51
8.1. Matice 8 x 8	52
8.2. Matice 10 x 10	53
8.3. Matice 12 x 12	55
8.4. Měření celkového obvodového házení	56
8.5. Shrnutí celkového měření.....	57
9. Závěr	59
Použitá literatura.....	61
Seznam obrázků.....	64
Seznam tabulek	66
Seznam příloh.....	67

Seznam použitých značek

D – průměr roztečné kružnice

D_a – průměr hlavové kružnice

D_f – průměr patní kružnice

A – montážní osová vzdálenost

b – šířka zubu

m – modul

O_1, O_2 – osy kuželů

R_e – vnější délka povrchu roztečného kužele

R_d – poloměr roztečné kružnice

h – výška celkového zubu

h_a – výška hlavy zubu

h_f – výška paty zubu

β_m – střední úhel sklonu boční křivky zubu

δ – úhel roztečného kužele

δ_a – úhel hlavového kužele

δ_f – úhel patního kužele

ϑ – úhel zubu

ϑ_a – úhel hlavy zubu

ϑ_f – úhel paty zubu

F_p – součtová odchylka dělení

f_p – jednotlivá odchylka dělení

F_r – obvodové (radiální) házení

F_{rsn} – obvodové házení jednoho boku zubu

f_u – skok dělení

CAD – počítačem podporované projektování (computer aided design)

CMM – souřadnicový měřicí stroj (coordinate measuring machine)

Úvod

Ozubená kola jsou nejpoužívanější strojní součásti přenášející mechanickou energii v podobě krouticího momentu. Existuje několik funkčních forem ozubených převodů, které můžeme rozdělit do více kategorií. Základní rozdělení můžeme provést na kola čelní, kuželová a šneková. Ozubená kola se vyrábí z ocele či plastu, a to třískovým obráběním, popř. aditivními technologiemi či kováním. Pod třískovým obráběním si lze představit odebírání materiálu, jedná se např. o obrázení, frézování, protahování apod. Výhodou je vysoká přesnost. Princip aditivní metody, tzv. Rapid Prototyping spočívá v nanášení materiálu po vrstvách. Čím tenčí, tím kvalitnější, ale za cenu delšího výrobního času. Používá se pro ověření smontovatelnosti a funkčnosti kol.

V dnešní době se postupně upouští od výroby ozubení klasickými konvenčními metodami třískového obrábění z důvodu velkého tlaku na vysokou produktivitu. Upřednostňuje se výroba kování především v automobilovém průmyslu. Kování je vysoce produktivní výroba, díky které jsme schopni vyrobit až tisíce kusů za den. Zápustka je velmi namáhaný nástroj. Musí vydržet vysoké teploty a tření. Často se opotřebovává a tím dochází k výrazným nepřesnostem. Jinou komplikací může být, že se materiál při pracovním zdvihu kovacího lisu, kde je zápustka umístěna, pohne z výchozí pozice a tím pádem způsobí nesprávnou funkčnost. Tyto již zmiňované faktory mají přímý vliv na kvalitu a funkčnost kovaných ozubených kol.

Kromě kol s přímými zuby nalezneme v široké škále aplikací ozubení kuželová, která se nejvíce uplatňují např. v automobilovém a leteckém průmyslu, v manipulační technice apod. Nezbytná jsou především v případech, kdy je potřeba převést směr osy rotace o 90°. Nejčastěji tedy bývají montována na hřídele, které mezi sebou svírají pravý úhel. Konstrukční provedení může být ale i v jiných úhlových nastaveních. Funkční provedení takových kol je v principu stejné jako u kol přímých a společně se spoluzabírajícím kolem tvoří funkční kuželové soukolí. Zuby na kuželových převodech mohou být rovné, spirálové nebo hypoidní. Z hlediska výroby se u kuželových a čelních kol s přímými zuby setkáváme s podobnými výrobními problémy. To je způsobeno použitím složité geometrie nástrojů a strojů s komplikovanou kinematikou, u kování se jedná o nepřesnost zápustky.

Oproti kolům s přímými zuby je kontrola funkčních parametrů kuželových kol zejména po technické stránce mnohem složitější. Nestačí definovat základní geometrii zubu, ale je nutné je doplnit o úhly. Dále se u kuželových kol využívá plocha záběru místo přímky, měřena otiskem spoluzabírajícího kola, která je řešena po celé šířce zubu.

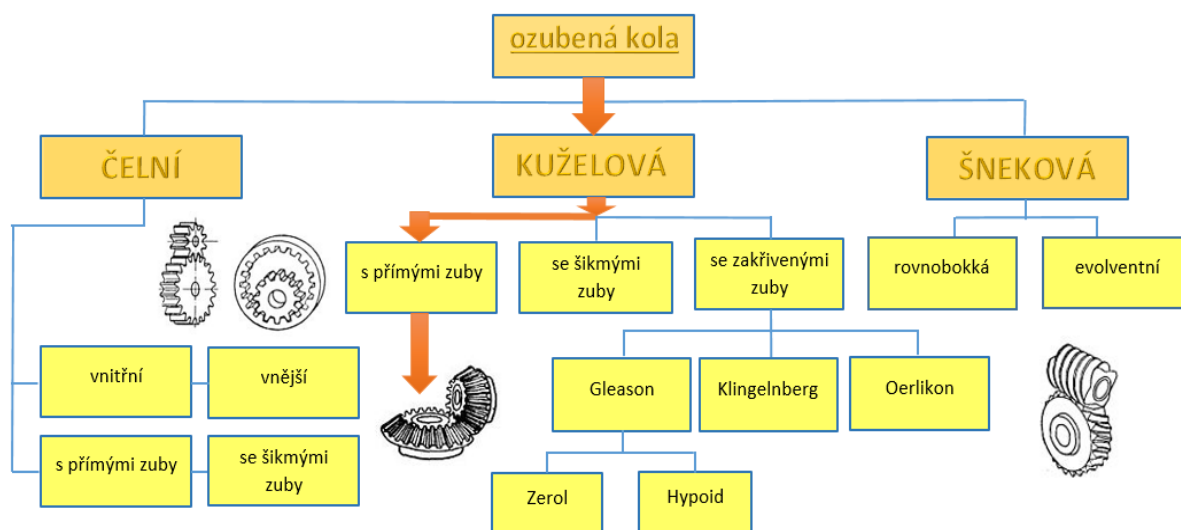
Tato bakalářská práce se proto zabývá měřením kuželového ozubení diferenciálu převodovky osobního automobilu, který využívá ozubení s přímými zuby na souřadnicovém měřicím stroji. Konkrétně jde o technologické vybavení od firmy Zeiss ve formě CMM a softwaru Calypso s nadstavbou pro ozubení Gear Pro bevel. Jelikož se jedná o CMM techniku, probíhá měření ozubených kol odečítáním bodů definované sítě na jednotlivých zubech v kartézském souřadném systému. Z takto naměřených bodů jsou následně matematicky dopočítány jednotlivé kontrolované parametry.

Hlavním cílem celé práce je prokázání vlivu hustoty sítě bodů jmenovitého zubu na hodnotu kontrolovaných funkčních parametrů kuželového ozubení při kontrole prováděné na CMM technice.

1. Rozdělení ozubených převodů

Ozubené kolo je základní součást ozubených převodů, používá se v převodových mechanismech se stálým převodovým poměrem a vyznačuje se malou vzdáleností os hřídelů, dlouhou životností a spolehlivostí. Nevýhodou může být zejména riziko nadměrné hlučnosti, která vzniká nedodržením předepsaných parametrů kvality při výrobě. Dalším problémem může být tzv. zadrhnutí ozubeného kola vlivem špatné rozteče. Zub kola je poté nadměrně silově namáhán a v závěrečné fázi dojde k jeho vylomení a destrukci celého mechanismu. Na toto všechno má zásadní vliv výrobní nepřesnost, která může vzniknout např. při chvění výrobního stroje, opotřebením nástroje, nevhodným technologickým postupem při výrobě kol atd. [1, 2]

Ozubená kola vyžadují speciální stroje a nástroje pro výrobu. Důležitou funkcí kol je přenos kroutícího momentu v rámci soukolí hnacího kola na kolo poháněné nebo také z kola malého (pastorek) a velkého (talířové kolo). Většinou se toto soukolí nazývá planetové, které např. v diferenciálu osobního automobilu umožňuje rozdílné otáčky na obou poháněných kolech. [1, 2]



Obrázek 1: Rozdělení ozubených kol podle průběhu zu

Ozubená kola se dělí podle mnoha kritérií:

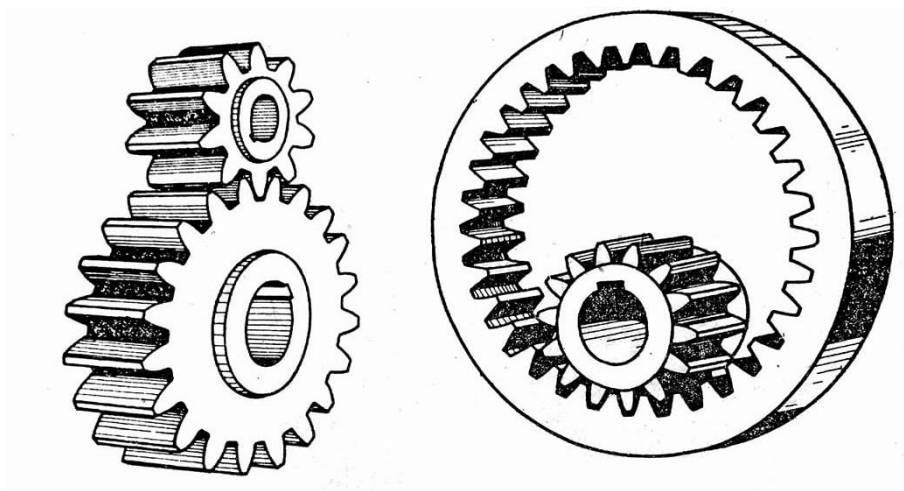
- podle průběhu zubů (viz obrázek 1),
- podle vzájemné polohy os hřídelů – rovnoběžná, různoběžná, mimoběžná,
- podle tvaru postranní křivky – evolventní, cykloidní (např. hodinkový mechanismus) a smíšená (šneková kola). [3]

Níže bude detailně rozvedeno rozdělení podle průběhu zubů.

1.1. Čelní kola

U čelních ozubených kol jsou osy rotace kol rovnoběžné. Spoluzabírající kola přenášejí moment dotykem v bodě záběru. [3]

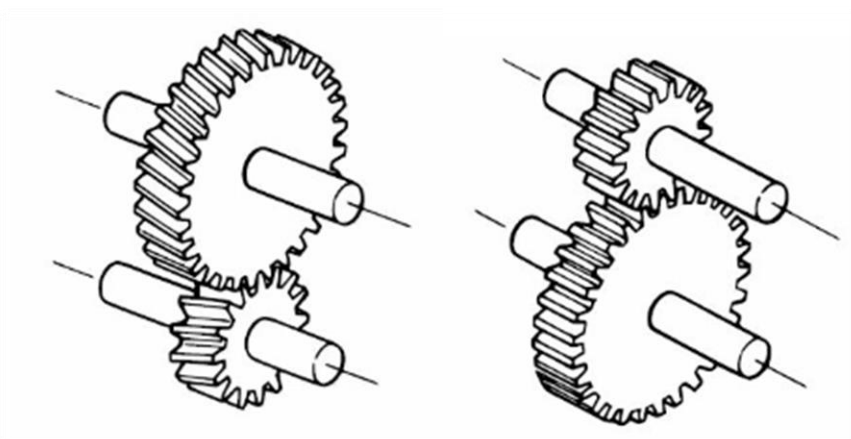
1.1.1. Vnější a vnitřní kola



Obrázek 2: Čelní soukolí vnější (vlevo) a vnitřní [2]

Velkou výhodou u kol s vnitřním ozubením je minimalizace prostoru. Kola mají stejný směr otáčení, ale jsou citlivá na hrubé nečistoty. Naopak u kol s vnějším ozubením je směr opačný a dochází k většímu opotřebení. Kola je nutné mazat a jsou náchylná na ohyb. Dochází k vylamování zubů. Oba dva typy kol je možné vidět na obrázku č. 2.

1.1.2. Kola s přímými a šikmými zuby



Obrázek 3: Čelní soukolí se šikmými (vlevo) a přímými zuby [20]

U kol s přímými zuby nevznikají axiální síly, ale u šikmých kol ano. Jejich rozdíl si můžeme všimnout na obrázku č. 3.

Čelní soukolí – planetové

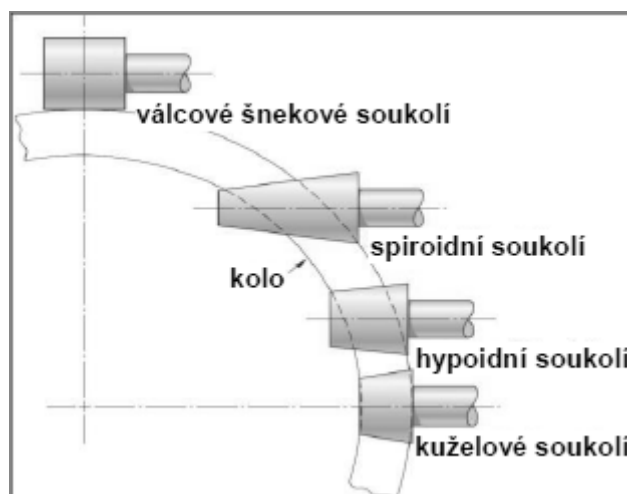
Planetové soukolí tvoří minimálně tři zabírající kola. Planetovou převodovku tvoří centrální kolo, korunové kolo, satelity a unašeč satelitů. Principem planetového soukolí je to, že je jedno kolo zastaveno, zbylá kola se otáčejí a zároveň se točí satelity okolo své osy. Tyto převodovky můžeme nalézt např. v užitkových vozidlech. [4]

1.2. Kuželová kola

Kuželová ozubená kola se řadí do valivého soukolí s různoběžnými osami kol, jsou vysoce citlivá na výrobní a montážní chyby.

Kuželové ozubené převodovky jsou vhodné pro přenos síly a mechanické energie mezi hřídelemi.

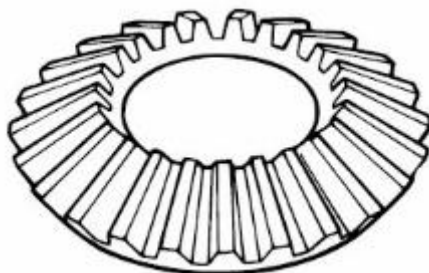
Existuje řada kritérií, podle nichž jsou kuželová kola a soukolí rozdělena. Jedním z nich je vzájemná poloha os rotace. V případě, že osa rotace hnaného kola protíná osu rotace kola hnacího, mluvíme o kuželovém soukolí s přímými (šikmými) zuby. Je-li situace taková, že jednotlivá kola jsou umístěna mimo společný průsečík os rotace a tvar jejich zubů je pak zakřivený, hovoříme o spiroidním, popř. hypoidním soukolí. Umístění jednotlivých ozubených kol v soukolí znázorňuje obrázek č. 4. [5, 6]



Obrázek 4: Rozdělení podle polohy os [21]

1.2.1. Kuželové ozubení s přímými zuby

Kuželové ozubené kolo můžeme uvidět na obrázcích č. 5 a 7 A. Jsou nejjednodušší formou a základním typem kuželového ozubení. Musí mít precizně vyrobenou rozteč, která zajišťuje bezproblémový chod soukolí. Zuby vstupují do záběru veškerou svou šířkou. K výrobě je zapotřebí dodat informace o základní geometrii. Jedná se o modul, rozteč, montážní vzdálenost, počet zubů, průměry kružnic a úhly kuželů. [5, 7]



Obrázek 5: Kuželové kolo s přímými zuby [20]

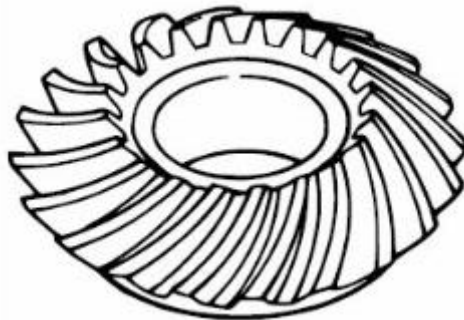
1.2.2. Kuželové ozubení se šikmými zuby

U těchto kol je řídicí křivkou šikmá přímka znázorněna na obrázku č. 7 B, která neprochází montážním středem ozubeného kola. Dosahují lepších vlastností než kola s přímými zuby, mají vyšší obvodové rychlosti a trvanlivost, menší citlivost na nepřesnosti a deformace, nižší hlučnost. Jsou více silově únosná než kola s přímými zuby, proto se

používají více v převodovkách a při správných provozních podmínkách mají vyšší životnost. [22]

1.2.3. Kuželové ozubení se zakřivenými (spirálními) zuby

V dnešní době se díky vyšším nárokům na rychlost, tichý chod a zatížení ozubených převodů uplatňuje čím dál tím více použití ozubených kol se zakřivenými zuby, např. v rychloběžných převodovkách. Výhodou je klidný a plynulý chod, možnost pracovat při větších rychlostech, delší trvání záběru a životnost. Mají vysokou odolnost proti opotřebení spoluzabírajících zubů. Za nevýhodu je považována vyšší pořizovací cena výrobního stroje, časová náročnost na seřízení a kladou se vysoké nároky na kvalifikaci obsluhy. Další nevýhodou je nutnost použití speciálního hypoidního oleje, který umožňuje vzájemné tření ploch zubů bez nadbytečného opotřebení, popř. poškození zubů. V kombinaci se složitou výrobou to všechno znamená vyšší pořizovací, ale i provozní náklady. Kuželové ozubení se zakřivenými zuby je na obrázku č. 6. [2, 3, 5, 7]



Obrázek 6: Kuželové kolo se zakřivenými zuby [20]

