

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



Diplomová práce

Dynamické měření přesnosti rotačních os

Vedoucí práce: Ing. Jan Urban

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Bc. Petra Žďánská

Praha 2021

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: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Dynamické měření přesnosti rotačních os

Název diplomové práce anglicky:

Dynamic measurement of the accuracy of rotary axes

Pokyny pro vypracování:

- 1) Princip měření ozubení metodou jednobokého odvalu.
- 2) Rozdílnost dotykového a dynamického měření ozubení.
- 3) Popis úchytek tvaru ozubení a jejich vliv na jednoboký odval.
- 4) Optimalizace dynamického snímače rotačních os.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

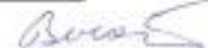
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **17.01.2021**

Plnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Jan Urban
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Bedrněk, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) konzultanty


prof. Ing. Michael Valáček, DrSc.
podpis konzultantů

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, a v případě poskytnutých konzultací, seznam použité literatury, jejich označení a jmen konzultantů je třesou uvést v diplomové práci.

30. 10. 2020
Datum převzetí zadání


Podpis studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

V Praze dne17.1.2021.....

.....Žďánská'.....

Bc. Petra Žďánská

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala panu Ing. Janu Urbanovi za odborné vedení, poznatky, jeho laskavost a ochotu. Velké poděkování patří celé společnosti GEARTEC.CZ, s.r.o., která mi umožnila vypracovávat diplomovou práci ve firmě. Také děkuji za všestrannou pomoc, poskytnutí podkladů, trpělivost, cenné rady a připomínky. Moc si vážím toho, kolik času mi všichni věnovali.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá kontrolou ozubení metodou jednobokého odvalu. V úvodu je zmíněno několik možností kontroly ozubených kol a následně je objasněn princip jednobokého odvalu. Poté jsou popsány příčiny, které mohou ovlivnit výsledky měření. V další části je vysvětlen rozdíl mezi dotykovým a dynamickým měřením, kde je vyzdvihnuta metoda jednobokého odvalu a souřadnicová měřicí technika. Dále se práce zaměřuje na detailnější vysvětlení úchylek ozubení.

Hlavní část diplomové práce je zaměřena na optimalizaci dynamického snímače rotačních os. V první fázi experimentální části se provedlo měření šnekového soukolí. Dále je práce zaměřena na návrh měřicí hlavy. Cílem práce bylo zjistit, zda navržená hlava zlepší přesnost měření.

Klíčová slova

jednoboký odval, měření, úchylky, kontrola, ozubené kolo

Abstract

This thesis deals with the control of gear by the method of single flank. The introduction discusses multiple options for gear control, and afterwards the principle of single flank is clarified. Subsequently, the possible causes that can affect the measurement results are described. The following part explains the difference between touch and dynamic measurement, with the emphasis on the method of single flank and coordinate measuring machine. Further, the thesis oriented on a more detailed explanation of gear deviations.

The main part of the thesis is focused on the optimization of a dynamic sensor of rotary axes. In the first phase of the experimental part, the measurement of the worm gear was performed. In the following part, the design of a rotary sensor is created. The goal is to identify whether the designed sensor will improve the accuracy of the measurement.

Key words

single flank, measuring, deviation, control, gear

Obsah

Seznam použitých značek.....	9
Úvod.....	10
1. Měření ozubení metodou jednobokého odvalu	13
2. Rozdílnost dynamického a dotykového měření.....	23
2.1. Dotykové měření	23
2.1.1. Protokol z dotykového měření.....	26
2.2. Dynamické měření.....	27
2.2.1. Jednoboký odval.....	28
2.2.2. Dvouboký odval.....	29
2.2.3. Protokol jednobokého odvalu.....	31
2.2.4. Jednoboký a dvouboký odval pro šneková soukolí.....	32
3. Popis úchylek tvaru ozubení a jejich vliv na jednoboký odval	33
3.1. Norma ISO 1328.....	33
3.2. Norma DIN 3974	39
3.3. Rozšířené úchytky v softwaru od firmy Geartec.cz.....	40
4. Představení společnosti Geartec.cz, s.r.o.	41
5. Stroj GTWG 600	42
6. Speciální měřicí jednotka GTM	43
6.1. Měřicí software GTM.....	43
7. Popis měřicí hlavy	45
8. Měření šnekového soukolí	47
8.1. Příprava měření	47

8.2.	Měření 1	49
8.3.	Měření 2	50
8.4.	Měření 3	52
8.5.	Měření 4	54
8.6.	Shrnutí	56
9.	Konstrukční řešení měřicí hlavy	57
10.	Ověření měřicí hlavy	61
10.1.	Kontrola měřicí hlavy	62
11.	Vyhodnocení	63
12.	Závěr	66
	Seznam literatury	68
	Seznam obrázků.....	72
	Seznam rovnic	74
	Seznam tabulek	74
	Seznam příloh.....	75

Seznam použitých značek

φ_1 a φ_2 – úhel natočení ozubených kol

z_1, z_2 – počet zubů hnacího, respektive hnaného ozubeného kola

D_2 – roztečný průměr hnaného ozubeného kola

arcsec – úhlové vteřiny

R – poloměr roztečné kružnice

j – boční vůle

p_{tM} – rozteč

n_{ptM} – n roztečí

r_i – jednotlivá radiální měření

d_M – průměr roztečné kružnice

m_x – osový modul

α_n – úhel záběru

a' - osová vzdálenost

W – natočení příčnicku

M'_y – poloha šneku v ose y

M'_z – poloha šneku v ose z

f_{pi} – dílčí úchylka jednotlivé rozteče

f_p – úchylka jednotlivé rozteče

F_{pi} – jednotlivá úchylka součtové rozteče

F_p – celková úchylka součtové rozteče

F_r – obvodové (radiální) házení

f_{ui} – jednotlivý rozdíl sousedních roztečí

f_u – rozteč sousedních roztečí

F'_i – celková kinematická úchylka za otáčku

f'_i – kinematická úchylka jednotlivých roztečí

f'_i – pomalá složka odvalu

f'_k - rychlá složka odvalu

$f'_{i,m}$ - je průměrná (střední) hodnota všech dílčích kinematických úchylek f'_i

$f'_{i,max}$ – kinematická úchylka f'_i s použitím tzv. signálního filtru

CNC – počítačem číselně řízený stroj (computer numerical control)

CAD – počítačem podporované projektování (computer aided design)

CMM – souřadnicový měřicí stroj (coordinate measuring machine)

Úvod

Ozubená kola můžeme považovat za důležitou součást ve strojírenství. Používají se téměř kdekoli, kde je potřeba přenášet kroutící moment nebo měnit rychlost rotace. To se provádí pomocí převodového poměru. Právě změna rychlosti rotace se hojně využívá v převodovkách automobilů a motocyklů, nalézt je ale můžeme i na klasickém jízdním kole. Ozubené kolo je specifická tvarová součást, při jejíž výrobě je zapotřebí dbát na vysokou přesnost a využití speciálních metod výroby. Díky tvarové složitosti je kontrola geometrie ozubení náročnou technickou disciplínou vyžadující specifické vybavení a hlubší znalosti operátora. Kontrolu ozubených kol můžeme provádět klasickými komunálními měřidly nebo pokročilejšími metodami dynamického měření, tzn. metodou jednobokého a dvoubokého odvalu. Trendem dnešní doby je i využití univerzálních souřadnicových měřicích strojů s dotykovým snímacím systémem.

Mezi komunální měřidla určená pro kontrolu kvality ozubení patří například posuvná měřítka, zuboměry či mikrometry. Posuvným měřítkem nebo mikrometrem můžeme zjistit rozměr hlavového či patního průměru ozubeného kola. Hlavový průměr se většinou měří už během výroby před tím, než se obrobí zuby, ovšem lze také zjišťovat hodnoty již na hotovém kole, kde záleží na počtu zubů. Tloušťku zubu lze kontrolovat třemi základními metodami. Za nejjednodušší způsob se považuje měření zuboměrem, který si lze představit jako posuvné měřítko s hloubkoměrem svírající úhel 90° , nicméně tento postup není příliš přesný. Dále můžeme zjistit tloušťku zubů nepřímou metodou, tzv. rozměrem přes zuby. Ta se určuje pomocí talířkového mikrometru, který zabezpečí správný osový směr měření kvůli plošnému dotyku. Zmiňovaná metoda se vyhodnocuje přes určitý počet zubů, který je nutný zjistit v tabulkách. Dalším způsobem je zjišťování míry přes kuličky nebo válečky umístěné v zubových mezerách. Ty se následně změří buď posuvným měřítkem nebo délkoměrem pro přesnější měření a zkontroluje se tak již definovaný rozměr vyhledaný v tabulkách příslušné normy.

V předchozích případech se jednalo pouze o kontrolu jedné hodnoty ze základních parametrů ozubení, jako je např. hlavová a patní kružnice, rozměr přes zuby atd. Jenže vzniká potíž s vyhodnocením jakékoliv úchylny, jež je důležitá pro bezproblémový chod soukolí. Toho docílíme použitím některé z dalších metod měření. Tím se myslí například souřadnicová měřicí technika, díky níž jsme schopni zjistit více informací o ozubených kolech. Průběh měření se

provádí buď manuálně u mobilních CMM nebo v CNC režimu (u laboratorních souřadnicových strojů). Princip měření na CMM spočívá v nasnímání bodů v prostoru souřadného systému a v jejich následném porovnání vůči jmenovitým bodům definovaných CAD modelem, popř. parametricky zadanou geometrií ozubení. Součást je většinou při měření pevně uchycena k pracovní desce stroje a dotyková sonda se pohybuje po součásti, respektive ozubeném kole. Vyhodnocuje se např. topografie boku zubů, profil a sklon zubů, rozteč, hlavový průměr, tloušťka zubů atd. Ozubená kola je možné naměřit také laserovým skenerem. Jedná se o metodu bezdotykovou a rychlou. Laserový skener je připevněn na měřicí rameno a umí vyhodnotit složitě zakřivené plochy. Jedná se o zařízení přenosné, které je možné použít i během výroby. Nasnímané plochy se dají převést do 3D obrazu, se kterým se následně vyhodnotí požadované úchytky. U těchto bezkontaktních principů lze změřit a zkontrolovat topografii boku, radiální a axiální házení atd. U optického způsobu snímání ozubení je přesnost stále velmi omezená a pohybuje se v řádech desetin milimetrů. Pro méně přesné díly a plastové výrobky je metoda naopak dostatečná.

Kontrola ozubených kol je v dnešní době stále důležitá a díky rychlému vývoji a univerzálnosti měření můžeme říct, že souřadnicová měřicí technika se používá častěji. To z toho důvodu, že je to univerzální metoda a lze ji použít jak pro kontrolu ozubených kol, tak i pro klasickou rozměrovou kontrolu dílů. Kvůli vysoké ceně a složitému konstrukčnímu řešení nesmíme zapomenout na klasické způsoby kontroly ozubených kol, tzn. měřit nadále komunálními měřidly.

U metody jednobokého a dvoubokého odvalu se jedná o dynamické měření, kde se otáčejí ozubená kola. Jednoboký odval představuje v podstatě měření převodového poměru, přičemž dvouboký odval zjišťuje kolísání osové vzdálenosti. Hlavním principem těchto metod je, že spolu zabírají ozubená kola, kde jedno kolo je považováno za kontrolované a druhé za etalonové. U jednobokého odvalu se nejprve vyhodnocuje jeden bok zubu a následně druhý. Výhodou tohoto měření je, že naměřené výsledky jsou k vidění ihned a je nejvíce podobné reálnému chodu. Naopak kontrola dvoubokým odvalem je velmi rychlá metoda, která dává okamžitě informace o tom, zda je ozubené kolo správně vyrobené. U této metody se hodnotí oba boky zubů zároveň. Tyto zmiňované techniky jsou velmi přesné, ale méně používané oproti CMM. Důvodem je pořízení speciálního stroje, který je díky vysoké přesnosti nákladný. Jeho použitelnost je pouze jednostranná a to proto, že je zaměřená pouze na vyhodnocení

ozubených kol. Obvykle tedy firmy dávají přednost univerzálnímu řešení v podobě CMM, kde v případě potřeby lze dokoupit pouze softwarovou nadstavbu určenou pro ozubení. Naopak pro společnosti, v jejímž portfoliu výroba ozubení hraje dominantní roli, je volba kontroly kvality založená na jedné z dynamických metod měření velmi vyhledávaná, neboť kombinuje rychlost a vysokou přesnost.

Firma Geartec.cz, s.r.o. se navzdory předchozí větě velmi intenzivně zabývá výrobou přístrojů pro měření ozubených kol metodou jednobokého a dvoubokého odvalu. Kvůli velkému důrazu na přesnost ozubených kol je každodenním úkolem ji zlepšovat. To v této společnosti bývá každodenní rutinou. Zařízení, která konstruují, jsou vybavena různými komponenty, jako např. základovou deskou, stojanem s příčником, lineárním vedením nebo otáčejícím se stolem. Stůl opatřený snímačem uvnitř se před použitím vyrovnává pomocí speciální měřicí hlavy. Tato diplomová práce se zaměřuje na právě zmiňovanou hlavu, kde je potřeba navrhnout lepší snímač zajišťující přesnější výsledky.

1. Měření ozubení metodou jednobokého odvalu

Cílem jednobokého odvalu je zjistit kinematickou přesnost ozubených kol. Jedná se o komplexní kontrolu soukolí z běžného použití, např. o kontrolu převodovek. Používá se i vzorové kolo sloužící jako etalon pro kola využívané v praxi. Tato metoda ukazuje reálný chod, který může zjistit nepřesnost kola, a tak lze jednoduše předejít chybám před montáží. Dvě ozubená kola jsou umístěna tak, aby měla stálou osovou vzdálenost po celou dobu měření konstantní. Stálost slouží k tomu, aby bylo možné porovnat úhel natočení φ_1 a φ_2 a tím se zjistila chyba přenosu. Jedná se o kontrolu hnacího a hnaného kola, kde se před měřením určuje, které kolo bude kontrolované a kontrolní. Kontrolované je lehce přibrzdováno kvůli zajištění stálého záběru spoluzabírajících kol a vzorové kolo musí být přesnější minimálně o tři stupně. V hnací i hnané ose je umístěn přesný úhlový snímač. [1, 2]

Princip tkví v tom, že se spustí měření, ve kterém se začnou ozubená kola pomalu otáčet. Nejprve se měří například levý bok ozubeného kola, poté se změní směr a kontroluje se pravý bok zubu. Měření se provádí buď za jednu otáčku nebo při nekonečném cyklu. Zařízení dokáže měřit s přesností jedné úhlové vteřiny za jednu otáčku s průměrem ozubeného kola až 200 mm, což v přepočtu znamená chybu jednoho mikrometru. Výsledkem celého měření je vyhodnocení úchylek zobrazujících skutečné naměřené hodnoty, které lze ihned porovnat s hodnotami teoretickými, např. podle norem. Jednotlivé úchyly budou podrobněji vysvětleny v kapitole č. 3. Celková úchylna převodového poměru se počítá pomocí jednoduchého vzorce [1]:

$$Fi' (rad) = \varphi_1 \cdot \frac{z_1}{z_2} - \varphi_2 \quad \text{Rovnice 1: Celková úchylna v radiánech [1]}$$

$$Fi'(\mu m) = Fi'(rad) \cdot \frac{D_2}{2} \cdot 1000 \quad \text{Rovnice 2: Celková úchylna v mikrometrech [1]}$$

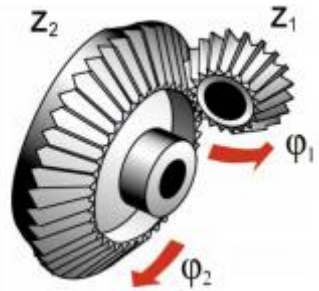
kde: Fi' je celková kinematická úchylna za otáčku měřená v radiánech nebo v mikrometrech

φ_1, φ_2 je úhel natočení hnacího, respektive hnaného ozubeného kola

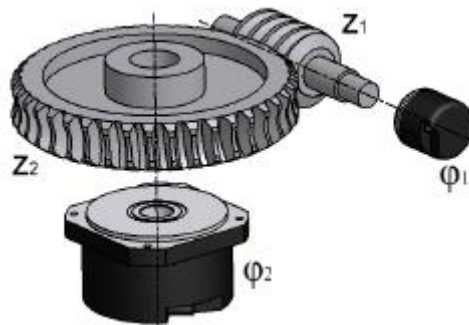
z_1, z_2 je počet zubů hnacího, respektive hnaného ozubeného kola

D_2 je roztečný průměr hnaného ozubeného kola v milimetrech [1]

Pro lepší představu jsou na obrázcích č. 1 a 2 ukázány principy jednobokého odvalu pro kuželová a šneková soukolí. Kuželová soukolí se řadí mezi kola s různoběžnými osami a zabírají spolu dvě ozubená kola. U šnekového soukolí se jedná o šnekové kolo a šneka, jejichž osy jsou mimoběžné. [1, 3]

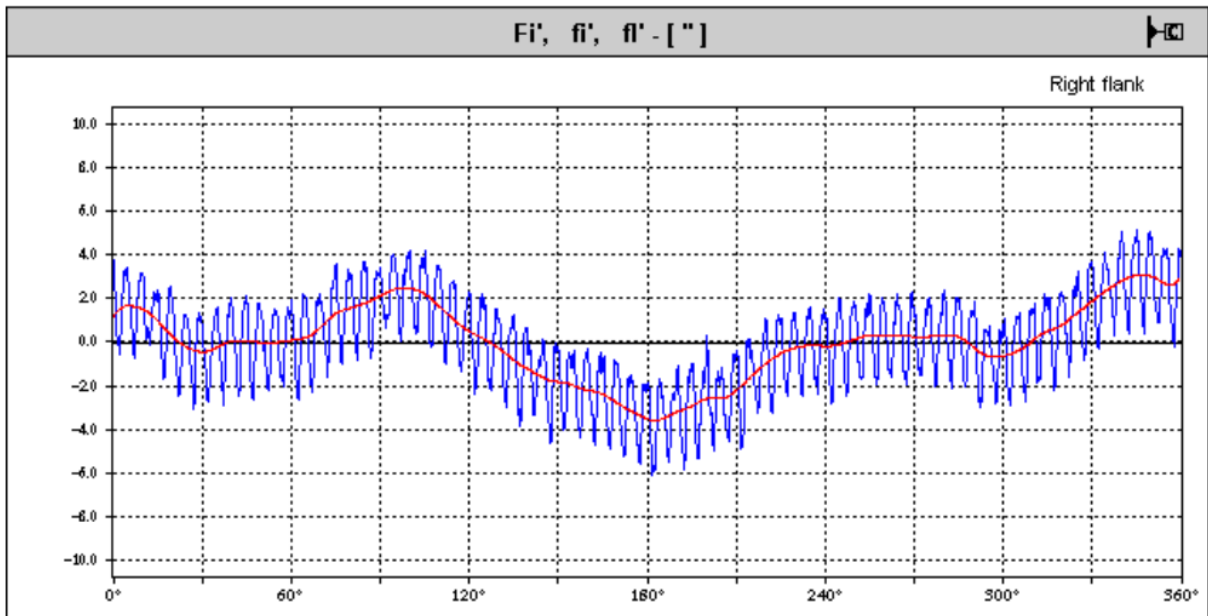


Obrázek 1: Princip jednobokého odvalu kuželového soukolí [1]



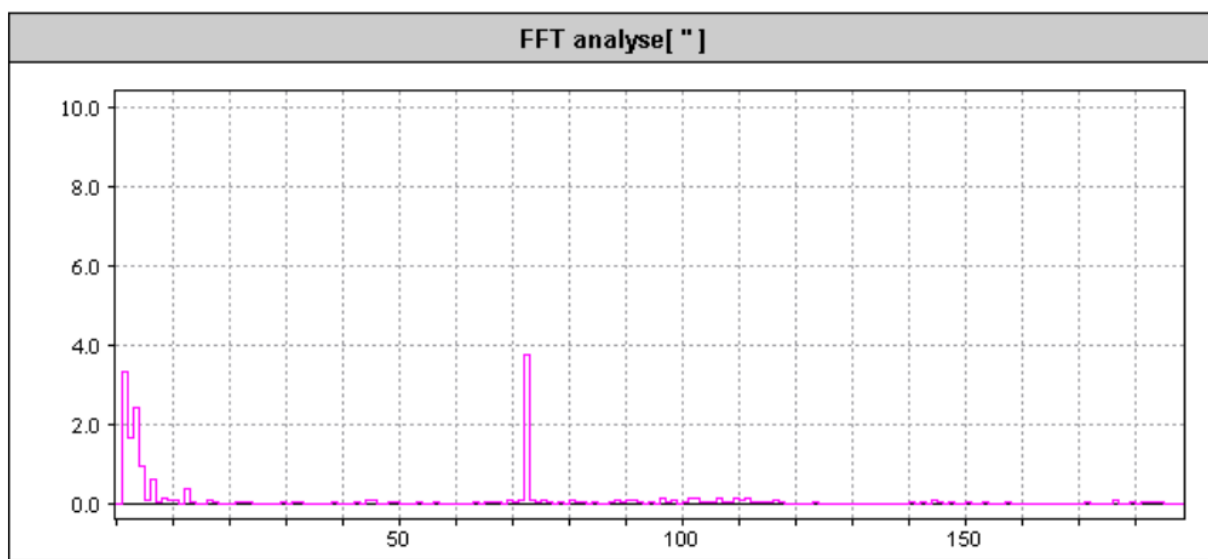
Obrázek 2: Princip jednobokého odvalu šnekového soukolí [4]

Dále je možné získat rychlý výpočet chybného přenosu Fourierovou transformací, takzvanou FFT analýzu. Transformace provádí rozklad měřeného signálu (obrázek č. 3) do jednotlivých harmonických složek. [5]



Obrázek 3: Protokol jednobokého odvalu – měřený signál

Protokol jednotlivých harmonických složek je možné vidět na obrázku č. 4.



Obrázek 4: Protokol jednotlivých harmonických složek

V této metodě se jedná o měření s vůlí a využívá se převod do pomala i do rychla. Měření je velmi rychlé a nejvíce se podobá reálnému chodu soukolí. Další výhodou je dlouhá životnost měřicího stroje, nízká hlučnost a jednoduchá obsluha stroje. Nevýhodou je, že je metoda finančně nákladná. Pro představu je na obrázku č. 5 stroj řady GTWG 200 určený na kontrolu jednobokého odvalu vhodný pro šneková soukolí. [1, 6]



Obrázek 5: Stroj GTWG 200 od firmy Geartec.cz, s.r.o. [7]

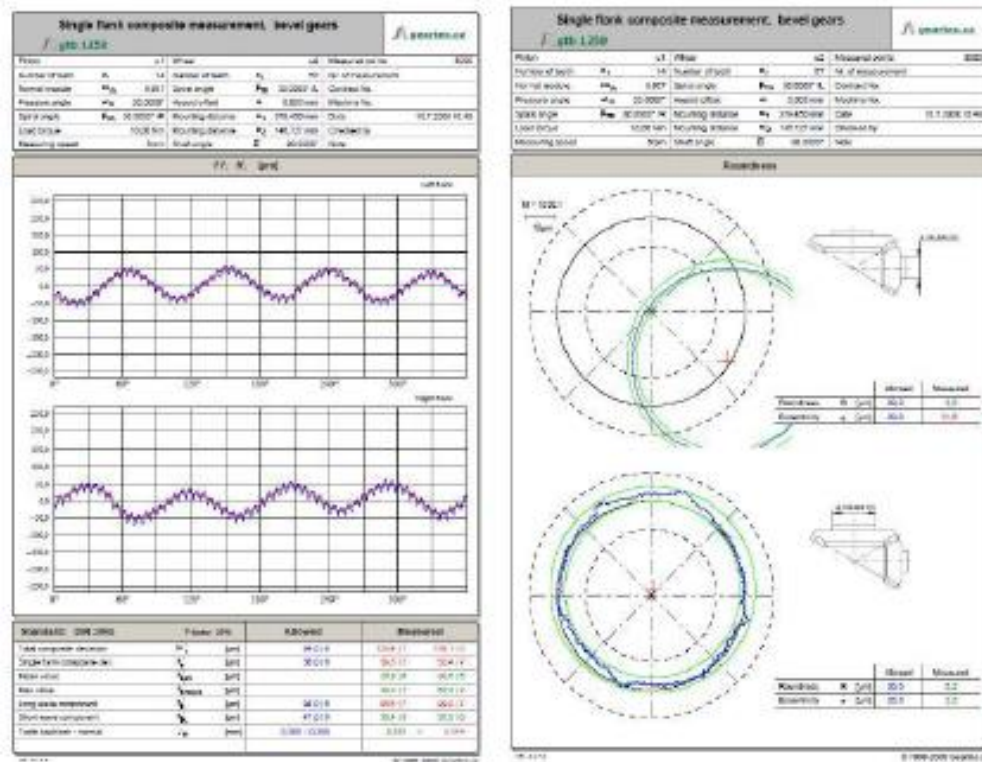
Metoda jednobokého odvalu slouží také pro zjištění správného chodu ozubených kol, tzn. kontrolu hluku, vibrací, lokálního poškození. Tyto problémy mohou být způsobeny například těmito důvody [1, 6]:

- a) nevyhovujícím záběrem zubů,
- b) jinou roztečí zubů,
- c) rozlišným materiálem a tvrdostí ozubených kol.

