

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F2

Fakulta strojní
Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Kontrola geometrie kola s evolventním ozubením na měřicím přístroji Carl Zeiss

Nguyen Thanh Tung

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Miláček
Obor: Konstruování podporované počítačem
2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nguyen Thanh** Jméno: **Tung** Osobní číslo: **458402**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Kontrola geometrie kola s evolventním ozubením na měřicím přístroji Carl Zeiss

Název bakalářské práce anglicky:

Measurement of a gearwheel with an involute gearing at the Carl Zeiss measurement device

Pokyny pro vypracování:

V laboratořích ČVUT na Julisce je přístroj pro měření evolventního ozubení od firmy Carl Zeiss. Běžně se zde provádí v rámci výuky měření na ozubených kolech s přímými zuby upnutých ve dvou hrotech za středící důlky ve svislé poloze.

- 1) provedte rešerši v oblasti zuboměrů, popište měřené veličiny na ozubených kolech
- 2) zkontrolujte a případně zprovozněte zatuhlé části zuboměru v laboratoři na Julisce
- 3) popište a zprovozněte veškeré příslušenství k tomuto zuboměru v laboratoři na Julisce.
- 4) pro jednotlivé typy měření vypracujte metodiku pracovního postupu
- 5) stanovte přesnost tohoto přístroje porovnávacím měřením na několika ozubených kolech.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ondřej Miláček, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Ondřej Miláček
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen 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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Ondřeji Miláčkovi za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Zbyňku Syrovátkovi, který mi po celou dobu řešení této práce poskytoval přístup do laboratoří. Nakonec bych chtěl poděkovat i panu Ing. BcA. Janu Podanému, Ph.D. za užitečné rady ohledně přesnosti měřících přístrojů.

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 10.07.2019

Nguyen Thanh Tung

Abstrakt

Tato bakalářská práce se bude zabývat zprovozněním a popisem funkcí měřícího přístroje od firmy Carl Zeiss. Popis se bude týkat funkce a nastavování tohoto měřícího přístroje a jeho součástí. Součástí popisu měřícího přístroje bude zjišťování měřících vlastností tohoto přístroje. Pro splnění těchto úloh, bude nejdříve zapotřebí provést rešerši v oblasti kontroly odchylek u čelních ozubených kol s evolventním ozubením. Práce se bude týkat i popisu geometrie samotné evolventní křivky.

Klíčová slova: čelní ozubené kolo, evolventní křivka, úchytky ozubeného kola, modifikace ozubení, měřící přístroj Carl Zeiss, přesnost a opakovatelnost měřícího přístroje

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Miláček
Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Abstract

This bachelor thesis will deal with commissioning and description of the measuring instrument from Carl Zeiss. The description will cover the function and settings of this instrument and its components. Part of the description of the measuring instrument will be the determination of the measuring properties of this instrument. To accomplish these tasks, it first be necessary to conduct a search for deviation gearing checks for involute gears. The work will also describe the geometry of the involute curve itself.

Keywords: gear wheel, involute curve, gear wheel deviation, gear tooth modification, ,measuring instrument Carl Zeiss, measuring instrument accuracy and precision

Title translation: Measurement of a gearwheel with an involute gearing at the Carl Zeiss measurement device

Obsah

1 Úvod	1
2 Geometrie čelních ozubených kol s evolventním ozubením	3
2.1 Geometrie evolventní křivky	3
2.2 Evolventní šroubová plocha	5
2.3 Parametry čelního ozubeného kola s evolventním ozubením	7
2.4 Skutečné evolventní ozubení	10
3 Nežádoucí odchylky čelního ozubeného kola s evolventním ozubením	13
3.1 Ukazatel přesnosti	13
3.1.1 Radiální házení	13
3.1.2 Kontrola ozubených kol odvalem	15
3.1.2.1 Dvojboký odval	15
3.1.2.2 Jednoboký odval	17
3.1.3 Úchylky rozteče	18
3.1.4 Kontrola profilu ozubeného kola	20
3.1.5 Kontrola úhlu sklonu zubu	23
3.2 Normy pro lícování čelních ozubených kol	25
4 Praktická část	29
4.1 Popis přístroje	30
4.1.1 Radiální házení	33
4.1.2 Měření roztečí	34
4.2 Zprovoznění přístroje	36
4.3 Opakovatelnost a přesnost přístroje	38
4.3.1 Určení opakovatelnosti měřícího přístroje	38
4.3.2 Odhad přesnosti měřícího přístroje	40
5 Závěr	51
Literatura	53

Obrázky

2.1 Obálková metoda tvorby evolventní křivky [1]	4	4.5 Popis měření radiálního házení .	33
2.2 Tvorba evolventní šroubové plochy šroubovou metodou [1]	5	4.6 Schéma pro měření rozteče	34
2.3 Rozvinutá šroubovice na válci [1]	6	4.7 Popis přípravku pro měření úchylek roztečí	34
2.4 Geometrie ozubeného kola [2] ...	7	4.8 Popis měření úchylek roztečí ...	35
2.5 Podřezání paty zubu	9	4.9 Konfigurace pro měření roztečí a úchylek tloušťky zubů	36
2.6 Výšková korekce nebo-li posunutí profilu [3]	10	4.10 Schéma měření úchylek tlouštěk zubů	36
2.7 Schémata výškové modifikace [1]	11	4.11 Šnekové kolo a převodový mechanismus	37
2.8 Schéma podélné modifikace změnou tvaru boční křivky [1]	11	4.12 Rozebraný a vyčištěný převodový mechanismus z obr. 4.11b	37
2.9 Spoluzabírající kola	12	4.13 Určování opakovatelnosti pomocí kalibračního válce	38
3.1 Princip měření radiálního házení [4]	13	4.14 Určení opakovatelnosti měřícího přístroje pomocí kalibračního válce	39
3.2 Vyhodnocování radiálního házení [4]	14	4.15 Čelní ozubené kolo s přímými zuby	39
3.3 Diagram dvojbokého odvalu [4] .	16	4.16 Měření radiálního házení pro určení opakovatelnosti	40
3.4 Princip dvojbokého odvalu [4] ..	16	4.17 Měření úchylek základní rozteče pro určení opakovatelnosti	40
3.5 Diagram jednobokého odvalu [4]	17	4.18 3 ozubení na 1. hřídél	41
3.6 Rozteče v čelní rovině[4]	18	4.19 ozubení na 2. hřídéli	41
3.7 Vztah mezi čelní rovinou a normálovou rovinou[4]	19	4.20 Porovnávání radiálního házení 1. ozubení na 1. hřídéli s refer. hodnotami	42
3.8 Rozdíl mezi základní a čelní roztečí[4]	19	4.21 Porovnávání radiálního házení 2. ozubení na 1. hřídéli s refer. hodnotami	43
3.9 Součtová rozteč[4]	20	4.22 Porovnávání radiálního házení 3. ozubení na 1. hřídéli s refer. hodnotami	43
3.10 Princip evolventoměru[4].....	21	4.23 Porovnávání úchylek čelních roztečí 2. ozubení na 1. hřídéli s refer. hodnotami	44
3.11 Úchylky profilu[1]	22	4.24 Porovnávání úchylky součtové rozteče 2. ozubení na 1. hřídéli s refer. hodnotami	44
3.12 Typický záznam z měření profilu	23	4.25 Porovnávání úchylek čelních roztečí 3. ozubení na 1. hřídéli s refer. hodnotami	45
3.13 Sklon zubu na roztečném válci[4]	23	4.26 Porovnávání úchylky součtové rozteče 3. ozubení na 1. hřídéli s refer. hodnotami	45
3.14 Přístroj na měření sklonu zubu[4]	24		
3.15 Úchylky sklonu zubu[4]	25		
3.16 Tabulka doporučených stupňů přesností v závislosti na oblast použití[4]	27		
3.17 Předpis kinematické přesnosti pro 5. stupeň přesnosti[4][5].....	28		
3.18 Předpis plynulosti chodu pro 5. stupeň přesnosti[4][5]	28		
3.19 Předpis dotyku boku zubu pro 5. stupeň přesnosti[4][5]	28		
4.1 Měřící přístroj Carl Zeiss	29		
4.2 Měřící přístroj Carl Zeiss	30		
4.3 Popis součástí měřícího přístroje	31		
4.4 Popis součástí měřícího přístroje	32		

4.27 Porovnávání úchylek čelních roztečí pravých boků zubů na 2. hřídeli s refer. hodnotami	46
4.28 Porovnávání úchylek čelních roztečí levých boků zubů na 2. hřídeli s refer. hodnotami	46
4.29 Porovnávání úchytky součtové rozteče pravých boků zubů ozubení na 2. hřídeli s refer. hodnotami . .	46
4.30 Porovnávání úchytky součtové rozteče levých boků zubů ozubení na 2. hřídeli s refer. hodnotami	47
4.31 Vliv upínání měřeného kola na naměřené hodnoty	47
4.32 Tabulka shrnující výsledky měření	48
4.33 Naměřené radiální házení 2. hřídele	49

Kapitola 1

Úvod

Ozubená kola se stala za dobu jejich existence nenahraditelnou součástí strojírenství a to do takové míry, že jsou považována neformálně za jeho symbol. Ve stojích, ať už se jedná o ty malé nebo větší a složitější, umožňují ozubená kola spolehlivě realizovat přenos a transformace mechanické energie a pohybu. Tento základní prvek patří k nejsložitějším strojním součástím, a to jak z konstrukčního hlediska, tak i z té výrobní. Ozubená kola zažila potřebu jejich zdokonalování již ve středověku, a to především díky velkému rozmachu výroby přesných hodin. Tato potřeba zůstala až do dnešní doby, kdy se tato kola stala nepostradatelnou strojní součástí v mnoha oblastech strojírenství. Díky neustálé potřebě lidstva posouvat hranice strojů a to jak z konstrukčního a výkonového hlediska (výkon, rychlost, pevnost atd.), tak i z hlediska ekologického a ekonomického (spotřeba, účinnost, hlučnost atd.), bylo za několik desetiletí u vývoje ozubených kol dosaženo obrovských pokroků. Příchod moderní výpočetní techniky a nových technologií výroby ještě výrazněji urychlil zmiňovaný vývoj a pokrok. Moderní technika umožňovala nejen zvýšit produktivitu výroby kol, ale především umožnila dosáhnout vysokých geometrických přesností vyráběných ozubených kol, a to i těch s nestandardními tvary zubů. Takový pokrok jde, ale ruku v ruce s další problematikou, a tou je kontrola přesnosti vyráběných kol, respektive určování zda se při výrobě dosáhlo požadovaných tvarů kola.

V první části této práce bude vysvětlena geometrie čelních ozubených kol s evolventním ozubením, respektive geometrie samotné evolventy. Dále bude vysvětlen význam rozdílu (odchylky) mezi teoretickou (navrženou) geometrií ozubeného kola a jeho skutečnou geometrií. Práce bude obsahovat řešerši na druhy odchylek, jejich význam a jejich členění. Obsahem první části práce budou také používané normy pro lícování čelních ozubených kol.

Druhá část práce se bude zabývat měřícím přístrojem od firmy Carl Zeiss. Obsahem této části bude zprovoznění zatuhlých částí měřícího přístroje a jeho popis. Popis se bude týkat funkce a nastavování tohoto měřícího přístroje a funkce a nastavování všech jeho částí. Dále bude v práci vysvětlen postup a výsledek při zjišťování měřících vlastností tohoto měřícího přístroje.

Kapitola 2

Geometrie čelních ozubených kol s evolventním ozubením

2.1 Geometrie evolventní křivky

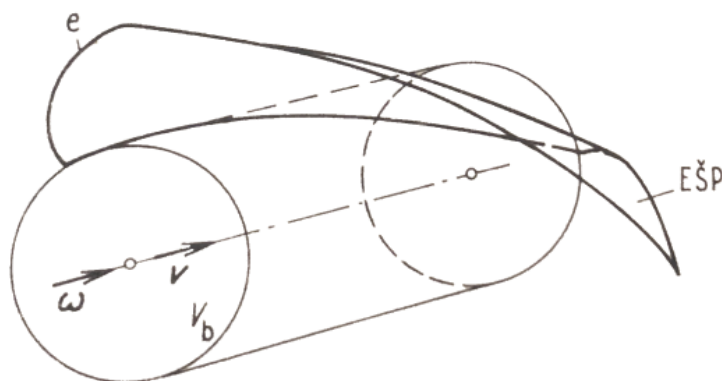
Jako evolventní ozubená kola se označují kola, která jsou charakteristická tím, že v čelním řezu (řez kolmý na osu kola) mají zubní profily tvar evolventy. Evolventní tvar boku zubu byl poprvé navržen v roce 1754 švýcarským matematikem a fyzikem Leonhardem Eulerem, který dokázal že evolventní profil zubu umožňuje plynulý pohyb soukolí.[10] Evolventa je z hlediska geometrie rovinou křivkou, protínající kolmo všechny tečny kružnice. Tato kružnice má funkci evoluty, která představuje množinu středů křivostí evolventy. U ozubených kol se taková kružnice nazývá základní kružnicí, která se běžně odlišuje od jiných parametrů ozubeného kola indexem malé b (například základní kružnice se běžně značí d_b). Evolventu lze získat obecně odvalováním přímky po kružnici, kde tvar evolventy odpovídá trajektorii libovolného pevného bodu na této valící se přímce.

Vznik evolventy velmi dobře popisuje tzv. obálková metoda (viz obr. 2.1). Mějme kružnici k_y s poloměrem r_y a kružnici k_b s poloměrem r_b , pro které platí, že $r_y \geq r_b$. Evolventa v takovém případě vzniká jako obálka tvořící přímky q pevně spojená s přímkou t_y , která se valí po kružnici k_y . Vzájemná poloha přímky q a přímky t_y je určena takzvaně úhlem profilu značené α_y , který odpovídá úhlu mezi přímkou q a kolmicí k přímce t_y . Přímka n je vždy tečnou ke kružnici k_b v bodě I a zároveň protíná tečný bod Y přímky t_y s kružnicí k_y . Je zřejmé, že při odvalení přímky t_y o určitou část oblouku na kružnici k_y se posune i přímka q , jelikož jsou obě přímky navzájem pevně svázané. Odvalováním přímky t_y zároveň způsobí odvalení přímky n po kružnici k_b , jelikož se bude měnit poloha tečného bodu Y . Evolventa e je pak množina bodů, které vzniknou průnikem přímky n a q . [1]

2.2 Evolventní šroubová plocha

U čelních evolventních ozubených kol se šikmými zuby, tvoří bok zubu takzvaně evolventní šroubovou plochu (zkráceně EŠP). Evolventní šroubová plocha je plocha složená z evolventních profilů odvinutých ze základního válce o poloměru r_b . Každý dílčí evolventní profil odpovídá příslušnému čelnímu řezu kolmém na osu evolventní šroubové plochy.[3]

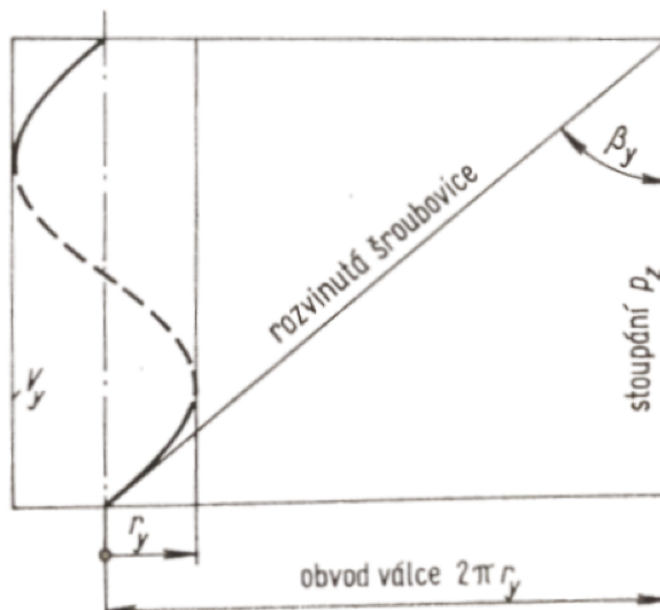
Vznik evolventní šroubové plochy lze nejlépe pochopit z takzvaného šroubového způsobu (obr. 2.2), který se uplatňuje například pro výrobu čelních evolventních ozubených kol se šikmými zuby na odvalovacím obrážecím stroji. Mějme základní válec V_b o základním poloměru r_b . Dále mějme evolventní tvořící křivku e , která se vztahuje na tento základní válec a jejíž vznik byl vysvětlen v předchozím kapitole. Začneme-li tuto evolventní tvořící křivku e posouvat ve směru osy základního válce rychlostí v , pak trajektorie evolventní tvořící křivky e bude představovat plochu, která se nazývá evolventní plocha (nikoliv evolventní šroubová plocha). Taková plocha odpovídá tvaru boku zubu u čelních evolventních ozubených kol s přímými zuby. Mějme teď případ, že kromě posuvu evolventní křivky e ve směru osy základního válce rychlostí v tato křivka bude konat ještě rotační pohyb kolem osy základního válce úhlovou rychlostí ω_o . Trajektorie evolventní křivky e v tomto případě vytvoří evolventní šroubovou plochu, která odpovídá tvaru boku zubu u čelních evolventních ozubených kol se šikmými zuby.[1][3]



Obrázek 2.2: Tvorba evolventní šroubové plochy šroubovou metodou [1]

Vezmeme-li válec V_y s poloměrem r_y , který je souosý se základním válcem a pro který platí, že $r_y \geq r_b$, pak protne tento válec V_y evolventní tvořící křivku e v různých bodech M_y v závislosti na velikosti r_y . Jelikož se evolventní tvořící křivka e pohybuje kolem osy základního válce úhlovou rychlostí ω_o , je zřejmé, že každý bod ležící na evolventní tvořící křivce e bude mít různou obvodovou rychlost v_o v závislosti na vzdálenosti od osy základního válce.