1.2.3.1 Ozubení typu Gleason - s kruhovými (obloukovými) zuby

Jedná se o kuželové ozubení se zuby zakřivenými do oblouku, které je možné spatřit na obrázku 7 C. Výroba tohoto ozubení byla vyvinuta firmou Gleason a probíhá na stejnojmenných strojích. Řídící křivkou ozubení je kruh se středem ležící na roztečné kružnici. Existují však další dvě provedení kol tohoto typu. [2]

a) Zerol

Tato kola se vyznačují tím, že mají úhel sklonu nulový. Mají malé osové síly, delší životnost a trvání záběru. Za řídicí křivku je považován kruh, který má střed na hlavové kružnici, respektive se nachází na vnějším obvodu ozubeného kola (viz obrázek 7 D).

a) Hypoid

Tvořen kuželovými koly nebo jedním kuželovým a druhým čelním kolem, které mají mimoběžné osy, jeho výhodou je tichý chod. [2, 5, 7]

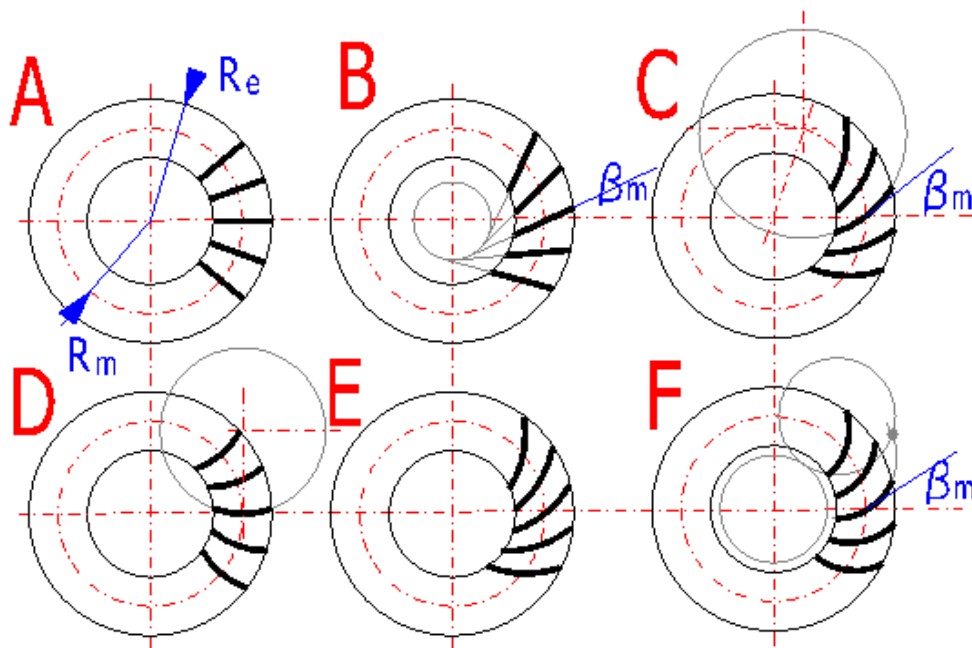
1.2.3.2. Ozubení typu Klingelberg - s paloidními (evolventními) zuby

Je nejpoužívanější z důvodu prostého seřízení stroje a možnosti výroby ozubení okamžitě po návrhu. Používají se skoro ve všech odvětvích strojírenství, v průmyslu obráběcích strojů a ve výrobě náhradních dílů pro automobily. Vzhledem ke kratším přípravným časům, než jsou u strojů Gleason a Oerlikon Spiromatic, jsou vhodné pro malosériovou a kusovou výrobu. Toto ozubení s řídicí křivkou je k nahlédnutí na obrázku 7 E. [5, 8]

1.2.3.3. Ozubení typu Oerlikon Spiromatic - s eloidními (epicykloidními) zuby

Eloidní zuby jsou zakřiveny pod úhlem $30 - 45^\circ$. Řídicí křivkou je kružnice, která se odvaluje po epicykloidě. Kola Oerlikon Spiromatic se používají v menší míře než ostatní typy kol. Důvodem je složitá technologie výroby, která s sebou nese vyšší finanční náklady na výrobu. Řídicí křivku eloidního ozubení můžeme spatřit na obrázku 7 F. [5, 8]

Na následujícím obrázku je shrnuto základní rozdělení kuželových kol.



Obrázek 7: Rozdělení kuželových kol [9]

A – přímé zuby – radiální křivka jako řídící přímka

B – šikmé zuby – šikmá křivka jako řídící přímka

C – kruhové zuby Gleason – řídící křivka je kruhový oblouk

D – kruhové zuby Gleason Zerol – řídící křivka je kruhový oblouk

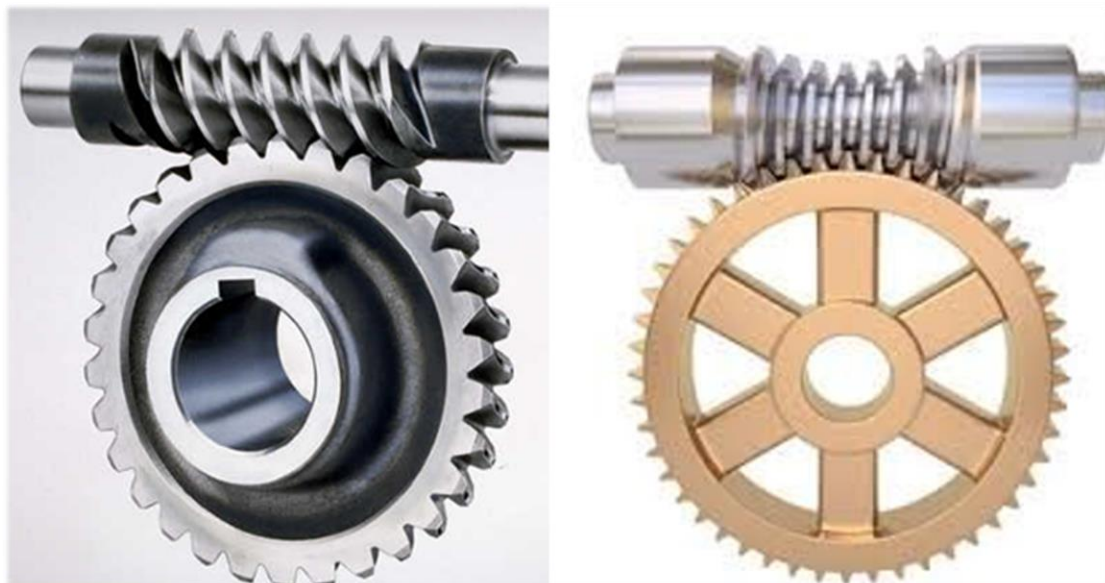
E – paloidní ozubení Klingelnberg – řídící křivka se odvaluje po evolventě

F – eloidní ozubení Oerlikon Spiromatic – řídící křivka se odvaluje po epicykloidě [9]

1.3. Šneková kola

Jsou speciálním případem ozubeného soukolí, které funguje principiálně jako šroubové soukolí. Patří mezi kola s mimoběžnými osami hřídelů, kde se obě dvě kola po sobě odvalují a současně se posouvají ve směru otáčení. Tato kola jsou charakteristická tichým chodem, vysokým převodovým stupněm a silovým zatížením, vysokými nároky na přesnost výroby a samosvorností aj. Lze je nalézt u míchaček, aut, výtahů a nejvíce v lodních šroubech.

Soukolí je složeno ze šneku a šnekového kola. Rozlišujeme šneková kola válcová a globoidní, jejichž rozdíl můžeme zpozorovat na obrázku č. 8. [2, 3, 10]



Obrázek 8: Šnekové válcové(vlevo) a globoidní soukolí [23, 24]

V dnešní době se setkává díky výrobní složitosti kuželového ozubení společnost ŠKODA AUTO a.s. s narůstajícími problémy při montáži způsobenými výrobní metodou. To vedlo ke spolupráci, a proto vznikla tato bakalářská práce, ve které se řeší dále jen kuželová ozubená kola s přímými zuby.

2 Geometrie kuželového ozubení s přímými zuby

Kuželová kola je nutné kontrolovat a měřit kvůli vysokým požadavkům na rozměrovou a tvarovou přesnost kol. Dělíme je do 10 kategorií přesnosti od 2. do 11., kde 2. kategorie znamená nejvyšší dosažitelnou přesnost. V těchto kategoriích hraje roli funkce, technologický postup, obvodová rychlost a drsnost obrobeného zubu. [12]

Na kuželových kolech s přímými zuby se nejčastěji kontroluje:

- rozteč – jedná se o součet tloušťek zubů a jejich mezer a se měří na roztečném kuželi
- tvar zubového profilu – představuje délku oblouku hlavového kužele na jednom zubu a zároveň oba boky zubu
- poloha zubového profilu vzhledem k roztečnému kuželi – jedná se o úhel tvořící křivky, tedy o úhel záběru, který bývá většinou 20° [12]

Odchytky v rozteči vyvolávají nepravidelný záběr boku zubů, proto dochází k velkému opotřebení a hluku při otáčení. Na rozteč jsou kladeny vysoké nároky při výrobě z toho důvodu, že se rozteč společně s tloušťkou zubu považuje za nejcitlivější parametr ozubeného kola. [3, 13]

2.1. Názvosloví kuželového kola

Střednice – za středy se považují vrcholy doplňkových kuželů

Vzdálenost os – je délka úseku střednice mezi středy O_1, O_2

Záběrová přímka – je přímka, po níž se při práci soukolí pohybuje záběrový bod, tj. bod dotyku spoluzabírajících profilů

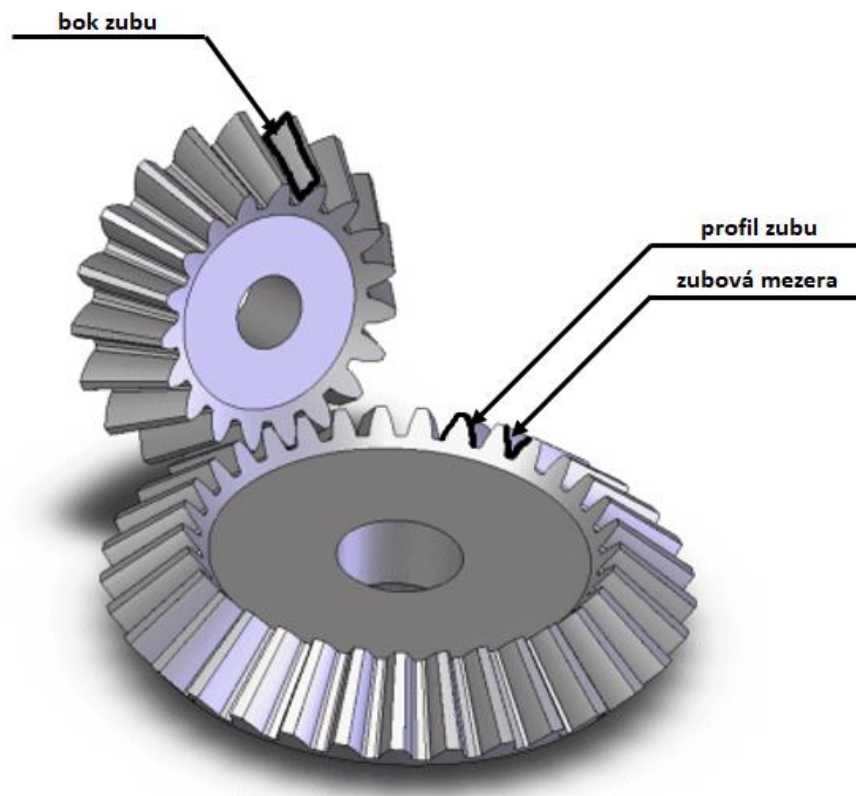
Délka záběru – je činná část záběrové přímky, tj. její úsek mezi počátkem a koncem skutečného dotyku spoluzabírajících profilů

Profil zubu – je křivka, podle níž je sestrojena boční plocha zubu, profil je možné vidět na obrázku č. 9

Modul m – je poměr průměru roztečné kružnice a počtu zubů, číselně se modul rovná roztečnému průměru dělenému počtem zubů a udává se vždy v mm.

Zubová mezera – je to prostor mezi dvěma zuby a je zobrazena na obrázku č. 9

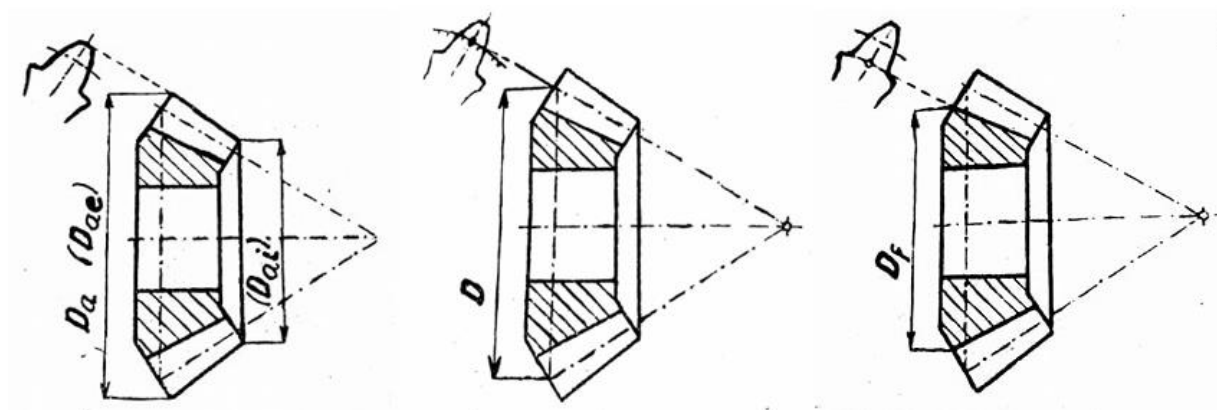
Boky zubů – označeny na obrázku č. 9 a jsou definovány jako pracovní část zubů [10, 12]



Obrázek 9: Názvosloví kuželového kola [25]

Průměr hlavové kružnice D_a – největší průměr kuželového kola
roztečné kružnice D – střední průměr – střední hodnota D_a a D_f
patní kružnice D_f - nejmenší průměr [10]

Tyto průměry jsou zakótovány na obrázku č. 10.



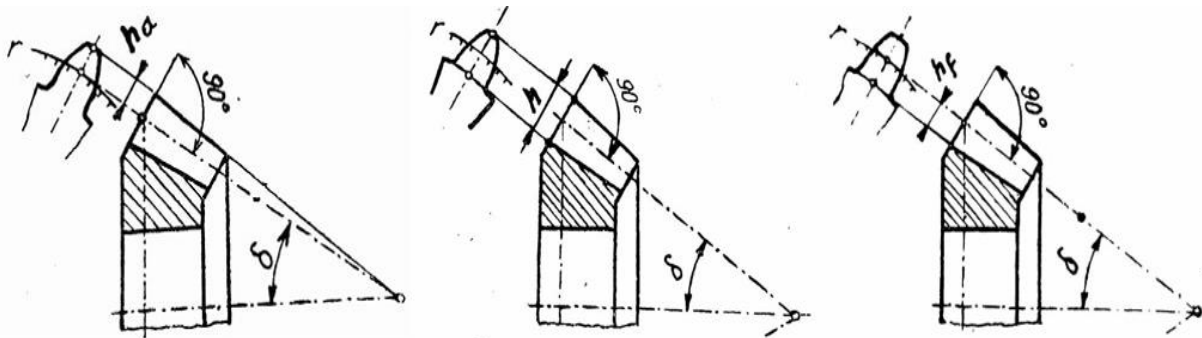
Obrázek 10: Hlavová, roztečná a patní kružnice ozubení [10]

Výška hlavy h_a – výška jednoho modulu (výška horní části zubu od rozteče)

zubu h – součet výšky hlavy a paty kužele

Paty h_f – výška 1,25 modulu (výška dolní části zubu) [10]

Zakótování výšek zubů je možné vidět na obrázku č. 11.



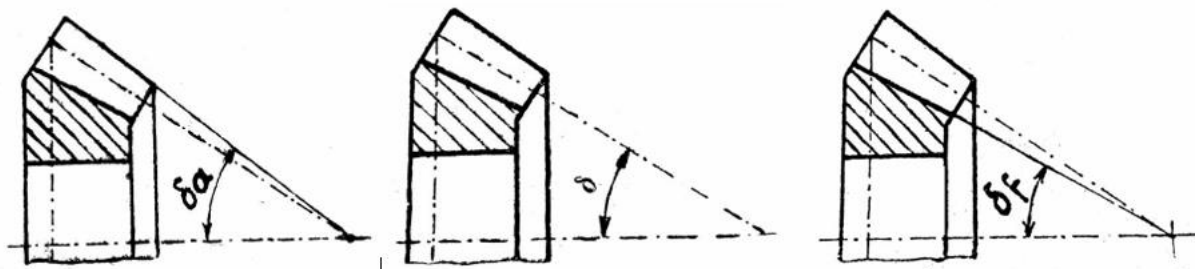
Obrázek 11: Výška hlavy, zubu a paty zubu [10]

Úhel hlavového kužele δ_a – úhel, který je tvořen přímkou hlavy zubu a osou kužele

roztečného kužele δ – úhel, který je tvořen roztečnou přímkou zubu a osou kužele

patního kužele δ_f – úhel, který je tvořen přímkou paty zubu a osou kužele [10]

Na obrázku č. 12 je možné se podívat na ukázkou úhlů kuželů.