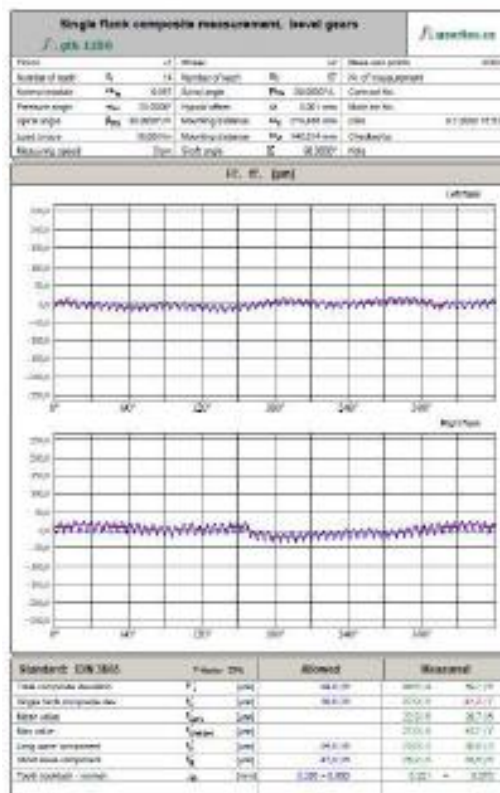
Chyby popsané v této kapitole mohou vzniknout například montážní či výrobní nepřesností, možnou zátěží, nevhodným zacházením, strukturou povrchu, nedostatečným vyčištěním součásti atd. Dále si vyjmenujeme a podrobně popíšeme další možné příčiny, které mohou ovlivnit výsledky měření. Je to [1]:

a) Nepřesné upnutí kontrolního kola

Kvůli nepřesnému upnutí kontrolního kola neboli pastorku mohou vzniknout celkem rozdílné výsledky měření. Na obrázku č. 6 je ukázka měření kuželových kol, kdy pastorek prokazuje vysoké házení (horní část obrázku vpravo), a naopak kontrolované kolo je bezvadně vyrovnáno (dolní část obrázku vpravo). Hodnoty nepřesnosti upnutí jsou matematicky kompenzovány, které výrazně zlepší výsledky (obrázek č. 7). [1]



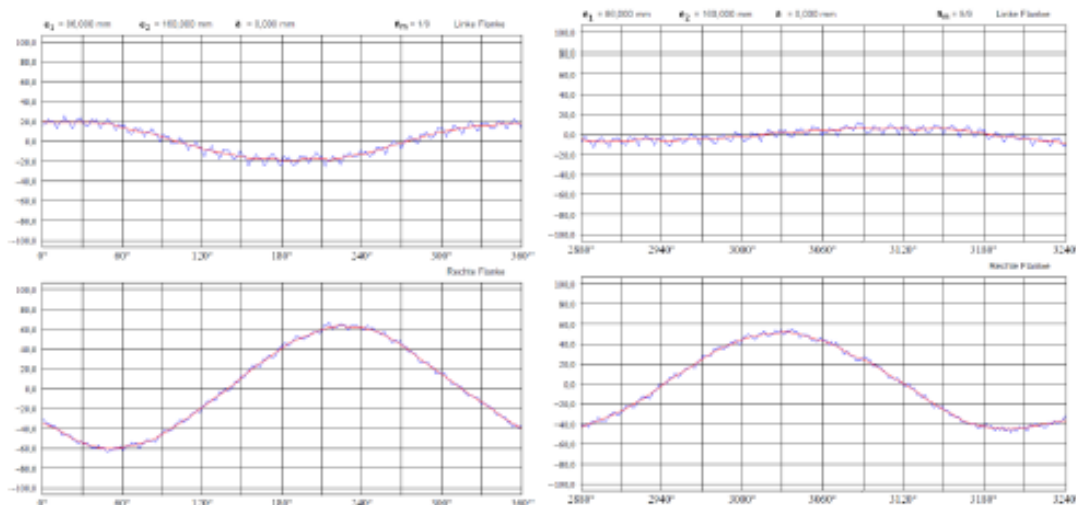
Obrázek 6: Protokol s nepřesným upnutím kontrolního kola [1]



Obrázek 7: Protokol s přesnějším upnutím kontrolního kola [1]

b) Rozdílný počet zubů

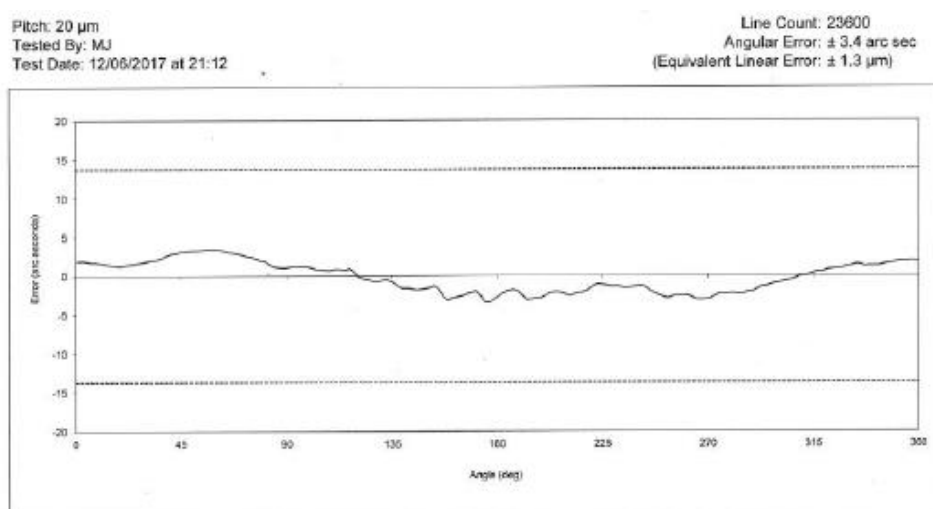
Za předpokladu, že mají obě ozubená kola obdobnou kvalitu a jedná se o nesoudělné počty zubů, dostáváme výsledky dokonalé nebo naopak absolutně špatné, podle toho, jak jsou kola navzájem natočena. Na obrázku č. 8 jsou možné zpozorovat dva protokoly s rozdílným počtem zubů. Vlevo se jedná o měření s počty zubů $z_1 = 31$, $z_2 = 32$, naopak vpravo je $z_1 = 9$, $z_2 = 49$. [1]



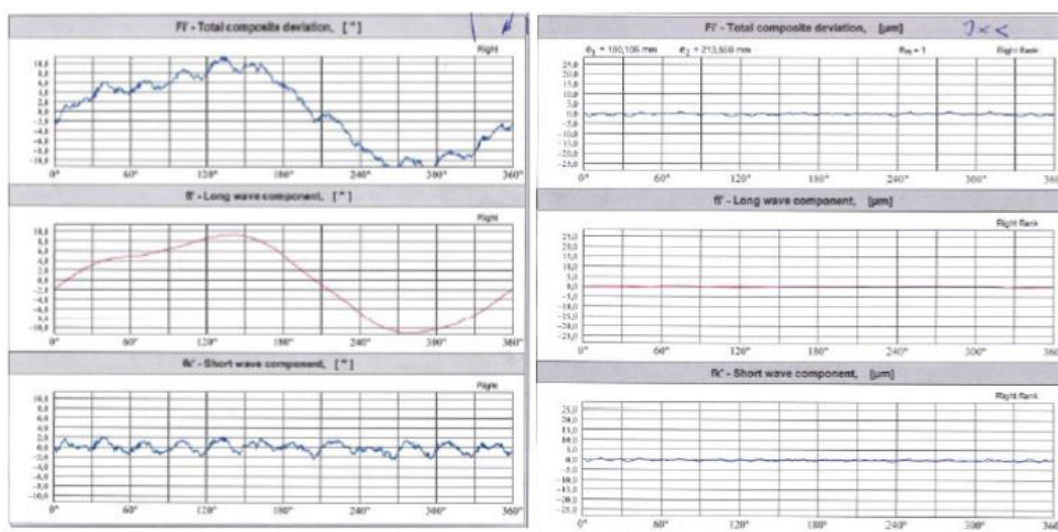
Obrázek 8: Protokol měření s nesoudělnými počty zubů [1]

c) Nepřesnost čtení rotačních enkodérů

Snímač od výrobce, který dokládá protokol s přesností $\pm 3,4$ úhlových vteřin (obrázek č. 9), byl změřen firmou Geartec.cz, s.r.o. Firma zjistila chybu až 41,25 arcsec. Aby s tímto snímačem mohla firma nadále měřit, je potřeba ho kompenzovat. Toho docílíme vlastním programem vyvinutého ve výše jmenované firmě, díky čemu jsou výsledky korigovány tak, že se chyba snímače do výsledků nepromítne. Rozdíl naměřených výsledků bez kompenzace (vlevo) a s kompenzací (vpravo) je možné vidět na obrázku č. 10. [1]



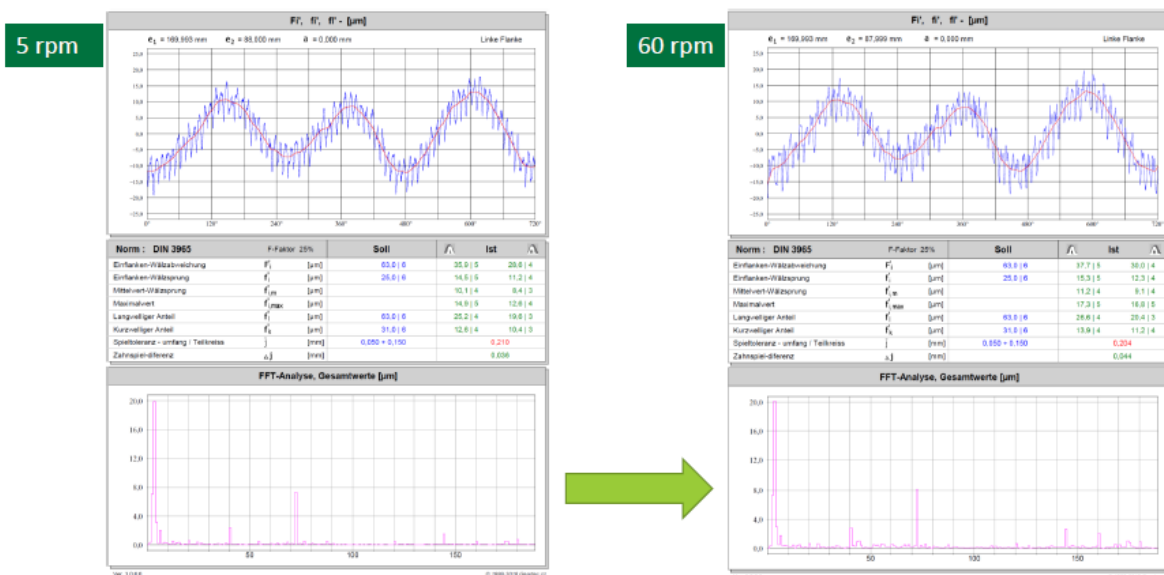
Obrázek 9: Protokol s přesností snímače [1]



Obrázek 10: Naměřené výsledky snímače [1]

d) Špatně zvolená rychlost měření

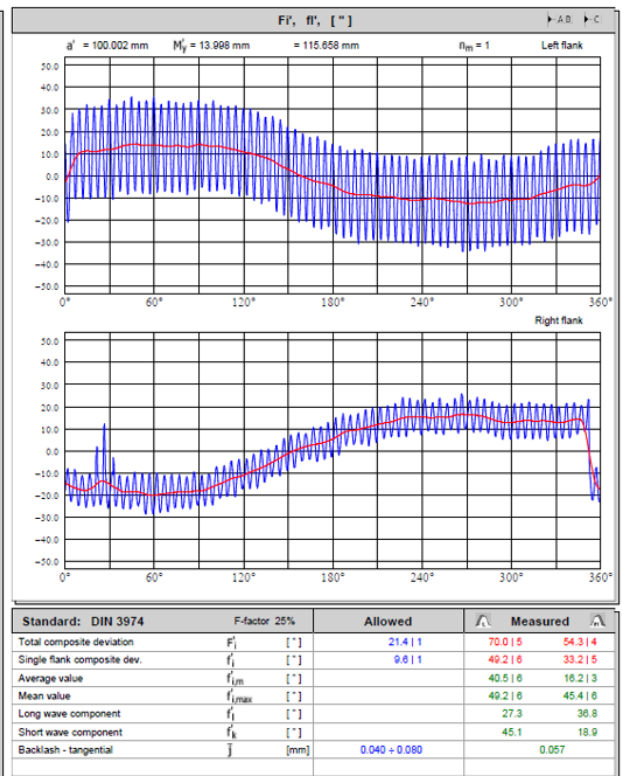
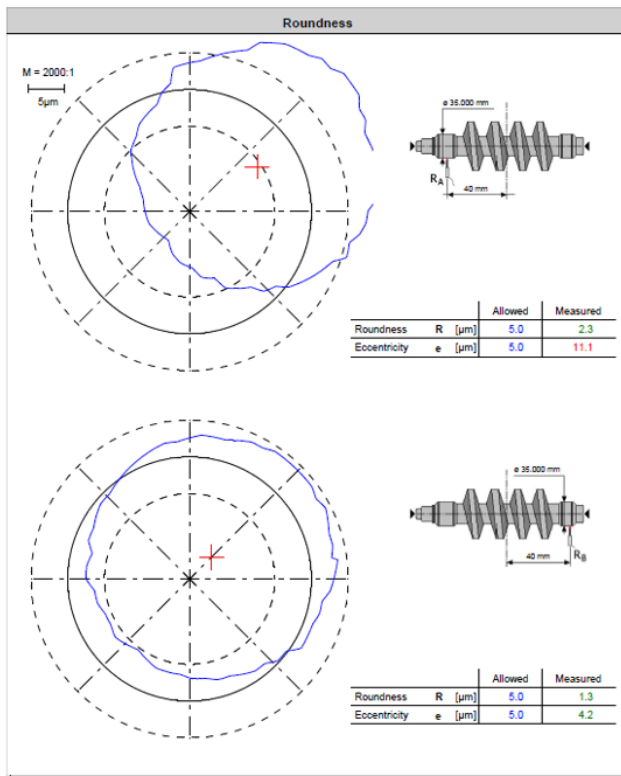
Při měření je potřeba najít optimální rychlost měření, aby došlo k co nejpřesnějším výsledkům. Například při volbě pěti otáček za minutu byla rychlost velmi pomalá, což způsobuje neefektivitu práce, protože metoda je hodně časově náročná. Při šedesáti otáčkách za minutu, kdy došlo ke zvýšení rychlosti měření, byly výsledky velmi podobné. Za špatně zvolenou rychlost se považují nízké otáčky (v tomto případě 5 ot/min). Naměřené protokoly můžeme vidět na obrázku č. 11. [1]



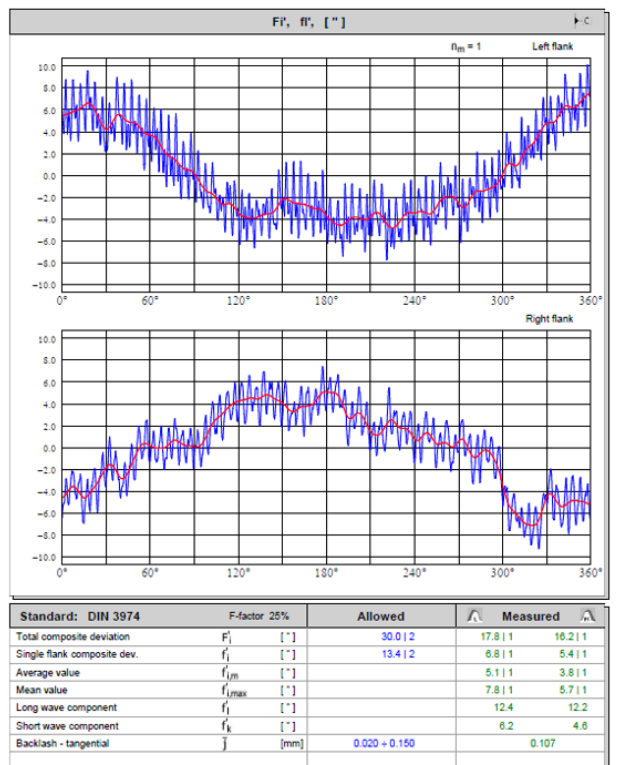
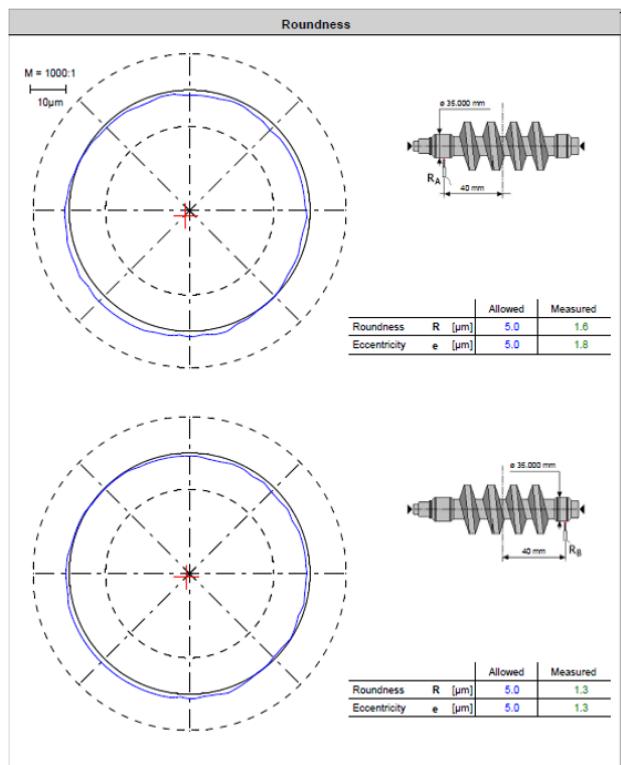
Obrázek 11: Protokoly s různou rychlostí měření [1]

e) Nevhodně upnutý šnek

Šnek je upnut mezi dvě špičky a vždy se musí před měřením vyrovnávat. Na obrázku č. 12 vlevo je zobrazen protokol chybně upnutého šneku, který by pochopitelně změnil výsledky celého měření, pokud bychom ho takto nechali. Ovlivnění výsledků jednobokého odvalu je možné vidět na obrázku č. 12 vpravo. Protokol (obrázek č. 12 vlevo) ukazuje v horní části velké házení levého kontrolního průměru (ložiskového kroužku), naopak ve spodní části kontrolní kroužek vykazuje minimální házení. V porovnání s obrázkem č. 13 se lze přesvědčit, že házení šneku opravdu ovlivňuje výsledky měření. [1]



Obrázek 12: Protokoly s nevhodně upnutým šnekem

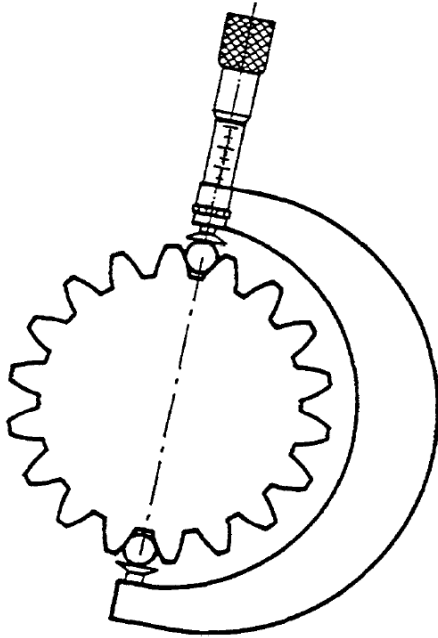


Obrázek 13: Protokoly s dobře upnutým šnekem

V této kapitole jsme si přiblížili základní problematiku jednobokého odvalu a základní parametry pro správný chod ozubení. Také byly vyjmenovány možné chyby vzniklé ještě před měřením nebo během měření. Pro vytvoření přehledu kontroly ozubených kol a soukolí je následující kapitola zaměřena na právě možné metody a na porovnání modernějších technologií, tj. dotykové a dynamické metody, která souvisí s kontrolou jednobokého odvalu.

2. Rozdílnost dynamického a dotykového měření

Ozubená kola je možné kontrolovat a měřit několika metodami. Za nejjednodušší způsob měření lze považovat kontrolu komunálními měřidly, se kterými můžeme zjistit



Obrázek 14: Měření míry přes válečky [8]

tloušťku zubů, hlavový a patní průměr ozubeného kola atd. Jsou široce používána pro počáteční kontrolu a zamezení vad. Hlavový a patní průměr měříme pomocí posuvného měřítka nebo mikrometrem už během výroby před obrobením zubů. U tloušťky zubů se používají tři základní metody, tj. měření zuboměrem, zjišťování rozměru přes zuby pomocí talířkového mikrometru nebo vyhodnocení míry přes kuličky či válečky měřené délkoměrem. Rychlejší, ale méně přesný způsob měření pak představuje kontrola parametrů pomocí posuvného měřítka. Na obrázku č. 14 je možné zpozorovat konkrétně metodu míry přes válečky kontrolované talířkovým mikrometrem. [2, 3, 9, 10]

Pro důkladnější kontrolu kvality ozubených kol se používají modernější a přesnější způsoby měření, u nichž lze vyhodnotit různé úchytky ozubení a více parametrů najednou. Jedná se o měřicí souřadnicovou techniku, kterou považujeme za dotykovou metodu, a metodu jednobokého a dvoubokého odvalu, což odpovídá dynamickému měření. Tyto metody dokážou měřit s přesností na desetiny mikrometru a lze je aplikovat od nejmenších ozubených kol až po ozubená kola velkých rozměrů. CMM a metodu jednobokým či dvoubokým odvalem si podrobněji popíšeme v této kapitole. [2, 11]

2.1. Dotykové měření

Jedná se o měření, kde ozubené kolo je pevně uchycené na měřicím souřadnicovém stroji. Součást tedy stojí na místě, a pomocí dotykové sondy se extrahují body, čímž je součást měřena. Měření probíhá nejčastěji v kartézském souřadném systému, ve kterém sonda na povrchu jednotlivých zubů snímá body porovnávající polohu každého naměřeného bodu s jmenovitým bodem definovaným v CNC programu. Alternativně je možné měřit v nekartézském souřadném systému, který pracuje např. na základě cylindrických souřadnic.

