

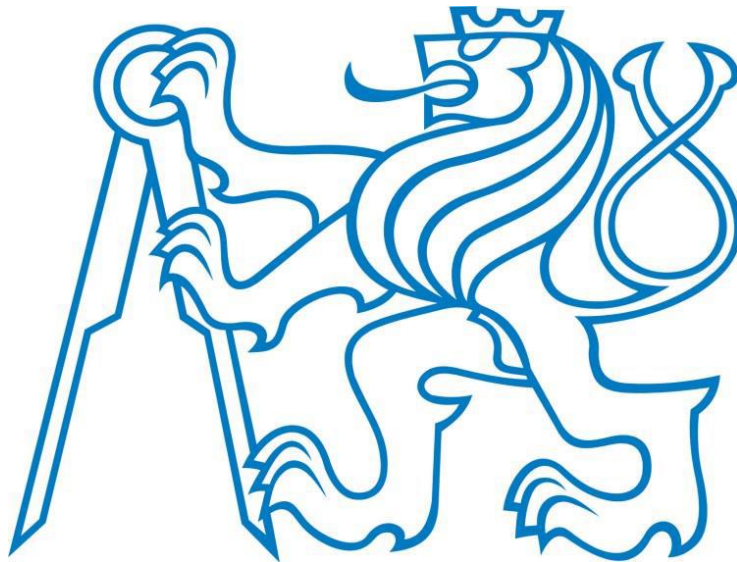
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie Ú12134

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv filtrace a metody výpočtu na výsledek měření rozměru a chyby tvaru při měření kruhovitosti



Vypracoval: Martin Bílý

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

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bílý** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **419857**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv filtrace a metody výpočtu na výsledek měření rozměru a chyby tvaru při měření kruhovitosti

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of filtration and calculation methods on the result of dimension and form errors in the measurement of roundness

Pokyny pro vypracování:

Geometrické tolerance a jejich rozdělení
Vliv kruhovitosti na funkci strojních součástí
Metody měření kruhovitosti a používané přístroje
Filtrace pomocí počtu vln na otáčku a Rychlá Fourierova transformace (FFT)
Demonstrace vlivu filtrace a metody výpočtu kružnice na výsledky měření

Seznam doporučené literatury:


Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Libor Beránek Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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.

28.4.2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování:

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Liboru Beránkovi Ph.D. za ochotný přístup, za čas, který mi věnoval v rámci konzultačních hodin a za cenné rady ohledně psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vladimírovi Šulcovi, který mi věnoval čas a pomohl při měření praktické části mé práce, jako i s problematikou ohledně kruhovitosti. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za cenné rady, trpělivost a podporu při mém dosavadním studiu.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřená na seznámení čtenářů se základními principy kruhovitosti, metodami měření kruhovitosti a v neposlední řadě s filtrací při měření kruhovitosti. V první části jsou uvedeny geometrické tolerance a jejich rozdělení. Druhá část práce se zabývá vlivem kruhovitosti na funkci strojních součástí. Další část je věnována konkrétním metodám měření kruhovitosti. V poslední teoretické části se pozornost věnuje konkrétním metodám filtrace při měření kruhovitosti. V praktické části se i díky použitým poznatkům z teorie zabývám konkrétním měřením a využitím filtrace v praxi na konkrétní měřené součásti.

Klíčová slova: Geometrické tolerance, kruhovitost, metrologie, filtrace, frekvence, UPR filtr

Annotation

The bachelor thesis is focused on familiarizing readers with basic principles of roundness, methods of measurement of roundness and finally with filtration during measurement of roundness. The first part lists the geometric tolerances and their distribution. The other part is concerned with influence of roundness on the function of mechanical parts. The next part is devoted to concrete methods of measuring roundness. In the last theoretical part, attention is paid to specific methods of filtration in the measurement of roundness. In practical part of bachelor thesis, in assistance to the used knowledge from theory, I realize concrete measurement and use there filtration in practice on specific measured component.

Key words: Geometric tolerances, roundness, metrology, filtration, frequency, UPR filter

Obsah

Úvod	9
1 Geometrické tolerance a jejich rozdělení	10
1.1 Tolerance tvaru.....	11
1.1.1 Tolerance přímosti	11
1.1.2 Tolerance rovinnosti.....	11
1.1.3 Tolerance kruhovitosti	12
1.1.4 Tolerance válcovitosti.....	12
1.1.5 Tolerance tvaru profilu libovolné čáry	12
1.1.6 Tolerance tvaru profilu libovolné plochy	13
1.2 Tolerance směru	13
1.2.1 Tolerance rovnoběžnosti.....	13
1.2.2 Tolerance kolmosti	13
1.2.3 Tolerance sklonu	14
1.3 Tolerance umístění	14
1.3.1 Tolerance polohy.....	14
1.3.2 Tolerance sousosti a soustřednosti.....	15
1.3.3 Tolerance souměrnosti.....	15
1.4 Tolerance házení.....	15
1.4.1 Tolerance kruhového házení	15
1.4.2 Tolerance celkového házení.....	16
2 Vliv kruhovitosti na funkci strojních součástí	17
2.1 Vliv tvaru ložisek.....	17
2.2 Vliv házení rotačního nástroje	18

2.3	Vliv upnutí dílů při obrábění	20
2.3.1	Univerzální sklíčidlo	20
2.3.2	Použití lícni desky	21
2.3.3	Soustružnické trny	21
2.3.4	Kleštinový upínání	23
2.3.5	Upnutí mezi hroty	23
3	Metody měření kruhovitosti a používané přístroje	26
3.1	Měření odchylek kruhovitosti	27
3.1.1	Dvojbodová metoda měření	28
3.1.2	Trojbodová metoda měření	28
3.1.3	Měření mezi hroty	29
3.2	Měření speciálními dotykovými přístroji	30
	ZEISS PRISMO navigátor	34
4	Metody filtrace	35
4.1	Rychlá Fourierova Transformace(FFT)	37
4.2	Digitální filtry	38
4.2.1	Dolno propustný filtr	39
4.2.2	Horno propustný filtr	40
4.2.3	Středně propustný filtr	40
	Demonstrace vlivu filtrace a metody výpočtu na výsledky měření	43
4.3	Měření na kruhoměru	43
4.4	Měření na souřadnicovém měřícím stroji	46
4.5	Výsledky měření a porovnání jednotlivých měření	47
4.5.1	Rychlá Fourierova Transformace	48
4.5.2	UPR 15	49
4.5.3	UPR 50	50

4.5.4	UPR 150	51
4.5.5	UPR 500	52
Závěr		54
Seznam obrázků		56
Seznam tabulek		58
Zdroje		59

Úvod

Kruhovitostí se v průmyslu začali intenzivně zaobírat v 50. letech dvacátého století. Kruhovitost jako taková společně s házením a jinými geometrickými součástmi má vliv na funkci hlavně rotačních součástí. V mé práci se zaměřím na vliv filtrace na měření kruhovitosti. Filtrace má za úlohy odfiltrout nepřesnosti výrobního procesu tak, aby měření s použitím těchto filtrací bylo přesné a aby se na grafu zobrazilo to, co potřebujeme. Proto rozeznáváme dolno, středně a horní propustné filtry, které nám zobrazí jenom určité frekvence, podle toho o jaký filtr se jedná.