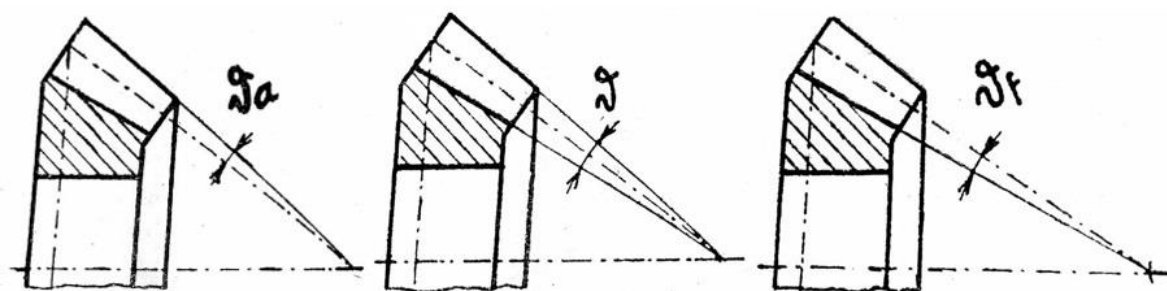
Obrázek 12: Úhel hlavového, roztečného a patního kužele [10]

Úhel doplňkového hlavového kužele ϑ_a – rozdíl úhlů hlavového a roztečného kužele

doplňkového roztečného kužele ϑ – úhel mezi hlavovým a patním kuželem

doplňkového patního kužele ϑ_f – úhel mezi roztečným a patním kuželem [10]

Doplňkové úhly kuželů jsou na obrázku č. 13.



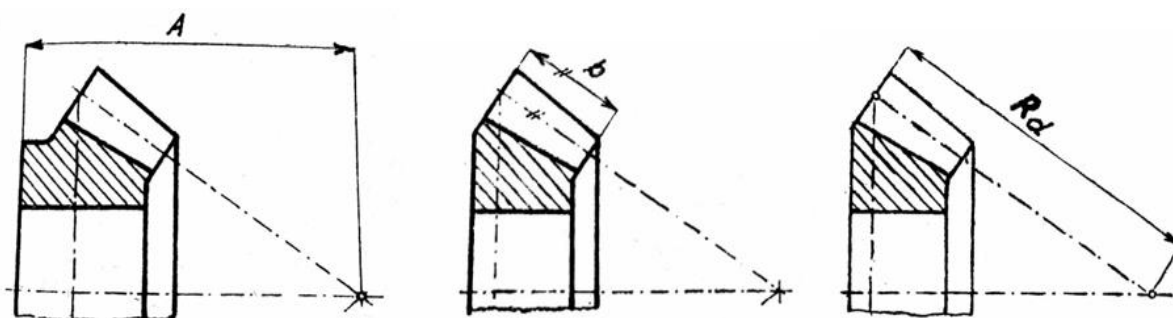
Obrázek 13: Úhel doplňkového hlavového, roztečného a patního kužele [10]

Montážní vzdálenost A – vzdálenost mezi společným vrcholem vůči opěrnému bodu (ploše)

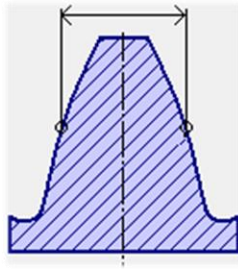
Šířka ozubení b – vzdálenost bodů tvořených průsečíky roztečného kužele a jednotlivých boků zubů měřených v obloukové míře

Poloměr R_d roztečné kružnice základního kola – délka površky roztečného kužele, která je tvořena spojnicí průsečíku hrany patního věnce a roztečného kužele s vrcholovým bodem

Šířku ozubení je možné vidět na obrázcích č. 14 a 15, montážní vzdálenost a poloměr roztečné kružnice základního kola je znázorněn na obrázku č. 14. [10]



Obrázek 14: Montážní vzdálenost, šířka zubu a poloměr roztečné kružnice [10]



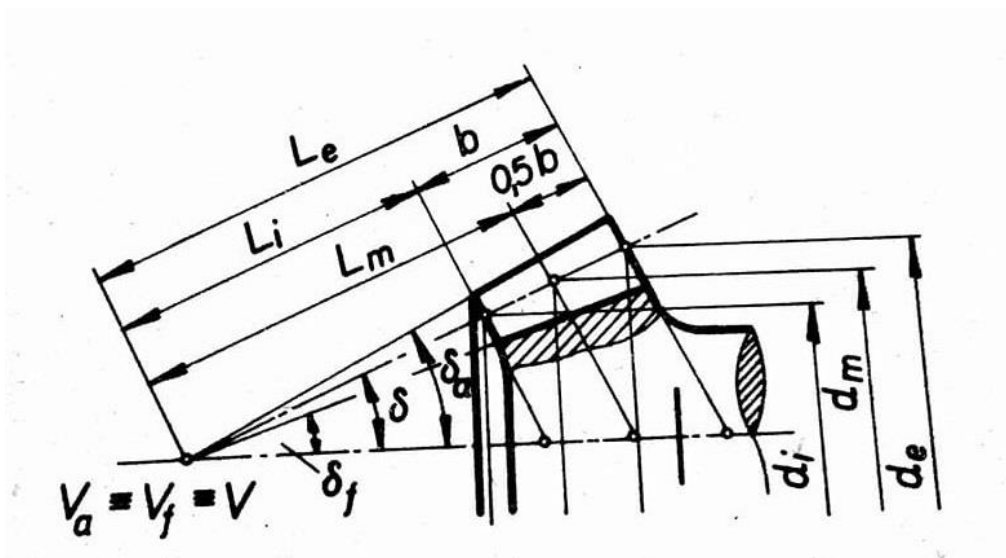
Obrázek 15: Šířka ozubení b

Výše popsaná teorie se považuje za základní geometrii, která je potřebná pro výrobu, ale i kontrolu kuželových kol, ať už se jedná o kola planetová nebo satelitní. Všechny tyto rozměry musí být uvedeny v doplňkové tabulce ve výkresu, která slouží pro přesnou definici vyráběného ozubení. Na základě údajů v této tabulce se provádí následná kontrola.

2.2. Druhy ozubených věnců

Tvar I

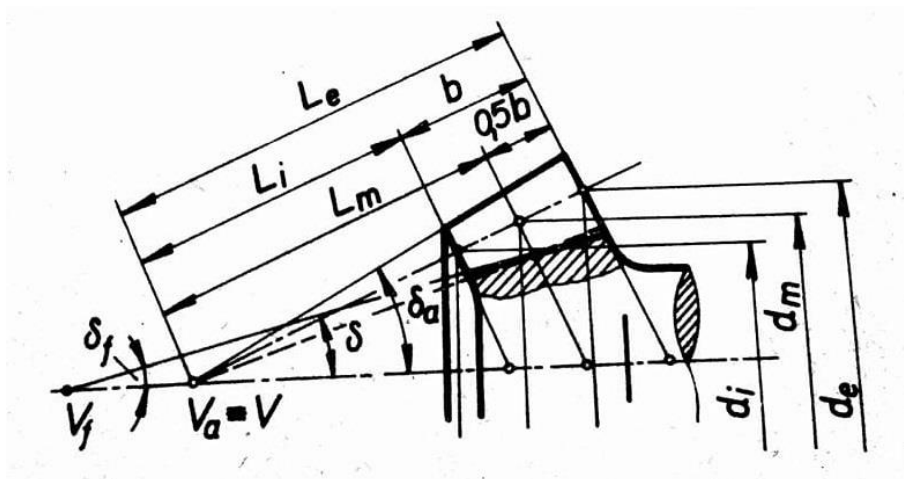
U tohoto tvaru má hlavový, roztečný a patní kužel společný vrchol, tj. $V_a = V_f = V$. Převážně se používá u kol se zakřivenými, šikmými a přímými zuby. U zakřivených zubů se uvažuje maximálně 30 zubů. Tvaru I odpovídá obrázek č. 16. [11]



Obrázek 16: Tvar I [11]

Tvar II

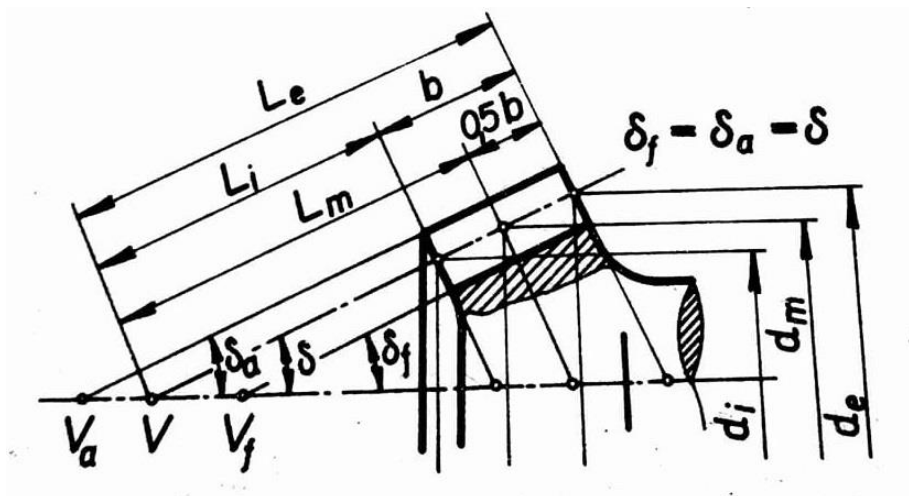
Tento tvar je specifický tím, že hlavový a roztečný kužel je společný a patní kužel je posunut. To se provádí z důvodu zachování konstantní šířky zubové mezery a tloušťka zubu na roztečném kuželi musí narůstat úměrně a od vrcholu. Tvar II se používá pro kola se zuby kruhově zakřivenými a je zobrazen na obrázku č. 17. [11]



Obrázek 17: Tvar II [11]

Tvar III

Tento tvar má konstantní výšku zubů, kde jsou všechny kužely, respektive povrchy všech kuželů rovnoběžné v osovém řezu. To znamená, že $\delta_a = \delta = \delta_f$. Tento tvar se využívá u kol paloidních, eloidních a také u kol s kruhově zakřivenými zuby. Na obrázku č. 18 je tento tvar ukázán. [11]



Obrázek 18: Tvar III [11]

3. Měření vyhodnocovacích parametrů kuželového ozubeného kola

Měření, tedy kontrolu kuželových kol je nutné provádět pravidelně mezi operacemi z důvodu lepší přesnosti ozubených kol s cílem zabránit ztrátám ve výrobě.

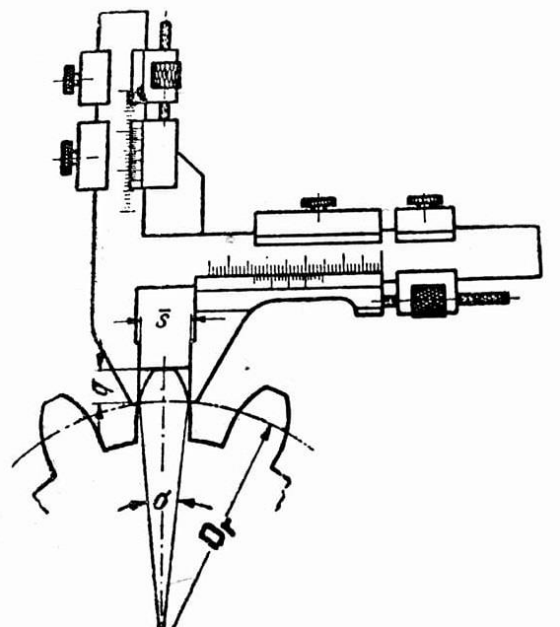
Kontrolou kuželových ozubených kol se zabývají tyto metody:

- ✓ Metoda měření za pomoci komunálních měřidel
- ✓ Metoda jednobokého a dvoubokého odvalu
- ✓ Metoda měření souřadnicovým měřicím strojem
- ✓ Metoda kontroly přípravkem simulující reálně namontovaný stav

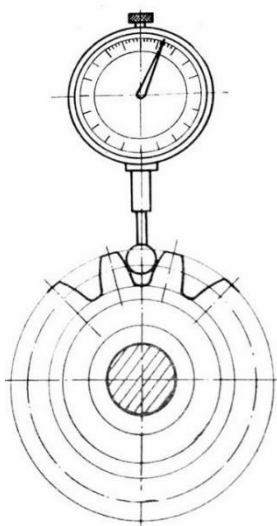
3.1 Měření pomocí komunálních měřidel

Komunálními měřidly se kontrolují tyto rozměry: tloušťka zubu, radiální, obvodové a čelní házení, průměr patního věnce, úhly hlavového a patního kužele. Měří se klasickými komunálními měřidly, jako jsou mikrometry, úhlooměry, číselníkové úchylkoměry, a speciálním posuvným měřítkem.

Tloušťka zubů se měří v konstantní výšce a hloubce zuboměrem, tj. posuvným měřítkem s hloubkoměrem. Je nutné kontrolu provádět proti světlu, abychom měli jistotu dosednutí opěrného místa měřidla na hlavě zubu. Tato metoda se považuje za nejjednodušší, avšak nepoužívá se pro přesná měření z důvodu vyššího nároku na kvalitu plochy hlavové kružnice a také na preciznost měření. Tuto metodu aplikujeme tehdy, pokud není možné měřit rozměr přes zuby. Ukázka měření je na obrázku č. 19. [13, 14, 15]



Obrázek 19: Měření tloušťky zubu [13]



Házení obvodového (radiálního) ozubení neboli házení výstřednosti je zapříčiněno nesprávným upnutím kola. Provádí se velmi jednoduchým přístrojem, a to měřidlem s kuličkou, případně klínem neboli číselníkovým úchylkoměrem na roztečné kružnici, který je možné vidět na obrázku č. 20. Rozměr kuličky, popř. klínu je dán tabulkou jmenovitých hodnot ozubení, která se nachází na výkrese součásti. Měřicí kulička se postupně vkládá do každé mezery zubu po celém obvodu kola. [13, 14]

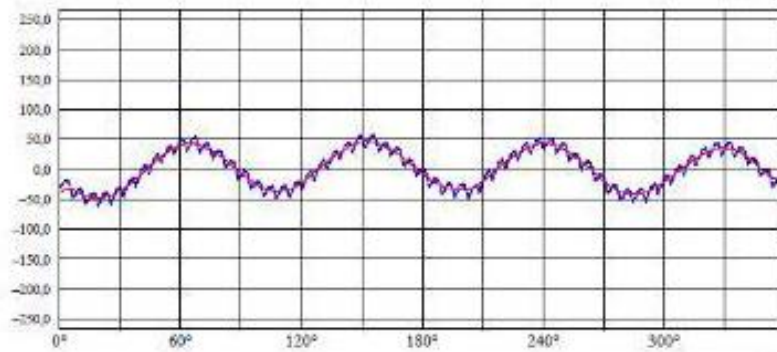
Obrázek 20: Měření házení [14]

3.2. Metoda jednobokého a dvoubokého odvalu

3.2.1. Metoda jednobokého odvalu

Jednoboký odval slouží pro kontrolu kinetické přesnosti. Zkouška probíhá tak, že zabírá jen jedna dvojice zubů etalonového, respektive kontrolního a zkoušeného kola při konstantním momentovém zatížení a montážní vzdálenosti, tudíž levá a pravá strana jsou testovány odděleně. Kontrolní kolo musí být přesnější alespoň o tři stupně s předepsanou vůlí. Zkušební ozubené kolo je lehce brzděno kvůli stálému záběru spoluzabírajících kol.

Princip metody kontroly jednobokým odvalem spočívá v tom, že kontrolované a etalonové kolo se otáčejí s převodem do pomala, zabírají s vůlí a vyhodnocuje se stopa záběru. Obě dvě kola mohou být nabarvena. Díky nabarvení se zjistí průběh záběrů zubů. Pro vyhodnocení jednobokého odvalu je doporučeno zvolit minimálně 30 bodů na zub. Toto zařízení umí vyhodnotit celkové odchylky, změřit kruhovitost a ihned vypočítat chyby přenosu Fourierovou transformací. Pod touto transformací si můžeme představit vykreslení sinusoidy, jejíž ukázkou lze vidět na obrázku č. 21. Tato transformace v podobě sinusového průběhu představuje průběh záběru soukolí, ze kterého jsme schopni určit kvalitativní znaky sledovaného ozubeného kola. [12, 32]



Obrázek 21: Ukázka Fourierovy transformace [34]

Výsledky této zkoušky jsou užitečné pro kontrolu hluku, vibrací, vrypů a otřesů ozubených kol, jelikož ze všech metod kontroly ozubení je metoda jednobokého odvalu nejbližší reálnému provozu soukolí. Je však technicky náročná a nákladná. Její výhodou je rychlost měření a vysoká životnost měřicího stroje. Měření jednobokým odvalem je ukázáno na obrázku č. 22. [3, 16]



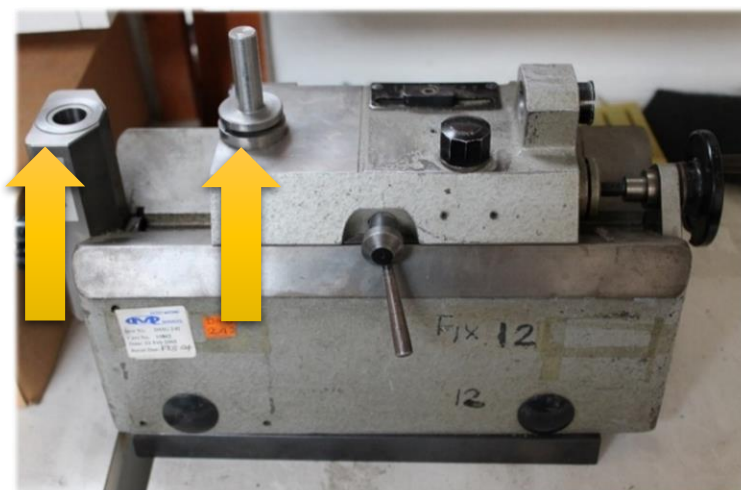
Obrázek 22: Metoda jednobokého odvalu [26]

3.2.2. Metoda dvoubokého odvalu

Kontrola dvoubokým odvalem je podobná kontrole jednobokým odvalem, avšak ozubená kola zabírají bez vůle. To je způsobeno tím, že první (kontrolované) kolo je dotlačováno ke druhému (etalonové). To slouží k zajištění oboustranného dotyku boků zubů.