Jedná se o ruční souřadnicové stroje stojanového typu, měřicí ramena atd. Velkou výhodou mobilních zařízení je to, že jsou spolehlivá, přenosná, tudíž dokážou měřit na konkrétním místě (např. v dílenském prostředí) a není nutné mít tedy laboratoř. Oproti laboratorním CMM jsou méně přesná, dokážou měřit pouze základní parametry ozubení a mají vyšší variabilitu výsledků. [11, 12, 13, 14]

Princip této metody tkví v tom, že se součást neboli ozubené kolo musí nejprve očistit mimo měřicí pracoviště, aby se kvůli nečistotám nezpůsobila případná porucha, a tím se nezneškodily výsledky měření. Jednou z možných závad může být poškození konstrukčních prvků stroje, které jsou náchylné na nečistoty (např. vzduchová ložiska, kontakty ve snímací hlavě, třecí převody atd.). Následně se kolo pevně zafixuje pomocí upínacích přípravků. Poté je potřeba zkonfigurovat a kvalifikovat snímač, určit počátek souřadného systému a vytvořit program neboli plán měření. Program se díky CAD modelu tvoří jednodušeji. Po tomto nastavení může začít měření, ve kterém je nutné nasnímat jednotlivé body. Na definovaných základních elementech, jako je např. kužel, válec, roviny, kružnice nastavíme v řídicím softwaru dráhy snímání, na kterých stroj v CNC režimu provede extrakci bodů k dalšímu vyhodnocení. Tyto prvky slouží k výpočtu určitých charakteristik, jako např. délkové rozměry a jejich tolerance, úhly, a co se týče ozubených kol, lze např. díky softwarové nadstavbě GEAR PRO od společnosti Zeiss změřit i topografii zubů, sklon zubů, jednotlivé chyby roztečí, velikost hlavové kružnice atd. Naměřené hodnoty se porovnávají s daty vloženými právě z CAD modelu nebo z parametricky vytvořených dat a tím se zjišťují různé úchyly, rozměry atd. Můžeme také zjistit podle výkresu, zda výsledky odpovídají tolerančnímu poli, ve kterém by se měla naměřená úchylka pohybovat. [12, 13, 14, 15]

Nakonec je vytvořen protokol. Tento způsob měření byl přiblížen pro kartézský souřadný systém. Ozubená kola je možné měřit na různých typech zařízení, existují např. sloupové, výložníkové, portálové konstrukce strojů. Kola se dají také měřit na speciálních souřadnicových měřicích strojích, které jsou vybaveny trnem na uchycení ozubeného kola. Ukázka portálové konstrukce je na obrázku č. 15. Jedná se o měřicí centrum řady Prismo od firmy Carl Zeiss. [11, 12, 13]



Obrázek 15: Souřadnicový měřicí stroj Prismo [16]

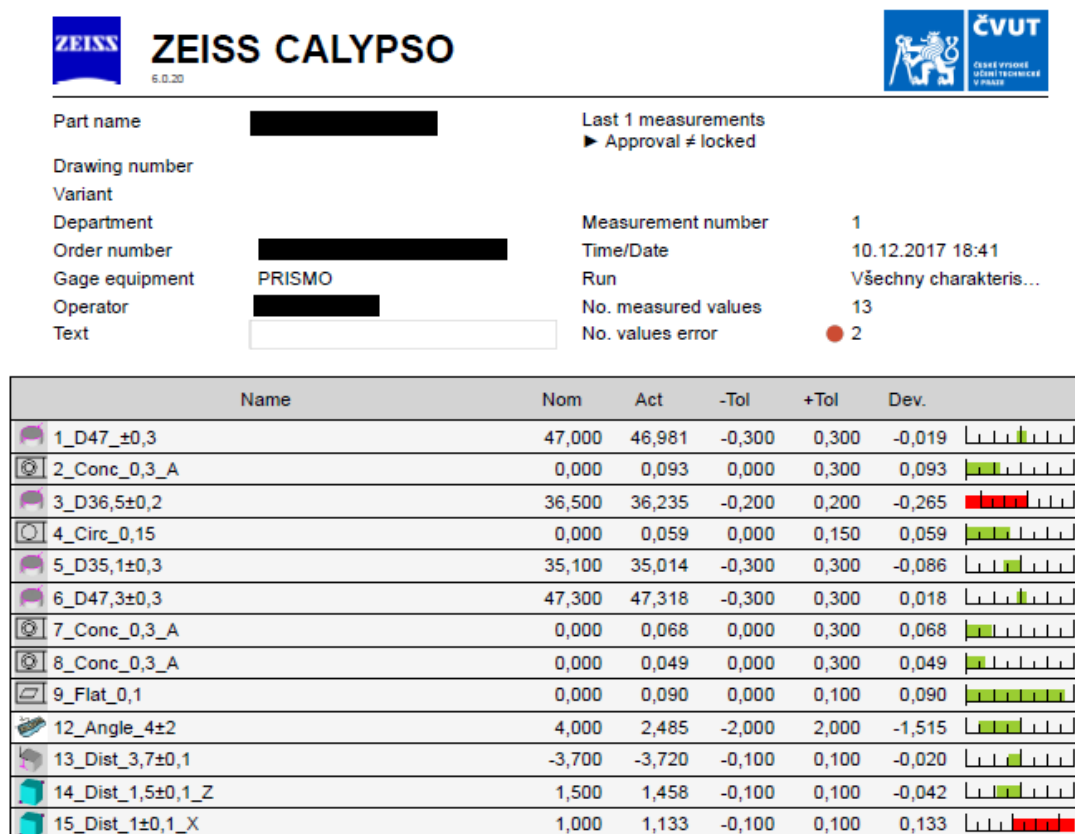
Dotykové měření se považuje za pomalejší variantu, avšak velmi přesnou, která je značně citlivá na způsob vyrovnaní součásti. Správnost volby vyrovnaní může proto ovlivnit přesnost měření. Nejčastěji tuto metodu aplikujeme na jednoúčelových strojích Klingelberg sloužících na kontrolu ozubení (příklad stroje je možné vidět na obrázku č. 16) nebo na univerzálních souřadnicových měřicích strojích vybavených aktivním skenovacím systémem. Příklad CMM byl ukázán na obrázku č. 15. [13, 17]



Obrázek 16: Jednoúčelový stroj Klingelberg P40 [17]

2.1.1. Protokol z dotykového měření

Protokolární výstup (obrázek č. 18) při měření ozubení je od výstupu ze standardní rozměrové kontroly odlišný. Při klasické rozměrové kontrole (obrázek č. 17) jsme zvyklí na tabulkový dokument, ve kterém je v jednotlivých sloupcích uveden naměřený rozměr, jmenovitá hodnota, tolerance a popř. úchylka. Protokol z kontroly ozubení je oproti tomu zcela odlišný. Velmi často se jedná o grafický výstup doplněný naměřenými hodnotami.

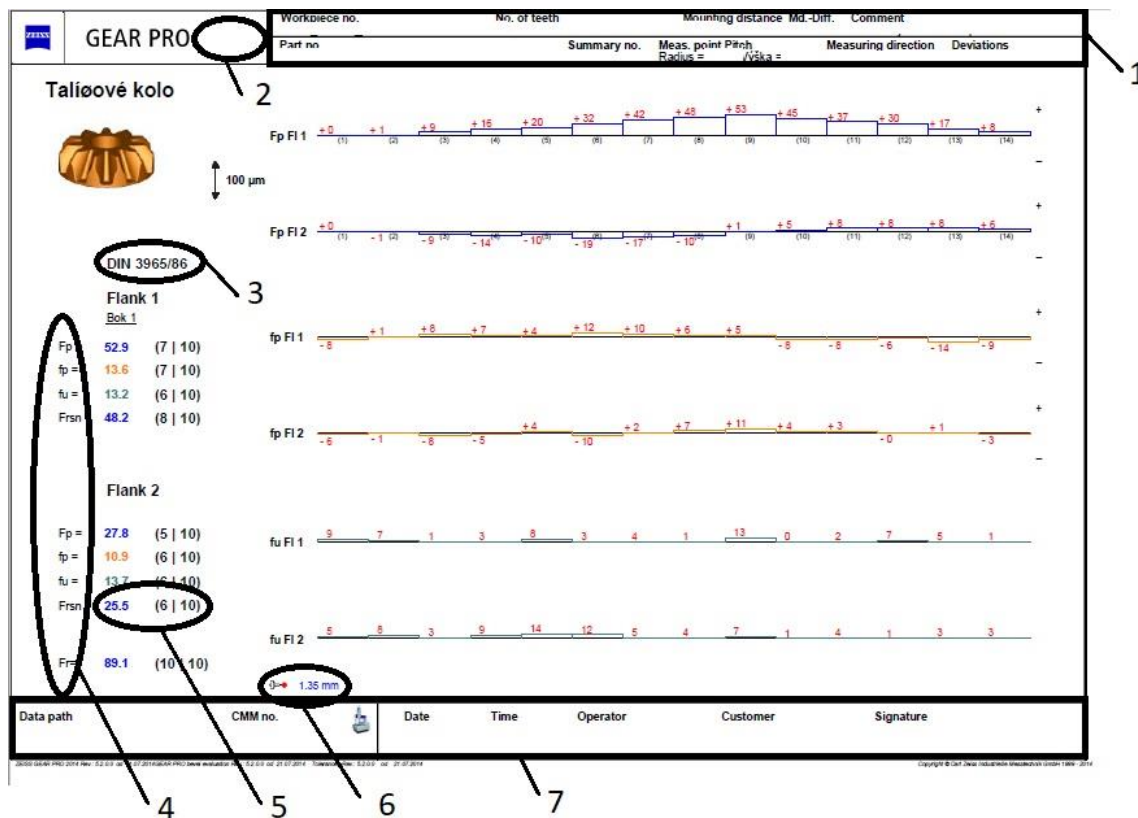


Name	Nom	Act	-Tol	+Tol	Dev.	
1_D47_±0,3	47,000	46,981	-0,300	0,300	-0,019	
2_Conc_0,3_A	0,000	0,093	0,000	0,300	0,093	
3_D36,5±0,2	36,500	36,235	-0,200	0,200	-0,265	
4_Circ_0,15	0,000	0,059	0,000	0,150	0,059	
5_D35,1±0,3	35,100	35,014	-0,300	0,300	-0,086	
6_D47,3±0,3	47,300	47,318	-0,300	0,300	0,018	
7_Conc_0,3_A	0,000	0,068	0,000	0,300	0,068	
8_Conc_0,3_A	0,000	0,049	0,000	0,300	0,049	
9_Flat_0,1	0,000	0,090	0,000	0,100	0,090	
12_Angle_4±2	4,000	2,485	-2,000	2,000	-1,515	
13_Dist_3,7±0,1	-3,700	-3,720	-0,100	0,100	-0,020	
14_Dist_1,5±0,1_Z	1,500	1,458	-0,100	0,100	-0,042	
15_Dist_1±0,1_X	1,000	1,133	-0,100	0,100	0,133	

Obrázek 17: Protokol z klasické rozměrové kontroly

Protokol z měření ozubeného kola dotykovým způsobem na souřadnicové technice lze vidět na obrázku č. 18. Z protokolu je možné vyčíst základní informace (1) o tom, jaký je počet zubů ozubeného kola, směr měření, název dílu a jiné. Dále také logo softwaru nebo jaký typ ozubeného kola kontrolujeme (2). V tomto případě se jedná o bevel, tzn. kuželové ozubené kolo vyobrazené také v protokolu. V dolním sektoru (7) jsou vypsány údaje o tom, kdy a kým bylo měření prováděno nebo, např. jaký souřadnicový stroj byl použit. Jedná se o protokol, kde interpretace výsledků je jednodušší než u specificky zaměřených dynamických měření. To z toho důvodu, že naměřené výsledky jsou jasně vypsány nad graf. Dále lze najít označení úchylek (4) pro pravý i levý bok zubu a jejich hodnotu (5) spadající do určité kategorie normy.

Normu, podle které jsou výsledky měřeny a vyhodnocovány, je možné upozorovat pod číslem (3). Pro měření souřadnicovou technikou je také důležité, jaký průměr kuličky (6) se bude používat.



Obrázek 18: Protokol z dotykového měření [15]

2.2. Dynamické měření

Dynamické měření je metoda jednobokého a dvoubokého odvalu založená na snímání úchylek generující se ze záběru měřeného a kontrolního kola. Oproti CMM se jedná tedy o měření dvou kol zároveň. V tomto případě se otáčí ozubená kola, naopak dotyková měřidla snímající nepřesnost jsou statická. Ačkoli se metody zdají podobné, protože se vyhodnocuje v obou případech sinusový průběh ozubených kol, výsledky jsou spíše odlišné. To z toho důvodu, že každá metoda má jiný princip. U metody jednobokého odvalu probíhá měření s vůlí a porovnává se zde rozdíl úhlového natočení mezi etalonovým a zkoušeným kolem, zatímco u metody dvoubokého odvalu se měří bez vůle a princip měření spočívá v měření kolísání osové vzdálenosti dosahované pružinovým systémem. U metody jednobokého odvalu probíhá měření zubů separátně, tzn. že je kontrolován levý bok, následně pravý bok zubu a vyhodnocují se především úchylky profilu, házení ozubeného kola, případně pomocí

Fourierovy transformace lze zjistit chybu přenosu nebo lokalizovat defekt na konkrétním zubu. Naopak u dvoubokého odvalu se kontrolují zároveň oba boky zubů a vyhodnocuje se nestabilní upnutí či problémy s výrobním procesem. [2, 18]

2.2.1. Jednoboký odval

U nevhodně vyrobených ozubených kol se díky této metodě dá zjistit, co je v konkrétním zubu špatně. Při znalosti úchytek ozubení a jejich vlivu na kontrolu jednobokého odvalu je možné přesně určit, jaký parametr je chybně vyroben. To se provede tak, že naměřené výsledky konfrontujeme s ideálním chodem hřídele. Vždy se kontroluje jen jeden bok zubů. U metody jednobokého odvalu se porovnává kontrolované a kontrolní kolo. Toto soukolí je umístěné v konstantní osové vzdálenosti, která slouží k porovnání úhlového natočení soukolí. [1, 2, 18]

Princip spočívá v tom, že se ozubené kolo upevní na stůl, v němž je umístěn úhlový snímač, a pomocí číselníkového úchylkoměru se vyrovná tak, aby byla zajištěna sousost. Na hnanou osu se umístí šnek nebo další ozubené kolo, které se také musí vyrovnat stejným způsobem. Kontrola probíhá tak, že se spustí měření a ozubené soukolí se začne otáčet. Kontrolované kolo je přibrzďováno kvůli stálému záběru. Kontroluje se jeden bok zubů při dané rychlosti, nejčastěji 60 otáček za minutu, a určitém otáčení např. jedna otáčka. Po změření se otočí směr a měří se druhý bok zubů se stejným nastavením. Ozubená kola můžeme měřit buď při jedné otáčce nebo při nekonečném cyklu. Výsledky je možné vyhodnotit jak z hladké sinusové křivky, její deformace, šíře atd., tak i z výstupků na křivce, tudíž lze zjistit různé úchytky. Naměřené výsledky se porovnávají s teoretickými hodnotami podle třídy přesnosti příslušné normy. Zjišťuje se např. kruhovitost, excentricita, rozteč, házení ozubeného kola. Po celou dobu je měření vyhodnocováno pomocí programu, ve kterém lze měnit nastavení i během měření. Po skončení měření se vytvoří protokol. Příklad stroje GTWG 600 od firmy Geartec.cz, s.r.o. na jednoboký odval je na obrázku č. 19. [1, 2, 18]



Obrázek 19: Stroj na jednoboký odval – GTWG 600 [19]

2.2.2. Dvouboký odval

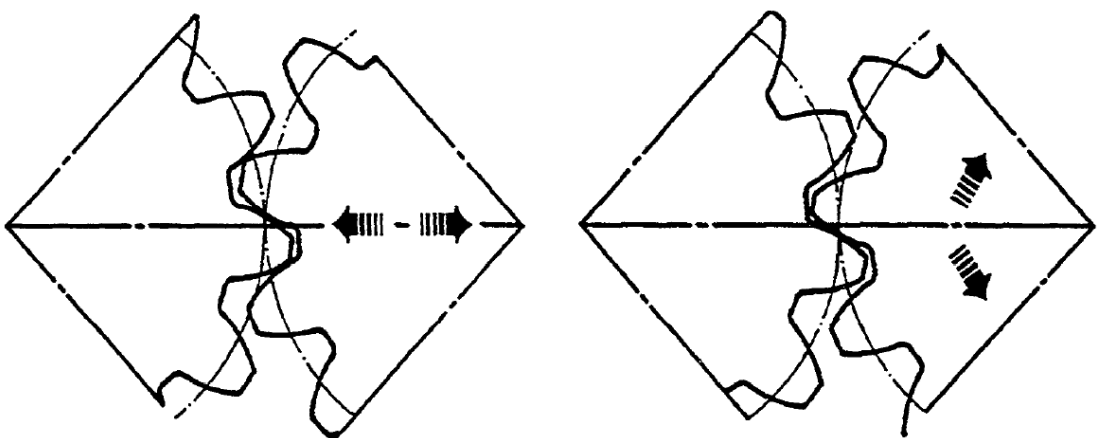
Druhou metodou dynamického měření je metoda měření dvoubokým odvalem. Tuto metodu si můžeme představit jako měření obvodového házení. Díky nepřesnosti ozubených kol se mění osová vzdálenost a tím se zjistí chyby ozubení. Na rozdíl od jednobokého odvalu v této metodě zabírají ozubená kola bez vůle, což není nic jiného než přitlačování jednoho kola ke druhému díky pružinovému systému. Měří se najednou oba boky zubů. Jedná se o prostou metodu, která vyhodnocuje kolísání osové vzdálenosti ozubeného soukolí. [2, 20]

Jednoduchý stroj řady GMS 32, který má pohyblivou a stabilní část, můžeme vidět na obrázku č. 20. Oproti zařízení na jednoboký odval je tento stroj levnější a je možné jej používat v dílenském prostředí. Toto měření se považuje za metodu rychlou a efektivní. [2, 20]



Obrázek 20: Stroj na dvouboký odval – GMS 32 [20]

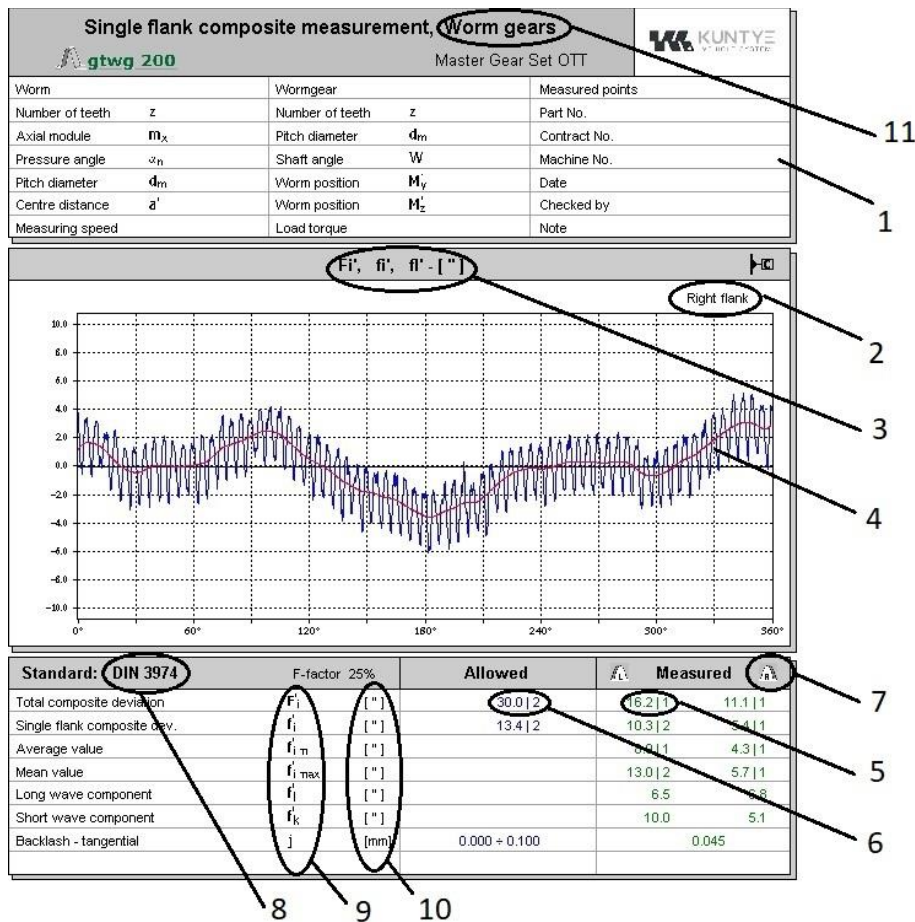
Princip jednobokého a dvoubokého odvalu je možné vidět na obrázku č. 21, kde lze zpozorovat rozdíl těchto metod (vlevo dvouboký odval, vpravo jednoboký odval). U jednobokého odvalu se ozubená kola k sobě přiblíží a při vyhodnocování se točí s vůlí, přičemž u dvoubokého odvalu se ozubená kola kontrolují bez působení vůle kvůli pružinovému systému. [2]



Obrázek 21: Princip dvoubokého a jednobokého odvalu [8]

2.2.3. Protokol jednobokého odvalu

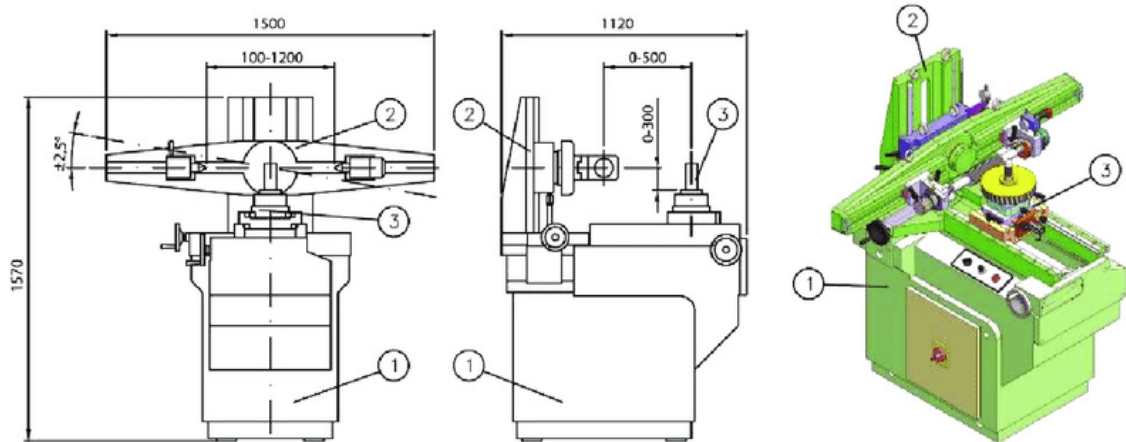
Protokol z měření jednobokého odvalu (obrázek č. 22) se skládá ze tří hlavních částí. V první (1) horní části jsou zmíněny základní informace, např. čím bylo měření kontrolováno, kdy se měření provádělo nebo jaký typ ozubeného soukolí se zkoumá (11). Dále jsou uvedeny parametry ozubeného soukolí, např. počet zubů obou kol, modul, úhel záběru, rychlost měření atd. Ve druhém úseku je zobrazeno měření jako takové. Lze vidět výsledek celkového měření (4) zobrazeného pomocí sinusového průběhu, také jaký bok zubu (2) se kontroluje a jaké úchytky (3) jsou zjišťovány. Vzhledem k sinusovému profilu, který je rozkmitaný, je potřeba rozumět těmto protokolům, tzn. je potřeba zaškolit personál. Z dolního sektoru je možné zjistit, jaký bok zubu (7) a typ úchytky (9) se vyhodnocuje. Úchytky mohou být vyhodnocovány v úhlových vteřinách nebo v mikrometrech (10). Hodnoty naměřených úchytek (5) se vyskytují na pravé straně protokolu, které jsou porovnávány s určitými třídami určené normy. Zmíněná norma je také vepsána do protokolu pod číslem (8) a povolená úchytky se vyskytují pod číslem (6).



Obrázek 22: Protokol jednobokého odvalu

2.2.4. Jednoboký a dvouboký odval pro šneková soukolí

Pro obě metody byl vynalezen kompatibilní stroj (obrázek č. 23) pro kontrolu šnekového soukolí vybavený lineárními snímači. Tento stroj se skládá ze základové desky (1), sloupu pro uchycení šneku (2), který dokáže regulovat výšku a úhel šneku, a z přesného vřetena (3), na němž je umístěno šnekové kolo. Vřeteno je vybaveno kuličkovým šroubem, tudíž je schopné měnit vzdálenost mezi středy šnekového soukolí, což slouží pro metodu jednobokého odvalu. Pro kontrolu dvoubokého odvalu je ve vřetenu umístěn ještě další držák pro oscilační pohyb. [2, 18]



Obrázek 23: Kompatibilní stroj pro kontrolu šnekového soukolí [2]

Pro zajímavost lze zmínit, že v Americe vznikla norma ANSI/AGMA 2111 - A98 pro metodu jednobokého a dvoubokého odvalu zobrazující metody a postupy měření. Dále popisuje a ukazuje různé varianty pro to, co může nastat, když je šnekové soukolí nevhodně nastavené. [2]

Ozubená kola jsou nejvíce používané součásti přenášející kroučící moment. Proto je důležité dbát na vysokou přesnost a kvalitu, kterou je nutné kontrolovat ještě před použitím v provozu. Jednou z možných kontrol se zabývá společnost Geartec.cz., s.r.o., díky níž vznikla spolupráce. Jedná se o metody jednobokým a dvoubokým odvalem. Dále se tato diplomová práce bude zabývat pouze jednobokým odvalem a v následující kapitole budou popsány úchytky této metody.