Cílem mé bakalářské práce je provést konkrétní měření na rotační součásti, na kruhoměru a souřadnicovém měřícím stroji, s použitím filtrů UPR. Konkrétně budou použity všechny mezinárodně uznávané UPR filtry a to UPR 15, UPR 50, UPR 150 a UPR 500.

V první části mé práce se budu věnovat všeobecně geometrickým tolerancím, jejich rozdělení, značení a taky konkrétnímu znázornění na příkladu.

V druhé části mé práce se zaměřím na vliv kruhovitosti na strojní součásti. Budu se zabývat upnutím dílů při rotačním obrábění, kde budou popsány konkrétní metody upnutí a taky se budu zabývat upnutím rotačních nástrojů.

Ve třetí části se chci zaměřit na samotné metody měření kruhovitosti, kde čtenáře obeznámím jak s komunálními měřidly tak i moderními měřicími přístroji.








V poslední teoretické části se čtenáři dozví o metodách filtrace při měření kruhovitosti. Budou zde zmíněny UPR filtry, význam filtrace FFT (Rychlá Fourierova transformace), a účinky dolno, středně a horní propustných filtrů.

V praktické části, proběhne konkrétní měření s použitím kruhoměru a souřadnicového měřícího stroje s použitím různého nastavení filtru, jako i použití filtrace UPR.

1 Geometrické tolerance a jejich rozdělení

Na správnou funkci součásti se kromě jakosti povrchu a rozměrových přesnosti podílí také geometricky přesný tvar funkčních ploch. Geometrické tolerance definují přípustné odchylky skutečných poloh a tvarů od těch teoreticky přesných. Geometrické tolerance se předepisují pouze tehdy, jsou-li podstatné z hlediska požadavků na funkci součásti. V případě, když odchylky vyhovují tolerančnímu poli, zajišťuje to taktéž správnou funkci součástí. Norma o geometrických tolerancích ISO 1101 definuje toleranci **tvaru**, **směru**, **umístění** a **házení**, stejně tak pravidla pro předepisování těchto tolerancí. Značení požadované tolerance se uvádí v pravouhlých rámečcích, které jsou rozdělené na dvě, případně více polí. Ten obsahuje značku tolerance, její hodnotu a případně základnu, vzhledem ke které je rozměr tolerován. Není-li předepsání geometrických tolerancí nutné, využívá se společného předpisu všeobecných tolerancí dle normy ISO 2768-2. Základní rozdělení geometrických tolerancí je uvedeno v Tabulce 1. [7], [9]

Tabulka 1: Přehled geometrických tolerancí

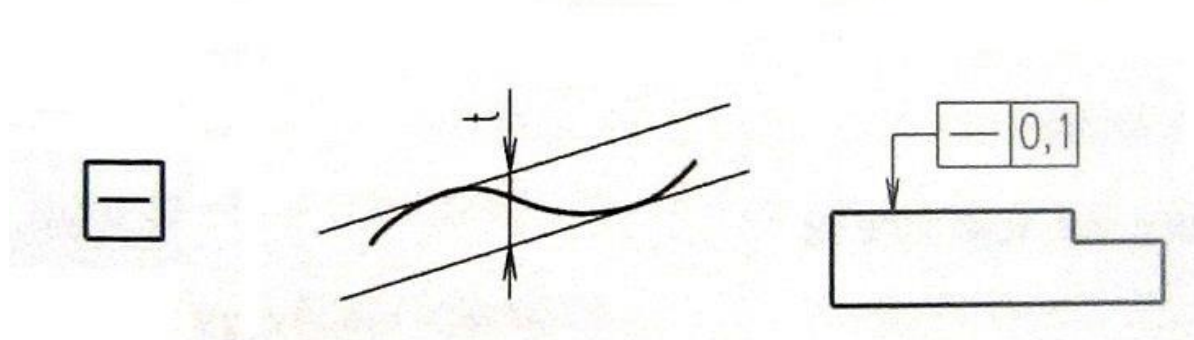
Geometrické tolerance		Značka	Potřeba základny
Tvaru	Přímosti	—	NE
	Rovinnosti		NE
	Kruhovitosti	○	NE
	Válcovitosti		NE
	Tvaru profilu libovolné čáry		ANO/NE
	Tvaru profilu libovolné plochy		ANO/NE
Směru	Rovnoběžnosti	//	ANO
	Kolmosti	⊥	ANO
	Sklonu		ANO
Umístění	Polohy	⊕	ANO
	Soustřednosti a sousostí		ANO
	Souměrnosti	≡	ANO
Házení	Kruhového		ANO
	Celkového		ANO

1.1 Tolerance tvaru

Tolerance jsou definovány pomocí tolerančního pole nebo tolerančního prostoru, kde musí geometrický prvek (přímka, rovina, plocha) ležet.

1.1.1 Tolerance přímosti

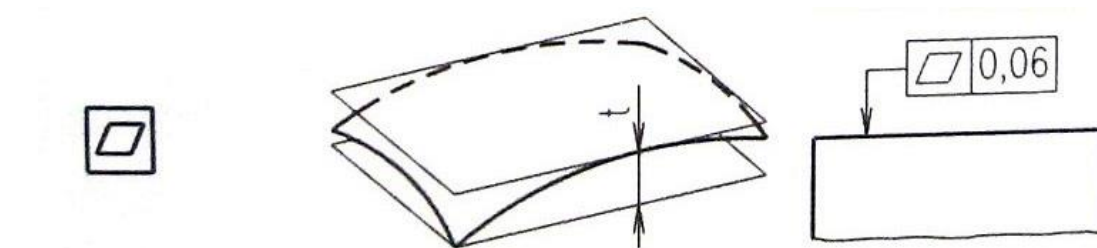
Tolerance přímosti je vyhovující, když skutečná přímka leží mezi dvěma rovnoběžnými přímkami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerančního pole přímosti t . [7]



Obrázek 1: Tolerance přímosti-značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.1.2 Tolerance rovinnosti