Měření ukazuje chyby ozubení, které způsobují změnu osové vzdálenosti u kol. Kontrola dvoubokým odvalem je obdobou měření obvodového házení. Měřicí kulička je zde nahrazena přesným protikolem. Pro kuželová kola se toto měření spíše nepoužívá.

Ukázku staršího zařízení dvoubokého odvalu, které se používá doposud, můžeme vidět na obrázku č. 23, kde je etalonové kolo umístěno na levé straně a kontrolované na straně pravé. [13, 16, 27]



Obrázek 23: Metoda dvoubokého odvalu

Rozdíl mezi měřením jednobokým a dvoubokým odvalem spočívá pouze v tom, že u jednobokého se měří jeden bok zubu, u dvoubokého jsou měřeny oba dva boky zubů současně. Oba způsoby používají na vyhodnocení měřicí software nenáročný na kvalifikaci obsluhy. Měří v přesnosti řádu μm na průměr 200 mm a výsledky měření vyhodnocuje pomocí norem DIN 3956, ISO, AGMA. V případě, že měření normám neodpovídá, postupuje se podle pravidel volného měření. Norma pomáhá zlepšit kvalitu, optimalizovat parametry a zvýšit rychlost měření. [12, 27]

Zkušební zařízení není postaveno pouze na softwaru, ale také nesmí chybět dvě ozubená kola, rotační enkodér, čtecí zařízení a motor (viz obrázek 24). [12]



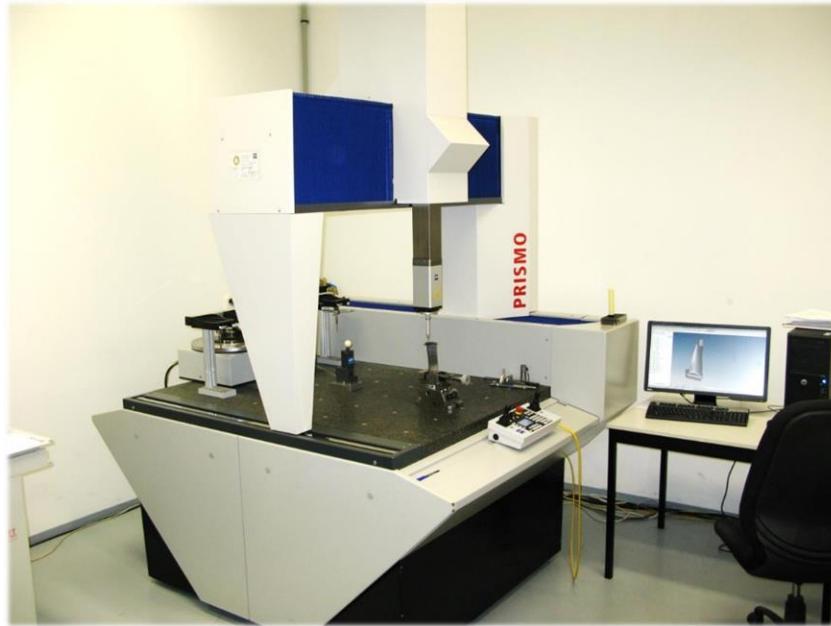
Obrázek 24: Měření dvoubokým odvalem [33]

Přesnost kuželových ozubených kol malých modulů

Jedná se o přesnost kuželových kol s modulem menším než jeden milimetr a musí odpovídat normě DIN. Měření má zaručenou vůli a bezhlučný provoz. Velký vliv na měření miniaturních ozubení má způsob montáže kol. Jednotlivé zkoušky měření jsou podmíněny dostupností malých snímacích hlav. Měření je rychlé a levné. [12, 27]

3.3. Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicový měřicí stroj (CMM), který je na obrázku č. 25, se považuje za univerzální měřicí techniku. Slouží ke kontrole rozměrů a tolerancí součástí v kartézském souřadném systému. Jeho obrovskou výhodou je přesnost dosahující u dnešních velmi přesných strojů se snímací dotykovou hlavou i pod hranici 1 μm . Další velkou výhodou je jeho univerzálnost použití a rychlost měření. V dnešní době se dají kontrolovat tvary od velmi malých rozměrů až po díly s rozměry v řádech metrů s různou tvarovou složitostí. [17, 18]



Obrázek 25: Souřadnicový měřicí stroj [28]

Principem měření je extrakce bodů v prostoru, přiřazení souřadnic v daném souřadném systému a následné matematické vyhodnocení všech naměřených bodů. Takto získané body a vypočtené elementy porovnáváme s teoretickými hodnotami převzatými z CAD modelu nebo z ručně vytvořených jmenovitých dat. [17, 18, 19]

3.3.1. Snímací hlavy

Základním a velmi důležitým prvkem u CMM jsou snímací hlavy, které slouží k získávání bodů v prostoru. Výběr snímacího systému je podstatná věc CMM měření, která zásadním způsobem ovlivňuje přesnost rozměrové kontroly. Snímat body lze dotykově, opticky nebo kombinovaně. Záleží na způsobu snímání – **opticky** se dají měřit malé tvarově složitější díly, např. hodinkové strojky pomocí kamerových systémů, popř. laserem, kde jej měřit i díly velké a **dotykově** za použití kontaktní bodové či skenovací sondy měříme pouze větší díly. [17, 18, 19]

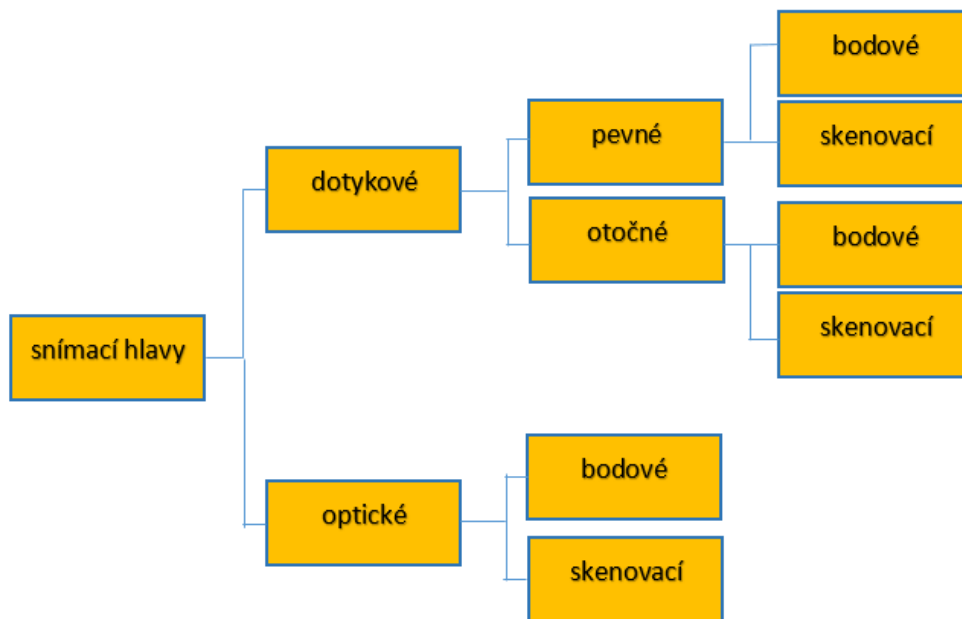
Dotykové měření je díky fyzickému kontaktu snímače s kontrolovanou součástí přesnější. Snímač se dotkne nastavenou přítlačnou silou měřené součástky a informuje operátora o zapsání bodu zvukovým signálem. V běžném nastavení se zapisuje bod v místě dotyku snímací koule snímacího systému.

Při měření může také dojít k problému v podobě prohnutí snímače vlivem nekonstantní měřicí síly, což můžeme odstranit použitím aktivní snímací hlavy. Pro reálné dotykové měření většinou nestačí pouze jeden snímač, ale je zapotřebí sestavit celou konfiguraci snímačů tak, abychom se dostali ke všem měřeným geometrickým elementům. Tato konfigurace je poté upevněna do snímací hlavy přes tzv. upínací talířek, který zabezpečuje přesnost a opakovatelnost upnutí a je možné ho vidět na obrázku č. 26. O dotykovém měření bude v této práci ještě psáno. [17, 18, 19]



Obrázek 26: Upínací talířek

Optické snímací systémy mají velkou výhodu v tom, že dokážou nasnímat velké množství bodů za sekundu. Tato rychlost se může pohybovat až v řádech stovek bodů za sekundu. Jednou z možností optického systému je laserové snímání, respektive optická triangulace, která zjišťuje místo, kam laserový paprsek dopadl. Jde vlastně o vysílání světelného paprsku, jenž vytváří světelný bod na měřené součásti. Toto světlo je poté vysláno do optického přijímače a vyhodnotí se z něj vzdálenost. Schéma používaných snímacích systémů je uvedeno na obr. 27. [17, 18, 19]



Obrázek 27: Rozdělení snímacích hlav

3.3.2. Dělení souřadnicových měřicích strojů

Souřadnicové měřicí stroje lze rozdělit na stroje:

- ✓ Mobilní
- ✓ Dílenské
- ✓ Laboratorní
- ✓ Multisenzorové

Mobilní CMM stroje se používají na měření velkých dílů, které nelze přesunout do laboratoří. Nejčastěji jde o velkorozměrové svařence, popř. odlitky atd. Lze měřit přímo v dílenském prostředí. Výhodou je, že tyto stroje umožňují měřit skrytá místa. Pro měření se nejvíce využívají měřicí ramena nebo lasertrackery. Ty zajišťují spolehlivost a stálost měření. Jedná se o přenosné souřadnicové stroje. Na obrázku č. 28 je ukázka měřicího ramene a lasertrackeru od společnosti FARO Technologies Inc. [29]



Obrázek 28: Lasertracker a měřicí rameno od firmy FARO [30]

Dílečné souřadnicové stroje se používají přímo v dílnách na mezioperační rozměrovou kontrolu rozměrů. Jde např. o stroje DuraMax, popř. CenterMax od společnosti Zeiss, u kterých není kladen takový důraz na stálost environmentálních podmínek. Svým konstrukčním uspořádáním pohonů zvládají práci i v mírně znečištěném prostředí s vynikající přesností měření. Jedná se nejčastěji o stroje výložníkové nebo mostové konstrukce, jejíž volba závisí na požadované velikosti stroje. Na obrázku 29 vlevo je uveden stroj DuraMax, který je zástupcem stroje s výložníkovou konstrukcí. Vpravo je pak stroj CenterMax s konstrukcí mostovou. [29]



Obrázek 29: Ukázka dílečných strojů [29]

Laboratorní stroje jsou náchylné na stabilitu a čistotu prostředí. Důvodem je konstrukční provedení strojů, u kterých jsou ve většině případů použita tzv. aerostatická ložiska, jenž umožňují pohyb jednotlivých částí stroje na „vzduchovém polštáři“. Tato ložiska umožňují velmi přesné polohování stroje a ke své činnosti vyžadují tlakový vzduch. Jsou však náchylná na poškození vlivem znečištění. Mezi nejčastější zástupce laboratorních strojů z konstrukčního hlediska patří portálová konstrukce. Díky tomuto konstrukčnímu provedení a moderním použitým materiálům pohyblivých částí, jako jsou např. kompozitní materiály na bázi keramiky či uhlíku, jsou tyto stroje velmi přesné a vysoce produktivní. Mezi typické představitele portálové konstrukce patří stroj řady Prismo od společnosti Zeiss, který je zachycen na obrázku 30. [29]



Obrázek 30: Laboratorní stroj Zeiss Prismo [29]

Multisenzorové stroje jsou dnes běžnou součástí kontroly kvality. Jde o stroje, které kombinují možnosti optického a dotykového snímání, kde tyto metody lze v rámci jednoho plánu měření volně měnit dle potřeby. Nejvíce se používají stroje se stojanovou nebo mostovou konstrukcí. Mezi nejpoužívanější senzory těchto strojů se považuje dotyková skenovací sonda, optická CCD kamera a v posledních letech k nim přibývá ještě i tzv. senzor bílého světla. Typickým zástupcem multisenzorového stroje je řada O-INSPECT od firmy Zeiss, který je uveden na obrázku č. 31. [29]



Obrázek 31: Multisenzorové stroje [29]

3.4. Zkušební přípravek na kontrolu kol

Přípravek pravoúhlého typu byl vyroben ve ŠKODA AUTO a.s. a používá se pro rychlé ověření funkčnosti kvůli omezené kapacitě a úplnému vytížení souřadnicové měřicí techniky ve firmě. Jde vlastně o rychlou kontrolu funkčnosti ozubeného soukolí, která zohledňuje reálně namontovaný stav. V případě, že se ozubené kolo netočí, vrací se dodavateli. Princip kontroly vychází z metody jednobokého a dvoubokého odvalu. Nejde ale o klasické měření, jelikož nedostáváme žádný číselný ani jiný výstup. Umožňuje však zefektivnit proces rozhodování, jaký postup zvolit v případě výskytu problému. Ukázka přípravku je uvedena na obrázku č. 32.



Obrázek 32: Zkušební přípravek na měření MQ 100

4. Představení společnosti ŠKODA AUTO a.s.

Firma ŠKODA AUTO a.s. patří mezi nejstarší a největší automobilové podniky v České republice. Momentálně má v ČR tři závody: Kvasiny, Vrchlabí a Mladou Boleslav, kde se nachází sídlo společnosti a je ho možné vidět na obrázku č. 33. Počet interních zaměstnanců převyšuje celkem 32 tisíc a za rok vyrobí firma přibližně milion a půl automobilů v šesti modelových řadách.

Společnost byla založena jako malý podnik v roce 1895 Václavem Laurinem a Václavem Klementem pod názvem Laurin & Klement. Klement si zakoupil kolo německé značky Germania, které se později rozbilo. Pohnutka k založení vznikla kvůli reklamaci kola napsané v českém jazyce, kdy již zmíněná německá firma reagovala tím, že má dotyčný psát ve srozumitelném jazyce. Klementa tyto argumenty dovedly k založení firmy. Jako první se vyráběla jízdní kola. Již po 4 letech podnik vyráběl první motocykly a v roce 1905 se začal vyrábět první automobil. Po dvou letech podnik mění název z L&K na Škoda Auto. V roce 1925 pak následovalo sloučení společnosti se Škodovými závody v Plzni. Roku 1991 vstoupil do Škody Auto a.s. koncern Volkswagen jako strategický partner. Následně koncern postupně přebíral Škodu Auto a.s. až do úplného vlastnictví. [31]



Obrázek 33: Závod ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav [32]

5. Kontrola kvality ve Škoda Auto a.s.

Ve výrobě ŠKODA AUTO a.s. se standardně provádí rozměrová kontrola na souřadnicových měřicích strojích od firmy Zeiss na oddělení GQH. To je důvod, proč jsem se soustředila v mé bakalářské práci na měření pomocí těchto strojů. Na oddělení GQH se měří komponenty pro výrobu motorů, převodovek – nejčastěji benzinové bloky motorů řady TSI, hlavy válců a skříně převodovek MQ 200, MQ 100. Souřadnicový měřicí stroj řídí program Zeiss Calypso, jde o software na bázi CAD prostředí. Pro aplikace měření kuželového ozubení je pak zapotřebí disponovat s nadstavbovým programem GEAR PRO.

5.1. SW Zeiss Calypso

Calypso od firmy Zeiss je základní řídicí software umožňující měření na souřadnicovém měřicím stroji na bázi CAD prostředí. Jedná se o program, který kromě plánu měření zahrnuje i důležité doprovodné funkce, jako je kalibrace snímačů, tvorba protokolů, nastavení a řízení funkce otočného stolu atd. Programování softwaru Calypso může probíhat dvěma metodami. Nejjednodušší je způsob, kdy se využívá CAD model, podle něhož se sestavuje plán měření. Také můžeme využít možnost přímého měření pomocí ovládacího panelu stroje v případě, kdy není k dispozici CAD model a nasnímat ručně jednotlivé měřené elementy. Ovládací panel si můžeme prohlédnout na obrázku č. 34.



Obrázek 34: Ovládací panel

Při programování se jednotlivá tělesa definují rozkladem celkového CAD tělesa na jednotlivé jednoduché geometrické elementy jako je válec, koule, kužel, body, přímky, roviny apod. Jednotlivé pokyny pohybu jsou definovány strategií jednotlivých elementů, kde musí být obsluha opatrná, aby kvůli nevhodně volené strategii nedošlo k negativnímu ovlivnění měření. Strategií rozumíme nastavení počtu bodů, dráhy, rychlosti apod.

Díky tomu, že je Zeiss Calypso založen na CAD modelu, je vytvoření plánu jednoduché a software je kvůli tomu uživatelsky přívětivý. Odpadá tím znalost programovacího jazyka, tudíž se snižuje riziko kolizí při měření. Software už dnes umí pracovat i s PMI daty, což jsou rozměrové charakteristiky obsažené v modelu. Využití takového modelu by vedlo k větší efektivitě programování, kdy by ideálním případem bylo vygenerování celého funkčního plánu měření. Tato situace v realitě ještě nefunguje.

Program ZEISS CALYPSO doplňují různé nadstavby pro případ speciálních aplikací měření a vyhodnocování. Pro měření existuje nadstavba křivky pod názvem ZEISS CURVE, která umožňuje měřit obecné tvarové plochy a křivky. Dále se může používat nadstavba ZEISS HOLOS, která je určena pro měření obecných tvarových ploch, např. pro bodové měření odlitků. V neposlední řadě se jedná o nadstavbu ZEISS GEAR PRO a ta slouží pro měření ozubených kol. Na vyhodnocování, tvorbu protokolů a zároveň statistické sledování hodnot se specializuje program ZEISS PiWeb, který umožňuje sledovat stabilitu výrobního procesu v delším časovém období.

Tato práce se zaměřuje na měření kuželových ozubených kol s přímými zuby, a proto se v další části budu zabývat jen popisem tvorby plánu měření pro tato kola. K měření jsem využila software Calypso, kde bylo provedeno základní vyrovnání součásti, a následně již veškeré další měření bylo uskutečněno v programové nadstavbě GEAR PRO bevel.