Každý válec V_y s poloměrem r_y protne evolventní tvořící křivku e v bodě M_y , který se pohybuje obvodovou rychlostí v_{oy} a vytvoří na tomto válci V_y šroubovici se stoupáním p_z . Rozvineme-li tuto šroubovici, získáme pravoúhlý trojúhelník (obr. 2.3), kde přepona odpovídá délce šroubovice, první odvěsna odpovídá obvodu válce ($2\pi r_y$) a druhá odvěsna odpovídá stoupání šroubovice o jeden obvod válce značené p_z , který je konstantní nehlédě na velikost válce V_y . Úhel mezi stoupáním p_z (odvěsna) a rozvinutou šroubovicí (přeponou), se značí β_y . [3]



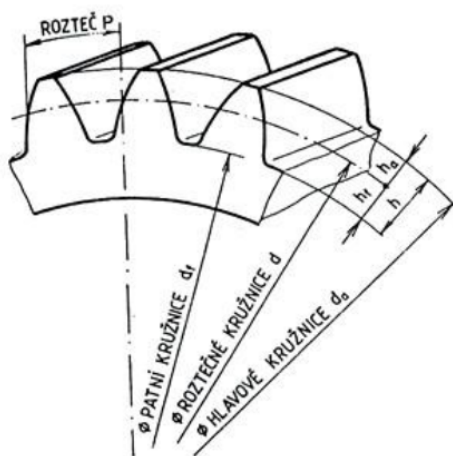
Obrázek 2.3: Rozvinutá šroubovice na válci [1]

Pomocí goniometrických vztahů lze tedy sestavit závislost stoupání p_z (2.2) s úhlem β_y a s poloměrem r_y válce V_y , na kterém se šroubovice nachází. Pokud je p_z neměnné pak to znamená, že každá libovolná šroubovice je jednoznačně určena právě dvěma parametry (poloměrem válce r_y a úhlem β_y). Pro každý poloměr r_y tedy přísluší právě jeden úhel β_y , který se nazývá úhel sklonu zubů. Například roztečnému válci V s roztečným poloměrem r ($r_y = r$) odpovídá roztečná šroubovice s roztečným úhlem sklonu zubů β , stejně tak jako valivému válci V_w s valivým poloměrem r_w ($r_y = r_w$) odpovídá valivá šroubovice s valivým úhlem sklonu zubů β_w . To je důvod, proč úhel sklonu zubů β_y není stejný po celé výšce zubů a také důvod, proč je důležité při práci s ozubenými koly (při návrhu, konstrukci nebo kontrole) rozlišovat různé úhly sklonu zubů. [1][3]

$$p_z = \frac{2\pi r_y}{\operatorname{tg} \beta_y} \quad (2.2)$$

2.3 Parametry čelního ozubeného kola s evolventním ozubením

Tato kapitola se bude zabírat geometrií čelního ozubeného kola s evolventním ozubením a jeho jmenovitými rozměry. Aby bylo čelní ozubené kolo funkčně použitelné, musí mít po celém svém obvodu celočíselný počet zubů z , které mají vždy jeden pravý a jeden levý bok tvořeny evolventní plochou (přímé zuby) nebo evolventní šroubovou plochou (šikmé zuby). Kvůli plynulosti přenosu kroutícího momentu, musí být zajištěno, aby byly všechny zuby na ozubeném kole rovnoměrně rozloženy tak, aby dva stejnohlé sousední boky zubů byly vždy od sebe vzdáleny o stejnou míru. Tato míra měřena v čelní rovině na oblouku kružnice o roztečném průměru d , se nazývá čelní rozteč p_t . Počet čelních roztečí je na ozubeném kole vždy tolik, kolik je na ozubeném kole zubů. Sečtou-li se všechny čelní rozteče, musí výsledná hodnota odpovídat velikosti obvodu roztečného válce, na kterém se čelní rozteče měří. Proto musí platit vztah (2.3). Při úpravě se získá vztah (2.4), a aby se vyloučila konstanta π , nahradí se zlomek takzvaným modulem m_y . Velikost roztečného modulu m určuje to, jakou část oblouku na roztečném kružnici zaujímá jeden zub (jedna tloušťka zubu na roztečném válci s jednou zubovou mezerou). Hodnoty modulů nejsou libovolné, ale jsou odstupňované normalizovanou řadou a řídí se normou ČSN 01 4608.



Obrázek 2.4: Geometrie ozubeného kola [2]

Geometrie čelního evolventního ozubeného kola bez úmyslných nebo výrobních úchylek je pak dána modulem m , počtem zubů z , jeho šířkou b úhlem profilu α a pokud jde čelní ozubené kolo se šikmými zuby, tak ještě úhlem sklonu zubů na roztečném válci β . Tyto parametry se nazývají takzvaně zadávací parametry a pomocí nich lze dopočítat zbývající geometrické veličiny čelních ozubených kol.[3]

Při výpočtu je velmi důležité, rozlišovat roviny ve kterých se hledané rozměry řeší. Jedná-li se o čelní rovinu, tedy o rovinu kolmá na osu ozubeného kola, pak se k veličinám přidává index malé t . Dále se veličiny řeší v takzvané normálové rovině, která je vůči čelní rovině nakloněna o úhel sklonu zubu na roztečném válci β a přísluší jí index malé n . Pro čelní ozubená kola s přímými zuby platí, že čelní rovina s normálovou rovinou spolu splývají a tím pádem se nerozlišuje v jaké rovině se hledané veličiny řeší. V opačném případě, pokud se jedná o čelní ozubená kola se šikmými zuby, je nesmírně důležité si uvědomit, zda se hodnoty daných veličin mění při přechodu z čelní roviny na normálovou rovinu a naopak. U zadávacích parametrů (modul m , počet zubů z , úhel profilu α a úhel sklonu zubů β), jsou počet zubů na ozubeném kole a hodnota úhlu sklonu zubů na roztečném válci neměnné a stále stejné, nehledě na rovině, ve kterém se dané ozubené kolo řeší. Naopak u modulu m a úhlu profilu α se jejich hodnoty mění v závislosti na tom, zda jsou tyto veličiny měřeny v čelní rovině nebo v rovině normálové. Modul v normálové rovině se nazývá normální modul m_n , modul v čelní rovině se nazývá tečný modul m_t , úhel sklonu zubů na roztečném válci v normálové rovině se značí α_n a úhel sklonu zubů na roztečném válci v čelní rovině se značí α_t . Přepočet mezi těmito veličinami se řídí vztahy (2.5 a 2.6).[3]

$$\pi \cdot d_y = z \cdot p_{ty} \quad (2.3)$$

$$\frac{d_y}{z} = \frac{p_{ty}}{\pi} = m_y \quad (2.4)$$

$$m_t = \frac{m_n}{\cos\beta} \quad (2.5)$$

$$tg\alpha_t = \frac{tg\alpha_n}{\cos\beta} \quad (2.6)$$

Pro čelní ozubená kola s přímými zuby je úhel sklonu na roztečné kružnici β nulová proto platí, že modul v čelní rovině m_t je stejný jako modul m_n v rovině normálové, stejně tak jak jako je úhel profilu v čelní rovině α_t stejný jako úhel profilu v normálové rovině. Další veličiny popisující geometrii ozubeného kola jako jsou průměr roztečné kružnice d , průměr základní kružnice d_b , průměr hlavové kružnice d_a , průměr patní kružnice d_f , výška zubu h , výška hlavy zubu h_a , výška paty zubu h_f , čelní rozteč na roztečné kružnici p_t a normální rozteč na roztečné kružnici p_n podle vztahů(2.7 - 2.15).

$$d = z \cdot m_t \quad (2.7)$$

$$d_b = d \cdot \cos \alpha_t \quad (2.8)$$

$$d_a = d + 2h_a \quad (2.9)$$

$$d_f = d - 2h_f \quad (2.10)$$

$$h_a = m \quad (2.11)$$

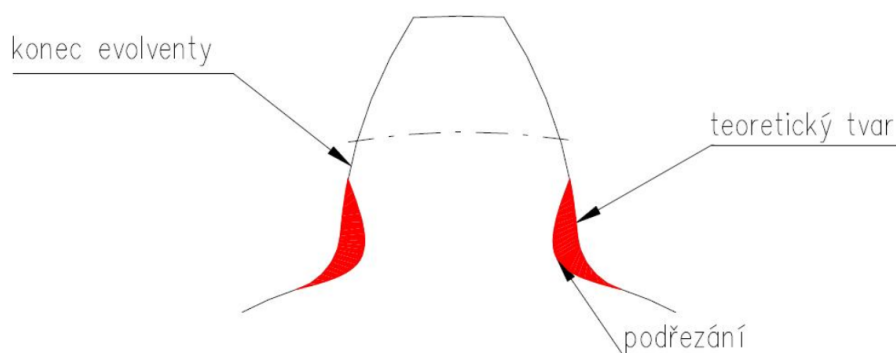
$$h_f = 1,25m \quad (2.12)$$

$$h = h_a + h_f \quad (2.13)$$

$$p_t = m_t \cdot \pi \quad (2.14)$$

$$p_n = m_n \cdot \pi = m_t \cdot \cos \beta \cdot \pi \quad (2.15)$$

V praxi dochází při výrobě ozubených kol s malým počtem zubů k takzvanému podřezání zubů (obr. 2.5). Podřezání je nežádoucí úběr materiálu, ke kterému dochází v patním prostoru zubu, tedy na konci evolventního profilu zubu. U zubů dochází k jeho největšímu ohybovému zatížení právě v prostoru jeho paty a kvůli chybějícímu materiálu, způsobené podřezáním je takový zub z hlediska únosnosti výrazně oslaben.[3][2]



Obrázek 2.5: Podřezání paty zubu

Taková problematika se v praxi řeší takzvanou výškovou korekcí, která vedle modulu m , úhlu sklonu zubu β , počtu zubu z a úhlem profilu α určuje výsledný teoretický tvar ozubených kol. Korekcí ozubení (nebo-li posunutím profilu) se mění výška hlavy a paty zubu, zatímco se ale zachovává výška zubu a roztečný a základní průměr korigovaného kola. Z tohoto důvodu musí být hlava i pata zubů korigována vždy stejným smyslem (kladná nebo záporná). Velikost takového posunutí se spočítá (2.16) jako součin modulu m a takzvaném jednotkového posunutí x . Jednotkové posunutí nabývá jak kladných tak i záporných hodnot a pro hodnotu $x = 0$, znamená, že se jedná o nekorigované ozubené kolo. Vliv velikosti jednotkového posunutí x na výsledný tvar zubu je naznačeno na obrázku 2.6. Pokud je vyžadováno zachování osové

vzdálenosti u soukolí, musí být korekce jednoho kola stejná a zároveň opačně orientovaná než je korekce druhého kola. Je-li ozubené kolo korigované, pak se jeho geometrické rozměry spočítá podle vztahů (2.16 - 2.20), přičemž jak už bylo řečeno roztečný průměr d (2.7) a základní průměr d_b (2.8) se nemění. [2][14]

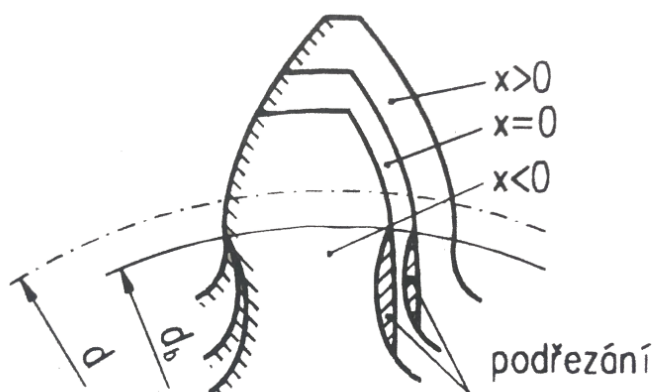
$$m \cdot x \text{ (posunutí výrobního nástroje)} \quad (2.16)$$

$$d_a = d + 2h_a = m \cdot z + 2 \cdot (m + m \cdot x) \quad (2.17)$$

$$d_f = d - 2h_f = m \cdot z - 2 \cdot (1,25m - m \cdot x) \quad (2.18)$$

$$h_a = m + m \cdot x \quad (2.19)$$

$$h_f = 1,25m - m \cdot x \quad (2.20)$$



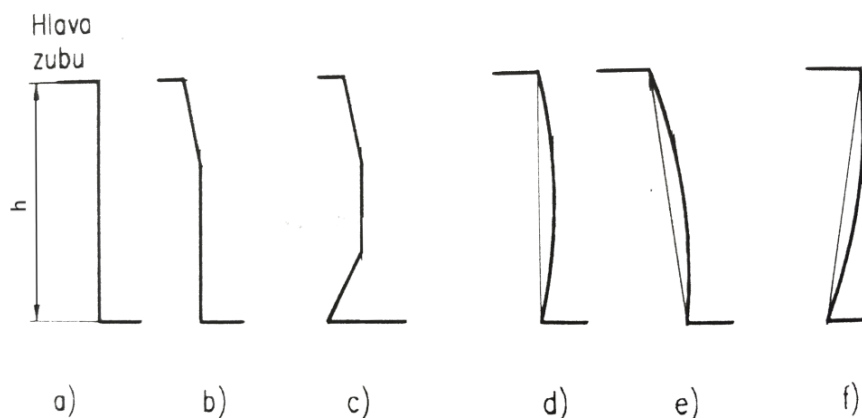
Obrázek 2.6: Výšková korekce nebo-li posunutí profilu [3]

2.4 Skutečné evolventní ozubení

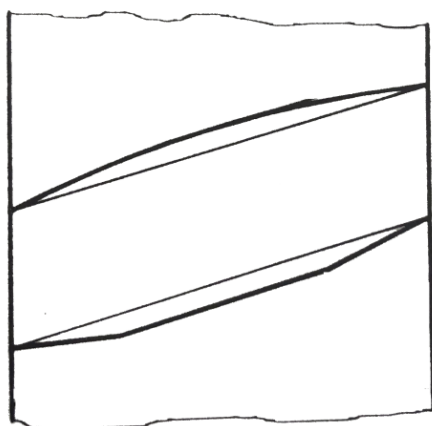
Tato kapitola bude věnována skutečnému tvaru čelních evolventních ozubených kol. Každý rozdíl mezi teoretickým tvarem a skutečným tvarem čelních ozubených kol s evolventním profilem, nazýváme odchylkami. Existují celkem tři druhy odchylek od teoretického tvaru a jmenovitých rozměrů, které se dělí na úmyslné a neúmyslné.[1][3][14]

Prvním druhem odchylek jsou takzvaně, odchylky od teoretického tvaru neboli modifikace ozubení. Modifikace mají za úkol kompenzovat vlivy nepříznivých faktorů na činnost ozubeného soukolí (například deformace zubů a hřídelů, vstupní nebo výstupní rázy, teplotní rozdíly atd.). Rozlišují se dva druhy modifikací, a to sice výšková modifikace a podélná modifikace.