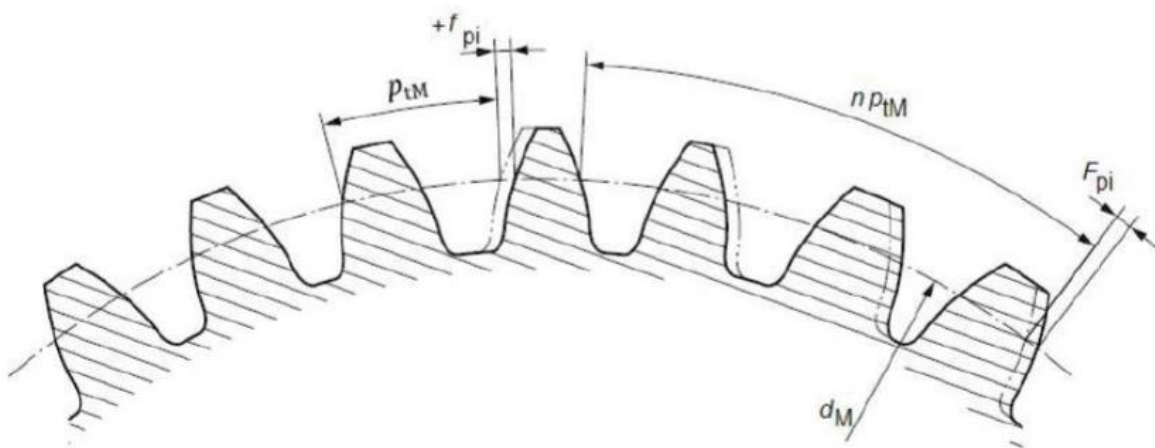
3. Popis úchylek tvaru ozubení a jejich vliv na jednoboký odval

U ozubených kol se setkáváme se spoustou norem, podle kterých se lze řídit. Konkrétně pro jednoboký odval můžeme použít normu ISO 1328 nebo německou normu DIN 3974. Tyto standardy pomáhají zlepšit kvalitu a optimalizovat parametry. Další variantou je měřit podle potřeb zákazníka, kterému nevyhovují normy, a tak si stanoví svoje vlastní požadavky.

3.1. Norma ISO 1328

Tato norma se rozděluje na dvě části. V první sekci se vysvětlují a definují různé termíny úchylek ozubení, v té druhé se jedná o určení stupňů přesnosti podle tabulek. Užití normy vyžaduje jisté zkušenosti s výpočty, výrobou a měřením ozubených kol. [21]

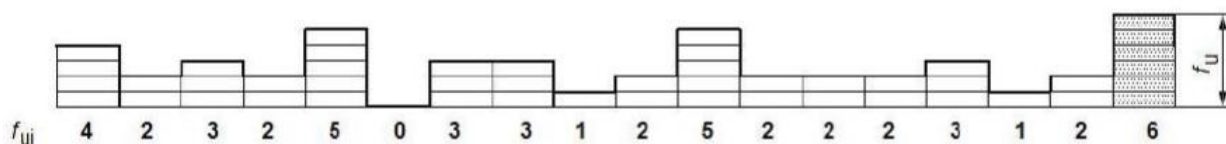
V normách, podle nichž se řídí kontrola ozubených kol u metody jednobokého a dvoubokého odvalu, jsou také vysvětleny úchylky. Několik z nich je uvedeno již v následující tabulce č. 1.



Obrázek 24: Úchylky okótované na ozubeném kole [21]

Tabulka 1: Úchylky [21]

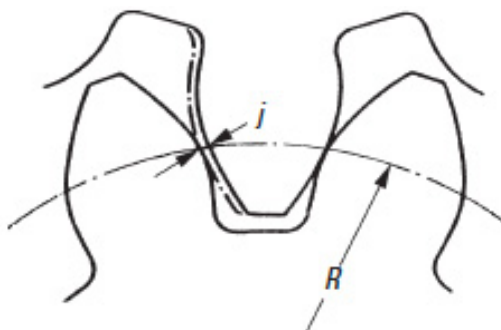
označení úchylky	popis úchylky	jednotky	obrázek č.
f_{pi} – dílčí úchylka jednotlivé rozteče	rozdíl mezi teoretickou a skutečnou hodnotou na každém jednom zubu daného kola	[$''$] nebo [μm]	24 <i>čerchovaná čára – skutečný profil zubu</i> <i>plná čára – teoretický profil</i>
f_p – úchylka jednotlivé rozteče	největší hodnota všech dílčích úchylek jednotlivé rozteče f_{pi} , kde platí: $f_p = \max f_{pi} $	[$''$] nebo [μm]	-
F_{pi} – jednotlivá úchylka součtové rozteče	součtová úchylka dvou po sobě následujících jednotlivých roztečí f_{pi} <u>Příklad:</u> $f_{p1} = 1 \text{ arcsec}$ $f_{p2} = 1 \text{ arcsec}$ součtová úchylka $F_{pi} = 2 \text{ arcsec}$	[$''$] nebo [μm]	24
F_p – celková úchylka součtové rozteče	maximální hodnota úchylky F_{pi} , která má tyto souvislosti: $F_{p2} - F_{p1} = f_{p1}$ $f_{p2} - f_{p1} = f_{u1}$	[$''$] nebo [μm]	-



Obrázek 25: Úchylky sousedních roztečí [21]

Tabulka 2: Úchytky [21]

označení úchytky	popis úchytky	jednotky	obrázek č.
f_{ui} – jednotlivý rozdíl sousedních roztečí	rozdíl sousedních roztečí na jednotlivých zubech <u>Příklad:</u> $f_{p1} = 1 \text{ arcsec}$ $f_{p2} = 2 \text{ arcsec}$ $f_{u1} = 1 \text{ arcsec}$ Rozdíl úchylek f_{p1}, f_{p2} je 1 arcsec, tudíž f_{u1} je 1 arcsec.	[$''$] nebo [μm]	25
f_u – rozteč sousedních roztečí	nejvyšší možná hodnota z úchytky f_{ui} , má vliv na hlučnost ozubeného kola	[$''$] nebo [μm]	25
r_i – jednotlivá radiální měření	aktuální vzdálenost základního profilu od osy rotace v každé zubové mezeře měřené přes kuličky nebo válečky	[$''$] nebo [μm]	-
Fr – obvodové (radiální) házení	rozdíl mezi maximálním a minimálním jednotlivým radiálním měřením r_i	[$''$] nebo [μm]	-
j – boční vůle	velikost mezery mezi libovolnými zuby u ozubených kolech měřené na roztečné kružnici, vůle v normálové směru	[mm]	26



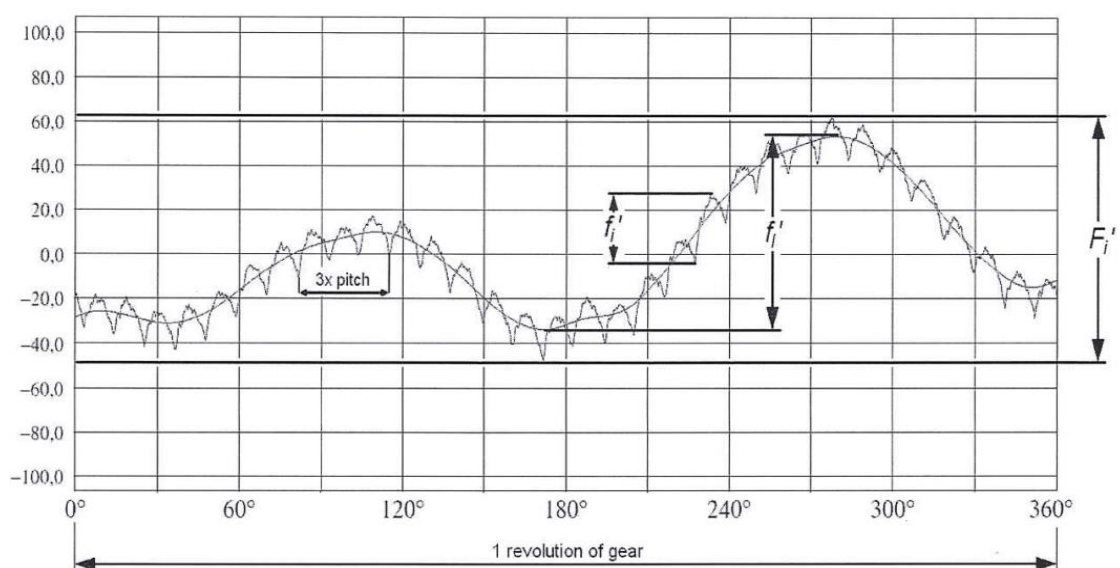
Obrázek 26: Boční vůle [22]

Na obrázku č. 27 lze určit maximální hodnotu obvodového házení F_r podle průměru ozubeného kola a modulu. Jedná se o normu ISO 1328-2. [23]

Referenční průměr (Reference diameter) d mm	Normální, modul (Normal module) m_n mm	Stupně přesnosti (Accuracy grade)												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		F_r μm												
$5 < d < 20$	$0,5 \leq m_n \leq 2,0$	1,5	2,5	3,0	4,5	6,5	9,0	13	18	25	36	51	72	102
	$2,0 < m_n \leq 3,5$	1,5	2,5	3,5	4,5	6,5	9,5	13	19	27	38	53	75	106
$20 < d \leq 50$	$0,5 \leq m_n \leq 2,0$	2,0	3,0	4,0	5,5	8,0	11	16	23	32	46	65	92	130
	$2,0 < m_n \leq 3,5$	2,0	3,0	4,0	6,0	8,5	12	17	24	34	47	67	95	134
	$3,5 < m_n \leq 6,0$	2,0	3,0	4,5	6,0	8,5	12	17	25	35	49	70	99	139
$50 < d \leq 125$	$0,5 \leq m_n \leq 2,0$	2,5	3,5	5,0	7,5	10	15	21	29	42	60	83	116	167
	$2,0 < m_n \leq 3,5$	2,5	4,0	5,5	7,5	11	15	21	30	43	61	86	121	171
	$3,5 < m_n \leq 6,0$	3,0	4,0	5,5	8,0	11	16	22	31	44	62	88	125	176
	$6,0 < m_n \leq 10$	3,0	4,0	6,0	8,0	12	16	23	33	46	65	92	131	185
	$10 < m_n \leq 16$	3,0	4,5	6,0	8,0	12	16	25	35	50	70	99	140	198
$125 < d \leq 280$	$16 < m_n \leq 25$	3,5	5,0	7,0	9,5	14	19	27	39	55	77	109	154	218
	$0,5 \leq m_n \leq 2,0$	3,5	5,0	7,0	10	14	20	28	39	55	78	110	156	221
	$2,0 < m_n \leq 3,5$	3,5	5,0	7,0	10	14	20	28	40	56	80	113	159	225
	$3,5 < m_n \leq 6,0$	3,5	5,0	7,0	10	14	20	29	41	58	82	115	163	231
	$6,0 < m_n \leq 10$	3,5	5,5	7,5	11	15	21	30	42	60	85	120	169	239
	$10 < m_n \leq 16$	4,0	5,5	8,0	11	16	22	32	45	63	89	126	170	252
	$16 < m_n \leq 25$	4,5	6,0	8,5	12	17	24	34	48	68	96	136	190	272
$280 < d \leq 560$	$25 < m_n \leq 40$	4,5	6,5	9,5	13	19	27	38	54	76	107	152	215	304
	$0,5 \leq m_n \leq 2,0$	4,5	6,5	9,0	13	18	26	36	51	73	103	146	206	291
	$2,0 < m_n \leq 3,5$	4,5	6,5	9,0	13	18	26	37	52	74	105	148	209	296
	$3,5 < m_n \leq 6,0$	4,5	6,5	9,5	13	19	27	38	53	75	106	150	213	301
	$6,0 < m_n \leq 10$	5,0	7,0	9,5	14	19	27	39	55	77	109	155	219	310

Obrázek 27: Tabulka obvodového házení z normy ISO 1328-2 [23]

Metodou jednobokého odvalu zjišťujeme přednostně úchyly uvedené v následující tabulce č. 3. Tato metoda se vyhodnocuje ze sinusového grafu zobrazeného na obrázku č. 28.



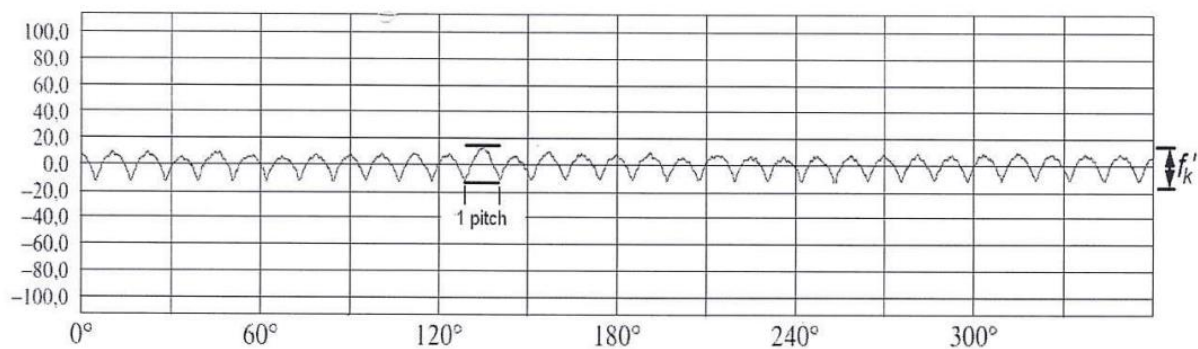
Obrázek 28: Úchyly jednobokého odvalu [24]

Naměřený protokol z obrázku č. 28 ukazuje vyhodnocení z měření jednobokým odvalem. Na svislé ose jsou hodnoty úchylek a na vodorovné ose jsou zobrazené úhly, které určují pootočení ozubeného kola od původní pozice.

Tabulka 3: Úchylky jednobokého odvalu [1, 24]

označení úchylky	popis úchylky	jednotky	obrázek č.
F_i' – celková kinematická úchylka za jednu otáčku měřeného kola	rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou převodového poměru za jednu otáčku, na tuto úchylku mají vliv všechny chyby záběru ozubeného kola	[$''$] nebo [μm]	28
f_i' – kinematická úchylka jednotlivých roztečí měřeného kola	rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou převodového poměru za rozteč, tato úchylka je způsobena hlavně chybou tvaru profilu a šroubovice, je ovlivněna i úchylkou f_i'	[$''$] nebo [μm]	28
f_i' – pomalá složka odvalu (tzv. dlouhovlnná úchylka odvalu)	jedná se o střední hodnotu odvalu za otáčku ozubeného kola s F_r měřenou přes 3 rozteče, tato úchylka obvykle souvisí s házením obou ozubených kol v záběru a také s úhlem sklonu zubu	[$''$] nebo [μm]	28

Dále existuje rychlá složka odvalu, tzv. úchylka krátkých vln s označením f_k' , která vyhodnocuje tzv. rychlou chybu neboli úchylku odvalu za rozteč zmenšenou o pomalou chybu. Měří se bez obvodového házení. Získá se z rozdílu celkové kinematické úchylky za jednu otáčku F_i' a dlouhovlnné pomalé úchylky odvalu f_i' . Diagram zobrazující úchylku f_k' je možné vidět na obrázku č. 29. [24]



Obrázek 29: Úchylka odvalu za rozteč [24]

3.2. Norma DIN 3974

DIN 3974 má také dvě části, které se zaměřují přímo na přesnost šnekového soukolí. V této konkrétní situaci se zaměříme na druhou část, kde jsou uvedeny různé tolerance pro jednotlivé chyby ozubení. Na obrázku č. 30 je tabulka zaměřující se na třídu přesnosti DIN 2, kde se najde konkrétní modul a průměr přípustné tolerance pro šneka i šnekové kolo. Získané hodnoty se podle geometrického průměru přepočítají. Tím získáme výsledek vhodný například pro DIN třídy 2. [25]

Seite 3
DIN 3974-2:1995-11

Tabelle 3: Toleranzen für Qualität 2 in μm

Modul m_s, m_x in mm	Abweichung F_{α}	Mittlenkreisdurchmesser d_m in mm								
		über 10 bis 50	über 50 bis 125	über 125 bis 280	über 280 bis 560	über 560 bis 1000	über 1000 bis 1600	über 1600 bis 2500		
über 0,5 bis 2	2,0	f_p	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,5	3,5	
		f_{p2}	1,5	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	3,0	
		$F_{\alpha 2}$	4,5	6,0	7,5	8,5	10,0	11,0	12,0	
		F_r	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	6,5	7,0	
		F_i'	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	11,0	11,0	
		f_i'	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,5	3,5	
		f_u	2,5	2,5	2,5	3,0	3,5	3,5	4,0	
		f_p	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	
über 2 bis 3,55	2,5	$F_{\alpha 2}$	6,0	7,5	8,5	10,0	11,0	13,0	14,0	
		F_r	4,0	5,0	6,0	6,5	7,5	8,0	8,5	
		F_i'	6,5	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	
		f_i'	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	
		f_u	2,5	2,5	3,0	3,5	3,5	3,5	4,0	
		f_p	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,5	
		$F_{\alpha 2}$	6,0	8,0	9,5	11,0	12,0	14,0	15,0	
		F_r	4,5	6,0	6,5	7,5	8,5	9,0	10,0	
über 3,55 bis 6	3,5	F_i'	7,5	9,0	10,0	11,0	13,0	14,0	15,0	
		f_i'	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	4,5	4,5	
		f_u	3,0	3,5	3,5	3,5	4,0	4,5	4,5	
		f_p	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,5	3,5	
		$F_{\alpha 2}$	6,5	8,5	10,0	12,0	13,0	15,0	16,0	
		F_r	5,5	6,5	7,5	8,5	9,0	10,0	11,0	
		F_i'	8,5	10,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	
		f_i'	4,5	4,5	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5	
über 6 bis 10	4,5	f_u	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0	5,5	
		f_p	3,0	3,0	3,5	3,5	3,5	4,0	4,5	
		$F_{\alpha 2}$	7,0	9,0	11,0	12,0	14,0	16,0	17,0	
		F_r	6,0	7,5	8,5	9,5	10,0	11,0	12,0	
		F_i'	10,0	12,0	13,0	15,0	16,0	17,0	19,0	
		f_i'	6,0	6,0	6,5	6,5	6,5	7,0	7,5	
		f_u	4,5	5,0	5,0	5,5	6,0	6,0	6,0	
		f_p	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	4,5	5,0	
über 10 bis 16	6,0	$F_{\alpha 2}$	7,5	10,0	12,0	13,0	15,0	17,0	19,0	
		F_r	7,5	8,5	9,5	11,0	12,0	12,0	13,0	
		F_i'	12,0	13,0	15,0	16,0	18,0	19,0	21,0	
		f_i'	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,5	8,5	
		f_u	6,5	7,0	7,0	7,5	7,5	7,5	8,0	
		f_p	5,0	5,5	5,5	6,0	6,0	6,0	6,0	
		$F_{\alpha 2}$	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	
		F_r	8,5	9,5	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	
über 16 bis 25	7,5	F_i'	14,0	16,0	18,0	19,0	21,0	22,0	24,0	
		f_i'	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	
		Abweichung $F_{\alpha 2}$								
		Meßlänge l in mm	15	25	45	75	125	200	300	
		Axialmodul m_x in mm	über 0,5 bis 2	über 2 bis 3,55	über 3,55 bis 6	über 6 bis 10	über 10 bis 16	über 16 bis 25	über 25 bis 40	
		Zähnezahl der Schnecke z_1	1	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	4,5	6,0
			2	2,0	2,0	3,0	3,5	4,5	6,0	7,0
			3 und 4	2,0	2,5	3,5	4,5	5,5	7,0	8,5
5 und 6	2,5		3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0		
über 6	3,0		3,5	4,5	6,0	7,5	8,5	11,0		

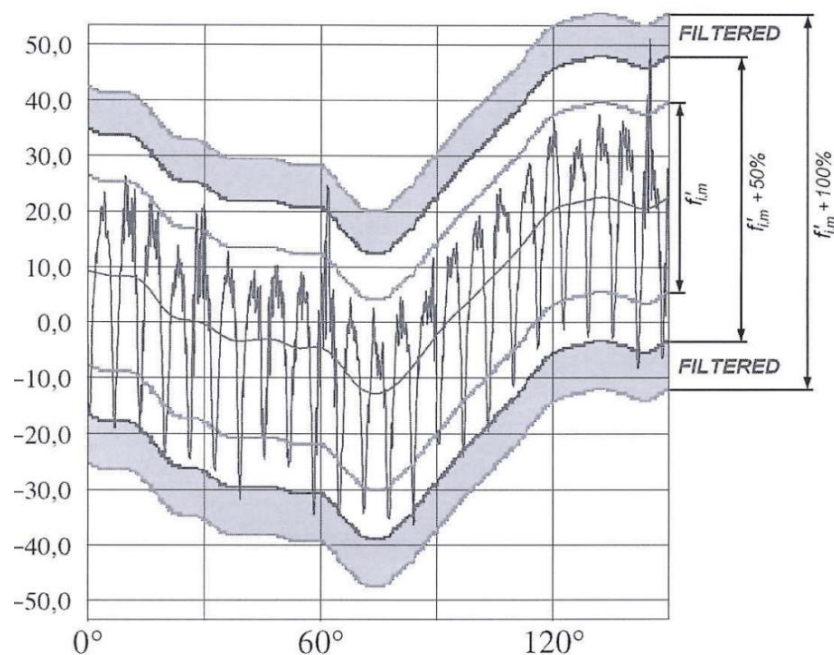
Obrázek 30: Ukázka tabulky z normy DIN 3974-2 [25]

3.3. Rozšířené úchytky v softwaru od firmy Geartec.cz

Firma Geartec.cz používá ještě další úchytky využívané u metody jednobokého odvalu. Jedná se o úchytky $f'_{i,m}$ a $f'_{i,max}$, které úzce souvisí s úchytkou f'_i . Úchytkou $f'_{i,m}$ je průměrná (střední) hodnota všech dílčích kinematických úchytek (f'_i) odolná vůči lokálním úchytkám některých zubů. Naopak $f'_{i,max}$ se liší od f'_i pouze v tom, že se používá tzv. signální filtr, který slouží k odstranění velkých píků v grafu. Ty jsou způsobeny různými nečistotami na zubech ozubeného kola, jako např. prach, barva atd. Signální filtr můžeme označit jako F-faktor, jehož použitý filtr se zobrazuje v naměřeném protokolu. Rozlišujeme 4 úrovně faktorů a jsou to [24]:

- 100% - značí žádný filtr, tudíž není měřený signál vůbec filtrován
- 75% - nízká citlivost filtru
- 50% - střední citlivost filtru
- 25% - vysoká citlivost filtru (chyby překračující střední hodnotu o více než 25%, jsou odfiltrovány)

F-faktor je stupeň velice jemné filtrace, který odstraňuje chyby v protokolu. Úkolem je zjistit nedostatky měřeného signálu a následně se jej odfiltrovat s určitou citlivostí filtrů. Podle zvoleného filtru se hodnoty vyselektují. Protokol s 50% filtrem můžeme vidět na obrázku č. 31. V dalším kroku lze odečíst úchytky F'_i , f'_i a f'_k z grafu. [24]



Obrázek 31: Protokol s 50% F-faktorem [24]

4. Představení společnosti Geartec.cz, s.r.o.

Firma Geartec.cz, s.r.o., jediná v České republice zaměřená na metodu jednobokého a dvoubokého odvalu, vznikla roku 1998. Podnik vyrábí ojedinělé stroje s vysokou kvalitou zaměřující se na individuální požadavky a přání každého zákazníka a spolupracuje také se zahraničními klienty. V této firmě dokážou testovat všechny typy ozubených kol. V současnosti firma spolupracuje s českými i se zahraničními univerzitami pro zlepšení kvality strojů, a tak je schopna zlepšovat a testovat nové produkty. Firma vyvinula a prodala více jak 150 kontrolních zařízení. Nejpoužívanější a nejžádanější můžeme považovat stroje pod označením GTWG 400, 600 a 700. Firma se také zaměřuje na inovaci starých strojů, např. zařízení Klingelnberg, Gleason, Mahr, Hommel, Maag a jiné. Ukázky stroje před generální opravou a po ní lze vidět na obrázcích č. 32 a 33. [26]