Tento program je možné používat i v offline režimu. V online režimu pracuje program tehdy, když je spuštěný souřadnicový měřicí stroj.

5.2. Nadstavba GEAR PRO

GEAR PRO obecně slouží pro měření ozubených kol, které z důvodu tvarové složitosti a specifické geometrie nelze měřit v základním programu Calypso. Jde o náročnou aplikaci měření i z hlediska vyhodnocení, jelikož ozubená kola mají odlišné typy protokolů. Vyhodnocují se různé parametry ozubených kol, jako je např. topografie, tvar evolventního profilu zubu, sklon zubů atd. Existuje několik variant programu GEAR PRO pro různé typy kol (viz obrázek č. 35):

GEAR PRO involute – drážkování, čelní kola s přímými zuby, popř. šikmými

GEAR PRO bevel – kuželová kola

GEAR PRO worm – šneková kola

GEAR PRO rotor – rotory

GEAR PRO hob – frézy



Obrázek 35: Varianty programu GEAR PRO

Podle potřeby výroby je možné varianty kombinovat. Pro kuželová kola s přímými nebo šikmými zuby se používá GEAR PRO bevel, kde je program speciálně přizpůsoben pro tato kola. Existuje řada příslušných norem, podle nichž měření a vyhodnocení kuželových kol provádíme, a program GEAR PRO již tyto normy obsahuje ve své databázi.

Program je jednoduchý na ovládání, jelikož nastavení geometrie probíhá pomocí dialogového okna s nákresem požadovaných vstupních rozměrů, které lze vidět na obrázku č. 42. Důležité je při měření kuželových kol mít k dispozici CAD model, protože je zapotřebí vypočítat jmenovitá data na jmenovitém zubu. Software GEAR PRO se zaměřuje na kontrolu topografie boku zubu, tloušťku zubu, měření rozteče, hlavového a patního úhlu. V průběhu měření můžeme vložená data pozorovat v náhledu.

Měření tímto programem lze provést pouze s pevnou aktivní dotykovou snímací hlavou a nejde ho používat bez systému Calypso, neboť z něj přebírá informace o poloze počátku souřadného systému. Tento program má výpočetní výkon použité pracovní stanice.

Veškeré naměřené výsledky mohou být zobrazeny v tabulce, grafu, souborech a jiných formátech dle požadavků výroby, a hlavně musí korespondovat s povoleným formátem tiskárny. Bevel je přizpůsoben tak, že umí exportovat data ve formátu pro stroje ostatních výrobců (např. Klingelberg), kteří se zabývají měřením ozubených kol. Je také možné importovat jmenovitá data ze strojů jiných výrobců. Tato data jsou k dispozici v přenosovém formátu Zeiss (standard), GAGE4Win (Gleason), KIMOS (Klingelberg), CDS (Oerlikon), ZAFE (Daimler) a jiné, ve kterých lze měřit model a vytvořit plán měření. Podmínkou je mít příslušnou licenci.

6. Příprava měření

Podmínkou pro správné měření je mít pevné upnutí a tuhý a stabilní snímač, minimalizuje se tím chyba měření. V první řadě se musí očistit díl, aby nečistoty nebránily měření. Poté je nutné sestavit konfiguraci snímače a upnout díl.

6.1. Konstrukce a kalibrace snímače

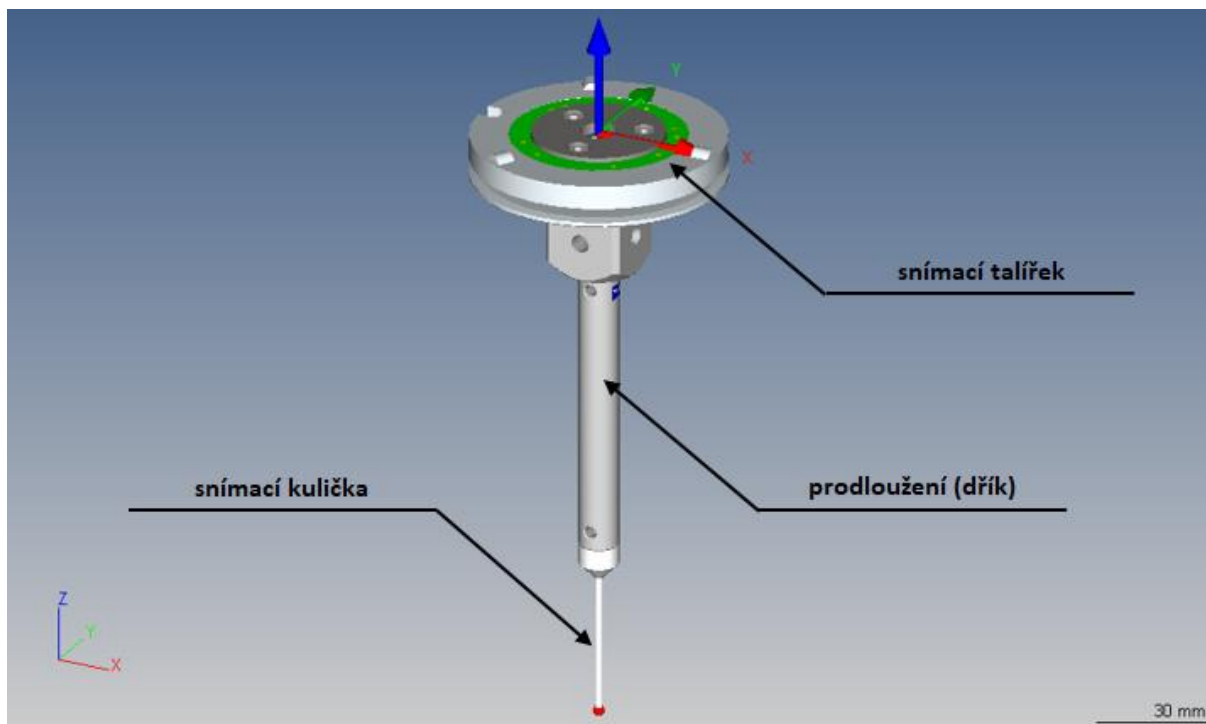
Díl byl měřen jednoduchou konfigurací snímače, kdy byl použit pouze jeden snímač ve směru osy -Z. Konfiguraci upneme do pevné snímací dotykové hlavy a provedeme její kvalifikaci pomocí referenčního snímače a kalibrační koule. Tento snímač je na obrázku č. 37 a vybrala jsem ho z toho důvodu, že jsem s tímto snímačem schopna provést celé měření. Jakýkoliv další snímač do jiného směru by mohl být příčinou kolize. V některých případech nestačí mít jednoduchou konfiguraci, ale je třeba zvolit konfiguraci složitější pro změření dalších požadovaných elementů, které by jinak základním snímačem nebyly přístupné. Snímací konfigurace byla složena z upínacího talířku pro snímací hlavu, prodloužení, respektive dřívku a snímací kuličky.

Pro provedení měření byla použita snímací hlava řady VAST gold od společnosti Zeiss, který je k nahlédnutí na obrázku č. 36. Dřívík byl zvolen v kratším provedení kvůli stabilitě a talířek byl upnut do snímací hlavy pomocí třech válečků po 120° a jednoho čepu, to zajišťuje velmi přesné a opakovatelné upnutí.



Obrázek 36: Snímací hlava

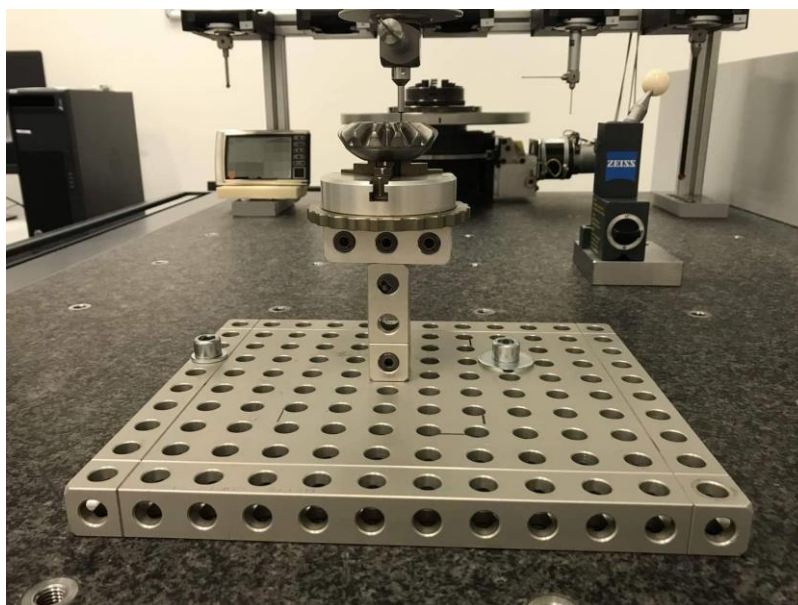
Kuličku snímače o průměru 1,35 mm jsem vybrala z toho důvodu, aby byly měřitelné veškeré elementy, které je potřeba změřit, s ohledem na vnitřní drážkování měřeného ozubeného kola metodou samostředění jednotlivých bodů. Při tomto měření se totiž kulička nesmí dotknout paty zubu.



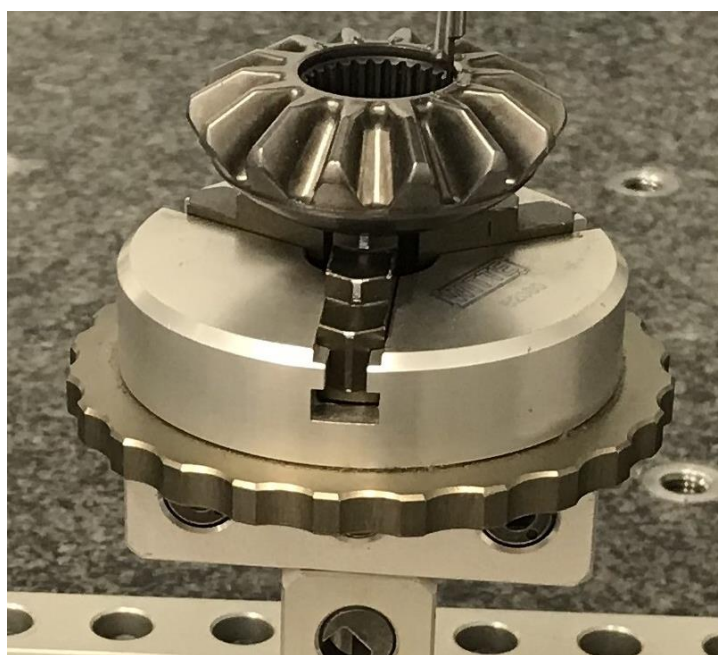
Obrázek 37: Konfigurace snímače

6.2. Upnutí

Pro upnutí kuželového kola s přímými zuby byl použit univerzální stavebnicový systém Alufix s univerzálním tříčelistovým sklíčidlem od firmy Witte. Jedná se o hliníkový modulární systém zajišťující pevné a opakovatelné upnutí, které je pro provedení měření nezbytné. Používá se z důvodu udržení velké přesnosti, stability konstrukce a dlouhé životnosti. Při upnutí je třeba dbát na to, aby v každém případě byla při všech potřebných měřeních zaručena přístupnost s potřebným uspořádáním snímačů. Modulární systém je zobrazen na obrázku č. 38 a sklíčidlo na obrázku č. 39.



Obrázek 38: Základní stavebnice Alufix



Obrázek 39: Univerzální sklíčidlo

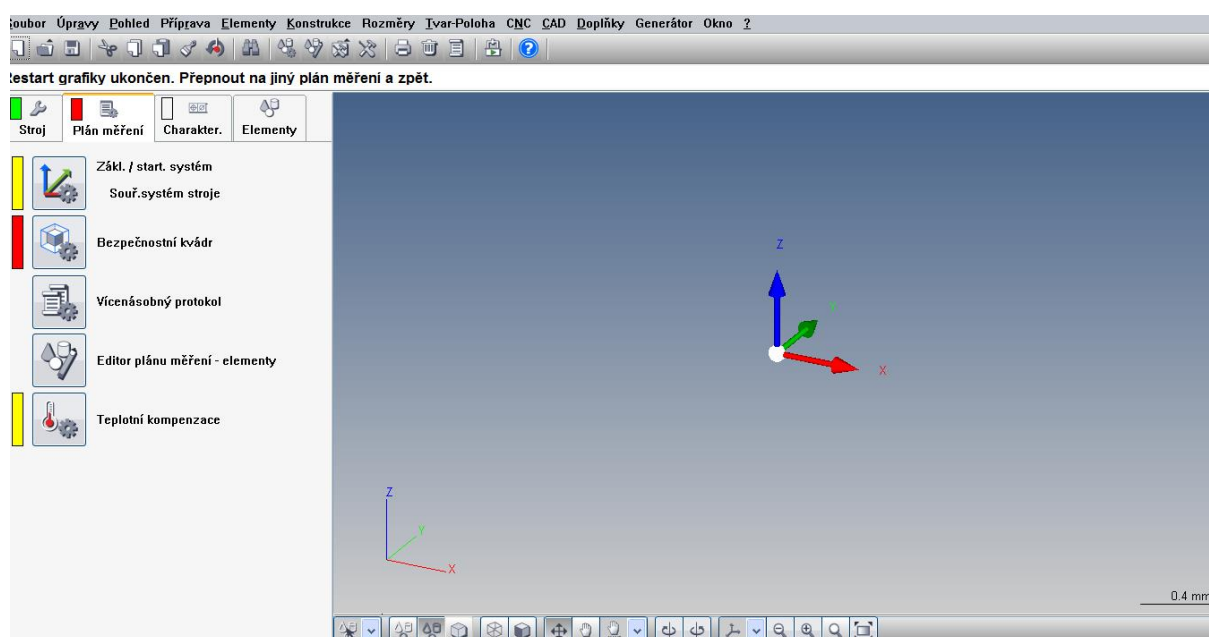
7. Tvorbá plánu měření

Pro měření je předepsáno klimatizované prostředí o teplotě 20 °C. Při tomto měření bylo naměřeno v místnosti 20,6 °C s odchylkou 0,1 °C a vlhkost v místnosti byla 49,8 % ± 0,2 %.

7.1. Postup

V prvním kroku je potřeba vyrovnat součást, což je ve své podstatě zavedení počátku souřadného systému. Tento krok se provádí v programu Calypso.

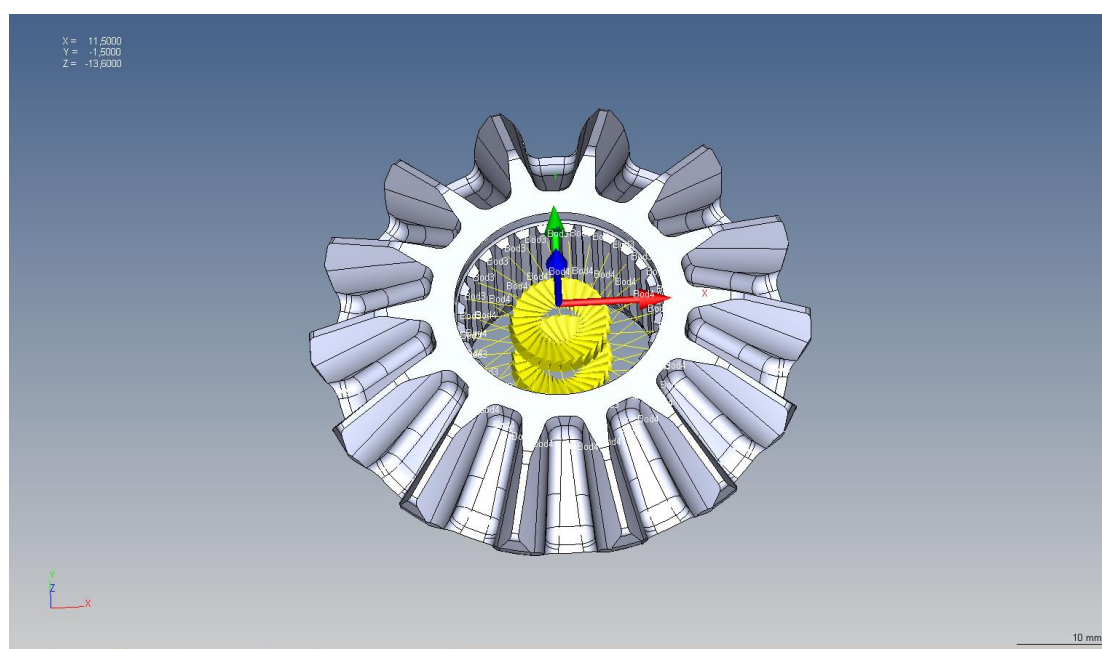
V následujícím obrázku, tj. obrázek č. 40 je základní zobrazovací okno tohoto programu.