Jak už název napovídá, výškovou modifikací se upravuje tvar ozubení po výšce zubů a podélnou modifikací se upravuje tvar ozubení po délce ozubení. Mezi výškové modifikace patří například změna tvaru evolventy nebo změna úhlu záběru a mezi podélné modifikace například změna boční křivky nebo změna úhlu šroubovice. Na obrázku 2.7 jsou naznačena schémata výškové modifikace (pouze schématicky, jelikož skutečný profil má tvar evolventy). Teoretický nemodifikovaný tvar je naznačen na obrázku 2.7a, zatímco na obrázcích 2.7b a 2.7c je naznačeno odlehčení hlavy a paty. Obrázek 2.4d je takzvaná plynulá modifikace a obrázky 2.7e a 2.7f jsou kombinace plynulé modifikace s modifikací úhlu záběru. Na obrázku 2.8 je naznačen příklad podélné modifikace (změna tvaru boční křivky) čelního ozubeného kola se šikmými zuby. Při modifikaci ozubených kol se bere v potaz chování celého soukolí (vzájemný vztah spoluzabírajících kol) a pokud existuje vhodná varianta modifikace, lze dosáhnout příznivého chování soukolí, modifikací pouze jednoho kola.[1][3]

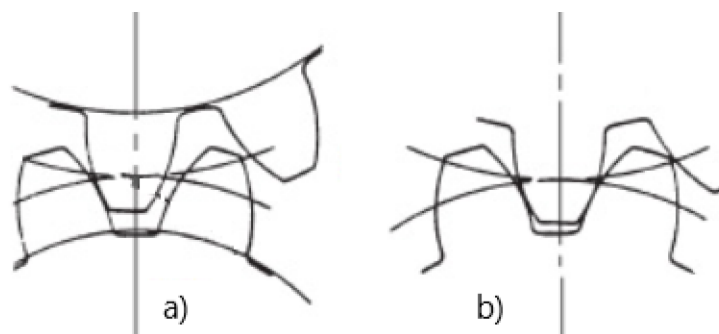


Obrázek 2.7: Schémata výškové modifikace [1]



Obrázek 2.8: Schéma podélné modifikace změnou tvaru boční křivky [1]

Dalším druhem úmyslných odchylek jsou úchyly tloušťek zubů. Tloušťka zubů se upravuje především kvůli zajištění boční vůle, mezi spoluzabírajícími koly. Na obrázku 2.9a je naznačeno soukolí s upravenými tloušťkami zubů a na obrázku 2.9b je soukolí bez úprav tloušťek zubů. Požadovanou odchylku tloušťek zubů je důležité znát už před samotnou výrobou ozubeného kola, jelikož se podle ní nastavuje přísuv nástroje do obrobku ozubeného kola. Vhodnou odchylkou tloušťek zubů se u čelních ozubených zaručuje, požadované boční vůle v ozubení.[1][16]



Obrázek 2.9: Spoluzabírající kola

Posledním druhem odchylek jsou nežádoucí odchylky, způsobené nepřesností výroby ozubeného kola. V praxi se tyto odchylky značí f a F s příslušnými indexy upřesňující druh řešené úchyly, přičemž f označuje dílčí odchylku vztahující se pouze k jednotlivému zubu (nebo rozteč, profil atd.) a F k celému kolu. Při kontrole úchylek, se mezní (přípustné) odchylky značí indexem r .

Kapitola 3

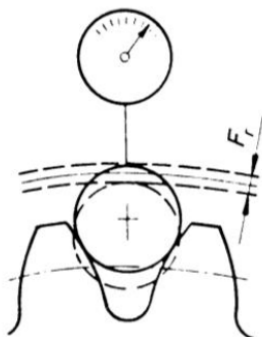
Nežádoucí odchytky čelního ozubeného kola s evolventním ozubením

3.1 Ukazatel přesnosti

3.1.1 Radiální házení

Měření radiálního házení patří mezi nejjednodušší kontroly ozubeného kola.[4] Díky tomu jsou k dispozici široké možnosti pro volbu měřících přístrojů. Jednoduchost má také příznivý vliv na automatizaci měření. V nejjednodušších případech postačí úchylkoměr a přípravek na upnutí měřeného kola (např. pomocí trn za středící důlky nebo pomocí sklíčidel).

Radiální házení, běžně značeno jako F_r , je maximální radiální odchylna dvou poloh měřícího elementu v libovolném čelním řezu ozubeného kola. Měřící element je postupně vkládán do všech zubových mezer (obr. 2.8), přičemž se měří radiální poloha měřícího elementu vůči ose ozubeného kola. Jako měřící element se nejběžněji používá hrot ve tvaru kuličky, méně často se pak používají klíny, které ale slouží pouze pro měření čelních ozubených kol s přímými zuby.[4] Velikost měřícího elementu se volí tak, aby se hrot dotýkal boky zubů přibližně na roztečné kružnici.



Obrázek 3.1: Princip měření radiálního házení [4]

■ 3.1.2 Kontrola ozubených kol odvalem

Kontrolou ozubených kol odvalem se rozumí kontrola kol jednobokým nebo dvoubokým odvalem. Jelikož zmiňované metody s celkovým radiálním házením (F_r a součtovou úchytkou roztečí (F_p patří do stejného typu ukazatele přesností, tak mají velice podobnou, nikoliv ale úplně stejnou vypovídající hodnotu ohledně přesnosti daného typu. Proto pokud to není ve zvláštních případech požadováno jinak, kontrolují se ozubená kola pouze pomocí jedné z výše zmíněných metod. Při výběru vhodné metody je nutné brát v potaz požadované vlastnosti kol a vhodnost metody i z ekonomického hlediska. Například kontrola jednobokým odvalem dává nejkompaktnější představu o kinematické přesnosti kola, ale jelikož se jedná o mnohem složitější a mnohem nákladnější metodu měření, používají se výhradně ve velkosériové výrobě a pro kola s většími požadavky na přesnost.[4][16]

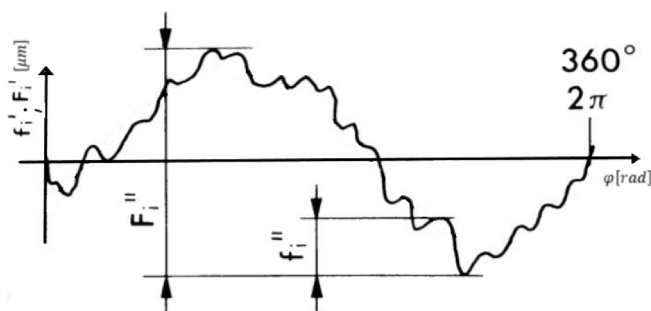
Princip obou metod odvalu spočívá v tom, že se nechává odvalovat kontrolované kolo s velmi přesným kontrolním (vzorovým) kolem, které jsou společně v záběru. Důležitou podmínkou je, aby kontrolní kolo (vzorové) bylo minimálně o tři třídy přesnější, než je požadovaná přesnost kontrolovaného kola. Podmínky při odvalu se mají co nejvíce podobat provozním podmínkám. Obě zmíněné metody kontrol budou popsány ve dvou následujících podkapitolách.[3][4][16]

■ 3.1.2.1 Dvouboký odval

Kontrola dvoubokým odvalem (obr. 3.4) představuje jednoduchou a hospodárnou metodu měření. Metoda spočívá v odvalu dvou spoluzabírajících ozubených kol bez vůle. Hnacím kolem by mělo být vždy kontrolní kolo, které je pevně přichyceno k přístroji a je mu umožněn pouze rotace kolem vlastní osy. Osa měřeného kola je pohyblivě uložena, tím je zajištěn vzájemný pohyb obou os (změna osové vzdálenosti odvalujících se kol). Měřené kolo je neustále přitlačováno ke kontrolnímu kolu nejčastěji pomocí pružin, tím se zajistí, aby se kola vzájemně odvalovala bez vůle. Úchylka měřeného kola způsobuje změnu osové vzdálenosti, která je nejčastěji zaznamenána úchytkoměrem. Výsledky naměřených hodnot se nanášejí do diagramu závislosti osových vzdáleností na poloze na obvodu kola, pomocí kterého se vyhodnocují dva druhy úchylek, a to sice kinematickou úchytku kola F_i'' při dvoubokém odvalu a místní kinematickou úchytku kola f_i'' při dvoubokém odvalu.[4][16]

3.1.2.2 Jednoboký odval

Další metodou odvalu je již zmiňovaný jednoboký odval. Jde o složitou a velmi nákladnou metodu měření, proto se používá převážně jenom ve velkosériové výrobě nebo při měření ozubených kol s většími požadavky na přesnost. Jednoboký odval má velice podobnou funkci jako součtová úchylka roztečí. Princip měření jednobokým odvalem spočívá v tom, že se nechá odvalovat měřené kolo, které je v záběru s kontrolním kolem. Kola se po sobě odvalují v předepsané vzdálenosti os, proto je mezi koly určitá boční vůle. Kvůli existenci úchylek, dochází k nerovnoměrnosti pohybu měřeného kola s kontrolním kolem. Během odvalu se měří úchylka polohy měřeného kola, tedy skutečné pootočení vzorku s teoretickým pootočením. Úchylkou pootočení se zde myslí nikoliv úhlové pootočení, ale změna polohy na roztečné kružnici, tedy obloukovou vzdálenost. Stejně jako u dvoubokého odvalu se naměřené hodnoty nechají zakreslit do diagramu závislosti úchylky polohy měřeného kola na poloze na obvodu kola. Opět se zde vyhodnocují dva druhy úchylek jako je tomu u dvoubokého odvalu.[4][16]



Obrázek 3.5: Diagram jednobokého odvalu [4]

Kinematická úchylka kola F_i' jednobokým odvalem je největší vzdálenost mezi dvěma body na diagramu, respektive je to největší rozdíl dvou naměřených úchylek během jedné otáčky kola. Přičemž úchylka zde odpovídá odchylce skutečné polohy ozubeného kola vůči teoretické poloze.

Místní kinematická úchylka kola f_i' je největší rozdíl mezi dvěma body přes jednu zubovou rozteč nebo během trvání jednoho záběru zubu. Opět platí že kinematická úchylka kola jednobokým odvalem patří do skupiny kinematické přesnosti a místní kinematická úchylka kola jednobokým odvalem patří do skupiny plynulosti chodu.

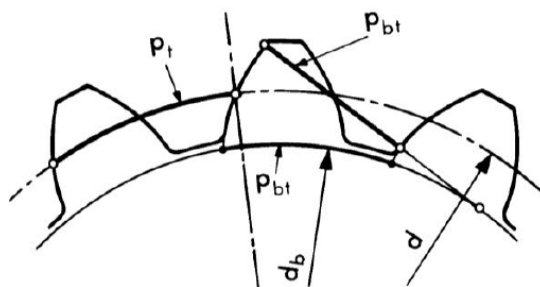
Dílčí úchylka normální rozteče f_{pn} je jednotlivý rozdíl mezi skutečnou hodnotou rozteče s teoretickou hodnotou rozteče p_n v normálové rovině. Měření dílčí úchylky normální rozteče se provádí pouze jako náhrada za měření dílčích úchylek čelní rozteče (obr. 3.7), za předpokladu že okolnosti nedovolují, aby byly úchylky naměřeny přímo v čelní rovině. Jednotlivé hodnoty dílčích úchylek normálových roztečí lze pak přepočítat pomocí vzorce (3.1) na hodnoty dílčích úchylek čelních roztečí f_{pt} .

$$f_{pt} = \frac{f_{pn}}{\cos\beta} \quad (3.1)$$



Obrázek 3.7: Vztah mezi čelní rovinou a normálovou rovinou[4]

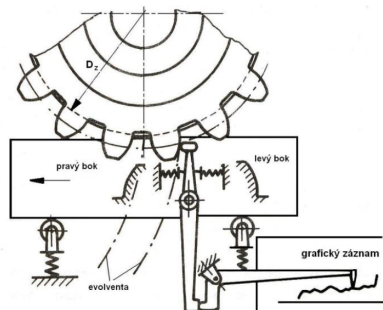
Dílčí úchylka základní rozteče v tečné rovině f_{pbt} je jednotlivý rozdíl mezi skutečnou hodnotou základní rozteče s teoretickou hodnotou základní rozteče p_b . Základní rozteč na rozdíl od čelní rozteče není obloukovou mírou (obr. 3.8), ale je dána délkou úsečky omezená dvěma body na dvou sousedních stejnohlých boků zubů. Úsečka spojující dva body dotyku tečen s profily zubů je zároveň tečnou k základní kružnici d_b . Velikost základní rozteče p_b je zároveň rovna délce oblouku na základní kružnici vymezenému začátky dvou stejnohlých sousedních evolvent. V žádném případě se nesmí použít kontrola úchylek základní rozteče jako náhrada za kontrolu čelních a normálních roztečí. Je vhodné neprovádět měření v modifikovaných oblastech, jako je oblast blízko hlavy zubů a oblast u paty zubů.



Obrázek 3.8: Rozdíl mezi základní a čelní roztečí[4]

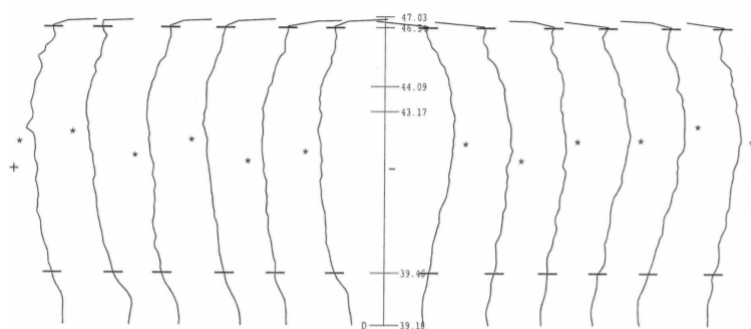
Optická metoda se používá, pokud nám okolnosti nedovolují použít mechanický princip. Optická metoda pro kontrolu evolventního profilu ozubeného kola, používá pro ozubení s modulem menší než 1 ($m \leq 1$). V takovém případě je totiž prostor mezi boky zubů příliš malá na to, aby se mezi ně vešel měřicí hrot. Kontrola evolventního profilu optickou metodou se provádí profilprojektorem, ve kterém lze promítnout zvětšený obraz skutečného profilu zkoumaného ozubeného kola. Rozdíl mezi zkoumanými evolventními profily se měří přesně rytým skleněným pravítkem, takže lze stanovit číselnou hodnotu odchylek.[4]

Mechanický princip lze provést na současných souřadnicových přístrojích nebo na přístrojích určené výhradně na zkoumání evolventního profilu, takzvané evolventoměry.[16]



Obrázek 3.10: Princip evolventoměru[4]

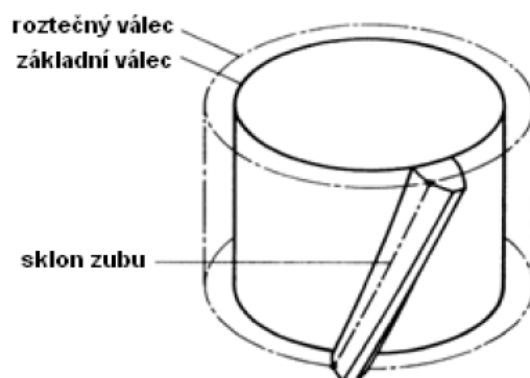
Princip evolventoměru (obr. 3.10) spočívá v tom, že se těsně pod zkoumané kolo nasadí přesný kotouč o stejném průměru jako je základní průměr měřeného kola, protože evolventní profil zubů vzniká právě odvalováním tvořící přímky po základní kružnici. Kotouč se dotýká pohyblivého suportu, a díky třecí síle mezi kotoučem a suportem, se suport pohybuje přímočaře pokud se měřené kolo otáčí. K suportu je zároveň pevně přichycena páka, kde na jednom konci je měřicí hrot a na druhém se nachází zapisovací mechanismus. Uvědomíme-li si, že suport zde má stejnou funkci jako tvořící přímka a nasazený kotouč má stejnou funkci jako kružnice, po které se tvořící přímka odvaluje při vzniku evolventy, pak je logické, že při pootočení měřeného kola se libovolný bod na suportu bude pohybovat vůči měřenému kolu po evolventní křivce. V případě že by byl skutečný evolventní profil zkoumaného zubu stejný jako teoretický evolventní profil (dokonalý evolventní profil zubu), pak by záznamový hrot zaznamenal přímku, nicméně každé ozubené kolo má nějaké nepřesnosti, které pak způsobují že zmiňovaná přímka se zvlní. Záznamu průběhu tvaru evolventního profilu měřeného kola slouží následně k určení tří druhů odchylek profilu, které se nazývají celkovou úchylkou profilu značené jako F_α , dílčí úchylkou tvaru profilu značené jako $f_{f\alpha}$ a nakonec dílčí úchylkou úhlu profilu značené jako $f_{H\alpha}$.