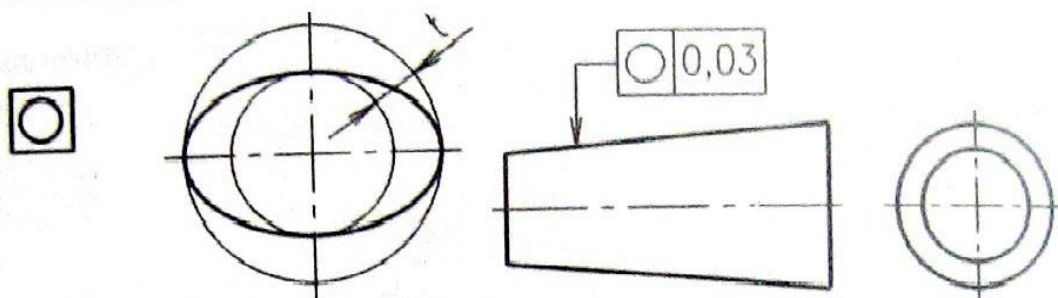
Tolerance rovinnosti vyhovuje tehdy, je-li reálná plocha mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdálené o hodnotu tolerančního pole rovinnosti t . [7]



Obrázek 2: Tolerance rovinnosti-značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.1.3 Tolerance kruhovitosti

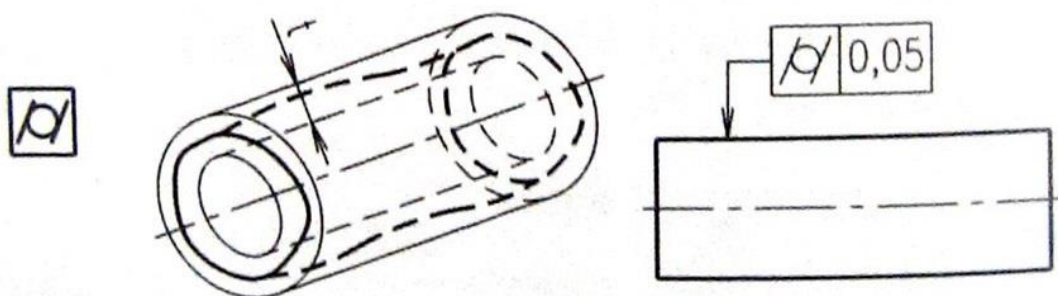
Je-li skutečný profil kteréhokoliv průřezu kruhové součásti v toleranci, potom leží mezi dvěma soustřednými kružnicemi vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance kruhovitosti t . [7]



Obrázek 3: Tolerance kruhovitosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.1.4 Tolerance válcovitosti

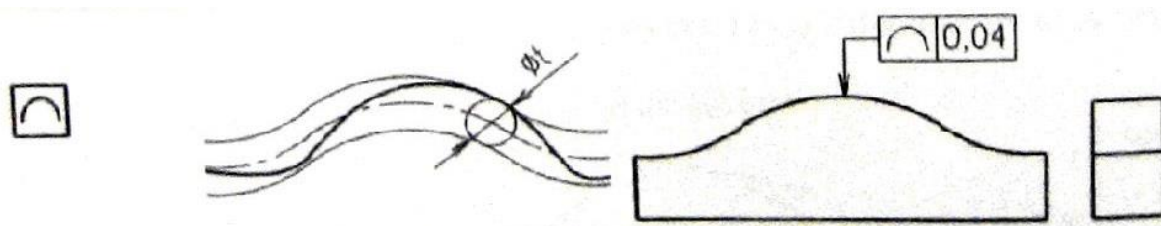
Skutečná válcová plocha musí ležet mezi dvěma souosými válci vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance t , aby této toleranci válcovitosti vyhovovala. [7]



Obrázek 4: Tolerance válcovitosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.1.5 Tolerance tvaru profilu libovolné čáry

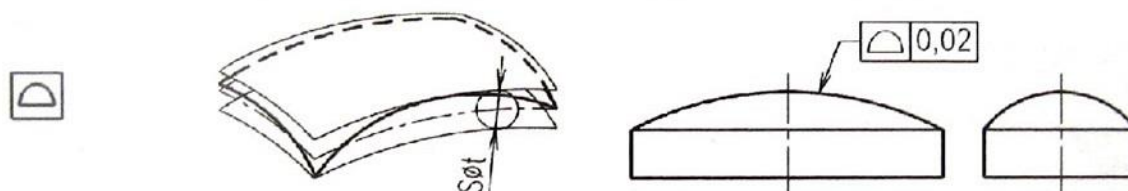
Tolerance profilu čáry vyhovuje, když daná čára leží mezi dvěma ekvidistantními čarami, které jsou od sebe vzdálené o předepsanou hodnotu tolerance t . V případě, že je tolerance předepsaná vzhledem k základně, je tam zobrazena i poloha bodu. [7]



Obrázek 5: Tolerance tvaru profilu libovolné čáry-značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.1.6 Tolerance tvaru profilu libovolné plochy

Skutečná plocha musí ležet mezi dvěma ekvidistantními plochami, mezi kterými je koule o průměrech rovných toleranci tvaru plochy. V případě předpisu se může vyskytnout základna, která se vztahuje k poloze bodu. [7]

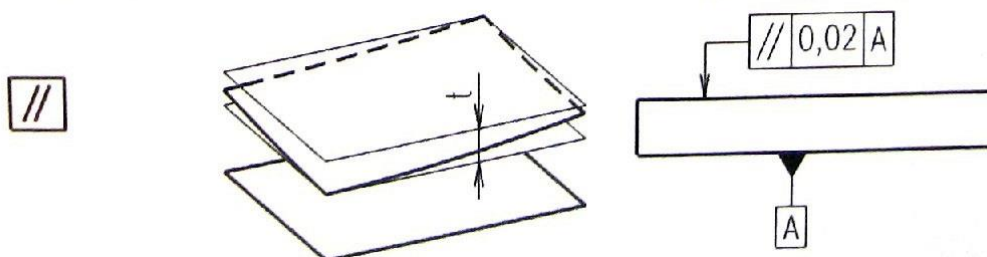


Obrázek 6: Tolerance tvaru profilu libovolné plochy- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.2 Tolerance směru

1.2.1 Tolerance rovnoběžnosti

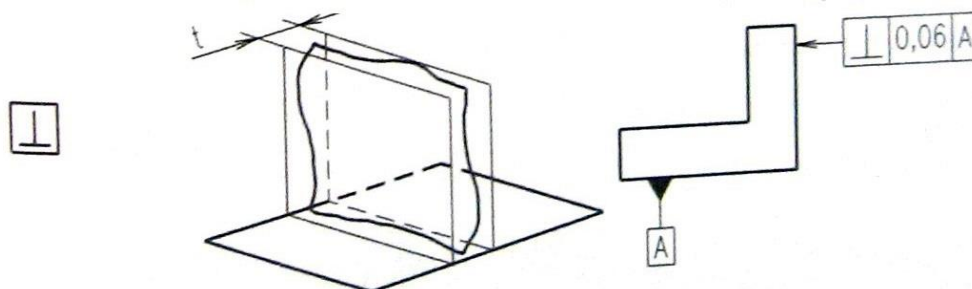
Tolerovaná rovina je rovnoběžná tehdy, nachází-li se každý její bod mezi dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance rovnoběžnosti t , přičemž tyto roviny jsou rovnoběžné se základní rovinou (základnou A). [7]