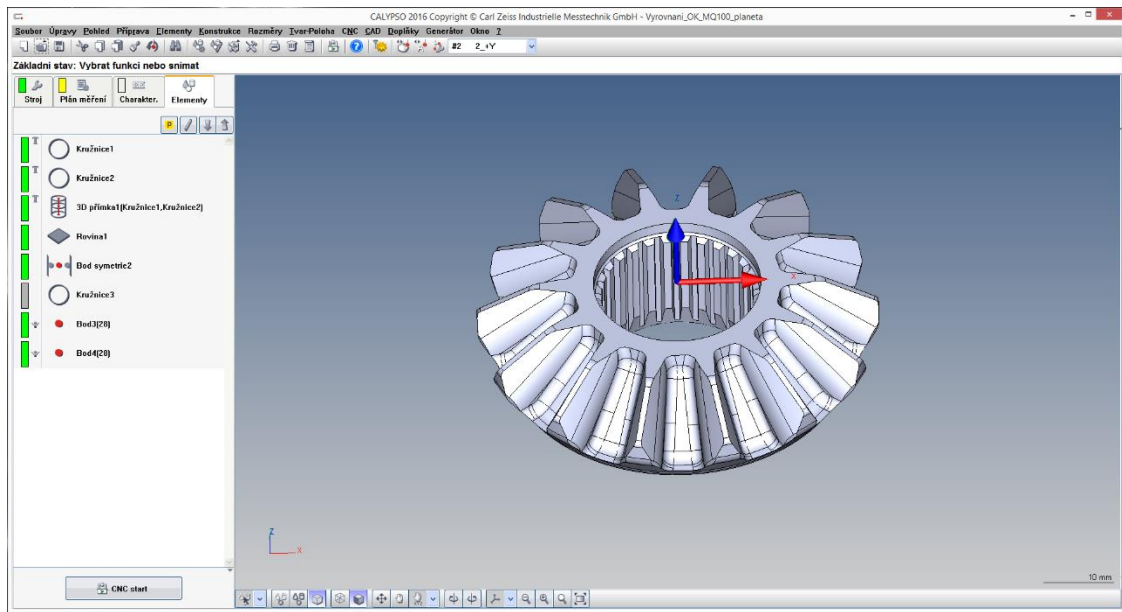
Obrázek 40: Základní zobrazovací okno programu Calypso

Prvním krokem byl import CAD modelu, se kterým se následně v programu pracuje. K vyrovnání potřebujeme zaměřit osu rotace součásti, to provedeme pomocí zaměření osy na vnitřním drážkování. Jelikož se nejedná o klasickou válcovou plochu, využila jsem k nasnímání bodů funkci tzv. samostředění, kdy se snímač dotkne obou boků zubů v zubové mezeře a sejme bod. Důležité je při použití samostředícího snímání přepnout vyhodnocení snímaného bodu z dotykového bodu na střed snímací kuličky.

Osu získáme zpětným vyvoláním bodů na kružnici v každém řezu a následné vytvoření 3D přímky spojením středu vyvolaných kružnic. Zaměřenou osu jsem použila jako primární prostorou referenci. Pro určení osového natočení (sekundární reference) jsem využila symetrického bodu na jednom ze zubů. Toho se využije při měření v programu GEAR PRO, jelikož tento program pro tvorbu jmenovitých dat požaduje, aby osa X procházela středem zubu. Terciální reference v osách X a Y je umístěna v ose rotace a v ose Z je na horní ploše ozubeného kola. Toto zaměření je možné vidět na obrázku č. 41 a elementy použité k vyrovnání je možné vidět na obrázku 42.

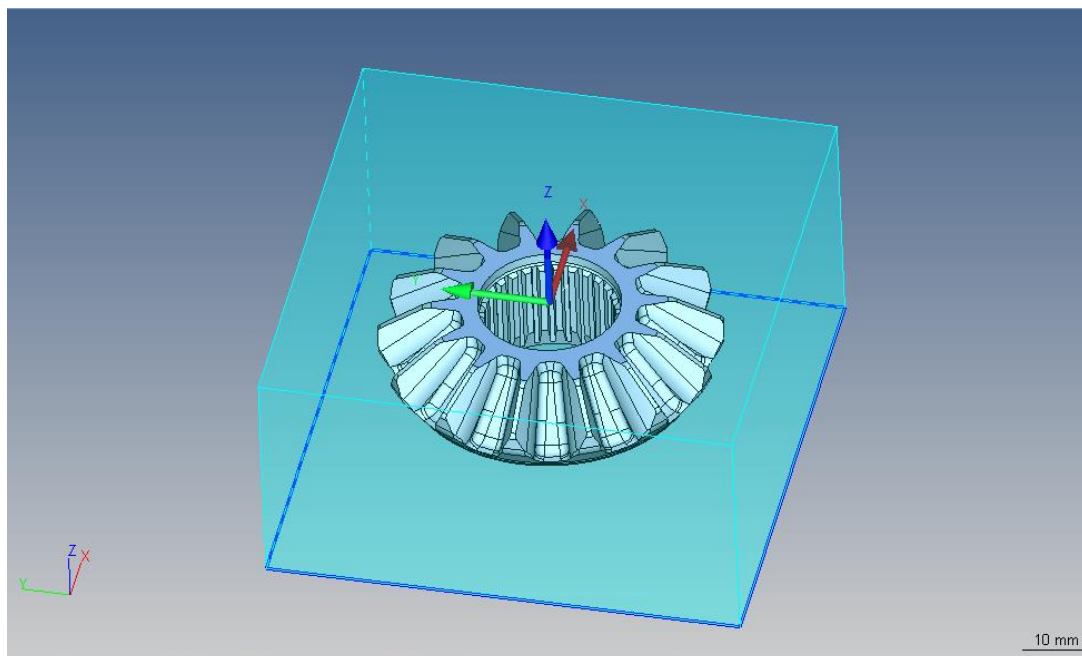


Obrázek 41: Zaměření osy rotace



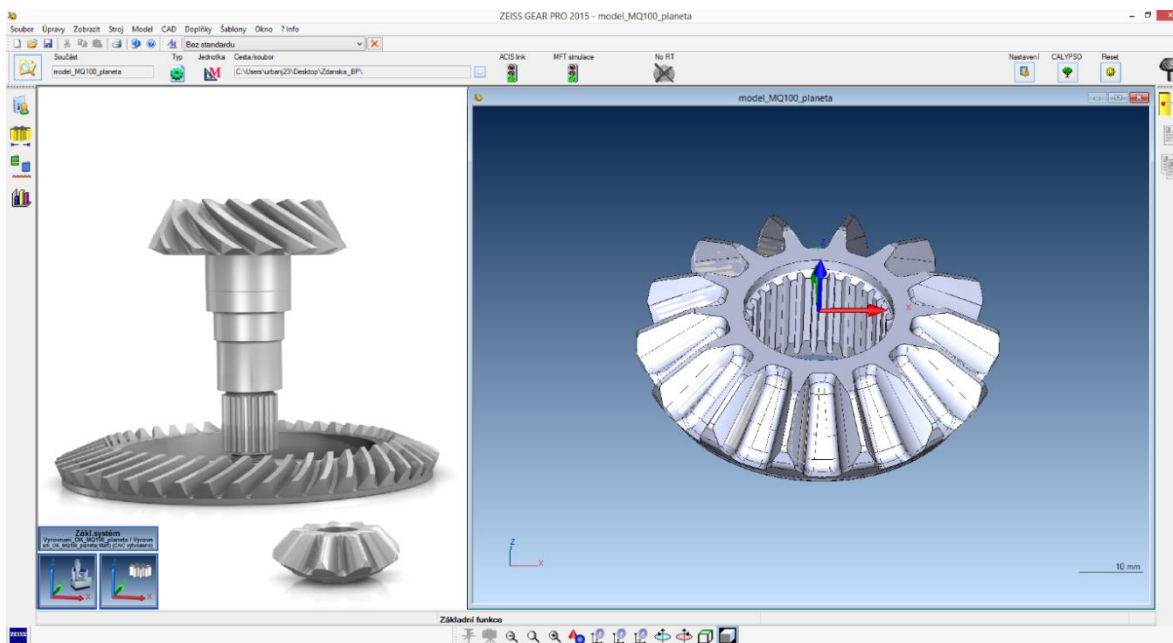
Obrázek 42: Elementy určující vyrovnaní

Je taky nutné nastavit bezpečnostní kvádr. Ten zabraňuje situacím, kdy se snímač může dostat do kolizního stavu se součástí. Jedná se o tzv. „bezpečnostní klec“, která definuje vzdálenost v jednotlivých rovinách pro bezpečný objezd snímače. Na okno pro nastavení bezpečnostního kváдру lze se podívat na obrázku č. 43.



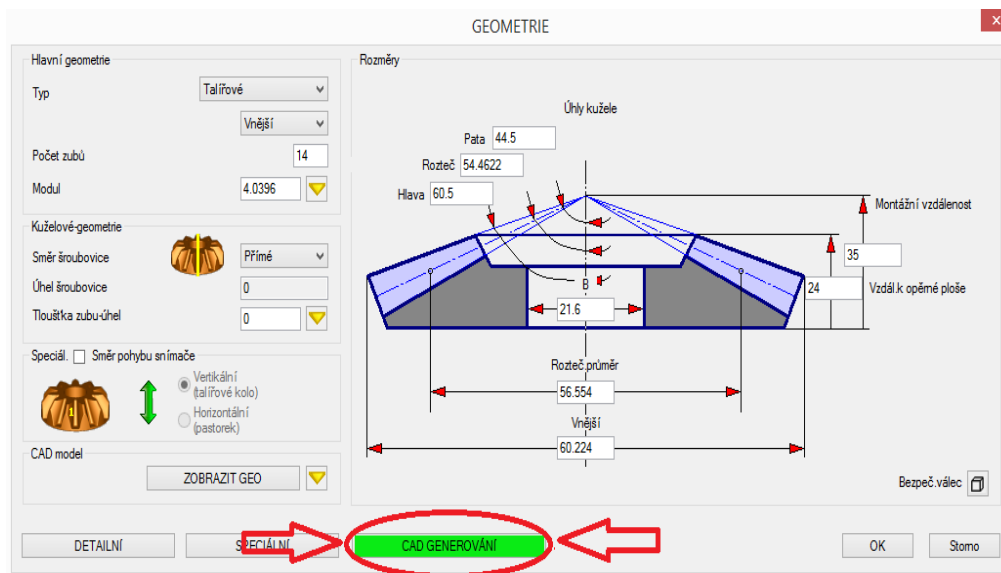
Obrázek 43: Bezpečnostní kvádr

Po provedení vyrovnání je potřeba v nadstavbě GEAR PRO bevel sestavit plán měření. Po spuštění programu GEAR PRO bevel se ukáže pracovní okno, které je vidět na obrázku 44. Pro vytvoření tvorby plánu měření je zapotřebí rozhodnout, zda se bude pracovat s CAD modelem nebo jmenovitými daty kuželového kola. U jmenovitých dat se jedná o vložení dat, která musí předem někdo vytvořit, a zároveň o vložení plánu měření.



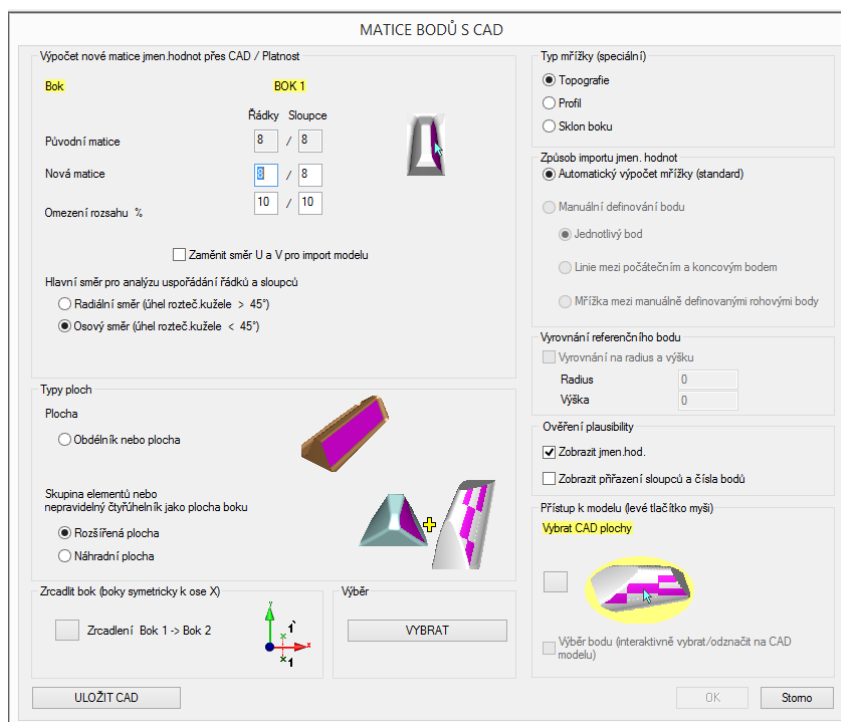
Obrázek 44: Základní zobrazovací okno v programu GEAR PRO bevel

V tomto programu zadáme hlavní a doplňkovou geometrii a rozměry kuželového kola. Oproti čelním kolům, kde si vystačíme pouze se základní geometrií, zde musíme zadat i úhly roztečného a patního kužele. Mezi rozměry, které do programu zadáváme, patří modul, počet zubů, hlavová kružnice, montážní vzdálenost a vzdálenost k dosedací ploše. Ukázku zadané geometrie je možné vidět na obrázku č. 45.



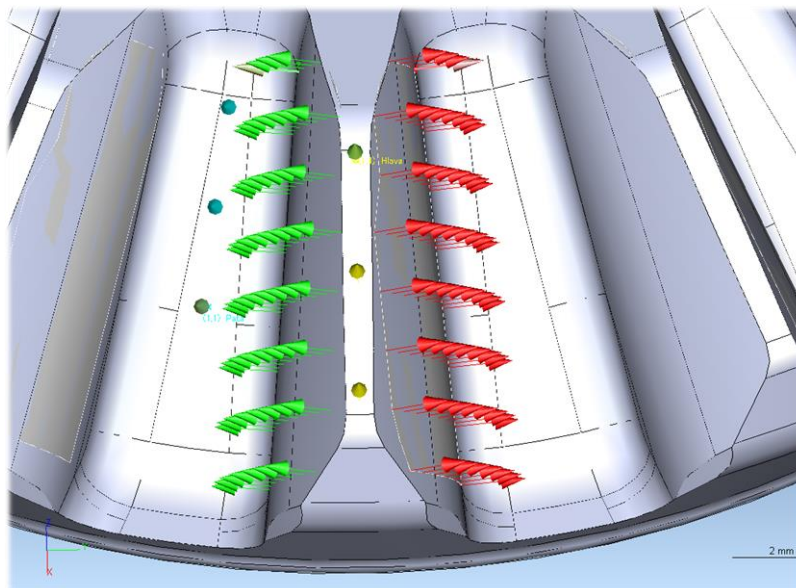
Obrázek 45: Základní a doplňková geometrie

Po nadefinování základních geometrických hodnot můžeme přistoupit k výpočtu matice jmenovitých dat pomocí vysvíceného dialogového okna pod názvem CAD generování – viz obrázek č. 45. Výpočet jmenovitých dat je vidět na obrázku č. 46. CAD generování vytvoří matici jmenovitých dat obou boků zubů včetně hlavového a patního kužele pomocí zubu, kterým prochází osa X. Tento zub označuje program GEAR PRO jako zub jmenovitý. Po výpočtu matice program přeneše matici i na ostatní zuby.



Obrázek 46: Výpočet nové matice

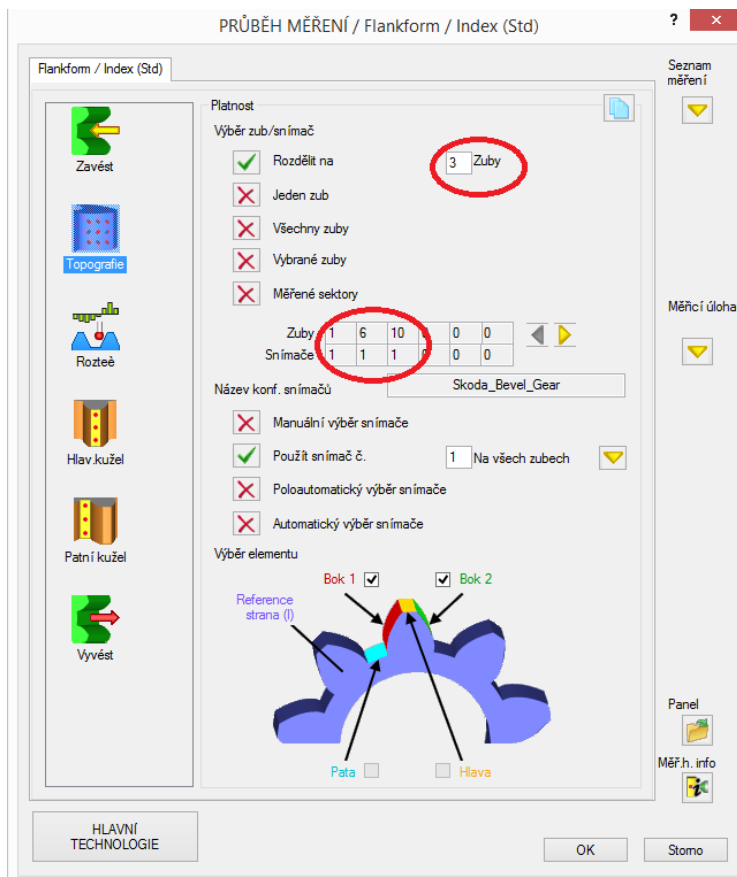
Začala jsem pravou stranou (bok 1), kde jsem označila celou plochu zubu a zvolila si velikost matice. Program následně rovnoměrně proloží zub jmenovitými body. U jednotlivých jmenovitých bodů dopočítá program GEAR PRO souřadnice X, Y a Z a jejich normálové vektory N_x , N_y a N_z . Tím vznikne síť jmenovitých bodů sloužících pro měření topografie boků jednotlivých zubů. V programu GEAR PRO je tato síť zapsána jako matice jmenovitých bodů. Její grafické znázornění je na obrázku č. 47.