Obrázek 32: Stroj před generální opravou [27]

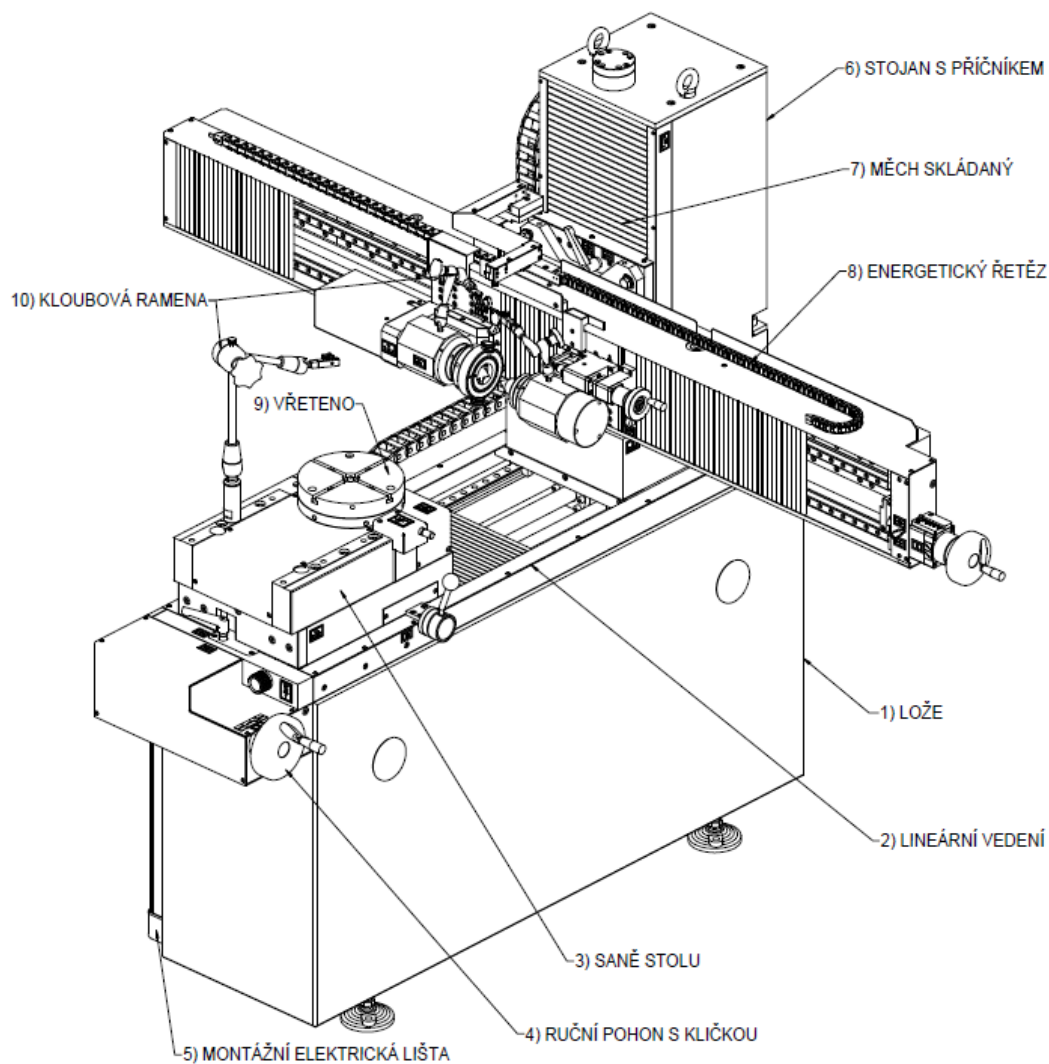


Obrázek 33: Stroj po generální opravě [27]

5. Stroj GTWG 600

V této diplomové práci byla praktická část měřena na inspekčním stroji GTWG 600, který je určen pro metodu jednobokého odvalu se šnekovým soukolím, v ojedinělých případech kuželových soukolí. V tomto případě představuje hnací osu šnek a hnanou šnekové kolo. V hnací i hnané ose jsou zabudovány snímače vyhodnocující měření. Obrázek č. 34 popisuje jednotlivé části stroje, jehož konstrukce je postavena na základové desce z granitu. [4, 19]

GTWG 600 má osovou vzdálenost ve vodorovném směru od 0 do 400 mm, ve svislé poloze se šnek výškově posouvá od 0 do 250 mm. Na měření se používá program přímo od firmy Geartec.cz, s.r.o. Na tomto přístroji lze použít šneková kola až do průměru 600 mm s maximální hmotností 200 kg. U šneku se může použít průměr až 100 mm s délkou 500 nebo 1000 mm s jeho maximální vahou 10 kg. [4, 19]



Obrázek 34: Stroj GTWG 600 [19]

6. Speciální měřicí jednotka GTM

Měřicí jednotka GTM byla vyvinuta firmou Geartec.cz, s.r.o. Slouží pro měření rotační přesnosti stolů, vřeten atd. Jedná se o sestavu, díky níž dokážeme určit přesnost snímače zabudovaného ve stole. Aby mohl GTM správně fungovat a vyhodnocovat, potřebuje následující příslušenství zobrazené na obrázku č. 35 a to [28, 29]:

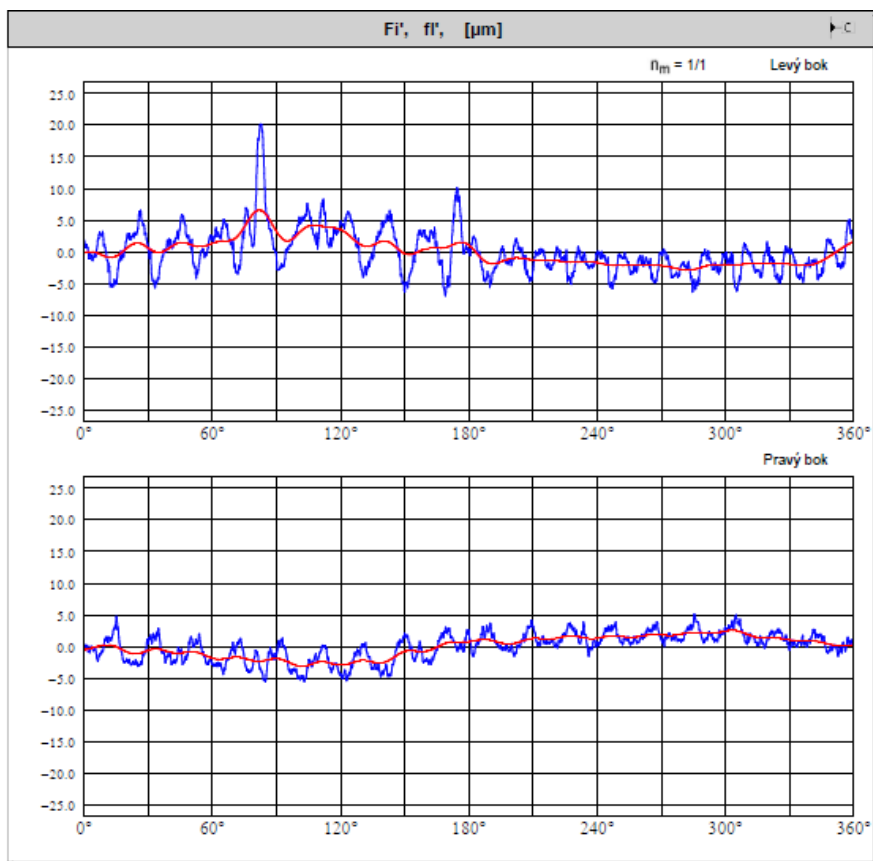
- Speciální průmyslový počítač
- Přesné rotační snímače (měřicí hlava)
- (Přesné lineární snímače – nejsou na obrázku)
- Měřicí software



Obrázek 35: Speciální měřicí jednotka GTM [28]

6.1. Měřicí software GTM

Měřicí software, který je součástí měřicí jednotky GTM, slouží pro vyhodnocení přesnosti snímačů a dokáže změřit např. celkovou kinematickou úchylku, jednotlivou kinematickou úchylku, kruhovitost, nepřesnost upnutí atd. Také je schopen zkompenzovat výsledky a měřit tak bez chyb snímačů nebo umí lokalizovat chyby, např. na jakém konkrétním zubu se vyskytuje poškození. Na obrázku č. 36 je ukázán protokol s poškozeným zubem. [28, 29]



Obrázek 36: Protokol s poškozeným zubem

Software je uživatelsky přívětivý a lze ho otevřít v operačním systému Windows. Nevyžaduje žádné velké počítačové znalosti a dokáže komunikovat v různých jazycích. Software umí měřit úchytky jednobokého odvalu mezi snímačem ve stole a měřicí hlavou a součtové úchytky kola a šneku, také FFT analýzu, kruhovitost a excentricitu. Veškeré výsledky se řídí podle norem DIN 3974 a ISO 1328. [28,29]

Souhrn vyhodnocujících úchylek u metody jednobokého odvalu, jejichž podrobné vysvětlení je v kapitole 3, a umí jej změřit software GTM, je uveden níže [28,29]:

F_i' – celková kinematická úchylka za otáčku

f_i' – kinematická úchylka jednotlivých roztečí

f_i' – pomalá složka odvalu

f_k' – rychlá složka odvalu

j – boční vůle

a součtové úchytky kola a šneku jsou:

F_p – celková úchylka součtové rozteče

F_{pi} – jednotlivá úchylka součtové rozteče

f_u – rozdíl sousedních roztečí

F_r – radiální (obvodové) házení

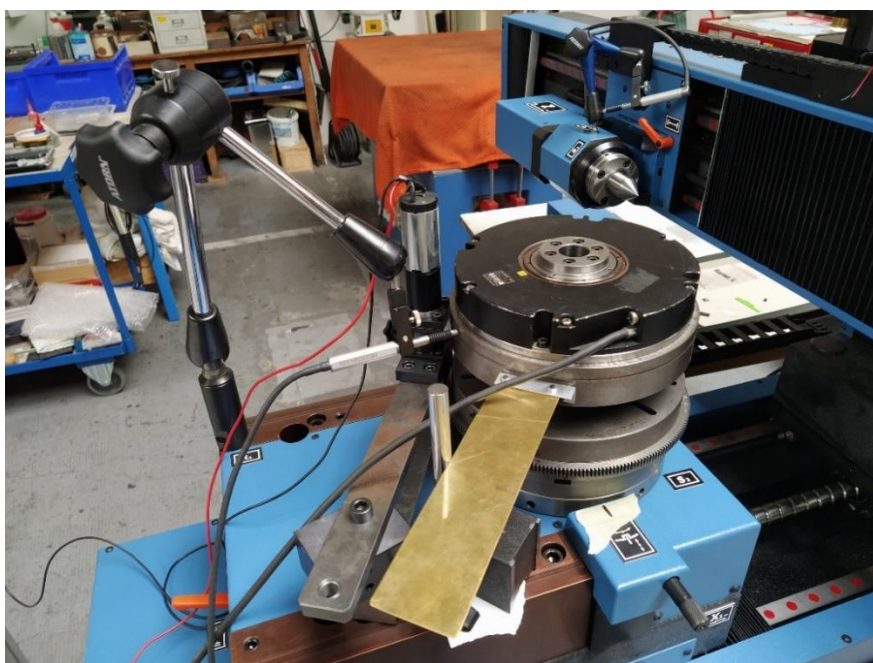
7. Popis měřicí hlavy

Měřicí hlava, podle níž jsme schopní vyrovnat snímač zabudovaný v otočném stole, byla použita před měřením šnekového soukolí. Ten má uvnitř zabudovaný inkrementální úhlový snímač řady RON 886 od firmy Heidenhain. Dále je měřicí hlava složena z určitých částí tak, aby se dokázal točit se stolem a zároveň se zastavil pomocí planžety o tyč připevněnou magnetem ke stolu. Na nehybné části se dotýkají dotyková měřidla (obrázek č. 37), která získávají hodnoty úchylek. Pro pohyblivou část je uvnitř zavedeno ložisko.

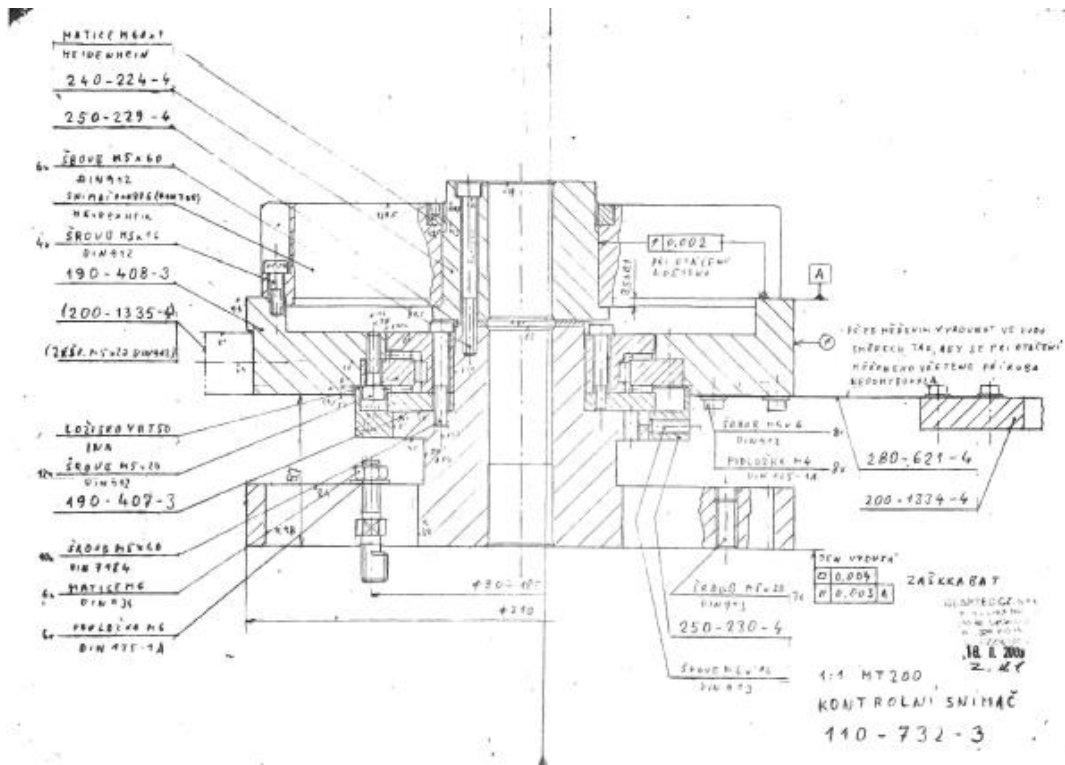


Obrázek 37: Dotyková měřidla [30]

Měřicí hlavu považujeme za téměř dokonalou, tudíž slouží jako etalon. Ten se nasadí na měřicí stůl, jak je vidět na obrázku č. 38, a pomocí dotykových měřidel se změří přesnost snímače zabudovaného ve stole, konkrétně úhlového snímače MRP 8080. Tyto výsledky se následně vloží do programu a díky kompenzaci výsledků lze měřit bez chyb snímače. Výkres měřicí hlavy je možné vidět na obrázku č. 39 nebo v příloze č. 1.

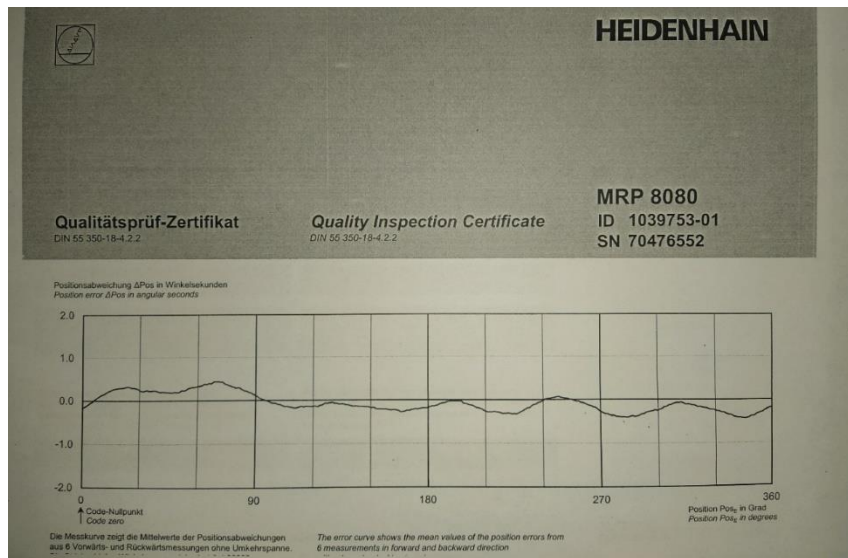


Obrázek 38: Měřicí hlava



Obrázek 39: Výkres sestavy staré měřicí hlavy

Snímač MRP 8080 je dodán firmou Heidenhain, s.r.o. Výrobce dodal protokol, který ukazuje přesnost snímače s úchytkou 0,5 arcsec. V následujícím měření si prověříme, zda přesnost snímače odpovídá dodanému protokolu. Protokol od výrobce je na obrázku č. 40.



Obrázek 40: Protokol od výrobce

8. Měření šnekového soukolí

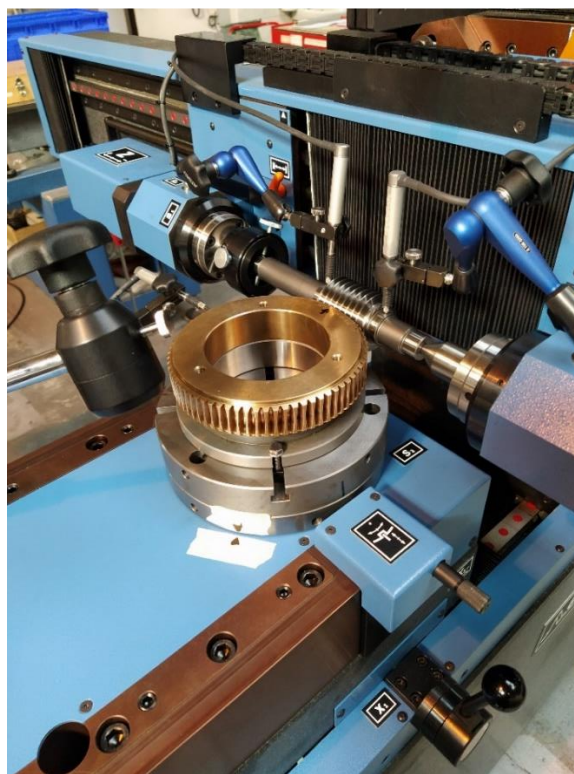
Pro měření jsem použila šnekové soukolí s těmito parametry:

Tabulka 4: Parametry šnekového soukolí

Šnek			Šnekové kolo		
Počet zubů	z	1/R	Počet zubů	z	72
Osový modul	m_x	2,120	Roztečný průměr	d_m	152,496 mm
Úhel záběru	α_n	15°	Natočení příčnicku	W	0°
Roztečný průměr	d_m	47,764 mm	Poloha šneku v ose y	M'_y	14 mm
Osová vzdálenost	a'	100 mm	Poloha šneku v ose z	M'_z	69 mm
Rychlost otáčení	-	50 rpm	Brzdící moment	-	2 Nm

8.1. Příprava měření

V prvním kroku je nutná příprava měření. Ta spočívá v připevnění šneku mezi hroty a šnekové kolo na stůl přístroje, ve kterém je umístěn snímač MRP 8080. Poté je potřeba vyrovnat šnekové kolo pomocí číselníkového úchylkoměru s přesností 0,01 a 0,001 milimetrů. Díky vyrovnání můžeme tak předejít velkému obvodovému házení. Na obrázku č. 41 je šnekové kolo a šnek. Po celou dobu je měření vyhodnocováno přes dotyková měřidla, která zaznamenávají přesnost ozubení.



Obrázek 41: Měření šnekového soukolí

Dále se v programu nastavilo několik parametrů, např. jednotky nebo nekonečný cyklus měření, který je výhodný pro získání lepších výsledků. Na obrázku č. 42 je nastavení jednotek a tolerancí. Lze vyhodnocovat buď v mikrometrech nebo v úhlových vteřinách. Tyto parametry se dají měnit v průběhu měření a slouží pro vyhodnocení protokolů. Já jsem si zvolila úhlové vteřiny. Celé měření se řídí normou DIN 3974. Následně bylo provedeno měření.

The screenshot shows the 'Measuring parameters' dialog box with the following settings:

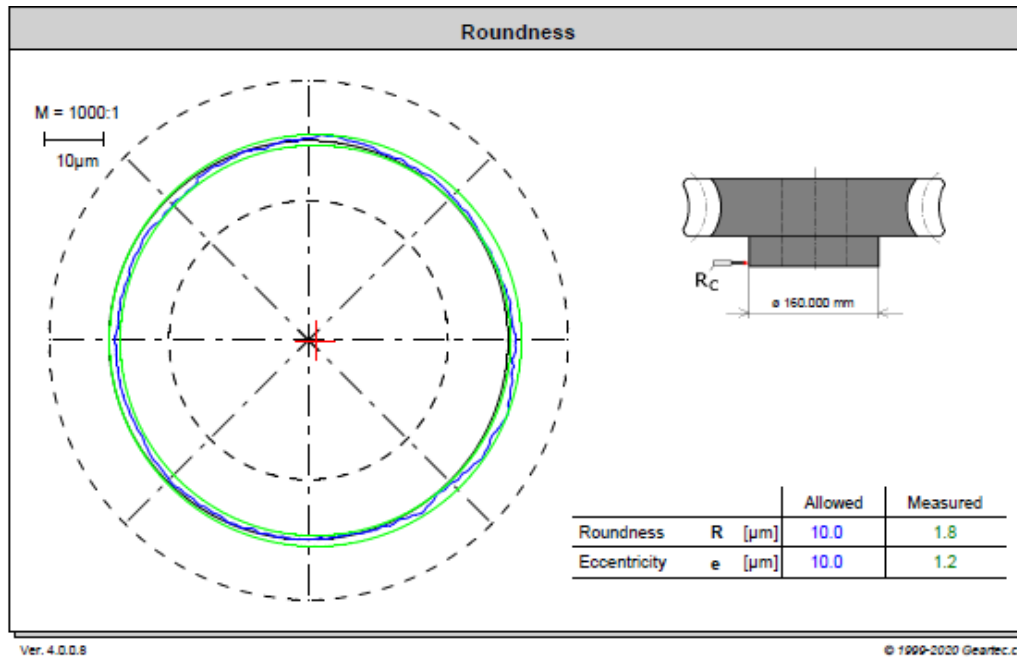
- Standard:** User Free, DIN 3974
- Deviation evaluation:** longitudinal, angular [wsec]
- Deviation values:**
 - Total composite deviation F_i : 2 / 30.0 "
 - Single flank composite dev. f_i : 2 / 13.4 "
 - Long wave component f_l : 0.0 "
 - Short wave component f_k : 0.0 "
- Backlash:** Backlash, tangential, Axial
- Deviation evaluation (Backlash):** longitudinal, angular [wsec]
- Backlash value:** j 0.020 + 0.150 mm
- Run-out deviations (unchecked):**
 - Run-out deviation F_r : 3 (5.5 μm) 3 (8.0 μm)
 - Total cumulative pitch dev F_p : 3 (8.0 μm) 3 (12.0 μm)
 - Maximum single pitch dev f_{pt} : 3 (2.5 μm) 3 (3.0 μm)
 - Adjacent pitch deviation f_u : 3 (3.5 μm) 3 (4.0 μm)

Buttons at the bottom: Cancel, Save, OK

Obrázek 42: Nastavení tolerancí a jednotek

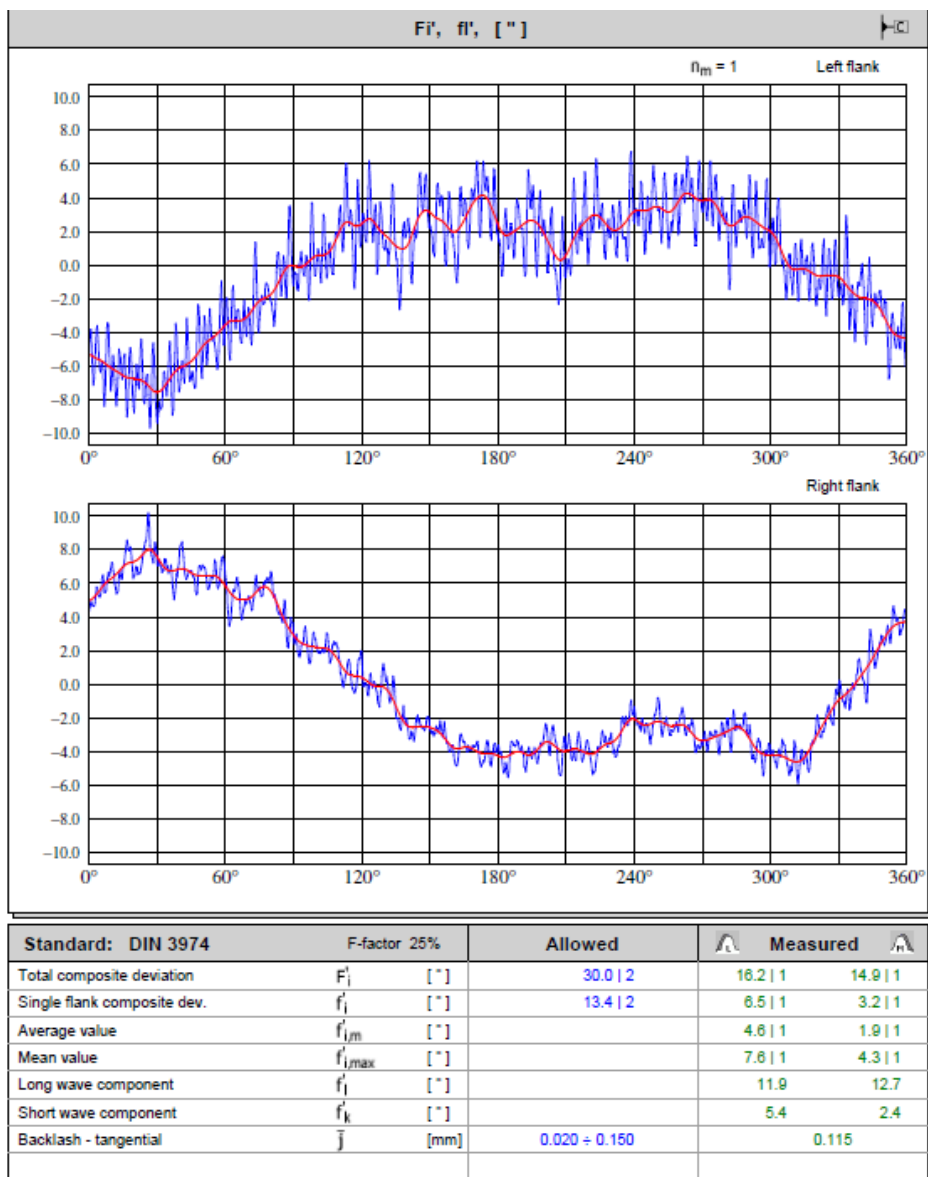
8.2. Měření 1

Provedla jsem první měření. Pro správné vyrovnaní šnekového kola jsem vyhodnotila excentricitu, která odpovídá 1,2 mikrometrům. To svědčí o tom, že ozubené kolo je dobře vyrovnané. Naměřená kruhovitosť leží v tolerančním poli, tudíž kolo nehází. V tomto protokolu na obrázku č. 43 nebo v příloze č. 2 lze vidět naměřené výsledky.