Obrázek 7: Tolerance rovnoběžnosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.2.2 Tolerance kolmosti

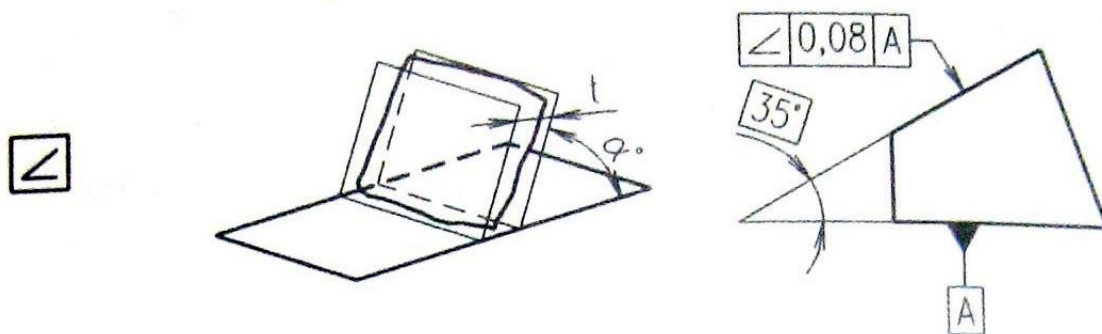
Tolerovaná rovina je kolmá, pokud každý její bod leží mezi dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance kolmosti t , a tyto roviny jsou kolmé k základní rovině (základně A). [7]



Obrázek 8: Tolerance kolmosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.2.3 Tolerance sklonu

Každý bod tolerované roviny musí ležet mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance t , které jsou sklopené od základní roviny (základny) o teoreticky přesný úhel α . [7]

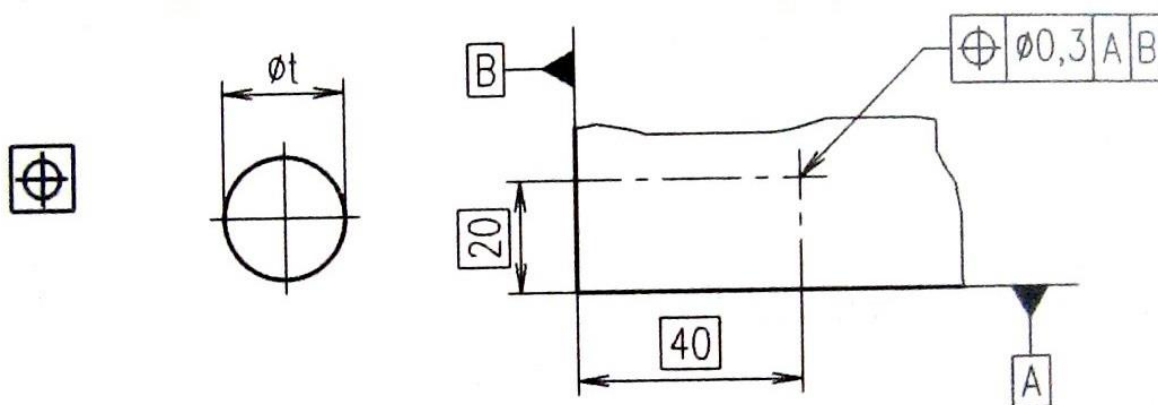


Obrázek 9: Tolerance sklonu- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.3 Tolerance umístění

1.3.1 Tolerance polohy

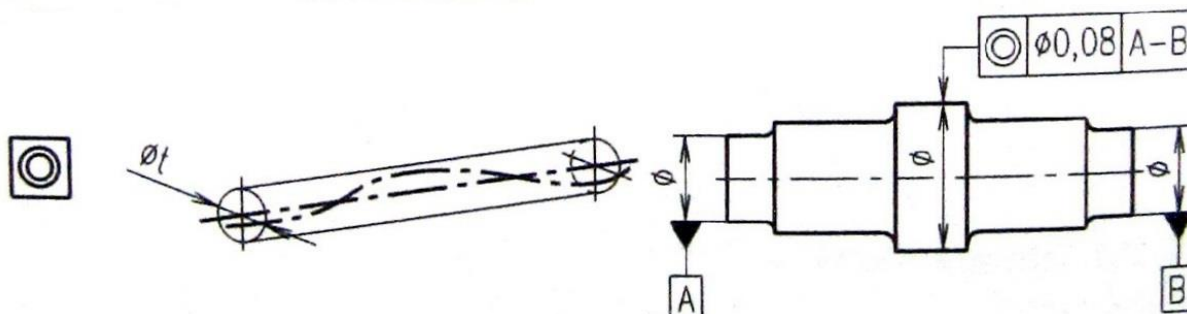
Osa tolerované díry (prvku) musí ležet uvnitř válcového tolerančního pole o průměru rovném toleranci. Střed díry leží v teoreticky přesné poloze. [7]



Obrázek 10: Tolerance polohy- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.3.2 Tolerance souososti a soustřednosti

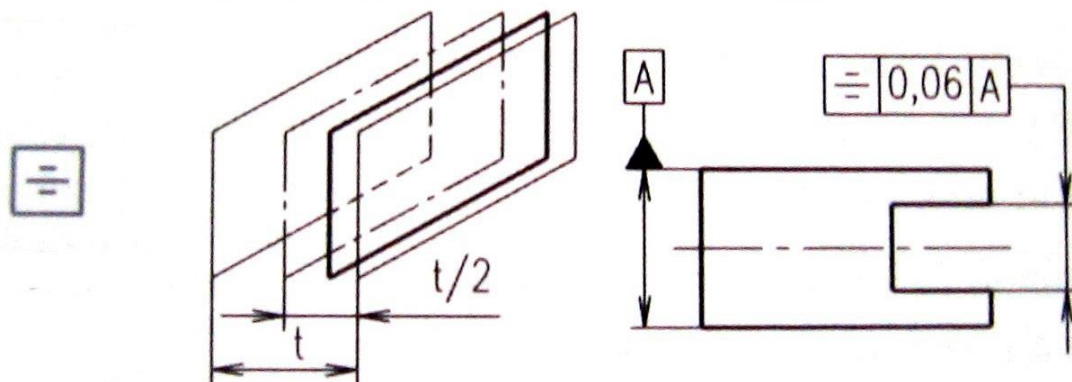
Osa tolerovaného prvku leží uvnitř válcového tolerančního pole o průměru rovném toleranci souososti, přičemž toleranční pole má osu shodnou se základní osou. [7]