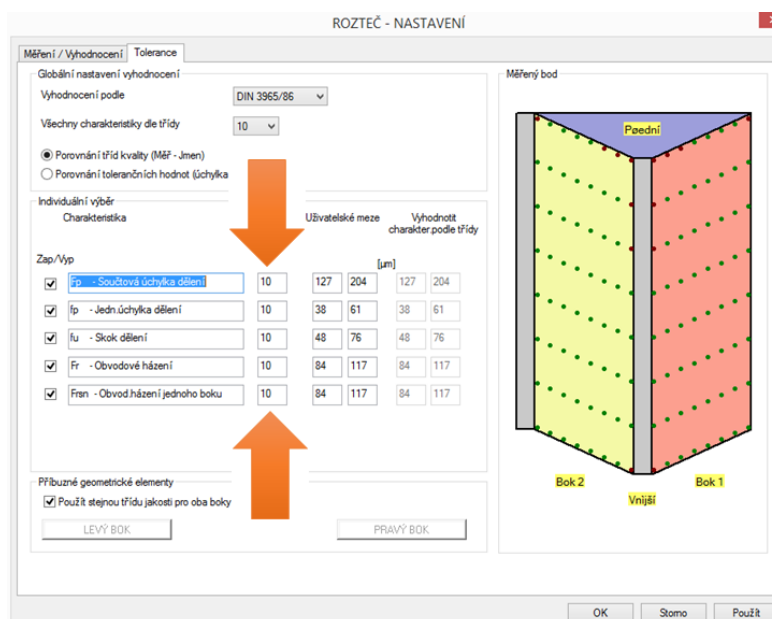
Obrázek 47: Matice jmenovitých bodů o rozměru 8 x 8

Tento postup se aplikuje i na levé straně (bok 2) a také u hlavového a patního kužele. Po definování všech matic jmenovitých dat se v programu GEAR PRO zpřístupní možnost nastavení strategie měření kontrolovaného ozubení.

Ve strategii jsem definovala měřicí úlohy, které představují vyhodnocení konkrétního parametru. V tomto kroku jsem tedy nastavila měření topografie, rozteče, hlavového a patního kužele. V každé této úloze bylo potřeba ještě nastavit příslušnou toleranční třídu, průběh měření a odjezdy. Nutné je také dbát na filtraci naměřených bodů. Nefiltrované body by zkreslily výsledky měření. Ukázka průběhu měření je znázorněna na obrázku č. 48 a ukázka nastavení tolerancí dle příslušné třídy na obrázku 49.



Obrázek 48: Průběh měření



Obrázek 49: Toleranční třídy

Použité měřicí úlohy:

Topografie zubů se měří skenováním a lze nastavit, zda měření bude probíhat po řádcích, sloupcích nebo meandrovitě (skenování topografie zubů po dráze ve tvaru L).

Rozteč se měří nejčastěji bodově obvykle na středním bodu matice jmenovitých hodnot.

Hlavová/patní kružnice se obvykle měří na třech místech.

U všech měřicích úloh lze v případě vylomení zubu chybějící zub při měření vynechat.

Na závěr tvorby programu je zapotřebí ještě nastavit vyhodnocení. K dispozici je několik typů formátu protokolů. Tím základním je tzv. globální formát. V něm je uveden náhled na topografii zubu s nejhorsími výsledky, dále je na něm vykreslena rozteč jednotlivých boků zubů včetně výpočtu sledovaných parametrů a zařazení do příslušných tříd přesnosti. V globálním formátu se ještě uvádí i největší vypočtená odchylka tloušťky zubu. Druhý používaný formát je určen pro detailnější vykreslení jednotlivých parametrů rozteče, jako je parametr úchylky dělení f_u , odchylky házení F_r , odchylky házení jednotlivých zubů F_{rSn} atd. Posledním používaným formátem je formát pro vykreslení topografie jednotlivých zubů.

Po nastavení vyhodnocení je programem GEAR PRO zpřístupněno tlačítko spuštění měření, kde nastavíme ještě označení měřené součásti, a po jeho zadání se stroj přepne do režimu CNC. Po splnění všech nastavených úloh program provede výpočet a vygeneruje příslušné protokoly.

K dispozici je protokol:

- topografie každého změřeného zubu,
- rozteče
- celkový souhrn.

8. Vyhodnocení

V rámci experimentu jsem použila zkrácenou verzi měření s vyhodnocením topografie na 3 zubech v programu GEAR PRO, který dokáže během měření ukázat průběžné výsledky. Podle defaultního nastavení byly zvoleny zuby č. 1, 6 a 10, jelikož nebyl důvod pořadí zubů změnit a rozložení zubů zůstalo rovnoměrné. Pro měření byl použit snímač popsáný v kapitole 6.1. a byla použita přítlačná síla snímače 200 mN, což je standardní nastavení pro většinu měření na CMM technice s tímto typem a velikostí snímače. Pro provedení experimentu byly zvoleny matice 8 x 8, 10 x 10 a 12 x 12. Vzhledem časové náročnosti měření byla každá matice měřena 4krát.

Níže zmíněné grafy jsou uvedeny v μm a slova označená „hvězdičkou“ znamenají, že se jedná o rozdíl odchylek měřených hodnot od hodnot jmenovitých.

Hlavními parametry, které jsem sledovala, jsou:

F_p – součtová odchylka ozubení

Jedná se o celkovou odchylku polohy zubu, respektive to je součet dílčích odchylek ozubení.

f_p – jednotlivá odchylka ozubení

Jedná se o odchylky rozteče mezi každým zubem.

F_r – obvodové (radiální) házení

Jedná se o součet vzdáleností snímací kuličky ke středu kontrolované součásti.

F_{rsn} – obvodové házení jednoho boku zubu

Jedná se o vzdálenost snímací kuličky ke středu kontrolované součásti.

f_u – skok dělení

Jedná se o odchylku sousední rozteče tzn. rozdíl jednotlivých odchylek ozubení mezi dvěma po sobě následujícími zuby. [12]

Všechny naměřené hodnoty se řídily normou DIN 3965/86.

8.1. Matice 8 x 8

Matice 8 x 8 znamená, že body jsou rozloženy po osmi sloupcích a osmi řádcích.

Výsledky naměřené matice 8 x 8 na boku zubu 1 jsou zaznamenané v tabulce č.1 a lze z ní vyčíst, že naměřené hodnoty se od sebe liší minimálně. Hodnoty jsem porovnála se směrodatnou odchylkou, což představuje chybovost měření. Z důvodu časové náročnosti měření, a tedy malého počtu opakování, jsem vyhodnocovala výběrovou směrodatnou odchylku, která eliminuje výkyvy hodnot. Výsledky se od sebe liší v řádech desetin μm , což znamená, že měření má uspokojivou opakovatelnost a dává nám stabilní výsledky.

Tabulka 1: Matice 8 x 8 - bok zubu 1 [μm]

Matice 8 x 8				
Číslo měření	Bok zubu 1*			
	F_p	f_p	f_u	F_{rsn}
1	52,5	13,6	13,3	47,8
2	52,9	13,6	13,2	48,2
3	52,4	13,5	12,9	47,9
4	51,4	13,2	12,6	47,2
s	0,638	0,189	0,316	0,419

Odchylky naměřené na boku zubu 2, uvedené v tabulce č.2, vycházejí podobně a směrodatná odchylka opět vychází v řádech desetin μm . Výběrová směrodatná odchylka na boku zubu 2 je nižší než odchylka na boku zubu 1, tzn. že bok 2 byl měřen s nižší chybovostí.

Tabulka 2: Matice 8 x 8 - bok zubu 2 [μm]

Matice 8 x 8				
Číslo měření	Bok zubu 2*			
	F_p	f_p	f_u	F_{rsn}
1	27,4	10,8	13,5	25,2
2	27,8	10,9	13,7	25,5
3	27,2	10,9	13,7	25
4	26,2	10,7	13,6	24
s	0,681	0,096	0,096	0,65

Výsledky z odchylek tlouštěk zubů u matice 8 x 8, které jsou znázorněny v tabulce 3, nevycházejí podle dané normy. Tloušťka zubů se může projevat jako chybná montážní poloha kuželového kola, která se zjišťuje pomocí souřadnice -Z nebo to může být zapříčiněno tím, že tloušťka nemusela být měřena na roztečném kuželi. Předepsána byla maximální odchylka 30 μm . V tomto měření byl kladen důraz hlavně na součtovou odchylku dělení F_p , která vyšla v třídě přesnosti 7.

Tabulka 3: Matice 8 x 8 - tloušťka zubu [μm]

Matice 8 x 8				
Číslo měření	Tloušťka zubu*	Tloušťka zubu 1*	Tloušťka zubu 6*	Tloušťka zubu 10*
1	839	819	830	868
2	839	819	830	869
3	839	819	830	869
4	840	821	831	869
\bar{x}	839,25	819,5	830,25	868,75

8.2. Matice 10 x 10

Matice 10 x 10 je nadefinována tak, že jsou body rozloženy po deseti sloupcích a po deseti řádcích. Slouží pro detailnější měření.

Výsledky naměřené matice 10 x 10 na boku zubu 1 v porovnání s chybovostí jsou velmi podobné. Chybovost se v tomto měření oproti matici 8 x 8 snížila. Z toho vyplývá, že čím větší má matice rozměr, tím menší jsou rozdíly měřených odchylek.

Tabulka 4: Matice 10 x 10 - bok zubu 1 [μm]

Matice 10 x 10				
Číslo měření	Bok zubu 1*			
	F_p	f_p	f_u	F_{rsn}
1	51,2	13,3	11,2	47,7
2	51,1	13,3	11	47,5
3	51,3	13,4	11,1	47,8
4	50,8	13,3	10,9	47,3
S	0,216	0,05	0,129	0,222

U rozložení matice 10 x 10 na boku zubu č. 2 vyšla naopak o trochu větší výběrová směrodatná odchylka než u boku č. 1. Jedná se však o odchylky, které se pohybují v desetinách μm , tudíž vliv rozložení matic jmenovitých hodnot přesnost kola neovlivní.

Tabulka 5: Matice 10 x 10 - bok zubu 2 [μm]

Matice 10 x 10				
Číslo měření	Bok zubu 2*			
	F_p	f_p	f_u	F_{rsn}
1	30,9	10,9	15,2	27,4
2	30,4	11	15,6	26,9
3	30,5	11	15,4	27,1
4	30	10,9	15,2	26,4
S	0,37	0,058	0,191	0,42

Naměřená tloušťka zubu neodpovídá normě DIN 3965/86. Výsledky lze pozorovat v tabulce č. 6 a je vidět, že jsou o 0,8 mm větší. Příčinou může být nevhodný způsob vyrovnání součásti, který zapříčinil posun v záporném směru osy Z. Nicméně z hlediska měření byl kladen důraz primárně na stabilitu sledovaných parametrů kvality ozubených kol u různých typů matic.

Tabulka 6: Matice 10 x 10 – tloušťka zubu [μm]

Matice 10 x 10				
Číslo měření	Tloušťka zubu*	Tloušťka zubu 1*	Tloušťka zubu 6*	Tloušťka zubu 10*
1	828	810	820	853
2	829	811	821	854
3	829	811	821	854
4	829	811	822	854
\bar{x}	828,75	810,75	821	853,75

8.3. Matice 12 x 12

Matice 12 x 12 byla měřena stejným způsobem a nastavením jako předešlé matice jmenovitých hodnot. Jde o rozložení plochy boku zubu s 12 sloupci a 12 řádky. Celkově je zde tedy definováno 144 jmenovitých bodů.

V porovnání s rozložením matice 10 x 10 bodů jsou zjištěny nižší hodnoty u parametrů F_p , f_u a F_{rsn} u obou boků zubů. Při požadavku na velmi přesné měření ozubených kol s nižší třídou přesnosti (tzn. s vyšší předepsanou přesností) je detailnější popis žádoucí. Matice 12 x 12 slouží pro detailní vyhodnocení. Větší matice se nedoporučují používat z důvodu velké hustotě rozložení.

Tabulka 7: Matice 12 x 12 - bok zubu 1 [μm]

Matice 12 x 12				
Číslo měření	Bok zubu 1*			
	F_p	f_p	f_u	F_{rsn}
1	50,4	11,6	12,4	45,8
2	50,5	11,9	12,5	45,9
3	50,5	12	12,5	45,9
4	50,6	11,9	12,6	45,9
S	0,082	0,173	0,082	0,05

Tabulka 8: Matice 12 x 12 - bok zubu 2 [μm]

Matice 12 x 12				
Číslo měření	Bok zubu 2*			
	F_p	f_p	f_u	F_{rsn}
1	31,1	10,4	12,1	27,2
2	29,7	10,3	12,4	26
3	29,7	9,9	12,4	25,8
4	30,4	10,7	12,7	26,5
S	0,67	0,33	0,245	0,624

U tloušťek zubů u matice 12 x 12 vyšly odchylky nejmenší. Do hranice <30 se nevešly, a proto stále neodpovídají normě DIN 3965/86. U ostatních sledovaných parametrů nebyl zjištěn žádný výrazný rozdíl. Pouze se potvrdilo zpřesnění výsledků měření při použití většího počtu jmenovitých hodnot. Přetrval zde i problém s tloušťkou zubu. Možné důvody vzniku výrazné odchylky tloušťky zubu jsou uvedeny výše.

Tabulka 9: Matice 12 x 12 - tloušťka zubu [μm]

Matice 12 x 12				
Číslo měření	Tloušťka zubu*	Tloušťka zubu 1*	Tloušťka zubu 6*	Tloušťka zubu 10*
1	823	804	815	851
2	825	806	816	853
3	825	807	817	853
4	826	807	817	854
\bar{x}	824,75	806	816,25	852,75

8.4. Měření celkového obvodového házení

Celkové obvodové házení bylo měřeno v úrovni roztečného kužele. Program si poté vypočítá střed v každé mezeře a zároveň odchylky obvodového házení. Z výsledků zobrazených v tabulce č. 10 lze vyčíst, že průměrné obvodové házení vyšlo nejmenší u matice 12 x 12.

Tabulka 10: Obvodové házení [μm]

Fr – obvodové házení*			
Číslo měření	Matice 8 x 8	Matice 10 x 10	Matice 12 x 12
1	88,7	89	87,1
2	89,1	88,8	86,9
3	89	89,3	86,1
4	87,6	88,5	87,6
\bar{x}	88,6	88,9	86,925

8.5. Shrnutí celkového měření

Rozdíly ve výsledcích zprůměrovaných hodnot ze všech měření jsou téměř nepozorovatelné. Hodnoty f_p boku č. 2 se liší o $0,329 \mu\text{m}$, což odpovídá nejmenší odchylce. Součtová odchylka dělení F_p se pohybuje kolem $50 \mu\text{m}$.

Tabulka 11: Zprůměrované odchylky [μm]

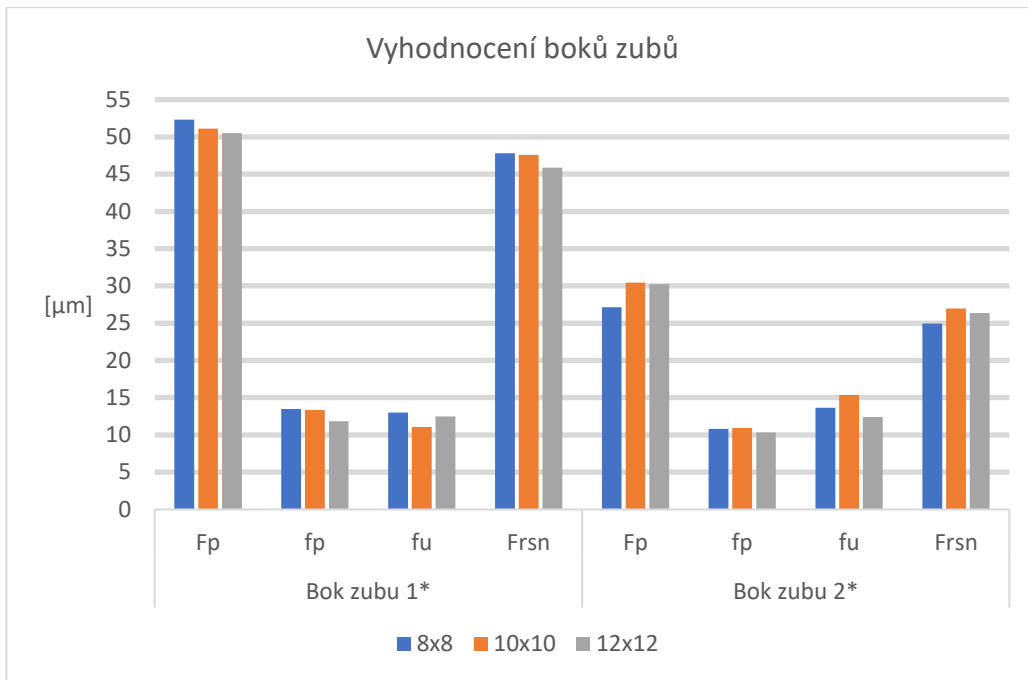
Průměrné hodnoty								
Matice	Bok zubu 1*				Bok zubu 2*			
	F_p	f_p	f_u	F_{rsn}	F_p	f_p	f_u	F_{rsn}
8x8	52,3	13,48	13	47,78	27,15	10,83	13,63	24,93
10x10	51,1	13,33	11,05	47,58	30,45	10,95	15,35	26,95
12x12	50,5	11,85	12,5	45,88	30,23	10,33	12,4	26,38
s	0,917	0,901	1,013	1,044	1,845	0,329	1,482	1,041457

Odchylky tlouštěk zubů se pohybují opět kolem $0,8 \text{ mm}$. Největší odchylka je u zubu č. 10. Může se jednat o nepřesnost měření kvůli špatné výrobě součásti.