Obrázek 43: Protokol házení 1. měření

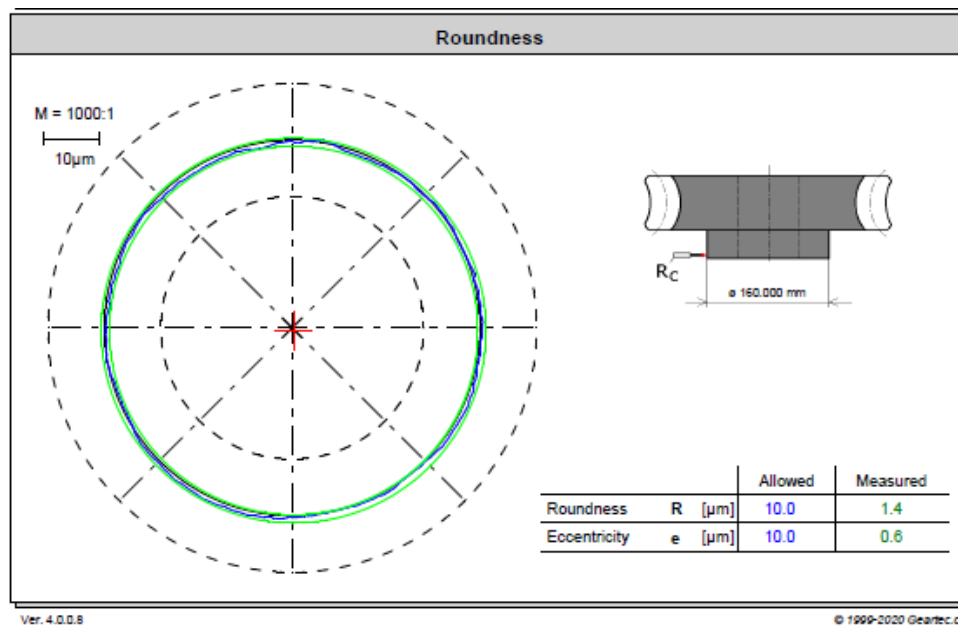
Dále měření spočívalo v tom, že jsem si zjistila několik úchylek, konkrétně mě zajímaly F_1' a f_1' šnekového soukolí. Naměřený protokol můžeme vidět na obrázku č. 44 a podrobnější protokol v příloze č. 3. Protokol je vyhodnocován v úhlových vteřinách. Celková úchylka levého boku vyšla 16,2 a pravého 14,9 arcsec. Tyto hodnoty spadají stále do DIN 1. Povolená celková úchylka sahá až k 30 úhlových vteřinám (DIN 2). Pomalá složka odvalu f_1' (tzv. dlouhovlnná úchylka odvalu) u levého boku je 11,9 a u pravého 12,7 arcsec.



Obrázek 44: Protokol jednobokého odvalu - 1. měření

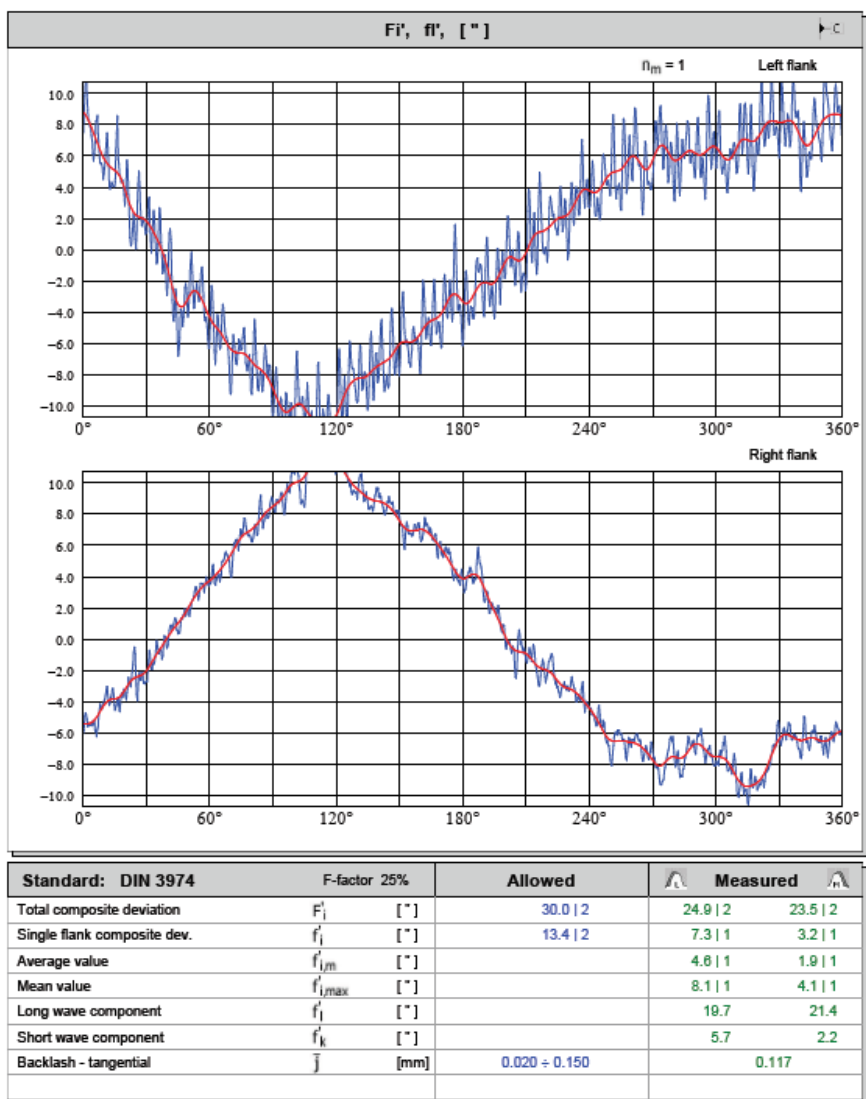
8.3. Měření 2

U druhého měření jsem si šnekové kolo povolila a otočila stůl přístroje o 90 stupňů. Dále jsem vyrovnala šnekové kolo číselníkovým úchylkoměrem na přesnost jednoho mikrometru, aby se předešlo nevyhovujícím výsledkům. V tomto případě jsem si musela dávat pozor, aby měření začalo od stejného zubu jako v prvním měření. Pomocí programu jsem spustila měření v nekonečném cyklu. V prvé řadě se vyhodnotila excentricita, aby se zjistilo správné vyrovnání šnekového kola. V tomto případě je excentricita 0,6 mikrometrů (obrázek č. 45), což na rozdíl od prvního měření vychází jako přesnější výsledek. Také kruhovitosť vyšla v tolerančním poli. Protokol lze také najít v příloze č. 4.



Obrázek 45: Protokol házení 2. měření

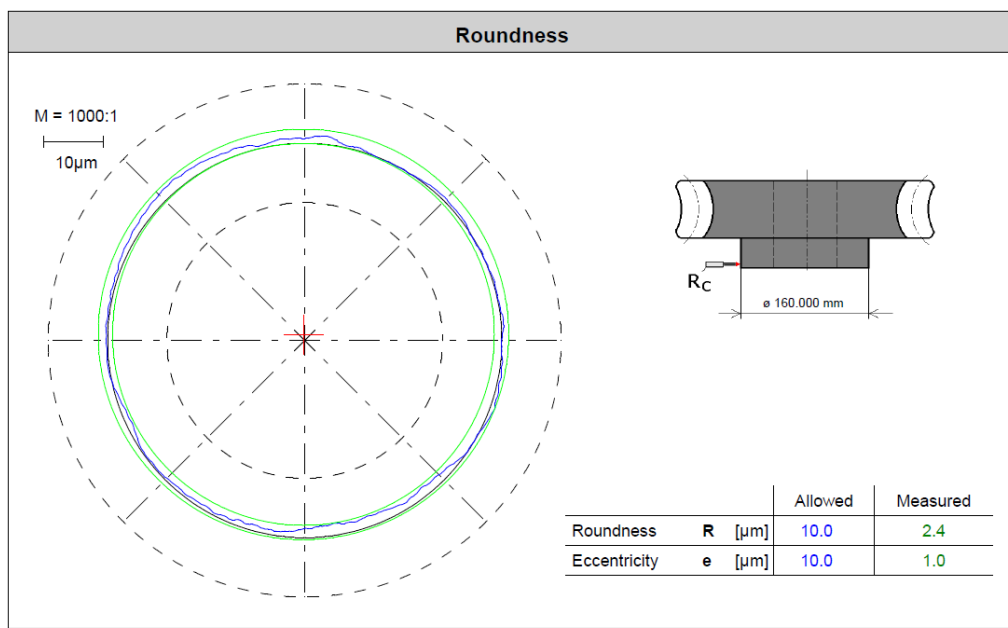
Hodnoty úchylek můžeme vidět na obrázku č. 46, kde celková úchylna F_i' u levého boku zubu odpovídá 24,9 úhlovým vteřinám, které podle normy DIN 3974 spadají do druhé kategorie. U měření pravého boku zubu výsledky dopadly lépe s hodnotou 23,5 arcsec (DIN2). Povolená naměřená hodnota celkové úchylny je 30 úhlových vteřin (DIN 2). Úchylna f_i' vyšla u levého boku 19,7 arcsec a u pravého 21,4 arcsec. Sinusový průběh měření je možné najít v příloze č. 5.



Obrázek 46: Protokol jednobokého odvalu - 2. měření

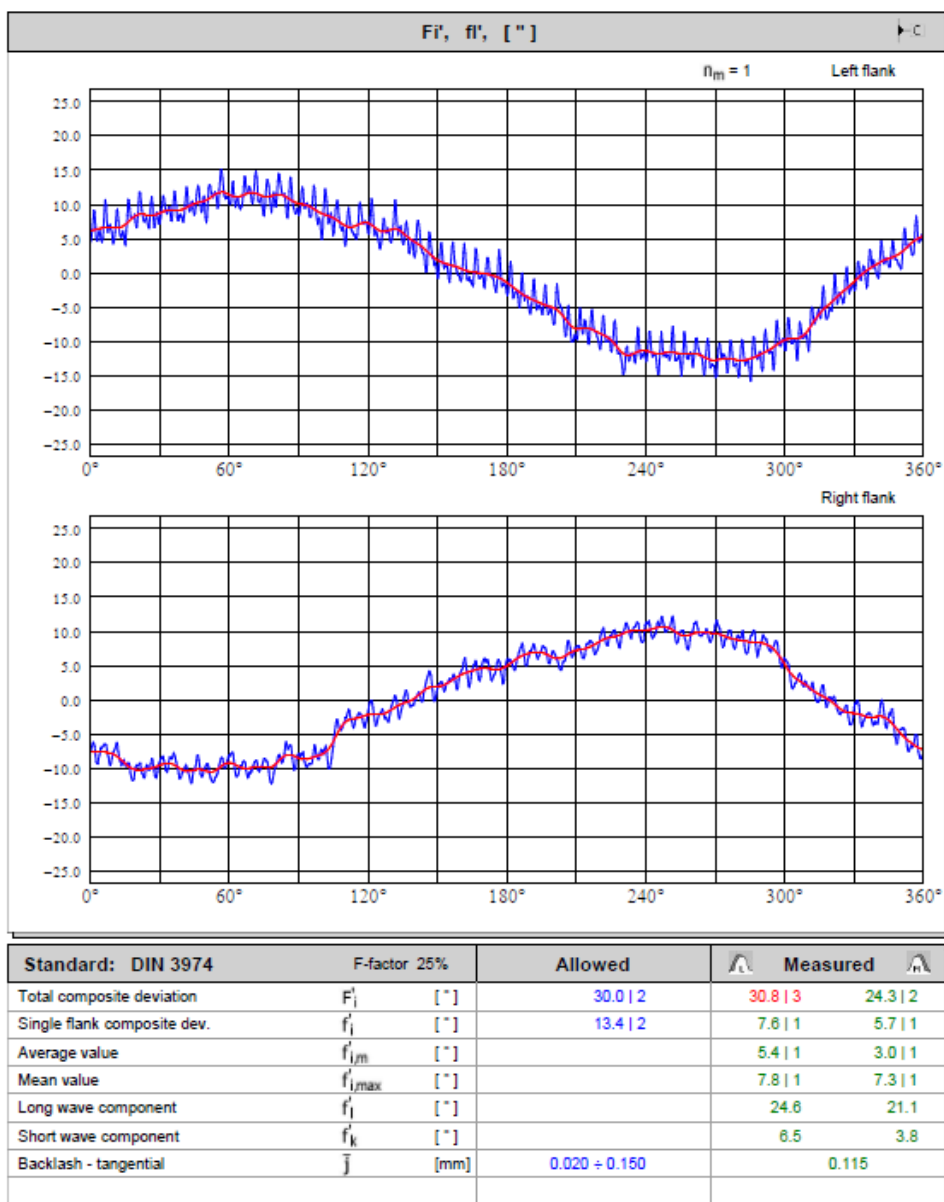
8.4. Měření 3

Další měření probíhalo podobně jako předchozí měření. Také se povolily šrouby šnekového kola a opět se otočil stůl o dalších 90°, tedy od počáteční polohy o 180°. Následně se provedlo vyrovnaní a začala jsem měřit od stejného zubu jako u prvního měření. V tomto případě jsem naměřila excentricitu s výsledkem 1 mikrometr. Dále bylo zjištěno, že kolo nehází, protože naměřený profil leží mezi dvěma soustřednými kružnicemi. Protokol je možné vidět na obrázku č. 47 nebo v příloze č. 6.



Obrázek 47: Protokol házení 3. měření

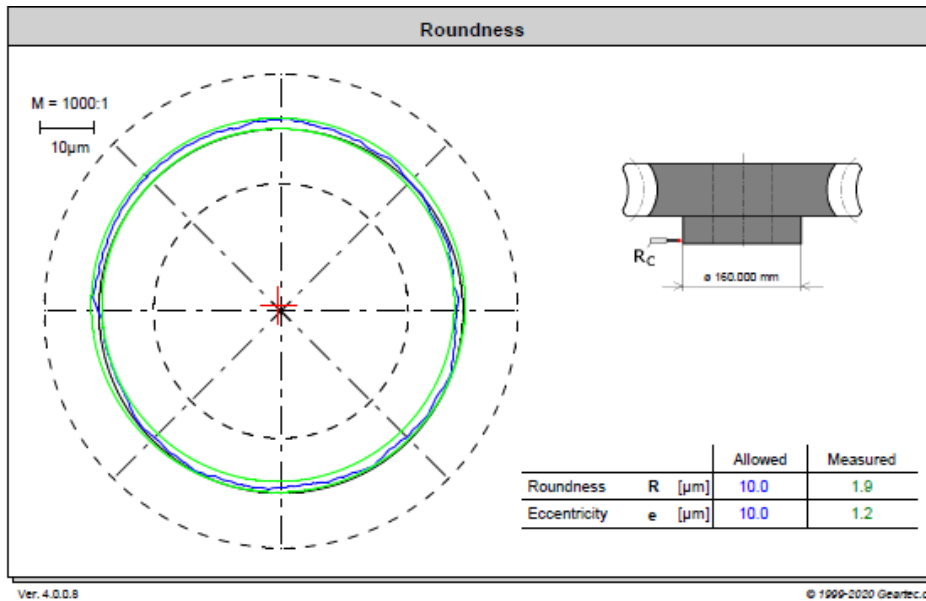
U tohoto měření jsem naměřila celkovou úchylku s hodnotami 30,8 a 24,3 úhlových vteřin patřící do kategorie DIN 2 a 3. Povolená úchylka je 30 arcsec, tudíž u levého boku neodpovídá předepsané hodnotě. Úchylka f_1' , tzv. pomalá složka odvalu vyšla s hodnotami 24,6 (levý bok) a 21,1 arcsec (pravý bok). Naměřený protokol jednobokého odvalu lze vidět v příloze č. 7 nebo na obrázku č. 48.



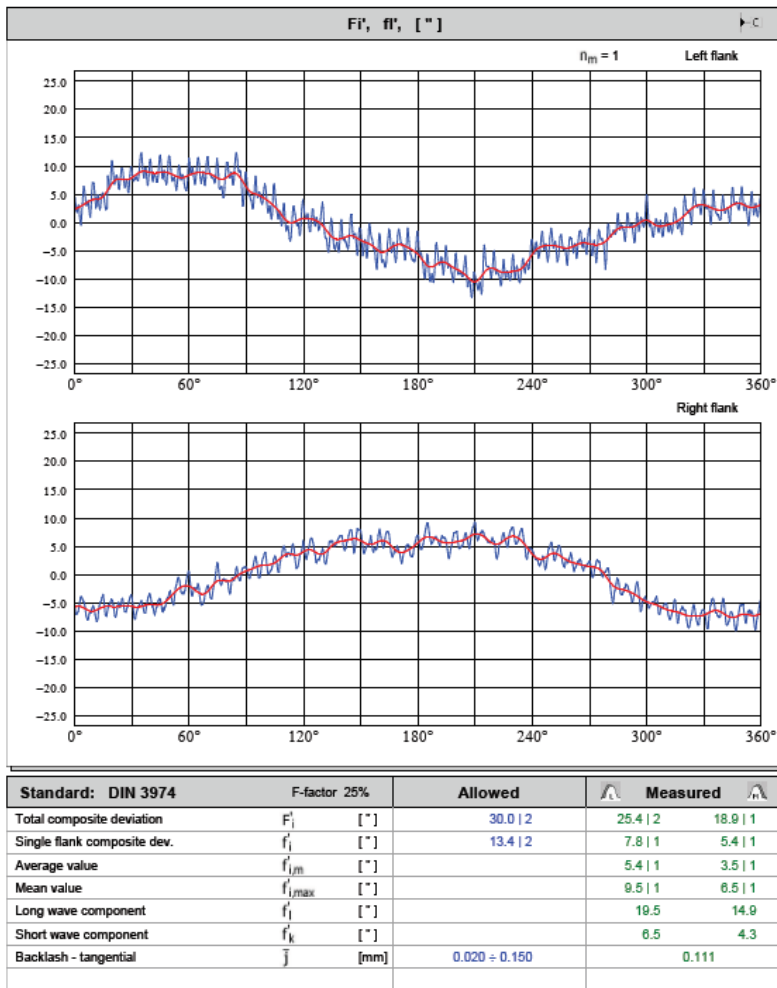
Obrázek 48: Protokol jednobokého odvalu - 3. měření

8.5. Měření 4

U posledního měření byl stůl otočen celkem o 270 stupňů od počátečního nastavení a měřen opět od stejného zubu. Šnekové kolo bylo dobře vyrovnáno, protože výsledek excentricity je 1,2 mikrometru. Kruhovitost je také vyhovující. U celkové úchytky levého boku zubu výsledky vyšly s hodnotou 25,4 úhlových vteřin (DIN 2), což odpovídá předepsané hodnotě 30 arcsec. Výsledek pravého boku dosáhl hodnoty 18,9 arcsec, která se řadí do DIN 1. Úchytku f'_i jsem naměřila s hodnotami u levého boku s 19,5 a u pravého boku s 14,9 arcsec. Naměřené výsledky můžeme vidět na obrázcích č. 49 a 50. Podrobnější protokol z jednobokého odvalu je možné vidět v příloze č. 9 a naměřenou excentricitu v příloze č. 8.



Obrázek 49: Protokol házení 4. měření



Obrázek 50: Protokol jednobokého odvalu - 4. měření

8.6. Shrnutí

Pro přehlednost jsem uvedla naměřené výsledky úchylek do tabulky.

Tabulka 5: Shrnutí naměřených výsledků

Bok zubů Úchylky	Měření 1		Měření 2		Měření 3		Měření 4	
	levý	pravý	levý	pravý	levý	pravý	levý	pravý
F_i'	16,2 1	14,9 1	24,9 2	23,5 2	30,8 3	24,3 2	25,4 2	18,9 1
f_i'	11,9	12,7	19,7	21,4	24,6	21,1	19,5	14,9

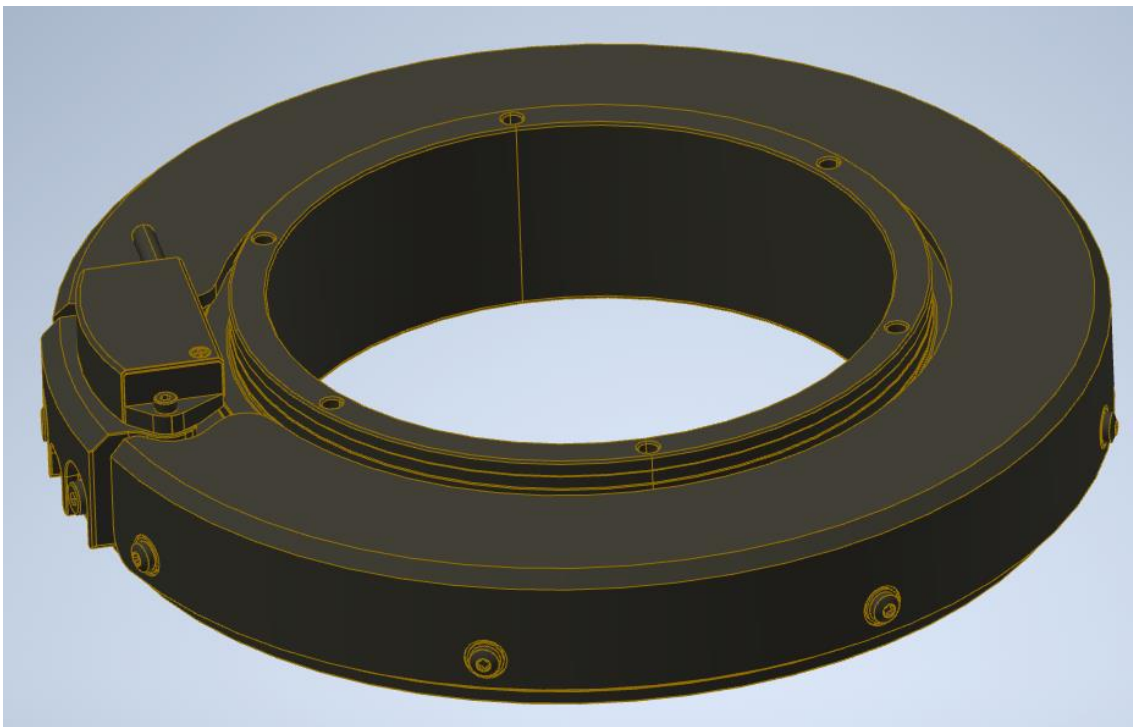
Hodnoty za svislou čárou jsou kategorie norem, do kterých spadají naměřené hodnoty.