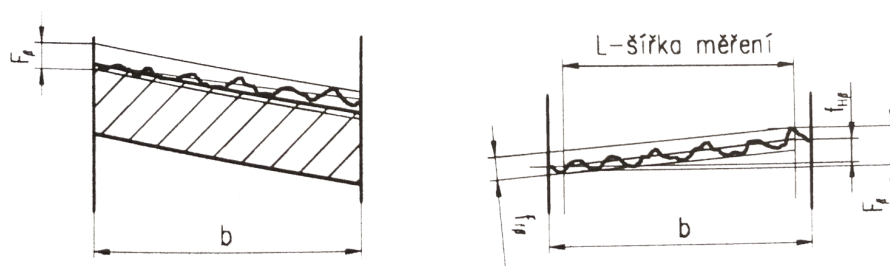
Obrázek 3.12: Typický záznam z měření profilu

3.1.5 Kontrola úhlu sklonu zubu

Kontrolou sklonu zubů se rozumí určování odchylky skutečného sklonu zubů od teoretického sklonu zubů na ozubeném kole. Průnikem roztečného válce ozubeného kola s libovolným bokem libovolného zubu (obr. 3.13) vznikne křivka (část šroubovice). Promítnutím zmiňované křivky na rovinu, která je tečná na roztečný válec a zároveň se dotýká křivky (část šroubovice) ležící v na tomto válci přesně uprostřed její výšky, vznikne v této rovině teoretická přímka, která má teoretický sklon vůči ose ozubeného kola. V praxi podobně jako je tomu u měření čelních roztečí, je nutná snaha provádět měření co nejbližší k roztečnému válci a platí, že se měření nemusí provádět úplně přesně na roztečném válci, jelikož je velmi obtížné najít přesnou polohu roztečného válce měřeného ozubeného kola, a ještě obtížnější je pak zaručit se měřicí element bude pokaždé dotýkat zmiňované polohy. U měření úchylek sklonu zubů je tato snaha obzvláště důležitá, jelikož sklon zubu není konstantní po celé výšce zubů (sklon zubů na roztečném válci se vždy liší od sklonu zubu v patní oblasti nebo u hlavy zubu). V praxi platí že teoretický úhel sklonu zubů β platí pro sklon zubu na roztečném válci. Pro podélně modifikovaná kola přechází tvar teoretického sklonu z přímky na část oblouku.[4]



Obrázek 3.13: Sklon zubu na roztečném válci[4]



Obrázek 3.15: Úchylky sklonu zubu[4]

Střední sklon se získá aproximací naměřených hodnot příslušnou křivkou (pro nedomodifikované ozubené kolo má křivka tvar přímky a pro modifikovaná kola má křivka tvar částečného oblouku). Stejně jako je tomu u úchylek profilů zubu, se i zde u měření úchylek sklonu zubu neměří všechny sklony na ozubeném kole, ale pouze vybrané. Opět se měří pouze sklony čtyř zubů umístěné rovnoměrně po celém ozubeném kole v obou směrech. Přičemž opět se u jednoho vybraného zubu proměří tři sklony, a to sice sklon zubu v blízkosti paty zubu, sklon zubu v blízkosti roztečného válce a sklon zubu v blízkosti hlavy zubu. V praxi se úchylky sklonu zubů zjišťují po kontrole profilu zubu, proto je výhodné si kvůli přehlednosti vybrat pro kontrolu sklonu zubu stejné zuby, které se vybrali pro kontrolu profilu zubů.

3.2 Normy pro lícování čelních ozubených kol

Požadavky (přesnost a stálost zubů, radiální házení atd.) kladené na ozubená kola mají za úkol zajistit při přenosu točivého momentu požadované vlastnosti, jako jsou správný a tichý chod, malá hlučnost, minimální vibrace a další. U každého ozubeného kola, jsou požadovány určité vlastnosti (přesnosti) závislé na účelu a podmínkách jeho použití. Z tohoto důvodu se neúmyslné nepřesnosti čelních ozubených kol, vznikající v průběhu jejich výroby (kvůli nepřesnosti stroje a nástroje, ustavení nástroje, upnutí obrobku atd.) rozdělují do tří skupin odchylek, a to sice na:

- odchylka kinematické přesnosti
- odchylka plynulosti chodu
- odchylka dotyku zubu

Všechny nežádoucí odchylky popsané v předchozím kapitole se rozdělují podle jeho významu a funkce právě do těchto tří skupin. Kromě těchto základních ukazatelů přesnosti ozubeného kola existují ještě pomocné ukazatele, jako je drsnost povrchu boků zubů, hlučnost, vibrace, dynamické jevy a další.

Stupně přesnosti ozubených kol se vybírají s ohledem na oblast jeho použití (obr. 3.16) a na intervalu obvodové rychlosti, ve kterém bude řešené kolo pracovat. Cílem je vybrat takový stupeň přesnosti, aby byl zajištěn správný a hladký přenos točivého momentu (malé házení, vibrace, plynulost chodu atd.), přičemž je důležité dbát i na hospodárnost výroby těchto kol (čím přesnější ozubená kola, tím dražší je jejich výroba a kontrola).

stupeň přesn.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
použití	Kola kontrolní										
		Kola na obrábění kol									
		Kola pro převody leteckých motorů a turbin									
		Přesné přístroje a dělicí mechanismy									
		Obráběcí stroje									
		Osobní automobily									
		Nákladní automobily a kolejová vozidla									
		Traktory a zdvihadla									
		Hospodářské stroje									
		Převody podřadného druhu									

Obrázek 3.16: Tabulka doporučených stupňů přesností v závislosti na oblast použití[4]

Jak už bylo zmíněno v kapitole (2.4 skutečné ozubení), úchytky ozubení se značí f (dílcí úchytky) a F (součtové nebo úplné úchytky), s příslušným indexem pro rozlišení ukazatele přesnosti. V praxi se dodržuje domluvená konvence, kdy se za kladnou úchytku považuje případ, kdy je skutečný tvar větší než jmenovité rozměry ozubeného kola a v opačném případě se naopak úchytky považují za záporné. Jelikož různé ukazatele přesnosti (například obvodové házení a dvojboký odval) patří do stejné skupiny přesnosti a zároveň mají podobnou vypovídající schopnost o přesnosti a vlastnosti ozubeného kola, není nutné kvůli hospodárnosti a časové náročnosti kontrol měřit všechny druhy úchytek a parametry tohoto kola. V praxi se vždy kontrolují pouze určité soubory úchytek (ukazatele přesnosti), které dokáží dostatečně popsat přesnost ozubeného kola. Norma umožňuje předepisovat, pro každý ukazatel přesnosti jiný stupeň přesnosti. Proto pokud je požadováno od ozubeného kola například maximální kinematická přesnost, lze pro ukazatele této skupiny úchytek předepsat vyšší stupeň přesnosti než pro skupiny ostatní. Doporučené možnosti souborů měření udává například 3. část normy **ISO/TR 10064**. V praxi, jak to bývá i u ostatních strojních součástí, mají větší firmy (velkosériová výroba) svoje vlastní normy na dovolené úchytky, vycházejících z jejich vlastních konstrukčních a výrobních zkušeností.

Kapitola 4

Praktická část

V laboratořích strojní fakulty ČVUT na Julisce se v místnosti, kde se rozebírají a následně zkoumají převodové skříně, nachází přístroj (podle pracovníků ČVUT v laboratoři už přibližně 30 let) na měření ozubených kol od firmy Carl Zeiss (obr. 4.1). Tento měřicí přístroj sloužil pouze k tomu, aby se studentům demonstrovalo, jakým způsobem se dá u ozubených kol v převodových skříních zjistit jeho úchylky. Konkrétně bylo na tomto měřicím přístroji upnuto čelní ozubené kolo s evolventním ozubením a s přímými zuby a přístroj byl nastaven na měření radiálního házení tohoto ozubeného kola. Jelikož měřicí přístroj sloužil pouze jako ukázkou při výuce, zůstal měřicí přístroj takto nastaven už delší dobu, aniž by se nějakým způsobem přenastavil nebo s nějakou jeho částí pohnulo.



Obrázek 4.1: Měřicí přístroj Carl Zeiss

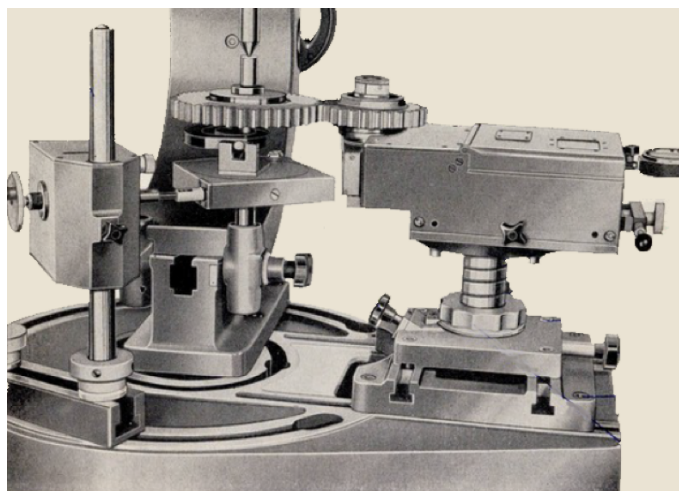
Téměř celá konstrukce měřicího přístroje a její součásti je vyrobena z kovu a k zajištění hladkého pohybu mezi různými součástmi přístroje, které se vzájemně dotýkají, respektive k snížení součinitele tření mezi plochami, které se vzájemně dotýkají, byla použita technická vazelína. Delší doba, kdy se s

tímto měřícím přístrojem nepohybovalo, mělo za následek, že technická vazelína zaschla (ztuhla), a tím pádem zamezila vzájemný pohyb mezi součástmi měřícího přístroje, tím pádem měla nakonec tato vazelína přesně opačnou funkci, než by měla mít. Kvůli omezenému pohybu různých částí měřícího přístroje, se logicky nedalo na tomto přístroji provádět měření všech vlastností ozubeného kola, ke kterým byl přístroj původně určen. Dalším problémem bylo, že za ty roky co se tento přístroj nachází v těchto laboratořích, se bohužel ztratily veškeré jeho dokumentace.

Cílem praktické části této práce, bylo zajistit, aby se na tomto měřícím přístroji Carl Zeiss daly opět naměřit úchyly, ke kterým byl tento přístroj původně určen. Nejdříve ale bylo zapotřebí pochopit funkci celého měřícího přístroje a jeho dalších součástí. Jelikož k tomuto měřícímu přístroji chyběly veškeré dokumentace, bylo nejdříve zapotřebí pokusit se tyto dokumentace najít nebo alespoň najít dokumentace k podobnému přístroji a pomocí nich a pomůcek, které jsou k tomuto přístroji k dispozici, pochopit funkci přístroje. Následujícím krokem měl být popis tohoto měřícího přístroje, a to jak z hlediska nastavování přístroje, tak i z hlediska jeho měřících vlastností (přesnost a opakovatelnost přístroje).

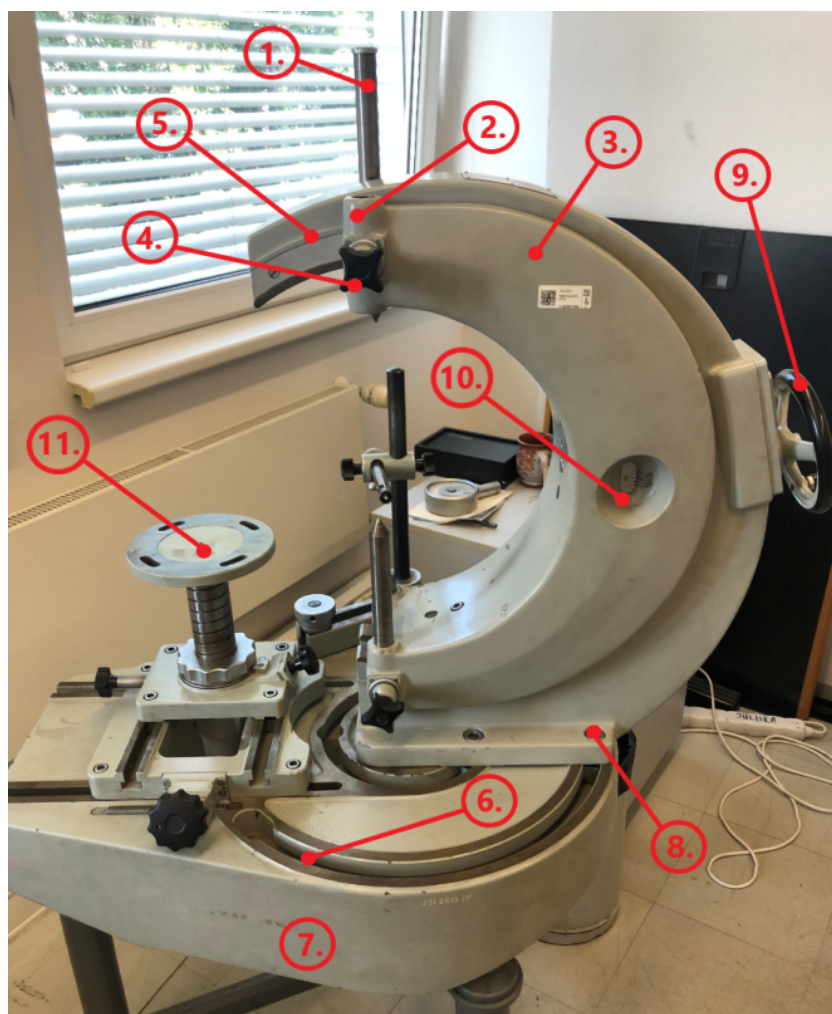
4.1 Popis přístroje

Tento měřící přístroj od firmy Carl Zeiss slouží k měření (zjišťování) úchylek ozubených kol. Konkrétně se na něm zjišťuje radiální házení, čelní a normální rozteče, základní rozteče v čelní i v normálové rovině, úchyly tloušťek zubů a původně se dalo k tomuto přístroji dokoupit zařízení k měření úchylek dvoubokého odvalu (obr. 4.2). Pokud bychom se neomezovali pouze na ozubená kola, mohlo by se na tomto přístroji zjišťovat i například kruhové házení válcových ploch.



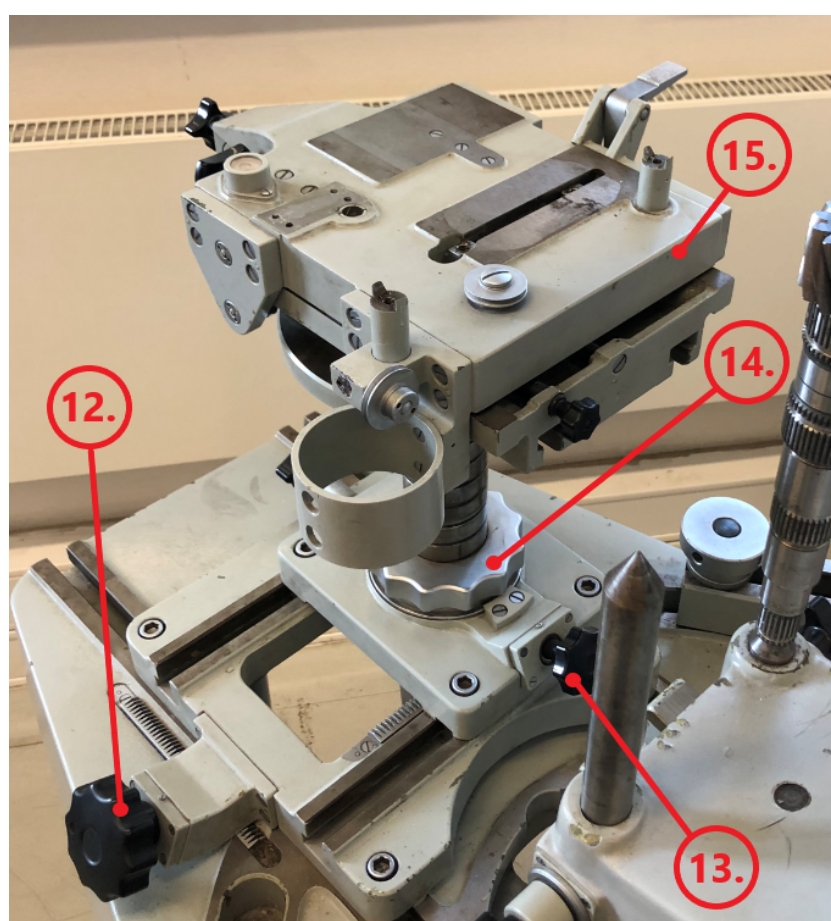
Obrázek 4.2: Měřící přístroj Carl Zeiss

Měřicí přístroj (obr. 4.3) je určený k měření ozubených kol na hřídele a uchy-
cený hřídele je realizován pomocí trnů (1) za jeho středící důlky. Vyjímá-
telné trny jsou upevněny v dírách (2), které jsou součástí pohyblivého rámu (3).
Pevná poloha trnů se zajišťují šrouby (4), které svým pootočením přitlačují
nebo povolují objímku, která zamezuje pohyb trnů. Pohyblivý rám (3), lze
vůči rámu přístroje (5) naklápět, a tímto způsobem se zajišťuje naklopení osy
měřeného hřídele vůči vodorovné ploše přístroje. Takové naklopení osy měře-
ného hřídele je nezbytný při zjišťování úchylek v normálové rovině (normální
rozteč, základní rozteč v normálové rovině nebo tloušťka zubu). Pro měření
ozubeného kola v normálové rovině tohoto kola je kromě naklopení hřídele
o úhel sklonu zubu β ještě potřeba vychýlit rám přístroje (5) o 90 stupňů,
podél t-drážek (6) v pevném stole přístroje (7), které definují rozsah pohyb
zmiňovaného rámu přístroje (5). Aby nedošlo k neúmyslnému vychýlení rámu
přístroje (5) při samotném měření, jsou v t-drážkách matice, které utáhnutím
šroubů (8) omezí pohyb rámu přístroje.