Obrázek 11: Tolerance souososti a soustřednosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.3.3 Tolerance souměrnosti

Rovina souměrnosti leží mezi dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerančního pole. Každá z rovin je od roviny souměrnosti vzdálená o hodnotu poloviny tolerance. Souměrnost je tolerována vzhledem k základně, která je rovnoběžná s rovinami souměrnosti. [7]

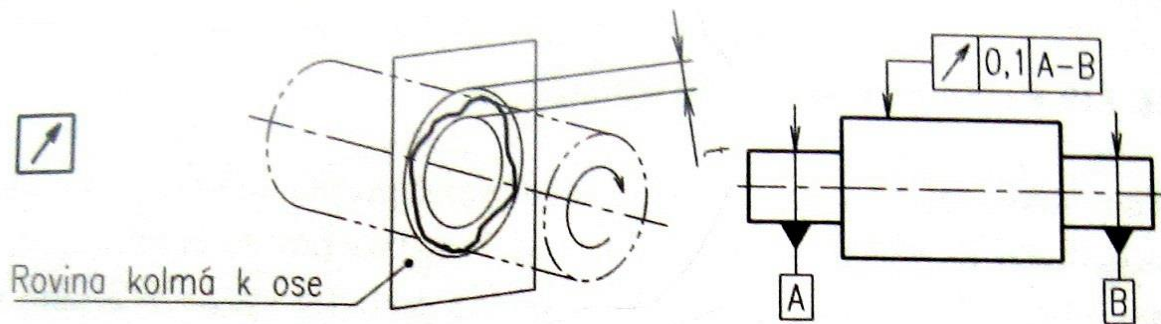


Obrázek 12: Tolerance souměrnosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.4 Tolerance házení

1.4.1 Tolerance kruhového házení

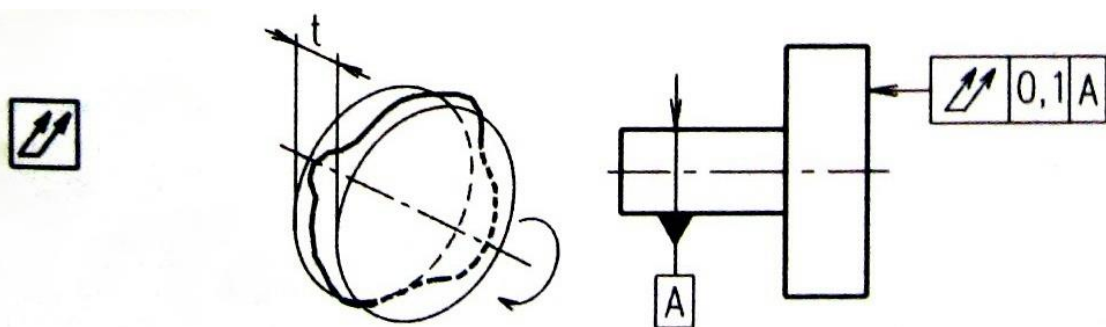
Kruhové házení rozdělujeme na obvodové a čelní. Obvodové házení je omezeno dvěma soustřednými kružnicemi vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance házení. Středů kružnic leží na základní ose. [7]



Obrázek 13: Tolerance kruhového házení- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

1.4.2 Tolerance celkového házení

Celkové házení rozdělujeme na obvodové a čelní, stejně jako kruhové házení. Součást vyhoví toleranci celkového házení, pokud se její body nachází mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdálené o toleranci. Tyto roviny jsou kolmé k základní ose. [7]



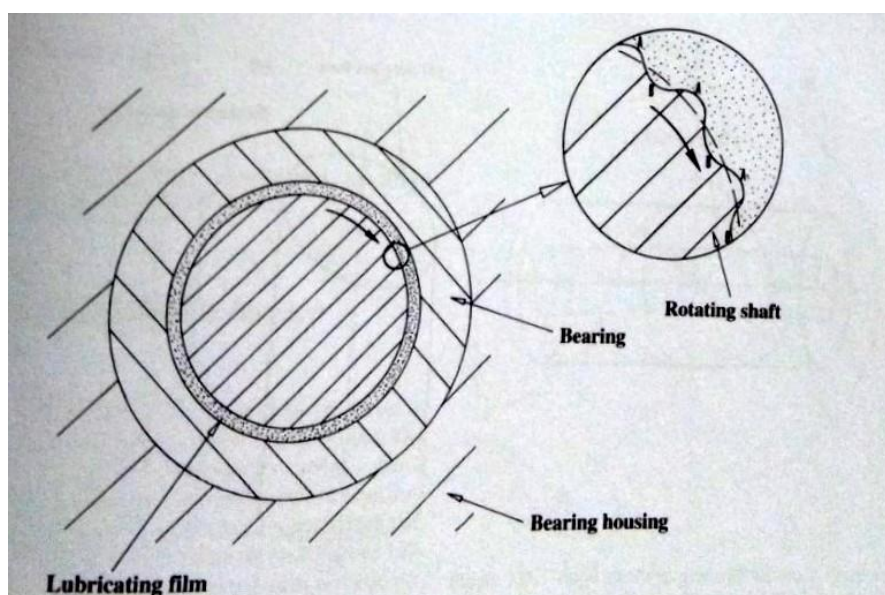
Obrázek 14: Tolerance celkového házení- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]

2 Vliv kruhovitosti na funkci strojních součástí

Kruhovitost je jeden z hlavních faktorů, který má vliv na rotační součásti. Každá kruhová součást, stejně tak jako součásti jiných tvarů, podléhá opotřebení při jejím namáhání. Správná geometrie má za následek vyšší odolnost, tím pádem i delší životnost strojních součástí. Kruhovitost má vliv na každou jednu rotační součást. Při nepřesné kruhovitosti dochází k vibracím dané součásti, které se následně přenášejí na celou sestavu. Kromě vibrací se do pohybu vnáší také házení. Její následky jsou porovnatelné jako u vibrací. Také dochází k únavě materiálu, což může vést až k jeho destrukci. [1], [6]

2.1 Vliv tvaru ložisek

Na obrázku je uveden příklad jednoduchého uložení hřídele a ložiska. Za předpokladu, že uložení není s vůlí ani není příliš těsné, hřídel běží hladce, pokud je spoj dostatečně mazán. Při prvotním zobrazení vypadá spoj jako dokonale rotační, bez odchylek. Při zvětšeném obrazu je ale patrné, že vzniklý profil je odlišný. Odchytky od skutečného kruhového profilu vytvářejí zvlňený profil. Spoj bude pracovat přesně, bez házení v případě dobrého mazání. Na obrázku je patrné, že tloušťka mazacího filmu nebude stejná. V případě, že ložisko nebo hřídel nejsou dokonale kruhové, ale mají deformaci tvaru, dochází k proměnlivému mazacímu efektu a do sestavy se vnáší nepřesnost ve formě chvění a v posledním radě se do sestavy vnáší teplo. [1]