Zjistili jsme, že naměřené výsledky otáčení kola vůči stolu nebyly stejné. To dokazuje tedy to, že snímač MRP 8080 neměří s takovou přesností, jakou uvádí protokol od výrobce. To znamená, že jednotlivá měření se mohla lišit nanejvýš o 0,5 arcsec. Podle tabulky č. 5 jsou maximální rozdíly hodnot f_i' u levého boku 12,7 arcsec a u pravého boku 8,7 arcsec. O těchto faktech se můžeme přesvědčit v přílohách 2–9. Na závěr můžeme konstatovat, že protokol od výrobce neodpovídá realitě, což potvrzuje tezi, že snímač zabudovaný ve stole ovlivňuje výsledky. Proto firma Geartec.cz, s.r.o. používá rotační měřicí hlavu, která dokáže zjistit chybu snímače ve stole, a tak zkompenzovat výsledky. Tento proces odstraňuje nepatrné vlivy snímače, které už nejdou seřídit. Kvůli tomu, že je měřicí hlava stará a hodně těžká, vymyslela jsem nové konstrukční řešení popsané v následující kapitole.

9. Konstrukční řešení měřicí hlavy

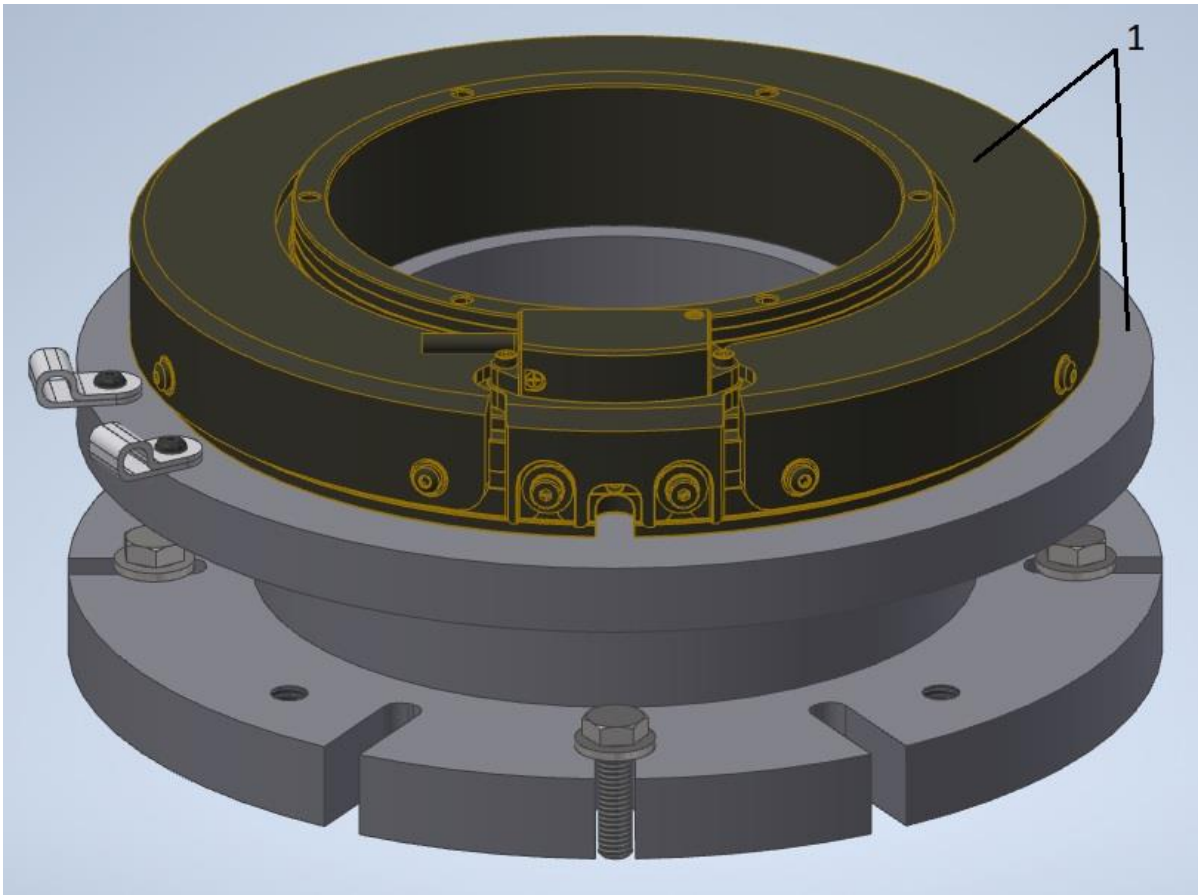
Měřicí hlavu jsem se rozhodla zoptimalizovat kvůli jeho hmotnosti, stáří a zlepšení jeho přesnosti. Použila jsem úhlový snímač MRP 8080, který je možné vidět na obrázku č. 51 ve 3D modelu. Výrobce zaručuje měření s přesností na 1 úhlovou vteřinu a tyto snímače jsou dobrou kombinací úhlového snímání a velmi přesných válečkových ložisek. To je určitou výhodou pro lepší manipulaci a přesnost rotačních os oproti starším modelům, které právě ložiskem nedisponují. Dále má v sobě také zabudovaný čtecí enkodér na snímání úhlů. Snímač MRP 8080 se vyznačuje také výbornou opakovatelností, kompaktní a tuhou konstrukcí.

Celé konstrukční řešení jsem řešila v programu Autodesk Inventor Professional 2021.



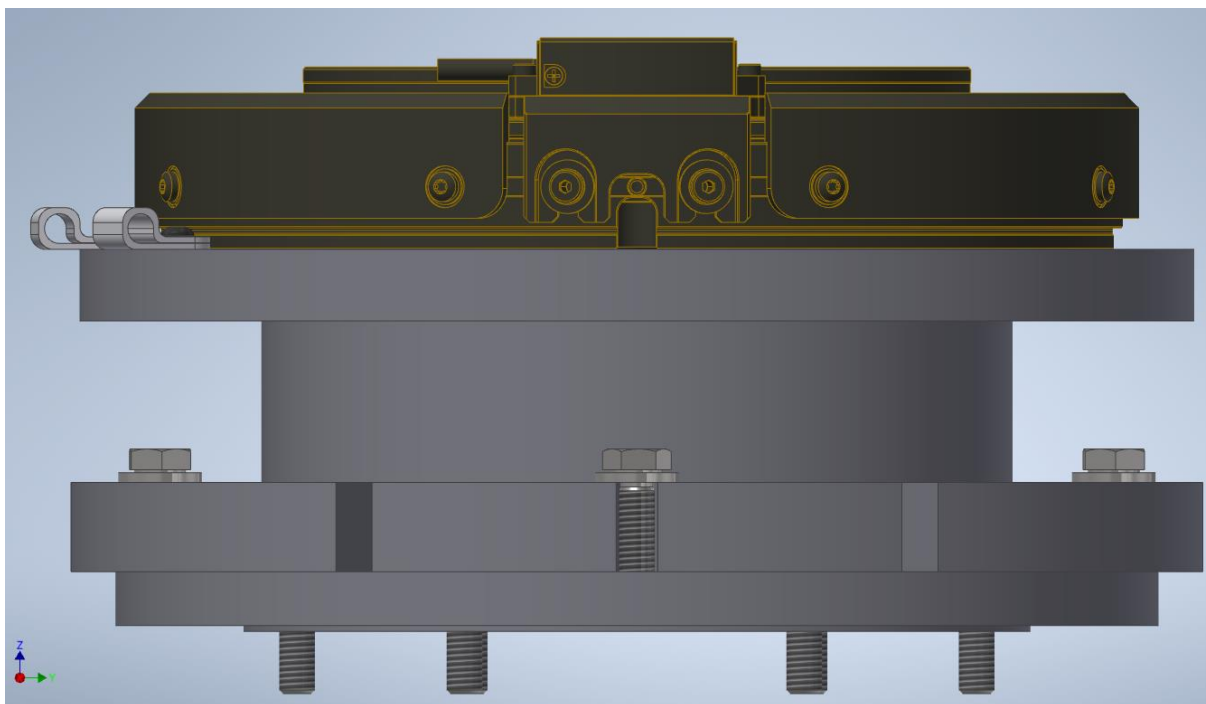
Obrázek 51: Snímač MRP 8080

Měřicí hlava je složena ze dvou základních částí, a to z části rotační a nepohyblivé. Pro představu je nepohyblivá část na obrázku č. 52 zobrazena pod číslem 1. Jedná se vlastně o úhlový snímač a o přírubu, na které se pomocí dotykových měřidel zjišťují veškeré nepřesnosti. Jedinou pohyblivou částí v úhlovém snímači je tzv. rotační prstenec, který se točí a díky čtecímu enkodéru dostáváme hodnoty úhlového natočení a počet otáček. Dalšími rotačními součástmi jsou dvě příruby, kdy jedna slouží k vystředění a ta druhá k upnutí na stůl přístroje. Nakonec jsem přidala dvě plastové příchytky, které přidržují kabel úhlového snímače. První návrh můžeme vidět na obrázku č. 52.

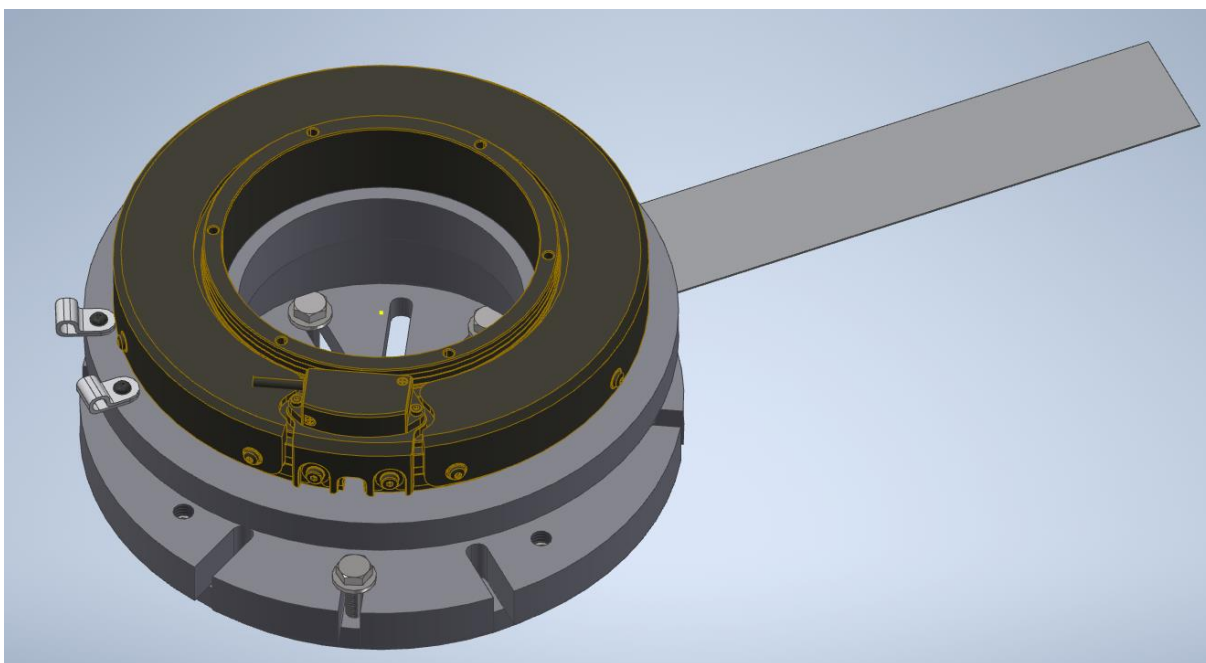


Obrázek 52: Návrh měřicí hlavy č. 1

Pro přichycení menších průměrů stolů, respektive vřeten jsem vytvořila další přírubu. Tuto změnu lze vidět na obrázku č. 53. Nakonec jsem vymyslela planžetu a tyč sloužící k zamezení rotačního pohybu určitých částí měřicí hlavy vyobrazených na obrázku č. 54. Ty se zastaví pomocí tyče, která je přichycená na saních stolu prostřednictvím magnetu. Zabránění rotačního pohybu slouží pro dotyková měřidla, která vyhodnocují celé měření.

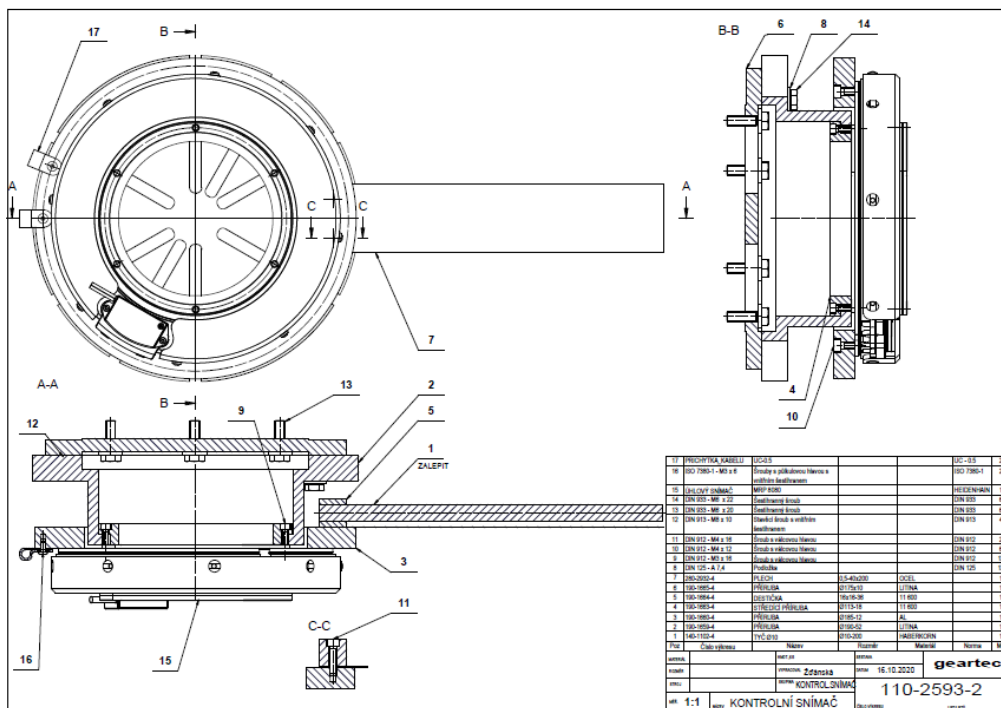


Obrázek 53: Návrh měřicí hlavy č. 2

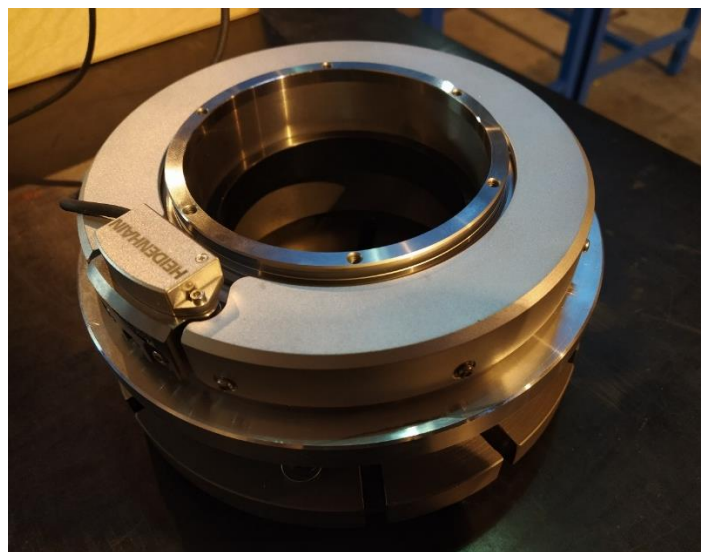


Obrázek 54: Návrh měřicí hlavy č. 3

Oproti původní měřicí hlavě jsem dokázala snížit hmotnost, proto bude jednodušší použít zoptimalizovanou hlavu i na svislé osy strojů. Druhou výhodou je, že se s ní dobře manipuluje a má vyšší přesnost. Vymodelovanou sestavu jsem nechala vyrobít (výkres na obrázku č. 55 nebo příloha č. 10) a v následující kapitole ověřím, zda optimalizace měřicí hlavy byla ke prospěchu. Kombinace velmi přesného snímače od firmy Heidenhain a celkové snížení hmotnosti by měla sloužit k tomu, aby naměřené výsledky byly přesnější. Vyrobená měřicí hlava ve smontovaném stavu lze vidět na obrázku č. 56.



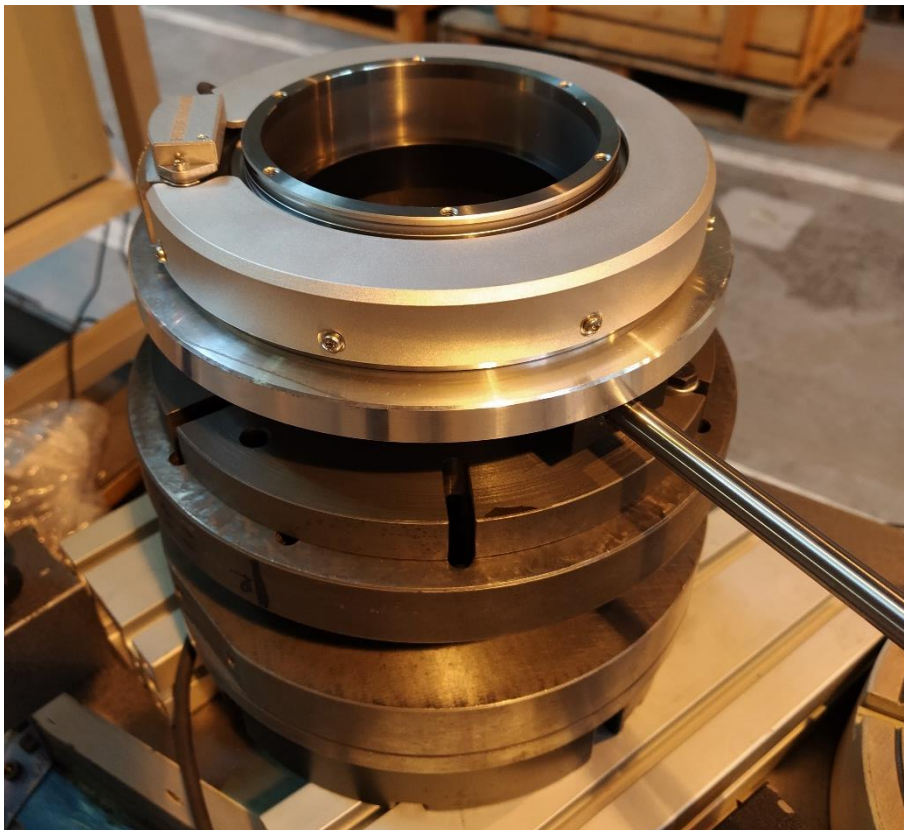
Obrázek 55: Výkres sestavy nové měřicí hlavy



Obrázek 56: Smontovaná měřicí hlava

10. Ověření měřicí hlavy

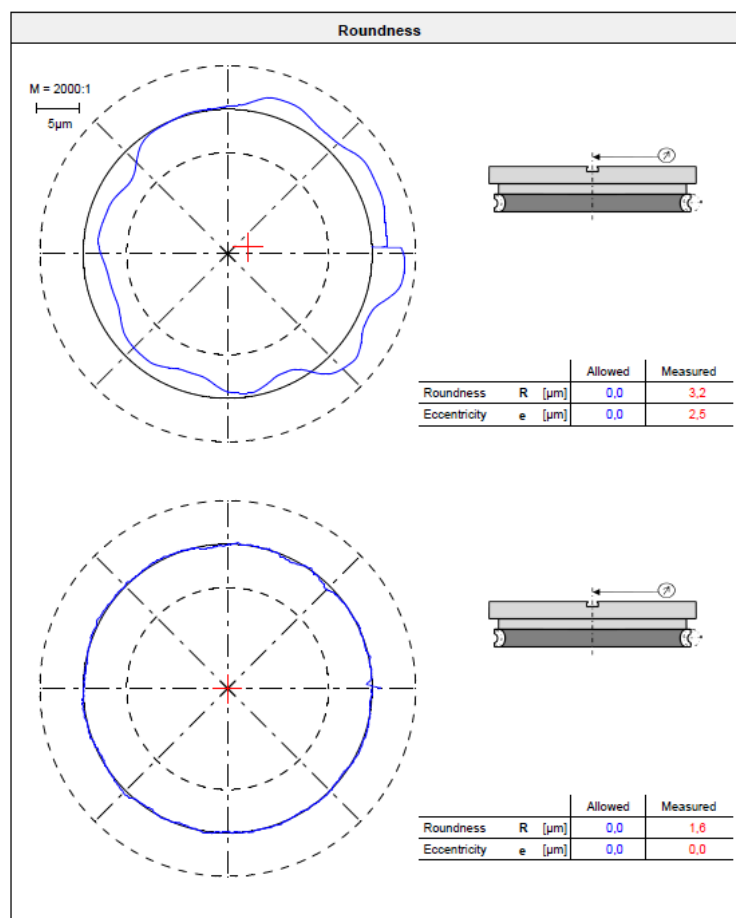
Měřicí hlavu jsem testovala na speciální měřicí jednotce GTM. Postup měření byl podobný jako u šnekového soukolí, kde je v první řadě nutné hlavu upevnit na stůl přístroje. V tomto případě se měřicí hlava upevnila na původní model a vyrovnala se. To se provádí pomocí číselníkového úchylkoměru s přesností jednoho mikrometru. Poté je potřeba nastavit v programu několik parametrů, jako např. nekonečný cyklus měření atd. Nakonec následuje měření jako takové. Na obrázku č. 57 je možné vidět měřicí hlavu připevněnou na původní model.