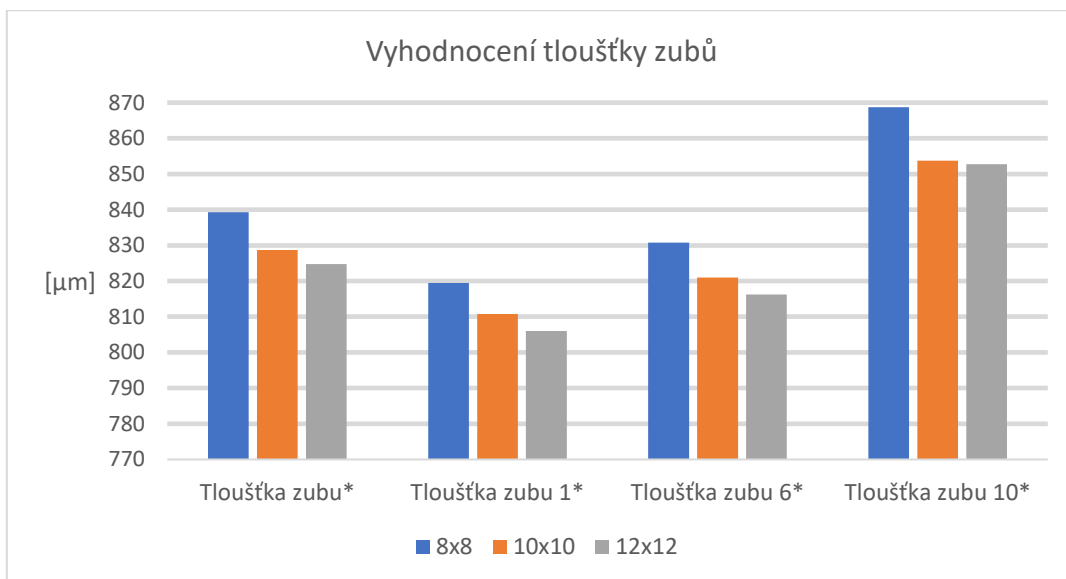
Tabulka 12: Aritmetický průměr tlouštěk zubů [μm]

Matice	Tloušťka zubu*	Tloušťka zubu 1*	Tloušťka zubu 6*	Tloušťka zubu 10*
8x8	839,25	819,5	830,75	868,75
10x10	828,75	810,75	821	853,75
12x12	824,75	806	816,25	852,75

Z grafů zobrazených na obrázcích č. 50 a 51 je možné pozorovat, že naměřené odchylky jsou v jednotkách μm a jsou stabilní, a tudíž nijak nekolísají. Na nepatrné odchylky může mít vliv teplota prostředí, nepřesná kalibrace a upnutí nebo také chyby způsobené technologií výroby. U vyhodnocení odchylek boků zubů je největší odchylka u součtové odchylky dělení a zároveň u jednotlivého obvodového házení. U odchylek tlouštěk zubů je u zubu č. 10 nejsilnější zub.



Obrázek 50: Vyhodnocení boků zubů [μm]



Obrázek 51: Vyhodnocení tloušťky zubů [μm]

Měření bylo provedeno na jedno upnutí, tím se eliminovala chyba měření způsobená vlivem operátora. V těchto měřeních vyšly velmi příznivé výsledky. Bylo zjištěno, že rozložení matic nemá zásadní vliv na přesnost měření kuželového kola. Bylo prokázáno, že detailnější popis zubů použitím matice jmenovitých hodnot vyššího rozměru má částečný vliv na snížení chybovosti.

9. Závěr

Práce se zaměřuje na kontrolu kuželových ozubených kol. V této práci jsem uvedla základní rozdělení ozubených převodů, tj. na kola čelní, kuželová a šneková. Zmínila jsem také hlavní geometrii kuželového ozubení s přímými zuby, což jsou důležité vstupní údaje pro měření kola. Při kontrole kuželových ozubených kol se provádí měření komunálními měřidly, měření jednobokým a dvoubokým odvalem a kontrolu zkušebním přípravkem pro ověření funkčnosti kola. V dnešní době se v oblasti kontroly a měření postupně stále více využívá souřadnicová měřicí technika, která je používána zejména pro svou přesnost a univerzálnost.

Ve společnosti ŠKODA AUTO a.s., se kterou jsem spolupracovala, se používají stroje od značky Zeiss. Ty zajišťují rozměrovou kontrolu dílů motorů a převodovek. Proto jsem se ve své bakalářské práci zaměřila na produkty této značky, se kterou jsou spojeny programy Calypso (program určený pro základní obsluhu souřadnicového stroje) a Gear Pro (slouží jako nadstavba programu Calypso a je určen pro měření ozubení).

V experimentální části jsem se zabývala analýzou vlivu rozložení matic jmenovitých bodů na přesnost výsledků kontroly kuželového ozubení. Práce popisuje kompletní postup od příprav měření až po vyhodnocení naměřených výsledků. V první řadě bylo potřeba upnout součást do souřadnicového měřicího stroje. K tomu účelu jsem využila modulární systém Alufix s univerzálním sklíčidlem od firmy Witte. Používala jsem CMM stroj řady Prismo, který disponuje aktivním skenovacím systémem VAST. Z komponent tohoto snímacího systému jsem sestavila jednoduchou konfiguraci snímače v ose -Z a provedla její kvalifikaci pomocí referenčního snímače a kalibrační koule.

V programu Calypso jsem provedla vyrovnání součásti, což je vlastně zavedení kartézského souřadného systému, a následně jsem přešla do softwaru GEAR PRO bevel 5.4. Vyplnila jsem zde základní geometrii a úhly kuželového ozubeného kola a nadefinovala jsem matice jmenovitých hodnot o velikostech 8 x 8, 10 x 10 a 12 x 12. Tyto údaje jsou pro měření nezbytné. Dále jsem zvolila strategii měření a nastavení vyhodnocení naměřených dat. Souřadnicový měřicí stroj se poté přepnul do CNC režimu a provedlo se samotné měření.

Měření proběhlo v laboratoři haly M6 ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. Tato laboratoř je plně vybavena pro souřadnicové měření. Disponuje zařízením pro sledování a řízení stabilních environmentálních podmínek. Během měření byla v laboratoři teplota $20,6 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ a vlhkost $49,8 \% \pm 0,2 \%$. Z důvodu časové náročnosti a vytíženosti strojů v laboratoři v hale M6 byla provedena čtyři opakovaná měření pro každý rozměr matice jmenovitých hodnot.

Experiment měl zjistit, zda má velikost matice jmenovitých hodnot vliv na přesnost měření kuželového ozubení. Při prvním pohledu je z výsledků patrné, že čím má matice větší rozměr, tím je menší výběrová směrodatná odchylka jednotlivých sledovaných parametrů ozubení. Jelikož byl proveden malý počet opakovaných měření pro konkrétní rozměr matice, byla použita výběrová směrodatná odchylka. Rozdíly u jednotlivých sledovaných parametrů jsou v řádech desetin mikrometru. Z toho vyplývá, že rozměr matice nemá zásadní vliv na rozdílnost jednotlivých výsledků. Jedním ze sledovaných parametrů byla i tloušťka zubů, kde byla zjištěna odchylka cca o 0,8 mm větší, než je jmenovitá hodnota. Tato odchylka bude zřejmě způsobena buď špatnou výrobou nebo nevhodně zvoleným způsobem vyrovnání součásti. Vzhledem k tomu, že ostatní parametry vycházejí v předepsané toleranční třídě (některé jsou i v lepší tol. třídě), je velmi pravděpodobné, že je součást nesprávně vyrobena. Tato skutečnost nemá vliv na závěry vyplývající z mé práce, neboť jejím cílem bylo vyhodnotit případné změny hodnot sledovaných parametrů na základě změny použitého rozměru matice jmenovitých hodnot. Tento vliv se však nijak neprokázal.

Použitá literatura

[1] *Ozubárna Jiří Pospíšil* [online]. [cit. 2018-06-13]. Dostupné z:

<http://www.ozubenipospisil.cz/home.html>

[2] BOLEK, Alfred. *Části strojů – Díl II*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1963. Česká matice technická.

[3] RŮŽIČKA, Václav. *Kontrola ozubených kol s úvodem do geometrického výpočtu ozubení*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. Řada strojírenské literatury.

[4] JETMAR, Lubomír. *Ozubená kola čelní*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956.

[5] KLEPAL, Václav a Jan BUREŠ. *Kuželová ozubená kola s paloidními zuby Klingelberg: určeno pro frézaře, seřizovače, mistry, konstruktéry, technology a učeb. pomůcka pro učiliště*. Praha: SNTL, 1961. Knižnice strojírenské výroby.

[6] JELASKA, Damir. *Gears and gear drives*. Chichester: Wiley, 2012. ISBN 978-1-119-94130-9.

[7] BUREŠ, Jan. *Kuželová kola s obloukovým ozubením Gleason*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. Knižnice strojírenské výroby.

[8] KLEPAL, Václav a Vladimír KUČERA. *Kuželová kola se spirálními eloidními zuby: určeno pro frézaře, mistry a techniky*. Praha: SNTL, 1962. Knižnice strojírenské výroby.

[9] Mitcalc.com [online]. 2007. [cit. 2018-06-20]. Dostupné z:

<http://www.mitcalc.com/doc/gear2/help/cz/gear2txt.htm>

[10] BARTOŠ, Josef. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953.

[11] ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: Ozubené převody*. Praha: České vysoké učení technické, 1985

[12] ČSN ISO 17485 *Kuželová ozubená kola – Systém přesnosti ISO*. Praha, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní příslušenství, 2013.

[13] KLEPAL, Václav. *Ozubená kola kuželová: Díl 1*. Praha: VTN, 1950. ISBN (váz.).

- [14] PŘIKRYL, Zdeněk. *Technologie obrábění*. Praha: STNL, 1967.
- [15] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02091-6.
- [16] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie: Část 1*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-0671-1.
- [17] BOSCH, John A. *Coordinate measuring machines and systems* [online]. New York: MARCEL DEKKER, 1995 [cit. 2018-07-08]. ISBN 8247-9581-4. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=YUz5XpLUH9gC&pg=PA21&hl=cs&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false
- [18] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2018-07-10]. ISBN 978-80-248-2514-4. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf
- [19] PETŘKOVSKÁ, Lenka. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ A METROLOGIE TEORETICKÝ ZÁKLAD: PŘEDNÁŠKA 13 SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE* [online]. Ostrava: VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2013 [cit. 2018-07-10]. ISBN 978-80-248-3035-3. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad_13.pdf
- [20] CHARACTERISTICS OF GEARS. *KHK Stock Gears* [online]. [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <https://khkgears.net/gear-knowledge/introduction-to-gears/characteristics-of-gears/>
- [21] SHIGLEY, JOSEPH E, CHARLES R. MISCHKE a RICHARD R. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Vutium, 2000. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [22] LUDVÍK, Prášil. *Kuželová kola se šikmými a zakřivenými zuby* [online]. Liberec, 2010, s. 1-19 [cit. 2018-07-01]. Dostupné z:

http://www.kst.tul.cz/podklady/casti_fs/podklady/Kuzelova%20soukoli%20se%20sikmymi%20a%20zakrivenymi%20zuby.pdf

[23] Objevte nápady na téma Cnc. *Pinterest* [online]. [cit. 2018-07-09]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/378654281161083703/>

[24] How Gears Work. *HowStuffWorks* [online]. [cit. 2018-06-30]. Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/gear5.htm>

[25] *Dominik Rybár ICT* [online]. [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <https://rybarict.webnode.cz/zajimave-priklady-sps/>

[26] SINGLE FLANK TESTING YOUR ADVANTAGE. *Geartec.cz* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <http://geartec.cz/products/bevel-gear-pairs/>

[27] GMS 32 - PŘÍSTROJ NA MĚŘENÍ OZUBENÝCH KOL, GEARTEC.CZ. Čelákovice, 2017.

[28] *Strojírenská metrologie* [online]. [cit. 2018-06-20]. Dostupné z: <http://technologie.fs.cvut.cz/provide/mereni>

[29] *Průmyslová metrologie* [online]. [cit. 2018-07-09]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy>

[30] *Přístroje pro měření a metrologii PRIMA BILAVČÍK, s.r.o.: Podle druhu* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/podle-druhu>

[31] *Historie ŠKODA* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <http://www.skoda-auto.cz/onas/historie>

[32] *SRDCE VÝROBY ŠKODA AUTO: 12 MILIONŮ AUTOMOBILŮ ZE ZÁVODU MLADÁ BOLESLAV* [online]. 24. 11. 2015 [cit. 2018-06-30]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-zpravy/srdce-vyroby-skoda-auto-12-milionu-automobilu-ze-zavodu-mlada-boleslav/>

[33] GTB 500 Measuring of bevel gears with our single flank inspection machine, GEARTEC.CZ. Čelákovice, 2017.

[34] Messgenauigkeit von Einflankenprüfmaschinen für Kegelräder - Measuring accuracy of single-flank gear roll inspection machines for bevel gears, GEARTEC.CZ. Čelákovice.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení ozubených kol podle průběhu zu	10
Obrázek 2: Čelní soukolí vnější (vlevo) a vnitřní [2]	11
Obrázek 3: Čelní soukolí se šikmými (vlevo) a příkými zuby [20]	12
Obrázek 4: Rozdělení podle polohy os [21].....	13
Obrázek 5: Kuželové kolo s příkými zuby [20]	13
Obrázek 6: Kuželové kolo se zakřivenými zuby [20]	14
Obrázek 7: Rozdělení kuželových kol [9].....	16
Obrázek 8: Šnekové válcové(vlevo) a globoidní soukolí [23, 24]	17
Obrázek 9: Názvosloví kuželového kola [25].....	19
Obrázek 10: Hlavová, roztečná a patní kružnice ozubení [10].....	19
Obrázek 11: Výška hlavy, zubu a paty zubu [10]	20
Obrázek 12: Úhel hlavového, roztečného a patního kužele [10].....	20
Obrázek 13: Úhel doplňkového hlavového, roztečného a patního kužele [10].....	21
Obrázek 14: Montážní vzdálenost, šířka zubu a poloměr roztečné kružnice [10].....	21
Obrázek 15: Šířka ozubení b	22
Obrázek 16: Tvar I [11]	22
Obrázek 17: Tvar II [11]	23
Obrázek 18: Tvar III [11]	23
Obrázek 19: Měření tloušťky zubu [13].....	24
Obrázek 20: Měření házení [14].....	25
Obrázek 21: Ukázka Fourierovy transformace [34]	26
Obrázek 22: Metoda jednobokého odvalu [26]	26
Obrázek 23: Metoda dvoubokého odvalu.....	27
Obrázek 24: Měření dvoubokým odvalem [33]	28
Obrázek 25: Souřadnicový měřicí stroj [28]	29
Obrázek 26: Upínací talířek	30
Obrázek 27: Rozdělení snímacích hlav	31
Obrázek 28: Lasertracker a měřicí rameno od firmy FARO [30]	32
Obrázek 29: Ukázka dílenských strojů [29]	32

Obrázek 30: Laboratorní stroj Zeiss Prismo [29]	33
Obrázek 31: Multisenzorové stroje [29].....	34
Obrázek 32: Zkušební přípravek na měření MQ 100	34
Obrázek 33: Závod ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav [32]	35
Obrázek 34: Ovládací panel.....	36
Obrázek 35: Varianty programu GEAR PRO	38
Obrázek 36: Snímací hlava	40
Obrázek 37: Konfigurace snímače	41
Obrázek 38: Základní stavebnice Alufix.....	42
Obrázek 39: Univerzální sklíčidlo	42
Obrázek 40: Základní zobrazovací okno programu Calypso	43
Obrázek 41: Zaměření osy rotace	44
Obrázek 42: Elementy určující vyrovnání.....	45
Obrázek 43: Bezpečnostní kvádr	45
Obrázek 44: Základní zobrazovací okno v programu GEAR PRO bevel	46
Obrázek 45: Základní a doplňková geometrie.....	47
Obrázek 46: Výpočet nové matice	47
Obrázek 47: Matice jmenovitých bodů o rozměru 8 x 8.....	48
Obrázek 48: Průběh měření	49
Obrázek 49: Toleranční třídy	49
Obrázek 50: Vyhodnocení boků zubů [μm].....	58
Obrázek 51: Vyhodnocení tloušťky zubů [μm].....	58

Seznam tabulek

Tabulka 1: Matice 8 x 8 - bok zubu 1 [μm]	52
Tabulka 2: Matice 8 x 8 - bok zubu 2 [μm]	52
Tabulka 3: Matice 8 x 8 - tloušťka zubu [μm]	53
Tabulka 4: Matice 10 x 10 - bok zubu 1 [μm]	53
Tabulka 5: Matice 10 x 10 - bok zubu 2 [μm]	54
Tabulka 6: Matice 10 x 10 – tloušťka zubu [μm]	54
Tabulka 7: Matice 12 x 12 - bok zubu 1 [μm]	55
Tabulka 8: Matice 12 x 12 - bok zubu 2 [μm]	55
Tabulka 9: Matice 12 x 12 - tloušťka zubu [μm]	56
Tabulka 10: Obvodové házení [μm]	56
Tabulka 11: Zprůměrované odchylky [μm]	57
Tabulka 12: Aritmetický průměr tlouštěk zubů [μm]	57

Seznam příloh

Příloha 1: Měření 1 - global matice 8 x 8

Příloha 2: Měření 1 – rozteč matice 8 x 8

Příloha 3: Měření 2 - global matice 8 x 8

Příloha 4: Měření 2 – rozteč matice 8 x 8

Příloha 5: Měření 3 - global matice 8 x 8

Příloha 6: Měření 3 – rozteč matice 8 x 8

Příloha 7: Měření 4 - global matice 8 x 8

Příloha 8: Měření 4 – rozteč matice 8 x 8

Příloha 9: Měření 1 - global matice 10 x 10

Příloha 10: Měření 1 – rozteč matice 10 x 10

Příloha 11: Měření 2 - global matice 10 x 10

Příloha 12: Měření 2 – rozteč matice 10 x 10

Příloha 13: Měření 3 - global matice 10 x 10

Příloha 14: Měření 3 – rozteč matice 10 x 10

Příloha 15: Měření 4 - global matice 10 x 10

Příloha 16: Měření 4 – rozteč matice 10 x 10

Příloha 17: Měření 1 - global matice 12 x 12

Příloha 18: Měření 1 – rozteč matice 12 x 12

Příloha 19: Měření 2 - global matice 12 x 12

Příloha 20: Měření 2 – rozteč matice 10 x 10

Příloha 21: Měření 3 - global matice 12 x 12

Příloha 22: Měření 3 – rozteč matice 10 x 10

Příloha 23: Měření 4 - global matice 12 x 12

Příloha 24: Měření 4 – rozteč matice 10 x 1