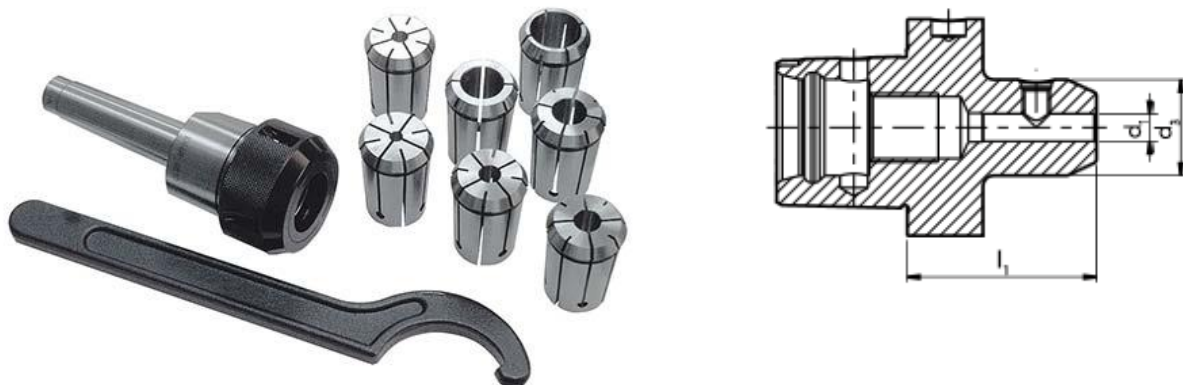
Obrázek 15: Uložení hřídel-ložisko [1]

2.2 Vliv házení rotačního nástroje

Jedním ze způsobů, jak do součásti nevnášet problém s házením a kruhovitostí je eliminovat ho už od začátku, při obrábění. Jako příklad dobře poslouží obrábění na frézce, či CNC frézce. V minulosti bylo upínání nástrojů o hodně složitější jako dnes. Dnes na trhu existuje mnoho upínacích systémů, které se přizpůsobují zvyšujícím požadavkům na kvalitu. Upínání stopkových fréz se v současnosti provádí jednou z následujících metod: upínání pomocí kleštiny, upínání plošným upínacím pouzdem (*Weldon a Whistle-noch*), hydraulické upínání, silově deformačním upínáním, nebo tepelným upínáním. [14]

Upínání plošnými pouzdry (Weldon) vyžaduje použití nástroje s boční záchytnou plochou, toho kterého typu. Obvodové házení díry je podobné jako při upínání kleštiny, ale vůle při upínání stopky vnáší do tohoto typu značnou nepřesnost a proto hodnoty házení výrazně stoupají. [14]

Upínání pomocí kleštiny je nejpoužívanější a nejběžnější metoda pro upínání stopkových nástrojů. Přesnost vyhotovení kleštiny má výrazný vliv na přesnost upnutí a také na celkové házení nástroje. Stejně tak důležitou úlohu hraje správné upnutí samotného nástroje v kleštině. [14]



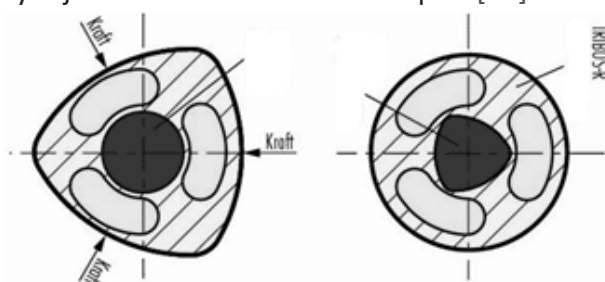
Obrázek 16: Kleštinový upínač (vlevo), upínač WELDON-princip (vpravo) [15]

Hydraulické upínání je, co se tlumení vibrační tyče, nejlepší a nejuniverzálnější. Nástroj se do upínače vloží a přitáhne se tlakový šroub. Ten pomocí pístu vyplní tekutinou tlakové komory, které upevní nástroj. Hlavní výhodou je tlumení vibrací, které zabezpečuje olejová náplň a systém tlakových komor. Tím výrazně roste trvanlivost nástroje a taky se zvyšuje kvalita obráběné plochy. [16]



Obrázek 17: Hydraulický upínač [16]

Metoda silově deformačního upnutí patří společně s tepelným upínáním mezi metody nejpřesnější. Při silově deformačním upnutí, má dutina pro nástroj tvar zaobleného trojúhelníka. Vložení nástroje se oblast plastické deformace mění a nástroj se působením deformace upevní. Jedná se o pružnou deformaci, proto je možné opakovat to bez omezení počtu upnutí. Roste tím životnost nástroje a také obvodové házení je výrazně nižší oproti předcházejícím metodám. V této metodě stejně jak při použití tepelného upínání se hodnoty obvodového házení pohybují maximálně na hodnotě 3 μm . [14]



Obrázek 18: Princip silově deformačního upnutí [16]

Tepelné upnutí patří v poslední době mezi trendovou metodu upínání. Důležitý je zde přesný lícovací otvor, aby byl upínaný nástroj co možno v největším rozsahu uchycen. Princip využívá rozdíly mezi teplotními roztažnostmi kovů. Pomocí indukční cívky se upínač rychle ohřeje, zasune se nástroj a upínač se nechá vychladnout, buď chladícím systémem, nebo přirozeně. Po smrštění dostáváme téměř homogenní nástroj. Nevýhoda této metody je nutnost pořízení kromě upínače i indukční cívku na ohřívání. [13]



Obrázek 19: Tepelný upínač [13]

2.3 Vliv upnutí dílů při obrábění

Jedním z faktorů, které ovlivňují výslednou kruhovitost součásti, je jejich upnutí při obrábění. Při upínání musí být obráběná součást ve správné poloze vůči nástroji a musí být dostatečně tuho upnuta. Pomocí správného upnutí součásti eliminujeme chvění a vibrace ve výrobním procesu a výsledek obrábění bude přesný. Při obrábění rotačních ploch při soustružení a broušení máme mnoho možností jak upnout obrobek. [4]