Obrázek 4.3: Popis součástí měřícího přístroje

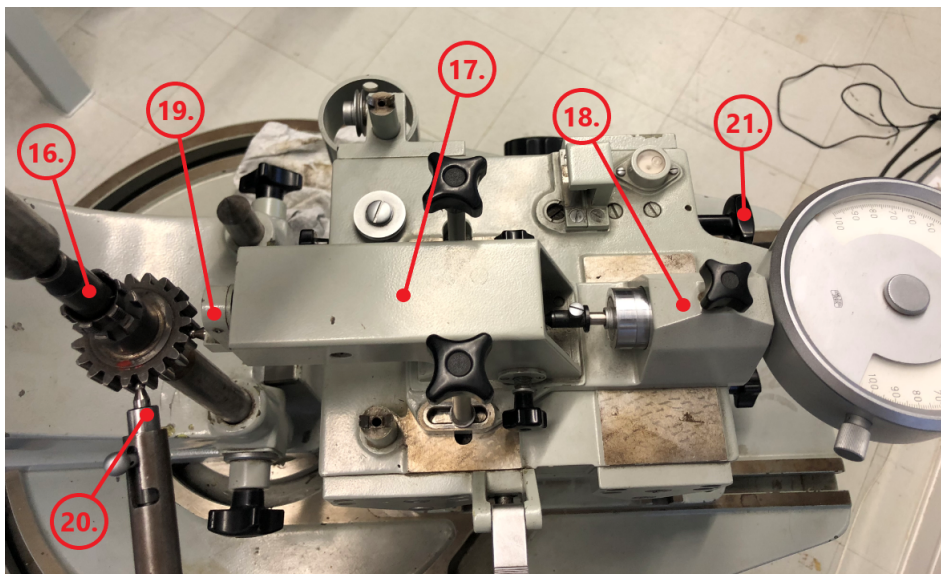
Naklopení pohyblivého rámu je realizován otáčením ovládacího prvku (9) (kola), a hodnota nastaveného úhlu naklopení ukazuje přesná ryska se stupnicí (11). Dále je součástí pevného stolu přístroje (6), pohyblivý stůl (11), na který se upevňují různé komponenty, podle měřené úchytky. Poloha pohyblivého stolu (11) lze měnit ve všech třech osách, kdy šroub (12) ovládá normálový posuv pohyblivého stolu (11) vůči měřenému hřídel, šroub (13) ovládá tečný posuv pohyblivého stolu vůči měřenému hřídeli a šroub (14) ovládá výšku pohyblivého stolu. K pohyblivému stolu je poté pevně přichyceno mechanické zařízení (15), které zajišťuje vysunutí a zasunutí měřícího elementu. Nakonec se na mechanické zařízení uchytil měřící pomůcka podle toho, jaká úchytky se právě zjišťuje (radiální házení nebo rozteče). Součástí měřícího přístroje je sada hrotů pro měření různých úchylek.



Obrázek 4.4: Popis součástí měřícího přístroje

4.1.1 Radiální házení

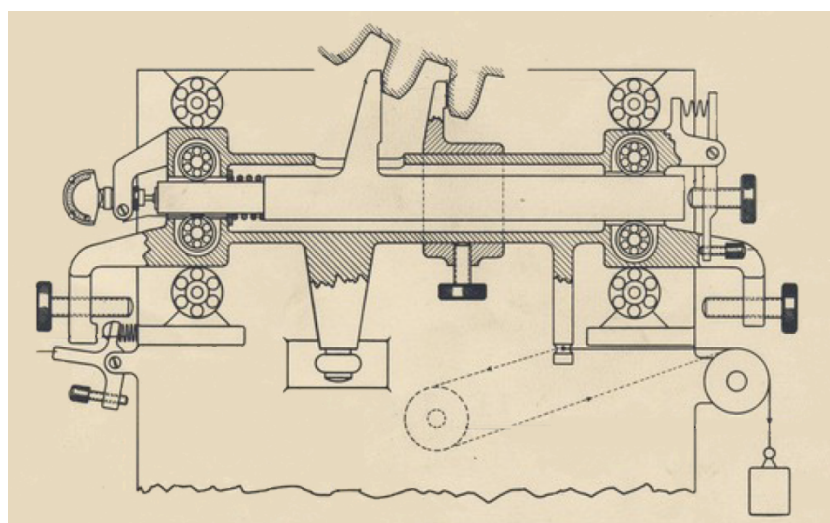
Na obrázku 4.5 je vidět sestava komponentů pro měření radiálního házení upnutého ozubeného kola (16). Na mechanické zařízení se uchytí pomůcka (17), která na jedné straně zajišťuje uchycení úchylkoměru (18) a na straně druhé měřící element (19) (hrot s kuličkou) pro radiální házení. Stavěcí hrot (20) zabraňuje neúmyslnému pohybu měřeného hřídele během dotyku měřícího hrotu (19) a během zaznamenávání naměřené hodnoty úchytky. U první zubové mezery se naměřená hodnota považuje za referenční hodnota pro porovnávání dalších naměřených hodnot. Vždy po zaznamenání naměřené hodnoty je potřeba ozubené kolo pootočit o jednu zubovou mezeru. Nejdříve se mechanické zařízení ručně odsune v radiálním směru od ozubeného kola. Poté co mechanické zařízení přestane být tlačeno, se toto zařízení automaticky vrací zpět směrem k ozubenému kolo (zasouvání měřícího elementu zpátky do mezizubového prostoru), nicméně je toto zařízení možno nastavit tak, aby se jeho pohyb vždy zastavil těsně před hlavou zubů. Tím je umožněno, aby se po vysunutí stavěcího hrotu (20) mohlo měřené ozubené kolo pootočit o jednu zubovou mezeru. Poté co se opět zasune stavěcí hrot, je ozubené kolo opět nehybné a po stisknutí páčky (21) směrem dolů se mechanismus, který zastavil měřící element těsně před hlavou zubů uvolní a mechanické zařízení opět zasune měřící element do mezizubového prostoru. Takto se naměří všechny hodnoty změn radiálních poloh měřícího elementu vůči referenční hodnotě.



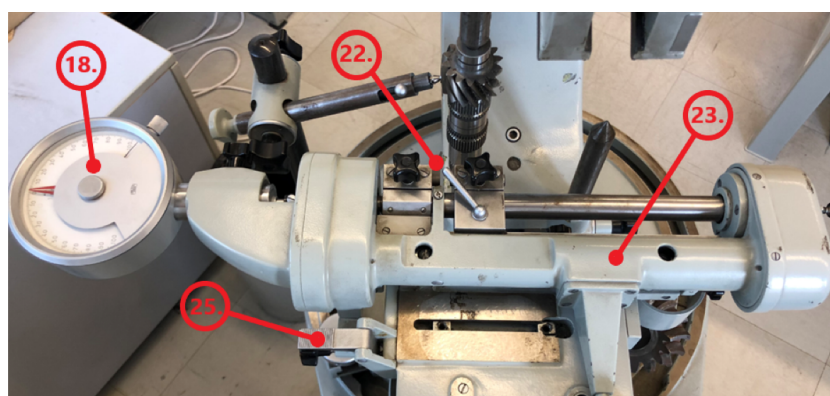
Obrázek 4.5: Popis měření radiálního házení

4.1.2 Měření roztečí

U měření roztečí funguje mechanismus pro vysouvání a zasouvání měřícího elementu a stavěcí hrot pro zamezení pohybu ozubeného kola stejně jako u měření radiálního házení. Při měření úchylek roztečí se měří změna vzdáleností dvou sousedních stejnohlých boků zubů, proto dotykové plochy měřících hrotů (22) míří stejným směrem. Jeden z měřících hrotů je pevně uchyceno k pojízdné měřící sestavě (23) a druhý hrot se volně pohybuje a je uchycenou k tyči, která se pohybuje v tečném směru vůči měřenému kolu. Svým pohybem měřící hrot tuto tyč sebou unáší a svým jedním koncem zároveň tlačí na úchylkoměr (18).



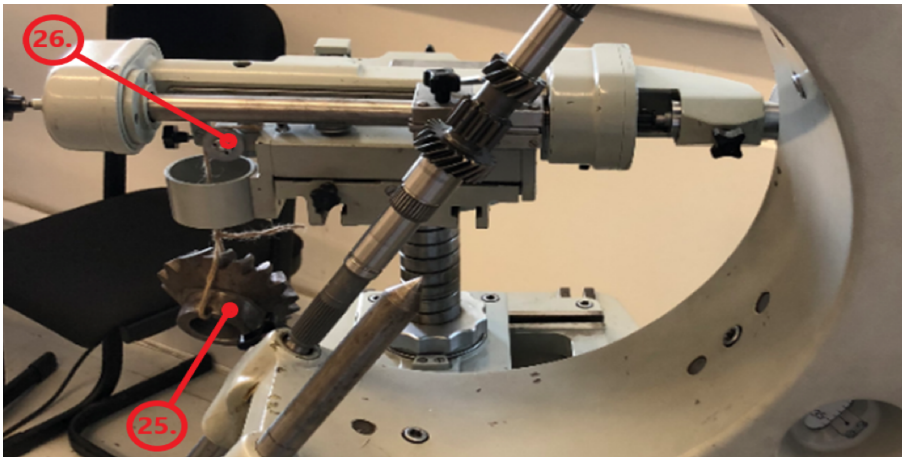
Obrázek 4.6: Schéma pro měření rozteče



Obrázek 4.7: Popis přípravku pro měření úchylek roztečí

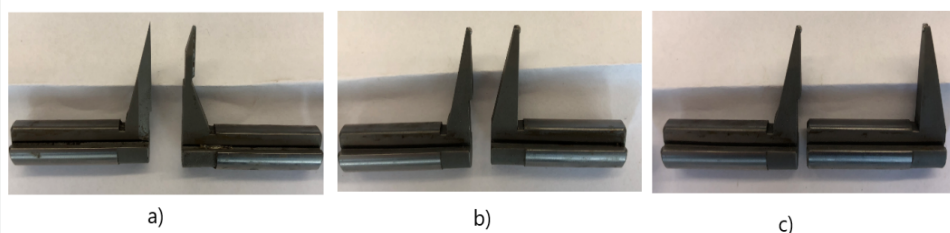
V mechanickém zařízení pro realizaci vysouvání a zasouvání měřící soustavy (23) se nachází pružina, která neustále tlačí na páku (25), která se dotýká měřící soustavy (23), a tím na ní neustále působí silou směřující směrem doleva.

Na druhé straně se za měřící soustavu (23) přes kladku (24) pověsí závaží (26), které naopak vyvolá opačně orientovanou sílu než v případě pružiny. Hmotnost závaží (24) musí být takové, aby nevyvolalo větší sílu, než je síla vyvolaná pružinou. Tím se zajišťuje to, že bez vnějšího zásahu má celá měřící soustava tendenci posouvat se doleva, tedy takovým směrem, aby se hroty, které jsou už zasunuté do mezizubových prostorách nedotýkali měřených boků zubů.

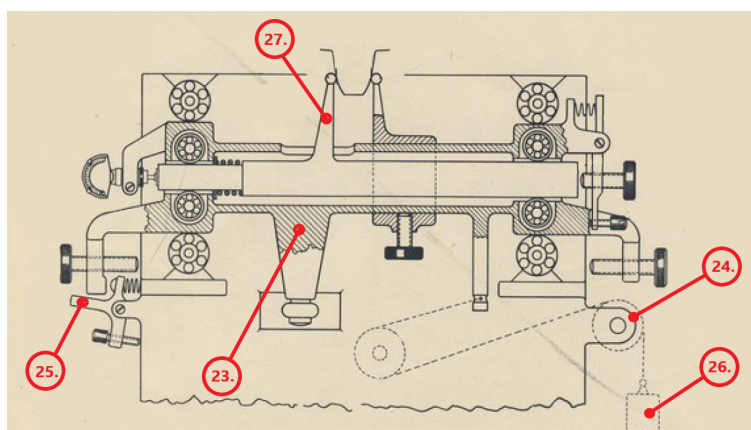


Obrázek 4.8: Popis měření úchylek roztečí

Po stlačení páčky se eliminuje síla v pružině a zbude pouze síla od závaží, která způsobí posuv měřící soustavy směrem doprava. Pevně uchycený hrot se zastaví měřící plochou o měřený bok zubu, a tím zároveň (protože je pevně uchyceno k celé měřící soustavě) zastaví pohyb celé měřící soustavy. Druhý hrot, jelikož je volně pohyblivý tak se zastaví o sousední stejnohříbý bok zubů. Pohyblivý hrot je zároveň uchycen za pohyblivou tyč, která se dotýká úchylkoměru. Proto pokud se změní vzájemná poloha dvou sousedních stejnohříbých boků zubů, změní se i vzájemná poloha obou hrotů a právě tato změna se ukáže na úchylkoměru. To, v jakých rovinách se různé rozteče měří bylo popsáno v kapitole 3.1.3. Pro měření čelních a normálních roztečí se používá hroty s kuličkou (obr. 4.9a) a pro měření základní roztečí se používají přímé hroty (obr. 4.9b), přičemž jelikož se měří stejnohříblé boky zubů, tak musí hroty směřovat jedním směrem. Pro měření úchylek tlouštěk zubů (obr. 4.10) platí stejný postup jako u měření úchylek roztečí. Jediný rozdíl je, že se u úchylek tlouštěk zubů používají jiné hroty (27), respektive jiné uspořádání hrotů (obr. 4.9c).