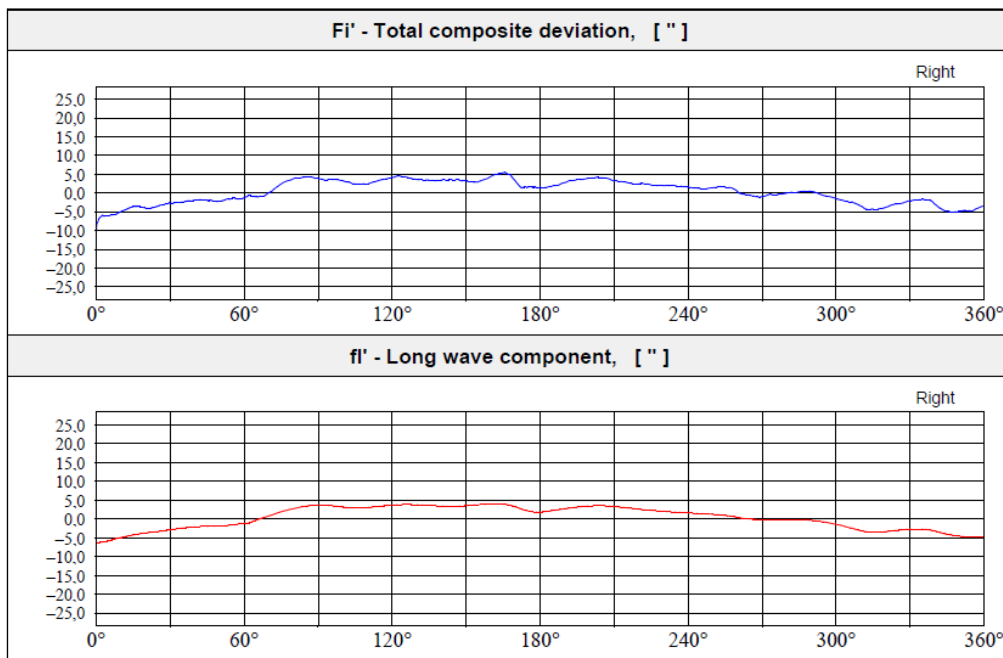
Obrázek 57: Měření hlavy

10.1. Kontrola měřicí hlavy

Po nastavení programu jsem spustila měření. Jako první jsem si vyhodnotila excentricitu, která činí 2,5 mikrometru (obrázek č. 58 horní část). To svědčí o tom, že by hlava mohla být lépe vyrovnaná. Výsledky ukazují také velké axiální házení (2,5 mikrometru). Výstupky na kružnici jsou způsobené přitažením šroubů k základnímu tělesu. V dolním sektoru protokolu jsou uvedeny hodnoty původního modelu, který je vyrovnan dokonale. Protokol lze zpozorovat na obrázku č. 58 a v příloze č. 11. Celková úchylka F_i' vyšla 12,4 arcsec a f_i' odpovídá 10,3 arcsec. Naměřené protokoly přesnosti hlavy je možné vidět na obrázku č. 59 a v příloze č. 12.



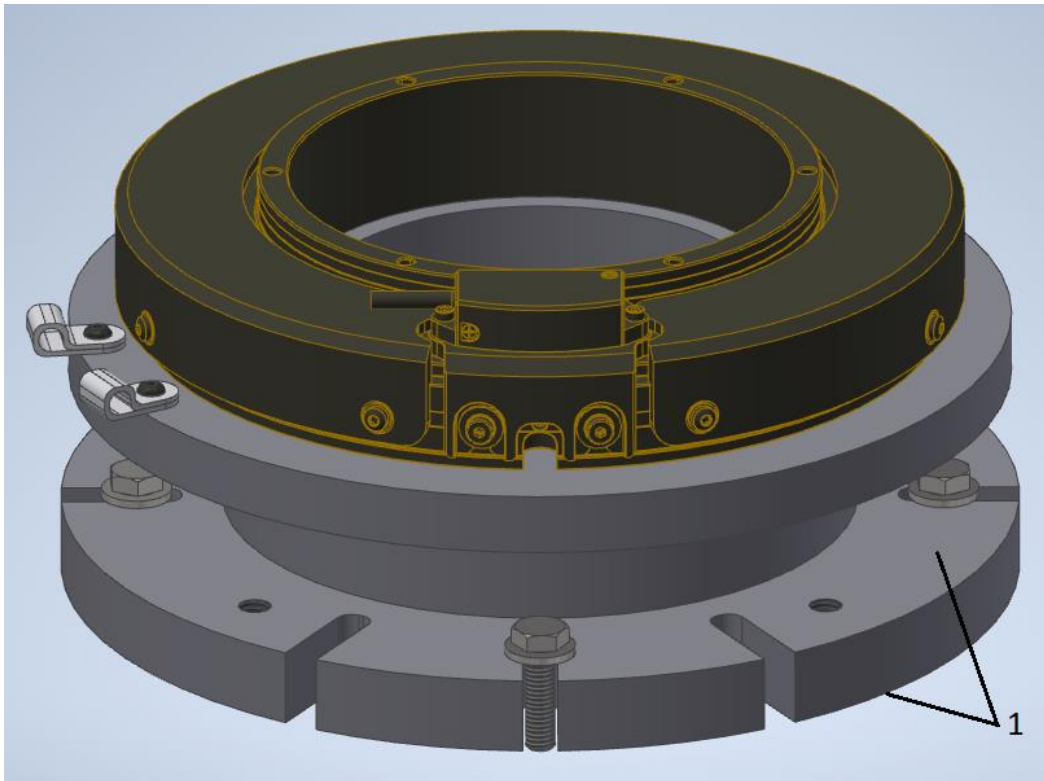
Obrázek 58: Protokol házení měřicí hlavy



Obrázek 59: Protokol přesnosti měřicí hlavy

11. Vyhodnocení

Výsledky ukazují, že optimalizovaná měřicí hlava má velké axiální (2,5 mikrometru) i obvodové házení. Maximální vyhovující hodnota axiálního házení je 1 mikrometr, u obvodového 15 mikrometrů. Naopak naměřené hodnoty úchylek, navzdory velkému házení, ukazují nadějně výsledky s hodnotami $F_i' = 12,4$ arcsec a $f_i' = 10,3$ arcsec. Při hodnotě f_i' se zjistilo, že při výrobě nebyla dodržena rovnoběžnost plochy základní příruby (0,03 mm), přičemž požadovaná hodnota je 0,003 mm. Protokol úchylek je možné zpozorovat na obrázku č. 59. V protokolu (obrázek č. 58) se můžeme přesvědčit o tom, že k házení hlavy došlo. Úchylka f_i' je toho důkazem, protože je úzce propojena s obvodovým házením. Na celkovou kinematickou úchylku F_i' mají vliv všechny chyby modelu. To potvrzuje tezi, že úchylky jsou ovlivněné velkým házením. Hlavní příčinou je výrobní chyba, která se může projevit například nekvalitně zpracovanou rovinností či rovnoběžností ploch, které jsou znázorněné na obrázku č. 60 pod číslem 1. Další příčinou může být to, že úhlový snímač MRP 8080 vložený do měřicí hlavy nebude měřit s tou jistou přesností, kterou deklaruje výrobce. Tato chyba by se projevila až při další kontrole. Kvůli omezeným časovým možnostem nešlo měřicí hlavu znovu zkontrolovat.



Obrázek 60: Nekvalitně zpracovaná rovinnost

Nyní je zapotřebí plochy měřicí hlavy znovu zaškrábat, čímž se zlepší rovinnost, a dále může firma pokračovat v kontrole. Ta by probíhala tím, že se hlava nasadí na původní model a vyhodnotí se znovu házení a úchylky. Měření by se uskutečnilo ve více polohách. Naměřené výsledky by se vložily do programu, který je umí kompenzovat. Kvůli tomu je možné odstranit nepatrné vlivy snímače, které nelze seřídit. Kompenzací lze tedy zkorigovat naměřená data, ve kterých se neprojeví chyba nepřesnosti snímače. Následně je měřicí hlava připravena na vyrovnání snímačů sloužících k měření šnekového, popř. jiného soukolí. Poté by měření probíhalo úplně stejně, jak je popsáno v této diplomové práci výše (viz kapitoly č. 8 a 10). Hodnoty úchylek, které jsou ovlivněny právě vysokými výsledky házení, vyšly i tak velmi přijatelné. Číselné hodnoty na obrázku č. 61 jsou toho důkazem.

Při použití optimalizované měřicí hlavy v nevyhovujícím stavu by se postupovalo úplně stejně, jak pro ověření její přesnosti, tak i pro samotné měření. Opět se provede měření pomocí původní měřicí hlavy v několika polohách, tím se získají různé hodnoty, které se použijí na kompenzaci výsledků. Po této činnosti lze použít novou měřicí hlavu na vyrovnání snímačů umístěných ve stole. Důsledkem je vnesení větší chybovosti kvůli velké kompenzaci.

Tolerances (F-factor 25%)			Allowed	Measured
Total composite deviation	F_i'	[""]	103,1	12,4
Single flank composite dev.	f_i'	[""]	103,1	5,4
Mean value	$f_{i,m}'$	[""]		2,1
Max value	$f_{i,max}'$	[""]		5,4
Long wave component	f_l'	[""]	103,1	10,3
Short wave component	f_k'	[""]	103,1	2,5
Backlash	j	[""]		

Obrázek 61: Vyhodnocení měřicí hlavy

Na obrázku č. 62 jsem vyfotila měřicí hlavy vedle sebe, aby měl každý představu, jak vypadá model před a po optimalizaci. Můžeme se přesvědčit o tom, že se navržená hlava zmenšila výškově i průměrově.



Obrázek 62: Optimalizovaná měřicí hlava (vlevo), hlava před úpravou (vpravo)

12. Závěr

Kontrola ozubených kol je v dnešní době velmi důležitá. Můžeme ji provést buď komunálními měřidly, kde se zjišťuje pouze jedna hodnota ze základních parametrů, nebo modernějšími způsoby. Za ně se považuje měření pomocí souřadnicové techniky nebo metody jednobokého a dvoubokého odvalu. Zmiňovanými metodami jsem se zabývala ve druhé kapitole, kde jsem uvedla jejich hlavní rozdíly a pro přehlednost také naměřené protokoly. Tato práce se hlavně zabývá kontrolou jednobokým odvalem, jejíž podrobnější vysvětlení je v první části. Dále jsem se zmínila o možných příčinách, které mohou ovlivňovat naměřené výsledky.

Firma Geartec.cz, s.r.o., se kterou byla vytvořena spolupráce, se zabývá jednobokým a dvoubokým odvalem. Proto jsem se zaměřila na jejich stroje. Tato společnost vyrábí velmi kvalitní stroje, které disponují měřicím softwarem pro zjištění různých úchylek odvalu. Tyto úchyly jsem vypsala v kapitole č. 3. Kapitola byla rozšířena o úchyly využívané přímo firmou.

Experimentální část byla zaměřena na dynamické měření přesnosti rotačních os. Touto problematikou jsem se zabývala proto, že bylo potřeba zmodernizovat měřicí hlavu, podle které se vyrovnávají snímače rotační os umístěné ve stole přístroje. Dalším důvodem, proč jsem se zabývala tímto tématem, bylo zjistit, zda snímač měří s přesností, kterou deklaruje výrobce. Ten tvrdí, že snímač měří s přesností 0,5 arcsec. V práci je uveden kompletní postup od příprav měření šnekového soukolí až po optimalizování měřicí hlavy. V první řadě jsem se zmínila o staré měřicí hlavě, podle níž se vyrovnává snímač umístěný ve stole stroje. Toto vyrovnání následně sloužilo ke změření šnekového soukolí na stroji GTWG 600. Soukolí bylo připevněno na stůl, kde se pomocí číselníkového úchytkoměru vystředilo. Provedlo se měření, u kterého jsem zjistila, že hodnoty se liší o více jak 0,5 arcsec. Kdyby snímač měřil podle přesnosti uvedené výrobcem, výsledky by se naopak měly lišit maximálně o 0,5 arcsec. Příčinou tedy je, že snímač zabudovaný ve stole neměří s přesností, jakou deklaruje výrobce v dodaném protokolu.

Kvůli hmotnosti, stáří a přesnosti snímače jsem navrhla novou měřicí hlavu, která je vybavena lepším úhlovým snímačem se zabudovaným velmi přesným válečkovým ložiskem, což oproti staršímu modelu představuje výhodu z hlediska lepší přesnosti a manipulaci s hlavou, je vhodná i pro svislé osy strojů. Po zkompletování bylo zřetelně vidět, že se hlava

zmenšila a zlehčila. S hlavou jsem provedla kontrolu. Začala jsem s připevněním hlavy na původní model a následně provedla vyrovnání číselníkovým úchylkoměrem. Nakonec jsem realizovala měření.

Smyslem této práce bylo zjistit, zda navržená hlava vedla ke zlepšení přesnosti. Naměřené výsledky ukazovaly, že došlo k velkému axiálnímu i obvodovému házení. Paradoxem ale je, že i tak vyšly slibné výsledky úchylek s hodnotami $F_i' = 12,4$ arcsec a $f_i' = 10,3$ arcsec. Důležitá je hodnota úchylky f_i' , která úzce souvisí s obvodovým házením. Na úchylku F_i' mají vliv všechny chyby. Příčinou u axiálního házení jsou příliš přitažené šrouby k základní přírubě. Naopak k obvodovému házení došlo kvůli mechanickým vadám. Ty se prokázaly přes špatně vyrobené tolerance rovnoběžnosti u základní příruby. Na výškoměru byla zjištěna hodnota 0,03 mm, přičemž výsledky měly dosahovat 0,003 mm. Další příčina může být způsobena tím, že snímač MRP 8080 neměří s přesností, kterou uvádí výrobce. Kvůli časovým možnostem jsem nemohla model znovu ověřit. To však neznamená, že se dál nebude s hlavou pracovat. Měřicí hlava byla poslána na opravu, kde se provede zaškrábání ploch a následně firma uskuteční další kontrolu. Připevnění a vyrovnání proběhne stejně jako u první kontroly. Měřicí hlava by se změřila ve více polohách. Naměřené výsledky by se zkompenzovaly a vložily do programu. Následně lze měřicí hlavu použít na vyrovnávání snímačů zabudovaných ve stole a kontrolovat tak soukolí. Naměřená nepřesnost u měřicí hlavy by neměla kvůli kompenzaci ovlivňovat výsledky soukolí. Pokud by se výsledky opět lišily více jak o 0,5 arcsec, dokazovalo by to, že snímač neměří s tou přesností, jak je uvedeno v protokolu. Při neprovedení těchto opatření a použití měřicí hlavy s mechanickými vadami by došlo k velké kompenzaci, a tudíž by se do měření vnesla větší nejistota měření.

Seznam literatury

[1] Messgenauigkeit von Einflankenprüfmaschinen für Kegelräder (Measuring accuracy of single-flank gear roll inspection machines for bevel gears) [online]. GEARTEC.CZ, Čelákovice [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://geartec.cz/software/single-flank-gear-roll/>

[2] PUEO, M., J. SANTOLARIA, R. ACERO, C. CAJAL a A. GRACIA. Universal roll testing machine for worm and worm gear [online]. Procedia Engineering, 2015, 848–855 [cit. 2020-12-27]. ISSN 1877–7058. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.569>

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

[4] GTWG 600 Inspection of worm gears by single and double flank testing machine [online]. GEARTEC.CZ, Čelákovice, 2017 [cit. 2021-01-07].

Dostupné z: <https://geartec.cz/products/worm-gear-pairs/>

[5] Frekvenční analýza [online]. Ekosoftware [cit. 2021-01-07].

Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/frekvencni-analyza>

[6] PETŘKOVSKÁ, Lenka. Technická měření a metrologie – teoretický základ (kontrola ozubených kol) [online]. Ostrava: Technická univerzita Ostrava VŠB, 2012, s. 4-11 [cit. 2020-12-28]. 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_10.pdf

[7] GTWG 200 Inspection of worm gears by single and double flank testing machine [online]. GEARTEC.CZ, Čelákovice, 2017. [cit. 2020-01-07]

Dostupné také z: <https://geartec.cz/products/worm-gear-pairs/>

- [8] ANSI/AGMA 2000-A88: Gear Classification And Inspection Handbook - Tolerances And Measuring Methods For Unassembled Spur And Helical Gears (Including Metric Equivalents). 6. King Street (USA): Copyright, March 1988.
- [9] MORAVEC, Vladimír. Konstrukce strojů a zařízení II: čelní ozubená kola: teorie – výpočet – konstrukce – výroba – kontrola. Ostrava: Montanex, 2001. ISBN 80-7225-051-5.
- [10] ČSN 01 4675 Ozubená kola: měření ozubených kol čelních s přímými zuby. Rozměr přes zuby = Gear wheels. Measurement of front gears with straight teeth. Dime over teeth.
- [11] Technická univerzita v Liberci – katedra výrobních systémů a automatizace. Souřadnicové měřicí stroje. [online] [cit. 2020-12-18] www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522
- [12] Spojení inovace a technologie Měřicí centrum pro ozubení úspěšně nahrazeno souřadnicovým měřicím strojem [online]. [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/metrologicka-reseni/strojirenstvi/wittmann.html>
- [13] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. Metrologie a řízení kvality [online]. Ostrava: Fakulta strojní VŠB – TUO, 2012, s. 91-122 [cit. 2021-01-11]. ISBN 978-80-248-2771-1. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Metrologie_a_rizeni_kvality.pdf
- [14] Snadný postup od výkresu k měření ZEISS CALYPSO [online]. [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/software/calypso.html>
- [15] ŽDÁNSKÁ, Petra. Vliv rozložení matice jmenovitých hodnot na přesnost měření kuželového ozubení na CMM. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Jan Urban.
- [16] ZEISS PRISMO Optimální pro každou měřicí úlohu [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo.html>
- [17] NENÁHLO, Čeněk. Měřicí technika v Sinsheimu. MM Průmyslové spektrum [online]. 2007, (7), 32 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/merici-technika-v-sinsheimu.html>

[18] PUEO, M., J. SANTOLARIA, R. ACERO, S. AGUADO a A. GRACIA. A new calibration guideline for worm and worm-gear rolling testers [online]. Procedia Manufacturing, 2017, 601–607 [cit. 2021-01-10]. ISSN 2351–9789.

Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.119>

[19] PŘÍSTROJ NA MĚŘENÍ ŠNEKOVÉHO SOUKOLÍ METODOU JEDNOBOKÉHO ODVALU – GTWG600. GEARTEC.CZ, Čelákovice, 2013.

[20] GMS 32 - Gear inspection machine [online]. GEARTEC.CZ, Čelákovice, 2017 [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: <https://geartec.cz/products/spur-helical-gears/>

[21] ČSN ISO 1328-1 Čelní ozubená kola – Soustava přesnosti ISO – Část 1: Definice a mezní úchytky vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola = Cylindrical gears – ISO system of accuracy – Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth. Praha: ÚTNMZ, Červenec 2015.

[22] How backlash affects gears, Elements of Metric Gear Technology (Cont.). SDP/SI [online]. Hicksville, New York [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: <https://www.sdp-si.com/resources/elements-of-metric-gear-technology/page7.php>

[23] ČSN ISO 1328-2 Čelní ozubená kola – Soustava přesnosti ISO – Část 2: Definice a mezní hodnoty dovolených úchylek relevantní k radiálním kinematickým úchytkám a informativně k obvodovému házení = Cylindrical gears – ISO system of accuracy – Part 2: Definitions and allowable values of double flank radial composite deviations. Praha: ÚTNMZ, 2014.

[24] Evaluation of single flank deviations. GEARTEC.CZ, 2010

[25] DIN 3974-2 Toleranzen für Schneckengetriebe-Verzahnungen – Teil 2: Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen. November 1995.

[26] About us [online]. GEARTEC.CZ, Čelákovice, 2017 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://geartec.cz/>

[27] RETROFITS. GEARTEC.CZ, Čelákovice, 2017. Dostupné také z: <https://geartec.cz/services/>

[28] GTM single flank inspection – hobbing machine [online]. GEARTEC.CZ. Čelákovice, 2016 [cit. 2020-12-28]. Dostupné také z: <https://geartec.cz/products/machines/>

[29] Machines – GTM [online]. GEARTEC.CZ, Čelákovice, 2017 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z:
<https://geartec.cz/products/machines/>

[30] Dotyková měřidla [online]. HEIDENHAIN [cit. 2021-01-12]. Dostupné z:
https://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty/dotykovy-meridla/

Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip jednobokého odvalu kuželového soukolí [1]	14
Obrázek 2: Princip jednobokého odvalu šnekového soukolí [4]	14
Obrázek 3: Protokol jednobokého odvalu – měřený signál	15
Obrázek 4: Protokol jednotlivých harmonických složek	15
Obrázek 5: Stroj GTWG 200 od firmy Geartec.cz, s.r.o. [7]	16
Obrázek 6: Protokol s nepřesným upnutím kontrolního kola [1]	17
Obrázek 7: Protokol s přesnějším upnutím kontrolního kola [1]	18
Obrázek 8: Protokol měření s nesoudělnými počty zubů [1]	18
Obrázek 9: Protokol s přesností snímače [1]	19
Obrázek 10: Naměřené výsledky snímače [1]	19
Obrázek 11: Protokoly s různou rychlostí měření [1]	20
Obrázek 12: Protokoly s nevhodně upnutým šnekem	21
Obrázek 13: Protokoly s dobře upnutým šnekem	21
Obrázek 14: Měření míry přes válečky [8]	23
Obrázek 15: Souřadnicový měřicí stroj Prismo [16]	25
Obrázek 16: Jednoúčelový stroj Klingelnberg P40 [17]	25
Obrázek 17: Protokol z klasické rozměrové kontroly	26
Obrázek 18: Protokol z dotykového měření [15]	27
Obrázek 19: Stroj na jednoboký odval – GTWG 600 [19]	29
Obrázek 20: Stroj na dvouboký odval – GMS 32 [20]	30
Obrázek 21: Princip dvoubokého a jednobokého odvalu [8]	30
Obrázek 22: Protokol jednobokého odvalu	31
Obrázek 23: Kompatibilní stroj pro kontrolu šnekového soukolí [2]	32
Obrázek 24: Úchylky okótované na ozubeném kole [21]	33
Obrázek 25: Úchylky sousedních roztečí [21]	34
Obrázek 26: Boční vůle [22]	35
Obrázek 27: Tabulka obvodového házení z normy ISO 1328–2 [23]	36
Obrázek 28: Úchylky jednobokého odvalu [24]	36
Obrázek 29: Úchylka odvalu za rozteč [24]	38
Obrázek 30: Ukázka tabulky z normy DIN 3974–2 [25]	39

Obrázek 31: Protokol s 50% F-faktorem [24]	40
Obrázek 32: Stroj před generální opravou [27]	41
Obrázek 33: Stroj po generální opravě [27]	41
Obrázek 34: Stroj GTWG 600 [19]	42
Obrázek 35: Speciální měřicí jednotka GTM [28].....	43
Obrázek 36: Protokol s poškozeným zubem	44
Obrázek 37: Dotyková měřidla [30]	45
Obrázek 38: Měřicí hlava.....	45
Obrázek 39: Výkres sestavy staré měřicí hlavy	46
Obrázek 40: Protokol od výrobce.....	46
Obrázek 41: Měření šnekového soukolí.....	47
Obrázek 42: Nastavení tolerancí a jednotek	48
Obrázek 43: Protokol házení 1. měření.....	49
Obrázek 44: Protokol jednobokého odvalu - 1. měření.....	50
Obrázek 45: Protokol házení 2. měření.....	51
Obrázek 46: Protokol jednobokého odvalu - 2. měření.....	52
Obrázek 47: Protokol házení 3. měření.....	53
Obrázek 48: Protokol jednobokého odvalu - 3. měření.....	54
Obrázek 49: Protokol házení 4. měření.....	55
Obrázek 50: Protokol jednobokého odvalu - 4. měření.....	55
Obrázek 51: Snímač MRP 8080	57
Obrázek 52: Návrh měřicí hlavy č. 1.....	58
Obrázek 53: Návrh měřicí hlavy č. 2.....	59
Obrázek 54: Návrh měřicí hlavy č. 3.....	59
Obrázek 55: Výkres sestavy nové měřicí hlavy	60
Obrázek 56: Smontovaná měřicí hlava.....	60
Obrázek 57: Měření hlavy	61
Obrázek 58: Protokol házení měřicí hlavy.....	62
Obrázek 59: Protokol přesnosti měřicí hlavy	63
Obrázek 60: Nekvalitně zpracovaná rovinnost	64
Obrázek 61: Vyhodnocení měřicí hlavy.....	65
Obrázek 62: Optimalizovaná měřicí hlava (vlevo), hlava před úpravou (vpravo).....	65

Seznam rovnic

Rovnice 1: Celková úchylka v radiánech [1]	13
Rovnice 2: Celková úchylka v mikrometrech [1]	13

Seznam tabulek

Tabulka 1: Úchylky [21]	34
Tabulka 2: Úchylky [21]	35
Tabulka 3: Úchylky jednobokého odvalu [1, 24]	37
Tabulka 4: Parametry šnekového soukolí	47
Tabulka 5: Shrnutí naměřených výsledků	56

Seznam příloh

Příloha 1: Výkres sestavy staré měřicí hlavy

Příloha 2: Protokol házení 1. měření

Příloha 3: Protokol jednobokého odvalu - 1. měření

Příloha 4: Protokol házení 2. měření

Příloha 5: Protokol jednobokého odvalu - 2. měření

Příloha 6: Protokol házení 3. měření

Příloha 7: Protokol jednobokého odvalu - 3. měření

Příloha 8: Protokol házení 4. měření

Příloha 9: Protokol jednobokého odvalu - 4. měření

Příloha 10: Výkres sestavy nové měřicí hlavy

Příloha 11: Protokol házení měřicí hlavy

Příloha 12: Protokol přesnosti měřicí hlavy