2.3.1 Univerzální sklíčidlo

Sklíčidlo patří mezi nejběžnější a nejuniverzálnější upínací zařízení. Slouží k rychlému upnutí a vystředění obrobku. Většinou se používá tříčelistové sklíčidlo, protože obráběné materiály mají často šestihranný tvar. Existuje více variant vyhotovení, ty však nejsou tak univerzální a mají menší škálu využití. Čelisti jsou opatřené několika stupni odsazení, jsou snadno vyměnitelné a otočné. Otočení čelistí umožní uchycení za venkovní průměr. Materiál čelistí ovlivňuje výslednou kvalitu obrobku. Při nekalených čelistech se dosahuje vysoká souosost a nepoškozuje se povrch obrobku. Klesá taky možnost deformací. Při použití kalených čelistí může nastat deformace obrobku. Nejčastější deformace při použití tříčelistového sklíčidla je deformace tvaru - K-profil. Při upnutí se do obrobku vnáší síly, které se po uvolnění obrobku projeví v deformaci obrobeného povrchu. [6]



Obrázek 20: Čelistě sklíčidla, Tříčelistové sklíčidlo [15]

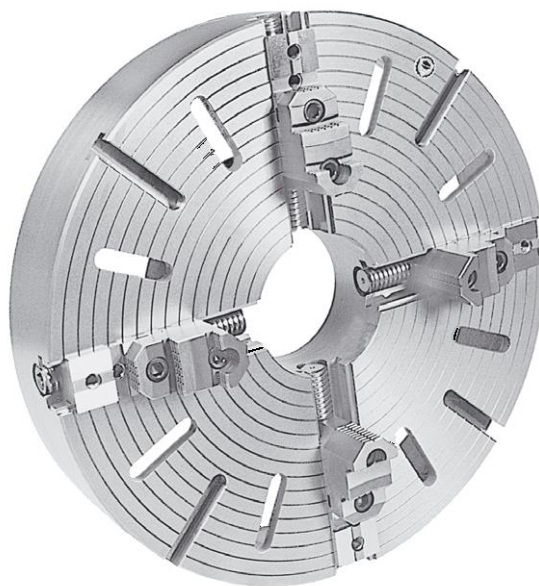
2.3.2 Použití lícni desky

Při použití lícni desek se upínají větší obrobky a obrobky, které nemají válcové plochy a jejich tvar je nepravidelný. Lícni desky je možné použít i při soustružení nesymetrických dílu, použitím přidavných upínacích přípravku.

Upínací desky:

- Desky s drážkami
- Elektromagnetické
- Magnetické

Nepravidelné obrobky, upnuté na lícni desce, nemají rovnoměrně rozloženou hmotu kolem osy. V tomto případě vzniká odstředivá síla, která způsobuje chvění a otřásání celého soustruhu, a tím se do procesu obrábění vnáší nepřesnost. Škodlivým účinkům se dá předejít vyvážením obrobku protizávažím, které se přichycuje na protější stranu upínací desky. Velikost závaží potřebného na vyvážení obrobku se vyhledává zkusmo. [5]



Obrázek 21: Univerzální lícni upínací deska

2.3.3 Soustružnické trny

Na trny se upínají obrobky, jejichž povrch nebo jeho část mají být souosé s obrobeným otvorem. Jedná se zejména o ozubená kola, pouzdra, odlitky nebo řemenice. Obrobek se upevní na trn nalisováním tak, aby se nemohl protáčet, trn s obrobkem se

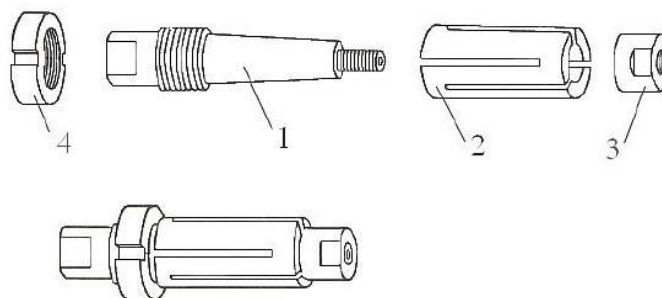
podepře koníkem. Na přesnosti otvoru, do kterého se lisuje trn, závisí také přesnost obráběného vnějšího povrchu.

Normalizované upínací trny mají malou kuželovitost, konkrétně 1:2500 až 1:3000, a to proto aby se vyvinula mezi stykovými plochami třecí síla potřebná pro upnutí. Obrobek, se na trn musí vždy lisovat rovnoměrným tlakem, aby se nedeformovala obrobena díra v obrobku. Obrobek se na trn nesmí narážet.

V některých případech se používá rozpínací trn. Průměr rozpínacího trnu lze přizpůsobit a proto je jeho použití vhodné pro obrobky, jejichž upínací díra má větší úchylky. Rozpínací trn se používá v kombinaci s kuželovým trnem. Na kuželový trn se nasadí rozpínací pouzdro s kuželovou dírou a přitáhne se maticí, čímž se zajistí a trn se rozpíná.



Obrázek 22: Kuželový soustružnický trn

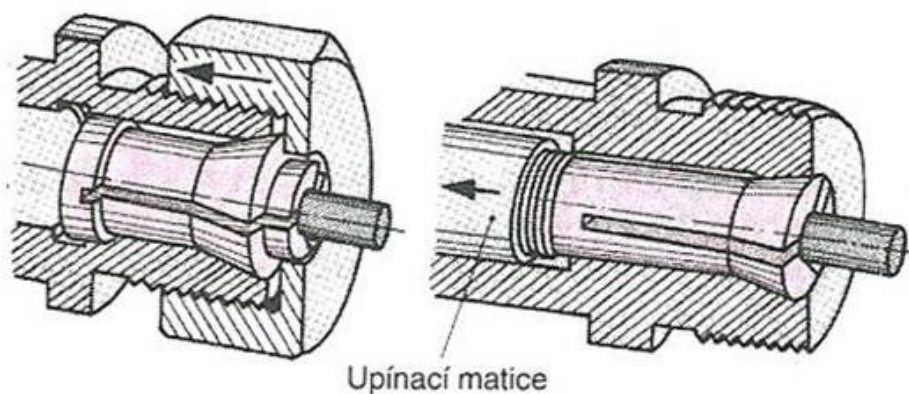


Obrázek 23: Princip rozpínacího trnu: 1 - trn, 2 – rozpínací pouzdro, 3- matic, 4 – čelní matic

Při válcových trnech se obrobek opře o osazení na trnu a přitlačí maticí. Na válcové trny se upínají obrobky s malou vůlí mezi trnem a obrobkem, například v tolerančním poli g6/H8. Jejich uložení není tak přesné, jako v případě kuželového trnu. Čela obrobku musí být kolmá na osu obrobku, aby nedocházelo ke křížení. Trny jsou zakončeny kuzelem, kterým se upíná trn přímo do kuželové dutiny vřetene. [5], [17]