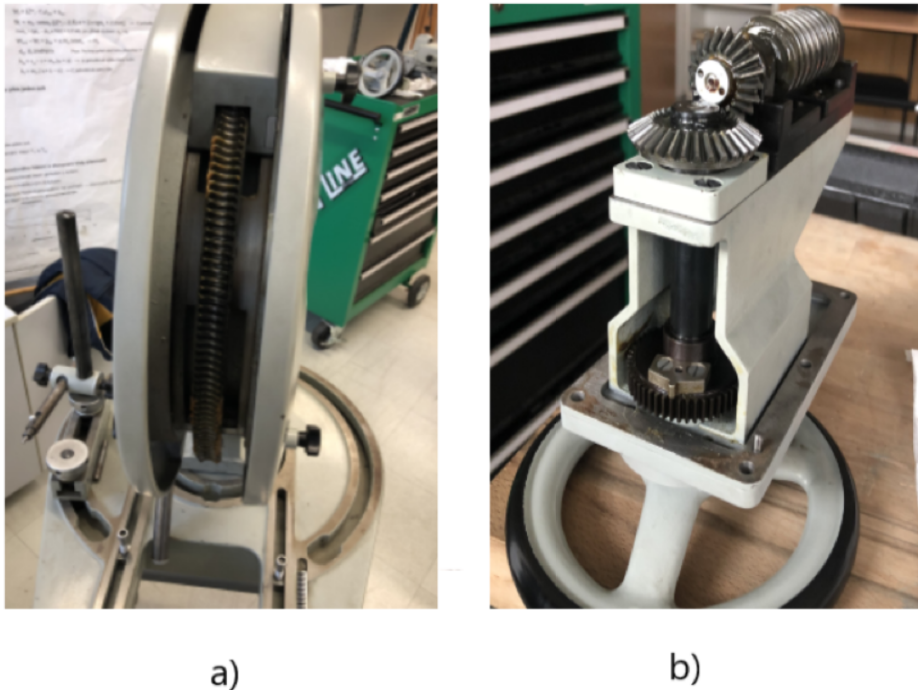
Obrázek 4.9: Konfigurace pro měření roztečí a úchylek tloušťky zubů



Obrázek 4.10: Schéma měření úchylek tlouštěk zubů

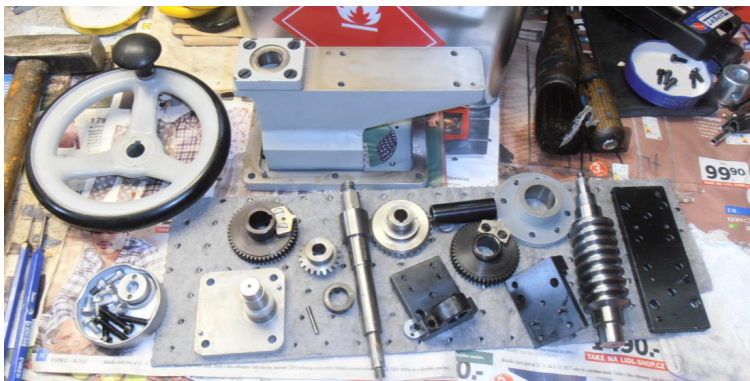
4.2 Zprovoznění přístroje

Ještě, než se na tomto měřícím přístroji Carl Zeiss dalo provádět měření, bylo nejdříve zapotřebí zajistit, aby všechny jeho zatuhlé součásti opět pracovaly správně. S mechanismem pro naklápění pohyblivého rámu dlouho nepohybovalo a to způsobilo, že stará vazelína použitá v tomto mechanismu zaschla a tím pádem zamezila volnému naklápění tohoto pohyblivého rámu. Přičemž naklápění pohyblivého rámu je nezbytně nutné při zkoumání ozubení v normálové rovině, jelikož je potřeba naklonit osu ozubeného kola (resp. osu hřídele s ozubeným kolem) o úhel sklonu zubů. Pohyblivý rám je uchyceno k rámu přístroje pomocí t-drážek (obr. 4.11a) a díky utažení matic v těchto drážkách lze zcela zamezit vzájemný pohyb obou rámu. Otáčením ovládacího kola se přenáší kroutící moment z tohoto kola na pohyblivý rám. Při otáčení ovládacího kola se převodovým mechanismem (obr. 4.11b) přenáší kroutící moment z hnacího kuželového ozubeného kola na hnané kuželové ozubené kolo, které je spojeno s hřídelem pomocí těsného pera. Součástí hřídele je také šnek, který přenáší kroutící moment na šnekové kolo, které je součástí pohyblivého rámu.



Obrázek 4.11: Šnekové kolo a převodový mechanismus

K vyčištění zaschlé vazelíny, která bránila plynulému přenosu kroutícího momentu mezi kuželovým převodem a šnekovým převodem, bylo nejdříve potřeba převodový mechanismus rozebrat na jeho jednotlivé součásti. Následně se všechny rozebrané části (obr. 4.12) vyčistily technickým benzínem a opětovně se složily. Po složení mechanismu, bylo nutné tento mechanismus opět namazat. Šnekové kolo se muselo čistit v poloze viz obrázek 4.11a, jelikož nebylo možné celý pohyblivý rám vyndat z t-drážek rámu přístroje a do úzkých mezer mezi oběma rámy kde, byla taktéž zaschlá vazelína se postupně pokapávala technickým benzínem. Následně se vyčištěné plochy a šnekové kolo opět namazalo novou vazelínou. Takto vyčištěný přístroj umožňoval využít všechny jeho funkce, a byl připraven na řešení další praktické části.



Obrázek 4.12: Rozebraný a vyčištěný převodový mechanismus z obr. 4.11b

4.3 Opakovatelnost a přesnost přístroje

Cílem každého měření, ať už se jedná o měření extenzivních veličin (hmotnost, délka atd.) nebo veličin intenzivních (tlak, teplota atd.), je snaha se co nejvíce přiblížit skutečné (pravé) hodnotě měřené veličiny. Z tohoto důvodu nás u každého měřicího přístroje vždy zajímá, s jakou přesností daný přístroj danou veličinu měří. Přesnost měřicího přístroje se dá obecně formulovat jako jeho schopnost dávat shodné (nebo velmi blízké) hodnoty se skutečnou (pravou) hodnotou měřené veličiny. Každý měřicí přístroj, který se používá v technickém průmyslu má od výrobce zaručenou nějakou určitou přesnost, se kterou danou veličinu měří. Pro popis kvality měřících přístrojů nás kromě přesnosti zajímá ještě jedna vlastnost, která se nazývá opakovatelnost. Opakovatelnost měření je míra shodnosti naměřených hodnot dané veličiny, měřená za stejných podmínek. Stejnou podmínkou je myšleno stejná metoda měření, stejná osoba, která měření provádí, stejné měřidlo a stejné okolní podmínky (teplota, tlak atd.) což se dosáhne opakováním stejného měření v co nejkratším časovém úseku.[6]

4.3.1 Určení opakovatelnosti měřicího přístroje

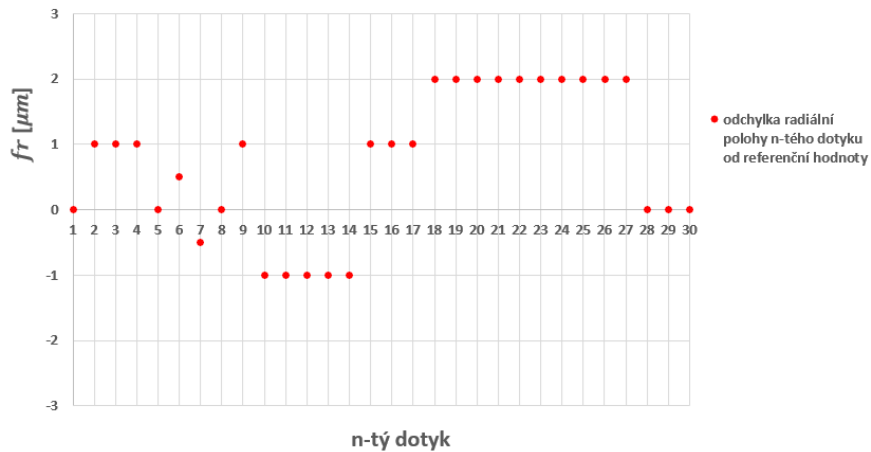
Abych získal nějakou představu o tom, jakou opakovatelnost řešený měřicí přístroj vykazuje, provedl jsem několik měření. První měření spočíval v tom, že jsem přístroj nastavil na měření radiálního házení. Pak jsem se mechanismem pro měření radiálního házení opakovaně dotýkal jednoho bodu na kalibračního válce (obr. 4.13), přičemž se válec při měření neotáčel. Po každém dotyku měřicího hrotu, byl tento hrot oddálen od měřeného bodu o nastavenou hodnotu na mechanickém zařízení, které slouží k oddálení a přiblížení měřicího prvku vůči měřicímu vzorku.



Obrázek 4.13: Určování opakovatelnosti pomocí kalibračního válce

Výsledek prvního měření byl takový, že po třiceti dotycích byl maximální rozptyl naměřených hodnot $3\mu\text{m}$. Na obrázku 4.14 je znázorněn průběh naměřených hodnot.

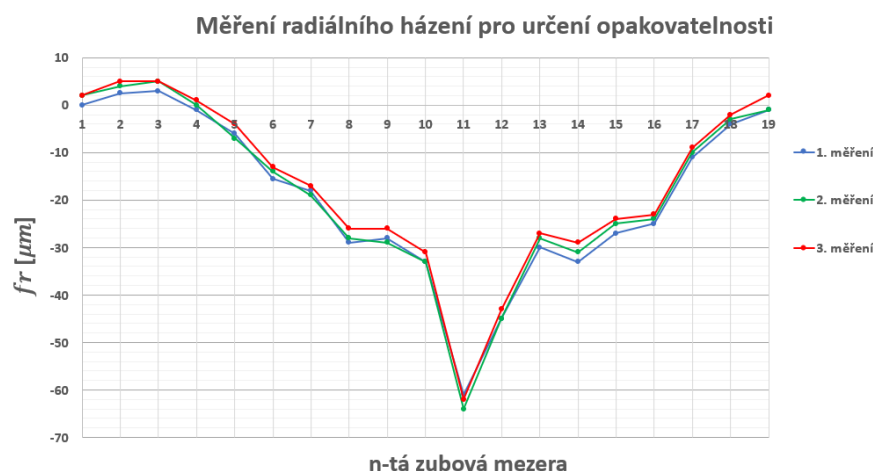
Určení opakovatelnosti měřícího přístroje pomocí kalibračního válce

**Obrázek 4.14:** Určení opakovatelnosti měřícího přístroje pomocí kalibračního válce

Dále jsem provedl měření radiálního házení a základní rozteče ozubeného kola s přímými zuby, přičemž pro oba ukazatele přesnosti (radiální házení a základní rozteč) bylo měření provedeno tři krát za sebou. Pro tato měření bylo použito čelní ozubené kolo s přímými zuby (obr. 4.15), kterých bylo na ozubeném kole celkem 19.

**Obrázek 4.15:** Čelní ozubené kolo s přímými zuby

V prvním případě (obr. 4.16) byla maximální neshoda naměřených hodnot $4\mu\text{m}$, konkrétně u 14. zubové mezery u radiálního házení. U základních roztečí (obr. 4.17) byla naměřena maximální neshoda $2\mu\text{m}$, konkrétně u 2., 3., 13., 16. A 17. rozteče levých boků zubů. Z výsledků měření plyne, že tento měřicí přístroj od firmy Carl Zeiss si i přes svoje stáří zachoval dobrou opakovatelnost se kterou dané veličiny měří.



Obrázek 4.16: Měření radiálního házení pro určení opakovatelnosti



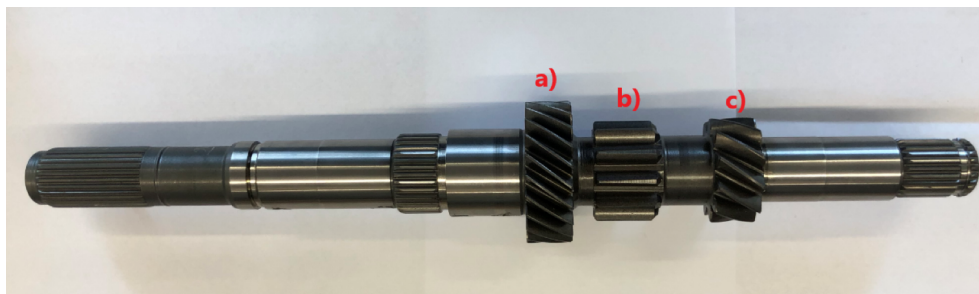
Obrázek 4.17: Měření úchylek základní rozteče pro určení opakovatelnosti

4.3.2 Odhad přesnosti měřícího přístroje

Jak už bylo řečeno na začátku této kapitoly, bohužel nejsou k dispozici žádné dokumentace k tomuto měřicímu přístroji od firmy Carl Zeiss, který se nachází v laboratořích ČVUT na Julisce. Dalším problémem je, že i kdybychom znali výrobcem zaručenou přesnost, se kterou tento přístroj původně měřil, tak tento přístroj za tolik let, co je v provozu takové vlastnosti už nemusí vůbec mít. Zjistit přesnost se kterou momentálně tento měřicí přístroj měří radiální házení, různé rozteče a úchylku tlouštěk zubů, by bylo nesmírně obtížné a složité. Proto jsem se pouze snažil přibližně odhadnout jeho přesnost, respektive jsem se pokusil získat přibližnou představu o přesnosti zmiňovaného měřícího přístroje Carl Zeiss. K odhadu, zda je měřicí přístroj stále provozuschopný (dostatečně přesný) jsem použil porovnávací způsob. Odhad spočívá v tom, že jsem porovnával mnou naměřené hodnoty daných ukazatelů úchylek nějakého

vzorku s výsledky toho samého vzorku, měřené na současně používaném měřicím přístroji. Současně používaný měřicí přístroj, který je v provozu musí mít totiž zaručenou přesnost, se kterou dané veličiny měří.

Budou-li se mnou naměřené hodnoty lišit s referenčními hodnotami v nějakém rozumném rozsahu, mohu pak tvrdit, že zmiňovaný měřicí přístroj od firmy Carl Zeiss je stále provozuschopný. Pro řešení této části práce mi byly díky vedoucímu práce poskytnuty dva hřídele. K hřídelům mi byly poskytnuty ještě jejich protokoly z měření, které jsem mohl použít jako referenční hodnoty, pro porovnávání s mnou naměřenými hodnotami úchylek. První hřídel (obr. 4.18) měl celkem 3 ozubení, přičemž první ozubení (obr. 4.18a) mělo 22 zubů s úhlem sklonu zubů na roztečném průměru $\beta = 33^\circ 45' 00''$, druhé ozubení (obr. 4.18b) bylo mělo 11 přímých zubů a třetí ozubení (obr. 4.18c) mělo také 11 zubů s úhlem sklonu zubů $\beta = 30^\circ 00' 00''$. Druhý hřídel měl jedno ozubení (obr. 4.19) s 14 zuby a úhlem sklonu zubů $\beta = 27^\circ 15' 00''$. Pro porovnávání s referenčními hodnotami jsem si zvolil proměřit radiální házení všech ozubení na 1. hřídeli, normálnou rozteč 3. ozubení na 1. hřídeli pro levý směr a normálnou rozteč ozubení na 2. hřídeli v obou směrech. Naměřené hodnoty normálné rozteče se následně musely přepočítat na čelní rozteče, a tím pádem bylo možné porovnat i hodnoty součtových roztečí. Každé měření se provedlo tak, že se daná úchylka změřila 10 krát, přičemž vždy poté, co se daná úchylka změřila 5 krát, se hřídel vyjmul a opět upnul, aby se zjistil vliv upínání na přesnost přístroje.

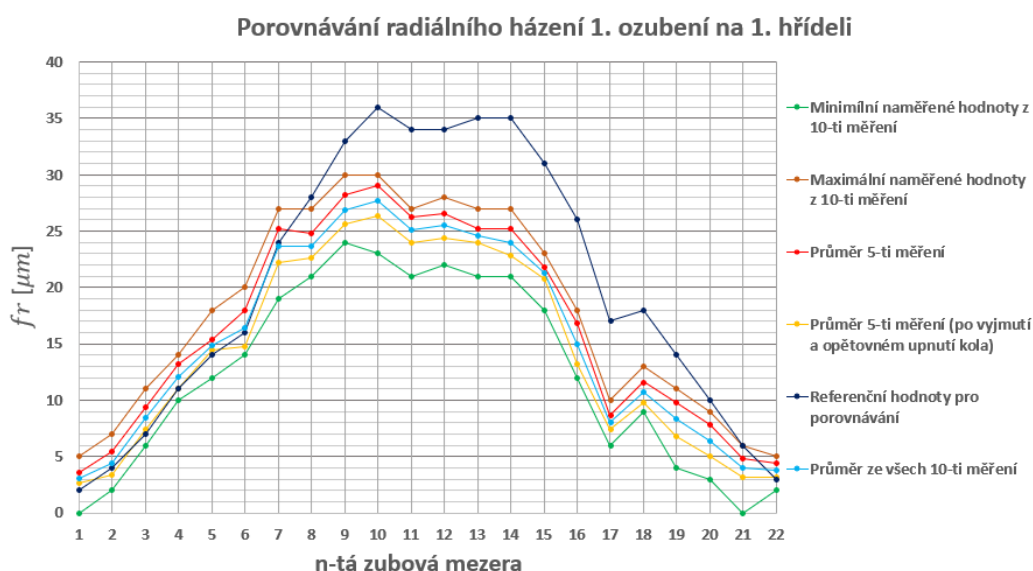


Obrázek 4.18: 3 ozubení na 1. hřídel



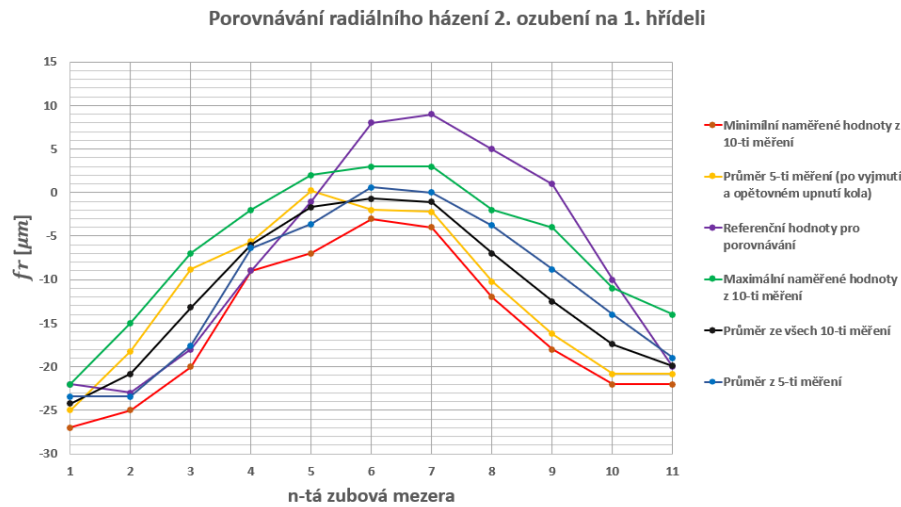
Obrázek 4.19: ozubení na 2. hřídeli

Pro 1. ozubení na 1. hřídeli vychází měření radiálního házení (obr. 4.20) tak, že maximální rozdíl mezi všemi naměřenými hodnotami z 10-ti měření a referenčními hodnotami je $14\mu m$. Dále vychází že maximální rozdíl mezi průměrem z 10-ti měření a referenčními hodnotami je $11\mu m$. Z průběhu grafu je vidět, že vyjmutí hřídele a jeho opětovné uchycení způsobilo pouze mírné snížení hodnot radiálního házení, které vykazovaly pokles o téměř konstantní hodnotu po celém obvodu měřeného vzorku.



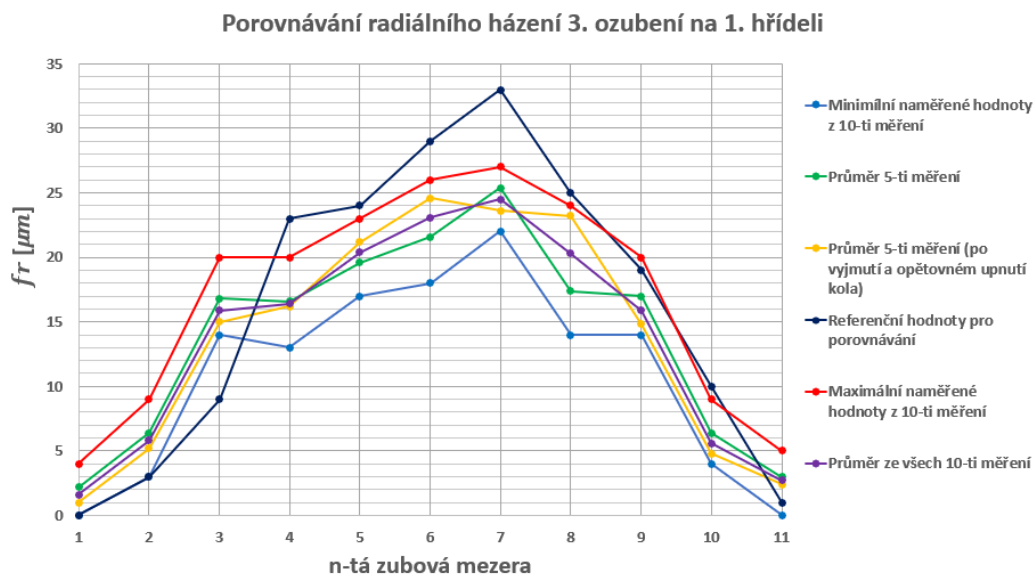
Obrázek 4.20: Porovnávání radiálního házení 1. ozubení na 1. hřídeli s referenčními hodnotami

V případě měření radiálního házení 2. ozubení na 1. hřídeli (obr. 4.21) byl naměřen maximální rozdíl mezi všemi naměřenými hodnotami z 10-ti měření a referenčními hodnotami $19\mu m$. Dále vychází, že maximální rozdíl mezi průměrem z 10-ti měření a referenčními hodnotami je $13,5\mu m$. Z průběhu grafu lze také vyčíst, že kromě mírného zhoršení přesnosti měření, byly v tomto případě výsledky měření více ovlivněny vyjmutím a opětovným upnutím měřicího vzorku.



Obrázek 4.21: Porovnávání radiálního házení 2. ozubení na 1. hřídeli s refer. hodnotami

Poslední měření radiálního házení, tj. radiální házení 3. ozubení na 1. hřídeli, mělo maximální odchylku mezi všemi naměřenými hodnotami z 10-ti měření a referenčními hodnotami rovna $11\mu m$ a maximální rozdíl mezi průměrem z 10-ti měření a referenčními hodnotami rovna $8,3\mu m$. To znamená, že tohle měření se nejvíce přiblížilo referenčním hodnotám, přestože stejně jako při měření 2. ozubení vykazuje upínání měřeného vzorku určitý vliv na výsledky měření.

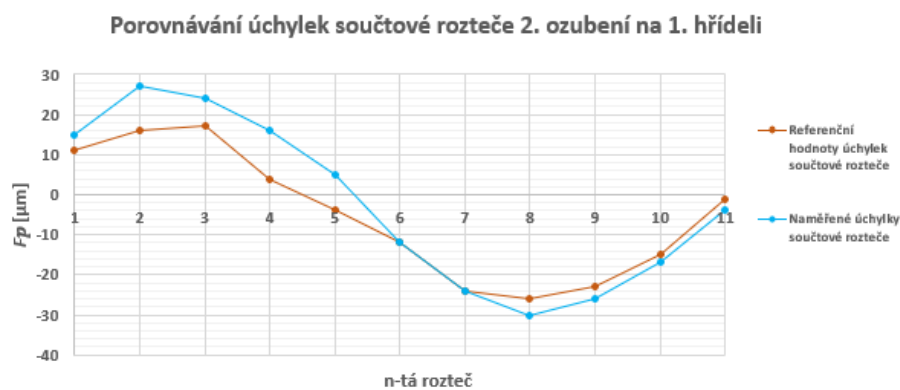


Obrázek 4.22: Porovnávání radiálního házení 3. ozubení na 1. hřídeli s refer. hodnotami

U prvního měření čelních roztečí (obr. 4.23), kromě jednoho bodu, vykazují naměřené hodnoty velmi podobný průběh úchylek jako referenční hodnoty. Při zanedbání odchylky u 6. rozteče, u kterého přístroj evidentně vždy naměřil nepřesnou hodnotu, se ostatní odchylky naměřených hodnot s referenčními hodnotami pohybují maximálně do $7\mu m$. Podobný průběh naměřených úchylek čelních roztečí a referenčních hodnot má vliv na to, že i naměřená úchylka součtové rozteče (obr. 4.23) vychází velmi podobně jako referenční hodnoty.



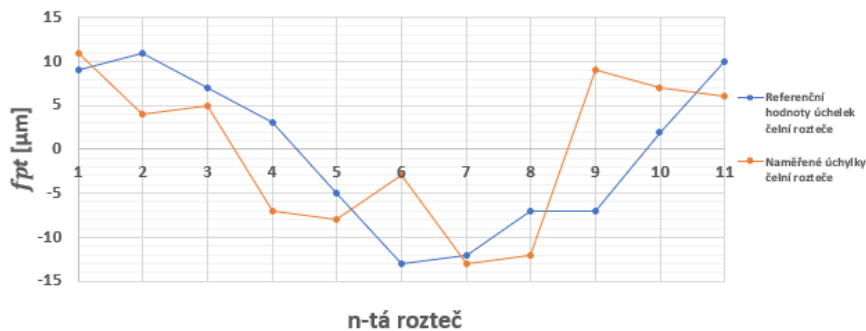
Obrázek 4.23: Porovnávání úchylek čelních roztečí 2. ozubení na 1. hřídeli s refer. hodnotami



Obrázek 4.24: Porovnávání úchylky součtové rozteče 2. ozubení na 1. hřídeli s refer. hodnotami

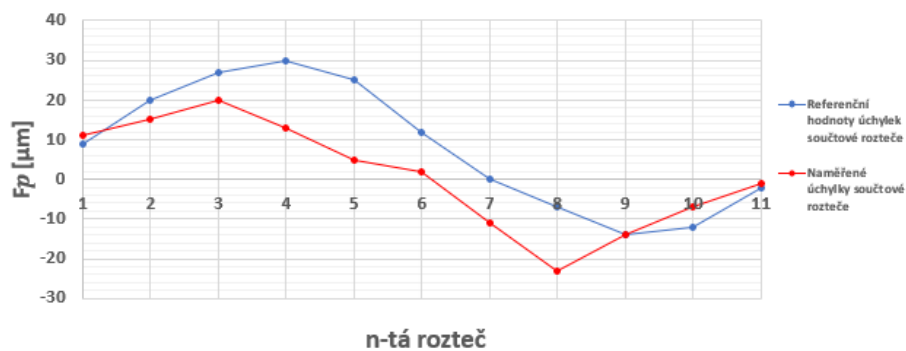
Během měření úchylek roztečí dalšího ozubení, konkrétně 3. ozubení na 1. hřídeli, už měřicí přístroj nevykazuje takovou přesnost jako v prvním případě. Nepřesnost měření lze vidět na velikostech naměřených hodnot odchylek vůči referenčním hodnotám (obr. 4.25), kdy například u 9. rozteče nabývá zmiňovaná odchylka dokonce hodnoty $16\mu m$. Ještě důležitější je skutečnost, že naměřené hodnoty úchylek mají velmi odlišný průběh než je tomu u hodnot referenčních.

Porovnávání úchylek čelních roztečí 3. ozubení na 1. hřídeli



Obrázek 4.25: Porovnávání úchylek čelních roztečí 3. ozubení na 1. hřídeli s refer. hodnotami

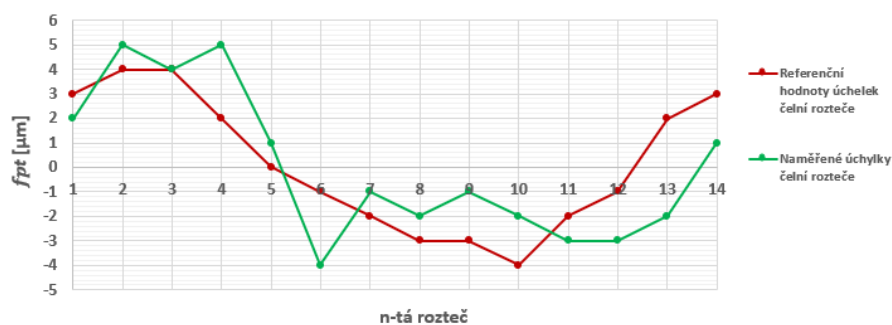
Porovnávání úchylek součtové rozteče 3. ozubení na 1. hřídeli



Obrázek 4.26: Porovnávání úchylky součtové rozteče 3. ozubení na 1. hřídeli s refer. hodnotami

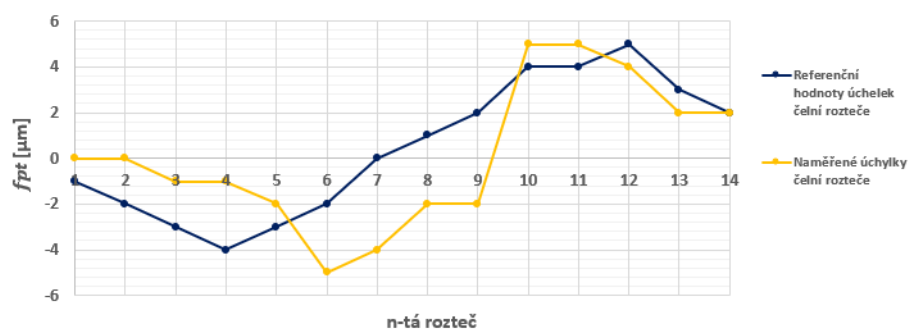
Z výsledků měření úchylek čelních roztečí ozubení na 2. hřídeli (obr. 4.27 a 4.28) lze vidět, že došlo při měření jen výjimečně k velkým odchylkám. V tomto případě je vidět, že v obou směrech naměřil přístroj pouze malé odchylky (max. 4μ) od referenčních hodnot, tím pádem lze v tomto případě považovat měření přístroje za velmi přesný. To dokazuje i skutečnost, že průběhy naměřených hodnot v obou směrech vykazují velmi podobný průběh stoupání a klesání jako je tomu u průběhů referenčních hodnot.

Porovnávání úchylek čelních roztečí pravých boků zubů na 2. hřídeli



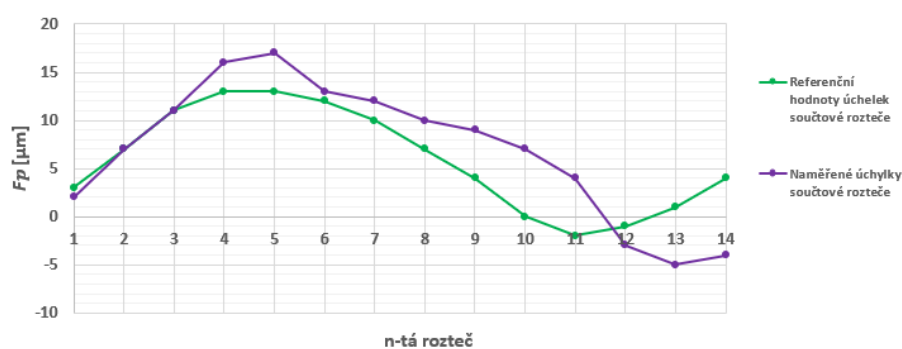
Obrázek 4.27: Porovnávání úchylek čelních roztečí pravých boků zubů na 2. hřídeli s refer. hodnotami

Porovnávání úchylek čelních roztečí levých boků zubů na 2. hřídeli

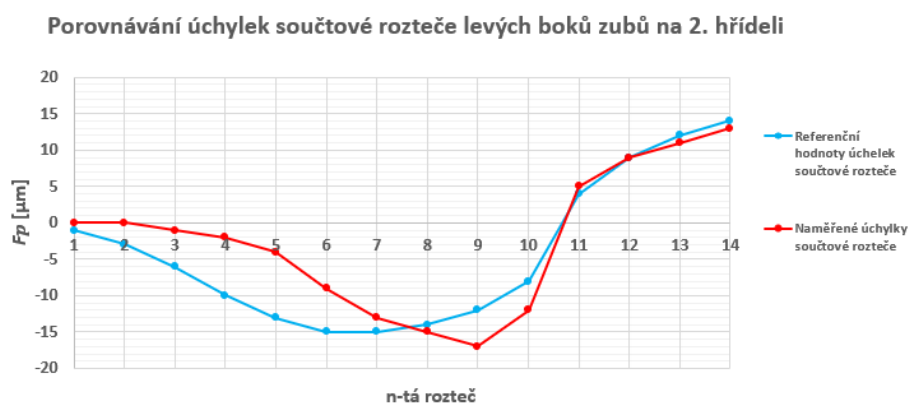


Obrázek 4.28: Porovnávání úchylek čelních roztečí levých boků zubů na 2. hřídeli s refer. hodnotami

Porovnávání úchylek součtové rozteče pravých boků zubů na 2. hřídeli



Obrázek 4.29: Porovnávání úchytky součtové rozteče pravých boků zubů ozubení na 2. hřídeli s refer. hodnotami



Obrázek 4.30: Porovnávání úchytky součtové rozteče levých boků zubů ozubení na 2. hřídeli s refer. hodnotami

Z výsledků měření a průběhů naměřených hodnot úchylek radiálního házení všech tří ozubení vyplývají vlastnosti, se kterými zmiňovaný měřicí přístroj tuto úchytku určuje. Porovnáním naměřených hodnot s těmi referenčními lze tvrdit, že čím větší je úchytky radiálního házení měřeného vzorku, tím větší je chyba, se kterou tento měřicí přístroj zmiňovanou veličinu měří. Dále lze tvrdit že vyjmutí měřeného vzorku a jeho opětovné uchycení (vliv hrotů pro středící důlky na měření) má určitý vliv na výsledky měření. Tento vliv se projevuje mírnými výkyvy naměřených hodnot. Vliv upínání měřeného vzorku na celkové radiální házení znázorňuje tabulka na obrázku 4.31. Na obrázcích 4.21, 4.22 a 4.23 je vidět, že vyjmutí měřeného kola a jeho opětovné upnutí způsobí výkyvy všechny jednotlivých naměřených hodnot radiálního házení, nicméně výsledky obrázku (4.31) naznačují, že vliv upínání způsobí pouze nepatrný rozdíl toho celkového (nikoliv jednotlivé hodnoty) radiálního házení. Celkově je tento měřicí přístroj, co se týče měření úchylek radiálního házení, stále schopný naměřit podobné (až na občasné výkyvy) hodnoty, jako ty současně používané měřicí přístroje.

VLIV UPÍNÁNÍ MĚŘENÉHO KOLA NA NAMĚŘENÉ HODNOTY								
	Měřené ozubení	Referenční hodnota radiálního házení [μm]	Největší odchylka z 1. pěti měření od ref. hodnot [μm]	Největší odchylka 2. pěti měření od ref. hodnot [μm] (přeupnutí)	Největší odchylka průměru z 10 měření od ref. hodnoty [μm]	Největší odchylka mezi dvěma hodnotami z 1. pěti a 2. pěti měření [μm] (po přeupnutí)	Celkové radiální házení F_r [μm] z 1. pěti měření	Celkové radiální házení F_r [μm] z 2. pěti měření
RADIÁLNÍ HÁZENÍ F_r	1. ozubení na 1. hřídeli	34	12	14	11	8	30	29
	2. ozubení na 1. hřídeli	33	13	19	13,5	14	28	29
	3. ozubení na 1. hřídeli	32	11	10	14,9	10	27	26

Obrázek 4.31: Vliv upínání měřeného kola na naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty čelních roztečí a z nich určené úchytky součtových roztečí napovídají tomu, že tento měřicí přístroj Carl Zeiss nedosahuje při měření těchto zmíněných úchylek takové přesnosti, jako tomu bylo u radiálního házení. Jeden z možných důvodů může být skutečnost, že přípravek a konfigurace součástí přístroje pro měření roztečí je složitější, než tomu je u radiálního házení. Dalším zdrojem nepřesností mohlo být naklápění měřeného vzorku pro jeho měření v normálové rovině, kdy bylo velmi obtížné naklopit například ozubení na 2. hřídeli o úhel sklonu zubů $\beta = 27^{\circ}15'00''$. I přes tuto větší nepřesnost prokázaly výsledky měření, že lze na tomto přístroji dosáhnout podobných výsledků jako na současně používaných měřicích přístrojích.

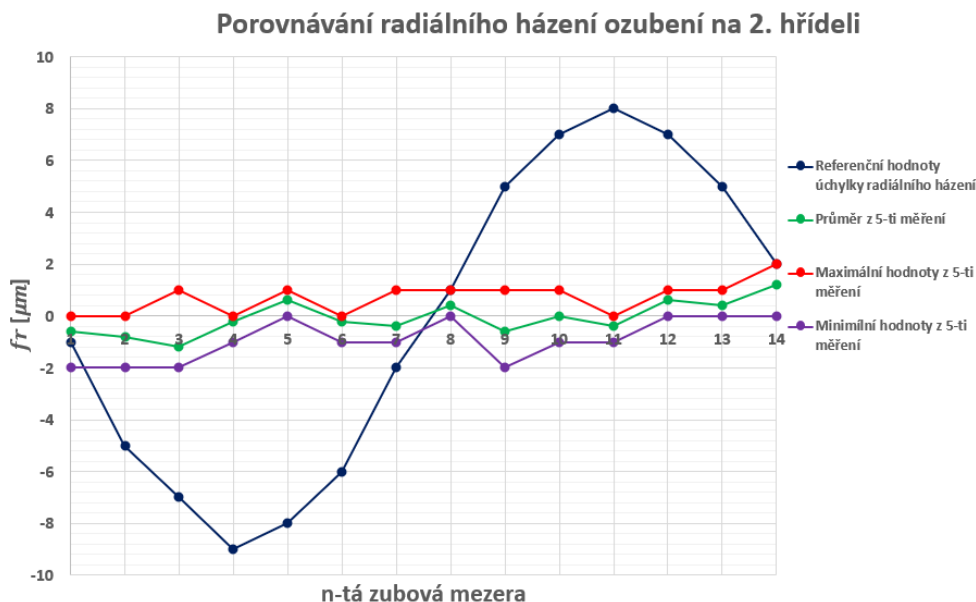
Pro shrnutí výsledků při odhadu přesnosti měřicího přístroje Carl Zeiss byla referenční data a naměřená data vložena do tabulky (obr.4.32). V 3., 5. a 7. sloupci jsou hodnoty úchylek příslušného měřeného ozubení v mikrometrech [μm]. Pro každou hodnotu úchytky je hned vedle ní (napravo) doplněna příslušná třída přesnosti podle normy ČSN 01 4682. Jak už bylo zmíněno v této práci, v praxi mají některé společnosti a firmy vlastní hodnoty dovolených úchylek a neřídí se normami, jako tomu je v tomto případě. Proto slouží doplněné třídy přesností pouze pro účel této práce, a jelikož se třídy přesnosti a dovolené úchytky vybírají podle účelu a geometrie ozubeného kola, nemusejí být doplněné třídy přesnosti příslušných ozubených kol v tabulce v souladu s normami.

SHRnutí VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ								
	Měřené ozubení	Dovolená úchytky podle měřového protokolu [μm]	Odpovídající třída přesnosti	Úchytky podle měřového protokolu [μm]	Odpovídající třída přesnosti	Úchytky naměřené měřicím přístrojem Carl Zeiss [μm]	Odpovídající třída přesnosti	Rozdíl mezi naměřenou úchytkou a ref. úchytkou [μm]
RADIÁLNÍ HÁZENÍ F_r	1. ozubení na 1. hřídeli	56	7.	34	6.	30	5.	4
	2. ozubení na 1. hřídeli	90	8.	33	5.	30	5.	3
	3. ozubení na 1. hřídeli	90	8.	32	5.	27	5.	5
ČELNÍ ROZTEČ F_{pr}	2. ozubení na 1. hřídeli	14	5.	14	5.	17	6.	3
	3. ozubení na 1. hřídeli	14	5.	13	5.	13	5.	0
	1. hřídel - pravé boky zubů	5	3.	4	3.	5	3.	1
	2. hřídel - levé boky zubů	5	3.	5	3.	5	3.	0
ÚCHYLKA SOUČTOVÉ ROZTEČE F_p	2. ozubení na 1. hřídeli			41	norma neuvádí	57	norma neuvádí	16
	3. ozubení na 1. hřídeli			42	norma neuvádí	43	norma neuvádí	1
	1. hřídel - pravé boky zubů			18	norma neuvádí	22	norma neuvádí	4
	2. hřídel - levé boky zubů			18	norma neuvádí	30	norma neuvádí	12

Obrázek 4.32: Tabulka shrnující výsledky měření

Třída přesnosti u dovolených úchylek odpovídá třídě přesnosti podle ČSN 01 4682 při respektování geometrie (modul a roztečný průměr) daného ozubeného kola. Třídy přesnosti dvou zbývajících úchylek odpovídají nejnižší možné třídě přesnosti, ve kterém by se dané úchyly mohli pohybovat, aby nepřekročily dovolenou úchytku. Při výpočtu úchylek radiálního házení naměřené na přístroji Carl Zeiss byly brány v potaz všechny naměřené hodnoty ze všech 10. měření. Výsledná úchytky (celkové radiální házení) je tedy maximální rozdíl dvou naměřených hodnot z dvou libovolného n-tého měření. Například pro 1. ozubení na 1. hřídeli byla výsledná úchytky ($30\mu\text{m}$) získána jako rozdíl mezi největší hodnotou házení ($30\mu\text{m}$), tj. u 7. zubové mezery při 3. měření a nejmenší hodnotou házení ($0\mu\text{m}$), tj. u 1. zubové mezery při 2 měření. Z doplněných tříd přesností vyplývá, že z 7 případů pouze v jednom případě, by se měřené ozubené kolo vyhodnotilo chybně, jelikož by přístroj naměřil větší úchytku než je dovolená hodnota (čelní rozteč 2. ozubení na 1 hřídeli). Lze tedy říci, že měřící přístroj Carl Zeiss má dostatečnou přesnost, aby naměřil podobné celkové hodnoty úchylek, jako hodnoty získané na moderních přístrojích.

Pro odhad přesnosti měřícího přístroje Carl Zeiss, jsem měl původně v plánu porovnat naměřené úchytky radiálního házení ozubení na 2. hřídeli (obr. 4.19) s referenčními hodnotami. Nicméně jsem narazil na neobvyklý problém. Po naměření radiálního házení mi vyšlo, že zmiňované ozubení má téměř po celém svém obvodu nulové házení (obr. 4.33). To by prakticky znamenalo, že takový hřídel s ozubením by z hlediska kinematické přesnosti pracovalo v provozu téměř bez jakýchkoliv kinematických nepřesností.



Obrázek 4.33: Naměřené radiální házení 2. hřídele

Po konzultaci s vedoucím práce ohledně řešení této problematiky, mi byla navržena jedna z možných příčin. Příčina spočívá v tom, že zatímco jsem při měření úchylek radiálního házení upínal hřídel za středící důlky, tak pro zjištění referenčních hodnot, které jsem použil při porovnávání byl ten samý hřídel upnut jiným způsobem. Při upnutí za středící důlky se totiž řeší radiální házení ozubení pouze vůči ose těchto důlků. Zatímco, jestliže se tento hřídel upne do sklíčidel například za válcovou plochu, která je určena pro nalisování ložisek, pak v takovém případě řeším radiálního házení ozubení vůči ose hřídele. Takové upnutí (do sklíčidel) má v praxi větší význam, neboť hřídele jsou v provozu uloženy nikoliv za středící důlky, ale právě do ložisek.

Kapitola 5

Závěr

Celá tato práce je rozdělena na dvě části. Dle zadání (str. 2) bylo v první části práce provedena rešerše v oblasti kontroly odchylek čelních ozubených kol s evolventním ozubením. Než se mohly v práci řešit odchylky, bylo nejdříve zapotřebí popsat samotnou geometrii čelních ozubených kol s evolventním ozubením. Proto tato práce začíná popisem evolventní křivky a evolventní šroubové plochy, které tvoří profil boků a tvar boků zubů řešených ozubených kol. Dále se práce zabývá teoretickým tvarem a skutečným tvarem čelních ozubených kol, ovlivněný úmyslnými i neúmyslnými odchylkami. Celá 3. kapitola je věnována odchylkám geometrie čelních ozubených kol. Nejdříve byly vysvětleny ukazatele přesnosti (různé druhy odchylek), a to sice z hlediska toho jak jsou definovány, jak vznikají, co znamenají, co způsobují, jak se zjišťují (měří) a jakým způsobem se vyhodnocují. Všechny ukazatele přesnosti jsou kategorizovány až v následující kapitole, která řeší problematiku lícování čelních ozubených kol, včetně norem, které se lícování týkají.

Praktická část této práce začíná nastíněním problému s řešeným měřícím přístrojem Carl Zeiss, který se nachází v laboratořích ČVUT na Julisce. Dle zadání (str. 2) byl měřící přístroj zprovozněn a uveden do takového stavu, ve kterém tento přístroj umožňoval zjišťovat všechny veličiny, ke kterým byl původně určen. Než se dalo na přístroji cokoli měřit, bylo nejdříve nutné pochopit jeho obsluhu a funkce jeho součástí. Tento krok ztížila absence původních dokumentací měřícího přístroje a pro pochopení měřícího přístroje byla použita dokumentace k podobnému přístroji (nikoliv stejném) od firmy Carl Zeiss a pro pochopení některých částí přístroje bylo nutné použít i metodu pokus-omyl. Práce pokračuje řešením dalšího zadaného úkolu a to sice, popis způsobu obsluhy přístroje, funkce jeho součástí a popis metodiky měření veličin, ke kterým je přístroj určen.

Konec této práce je pak věnována zjišťování a odhadování měřících vlastností přístroje. Konkrétně byla snaha odhadnout přesnost porovnáváním naměřených dat z řešeného přístroje s naměřenými daty z jiného měřícího přístroje. Výsledky a porovnávání naměřených dat naznačují, že si přístroj i přes svoje stáří zachoval dobrou opakovatelnost a dostatečnou přesnost, se kterou dané veličiny měří. Jako velkou nevýhodu tohoto měřícího přístroje

vidím v časové náročnosti při jeho přenastavování na měření jiné úchytky. Například po doměření radiálního házení zabere hodně času, než se tento přístroj správně přenastaví nebo než se vymění příslušný přípravek na měření jiné úchytky. V tomhle ohledu jsou moderní CNC měřicí přístroje mnohem vyspělejší a efektivnější, jelikož umožňují současně provádět měření více druhů úchylek najednou. Nicméně, pro ukázkou během výuky je tento měřicí přístroj podle mě ideální, jelikož si člověk při měření uvědomí potíže související s problematikou kontroly úchylek a lépe pochopí význam a funkci hledaných úchylek. Během řešení této práce byly splněny všechny zadané úkoly. Na úplném konci práce je nastíněna problematika s upínáním měřeného vzorku, která má také veliký vliv na naměřené hodnoty.



Literatura

- [1] ŠALAMOUN. Čestmír a Miloš SUCHÝ. Čelní a šroubová soukolí s evolventním ozubením. 1. vyd. *Praha: Nakladatelství techn. lit, 1990*, ISBN 8003005329;9788003005321;.
- [2] Michal. ŠAFÁŘ. Mezní možnosti převodů evolventních ozubení. *vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2015*. Bakalářská práce.
- [3] Vladimír. MORAVEC. Konstrukce strojů a zařízení 2: čelní ozubená kola : teorie - výpočet - konstrukce - výroba - kontrola. *Ostrava: Montanex, 2001*, 2001. ISBN 9788072250516;8072250515;.
- [4] Ivan Mrkvica. Vybrané kapitoly ze strojírenské metrologie. *VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012*, ISBN: 978-80-248-2709-4.
- [5] Český normalizační institut. ČSN 01 4682. Ozubená kola: lícování ozubených soukolí čelních s přímými a šikmými zuby. *Vydavatelský Úřad pro normalizaci a měření*.
- [6] MÁDL. Jan a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. technologie obrábění. 2. přeprac. vyd. *Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007.*, ISBN 8001037525;9788001037522;.
- [7] Emil. ŘEHÁČEK. Ozubená kola: pokrokové konstrukce a výpočty : pomůcka ke studiu i pro praxi. 1. vyd. *Praha: Práce, 1964*.
- [8] Český normalizační institut. ČSN 01 4678. Ozubená kola: měření zubů v konstantní tloušťce a výšce = measuring of teeth in constant thickness and height. *Vydavatelský Úřad pro normalizaci a měření*.
- [9] Stepan P. RADZEVIČ. Gear cutting tools: science and engineering. second. *New York;Boca Raton;London;: CRC Press, Taylor Francis Group, 2017.*, ISBN 9781138037069;1138037060;.
- [10] Václav. RŮŽIČKA. Kontrola ozubených kol s úvodem do geometrického výpočtu ozubení. vyd. 1. *Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957*.

- [11] Šárka a Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava. TICHÁ. Strojírenská metrologie. 1. vyd. *Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006.*, ISBN 9788024812090;8024812096;.
- [12] Jaroslav a České vysoké učení technické v Praze. BOHÁČEK. Elektrotechnická fakulta. metrologie. 2. vydání. *Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017.*, ISBN 8001061698;9788001061695;.
- [13] Miloš. NĚMČEK. Vybrané problémy geometrie čelních ozubených kol. *Ostrava: Montanex, 2003.*, ISBN 8072251112;9788072251117;.
- [14] Rudolf. KŘÍŽ. Stavba a provoz strojů ii: převody. 1. vyd. *Praha: SNTL, 1978.*
- [15] Vladimír. BAŠUS. Příručka měřicí techniky pro strojírenství a energetiku. *Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.*
- [16] Václav. JANÍK. Výroba ozubení: stručný přehled výroby ozubení k odbornému školení a opakování učiva. vyd. 1. *Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.*