2.3.4 Kleštinový upínání

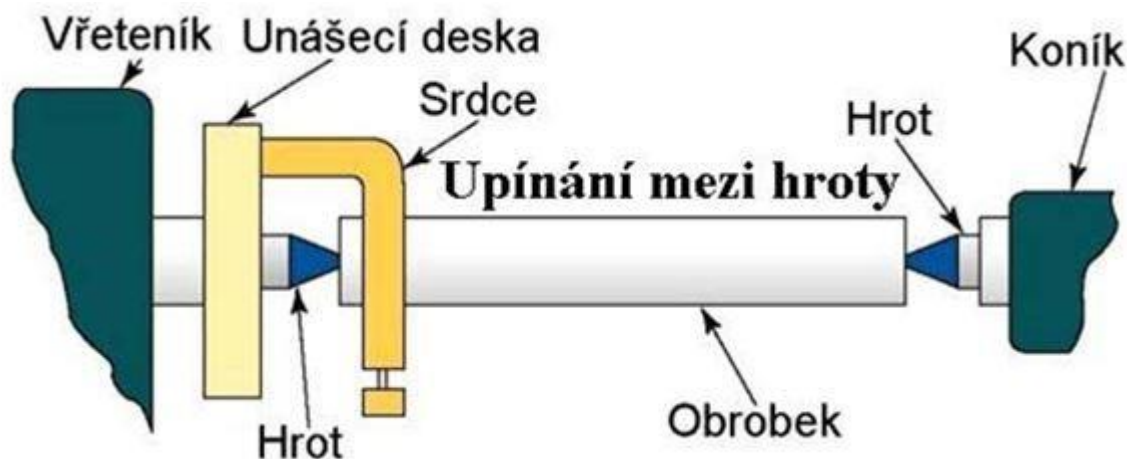
Kleštinové sklíčidlo funguje tak, že kleština je zasunutá v sklíčidle, nebo přímo ve vřeteně stroje. Kleština stahuje obráběný materiál, který je upnutý až na doraz, čím se kleština i zajistí, aby nedošlo k přerušení upínací síly. Kleštiny mohou mít kromě kulatého tvaru taky tvar šestihranu nebo čtverce. Kleštiny se vyznačují tím, že s rostoucími otáčkami klesá upínací síla. Toto upnutí je vhodné pro tenkostěnné a lehké deformovatelné materiály, jelikož upnutí probíhá na veliké ploše. Nevýhoda upnutí je, že každá kleština má upínací rozsah jenom 1-3mm a proto jednotlivé kleštiny jsou použitelné jenom pro malou škálu průměru. [17]



Obrázek 24: Řez kleštinou [17]

2.3.5 Upnutí mezi hroty

Upínání obrobku mezi hroty se používá hlavně u delších součástí, při kterých jsou kladeny velké nároky na obvodové házení. Díly se upnou mezi středícími hroty, které jsou pevné, anebo rotační. Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi se volí hroty rotační. Rotační pohyb obrobku je přenášen pomocí unášecí a unášecího srdce. Obráběné plochy jsou velmi přesně souosé. Hlavní nevýhoda upnutí mezi hroty je taková, že není možné obrábět po celé délce na jedno upnutí. Proto je toto upnutí vhodné při takých součástech, kde je osazení. Nebo se část obrobku neobrábí při tomto upnutí. Obrobek se mezi hroty upíná pomocí středících důlku, které jsou navrtány na čelo obrobku. [17]



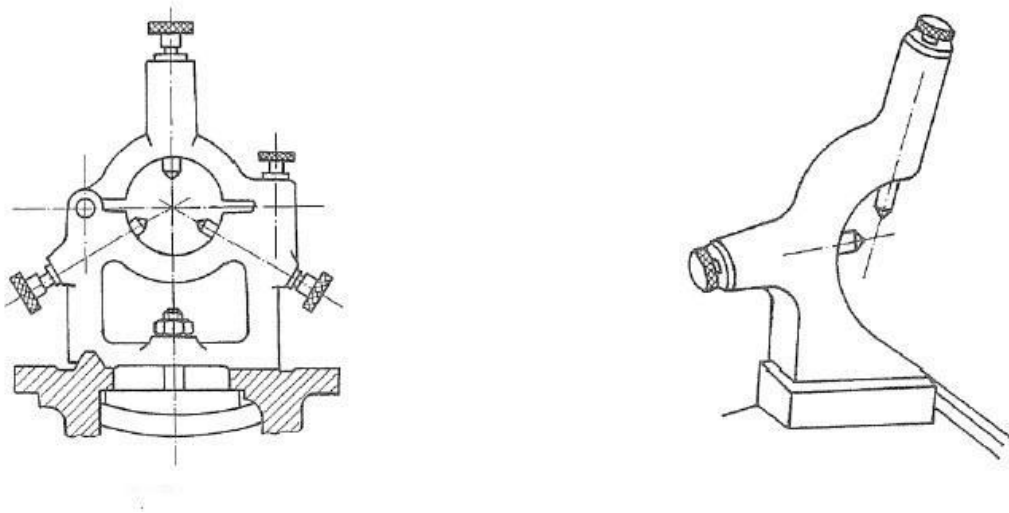
Obrázek 25: Upínání mezi hroty[5]

Normální upínací hrot se skládá z hrotu a matice. Matice slouží k snadnějšímu vyjmutí hrotu z kuželové dutiny ve vřetenu stroje. Hroty mají zpravidla uhel 60° . Při soustružení velkými řeznými rychlostmi se broušené hroty rychle opotřebují, proto se na funkční části navažují vrstvy jakostních ocelí. V případě větších sérii není při opakovaném upínání možné upnout vždy přesně. Požadované upnutí se dá dosáhnout pomocí odpruženého hrotu, který eliminuje tyto nepřesnosti. Jedná se o dutinu, uvnitř které je umístěna pružina opřená o zadní čelo. Pružina potom vytlačuje hrot do požadované vzdálenosti. [17]



Obrázek 26: Upínací hrot [17]

Při upínání dlouhých dílů se používají opěrky, takzvané lunety. Lunety se dělí na pevné a pohyblivé. Pevné jsou upnuty napevno na lože stroje. Vhodné jsou jako podpěry dlouhých obrobků, ale také jako podpěra pro obrobky, které nelze zasunout až do vřetena a obrábí se na nich čelo. Opěrky jsou opatřeny nastavitelnými kladkami nebo dotyky. Většina opěrek má samo středící dotyky. Ty mají za úlohu udržovat podepřený dlouhý obrobek ve správné poloze. [5]



Obrázek 27: Pevná a pohyblivá opěrka (luneta) [5]

3 Metody měření kruhovitosti a používané přístroje

Při měření kruhovitosti, stejně tak jako při měření jiných geometrických tolerancí, se zavádí pojem toleranční pole. Jedná se o prostor ohraničený několika geometricky přesnými čarami nebo povrchy. Tohle pole charakterizuje rozměr, který se nazývá tolerance. Vzhledem ke kruhovitosti je toleranční pole ohraničeno dvěma soustřednými kružnicemi, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu tolerance. [1], [8]

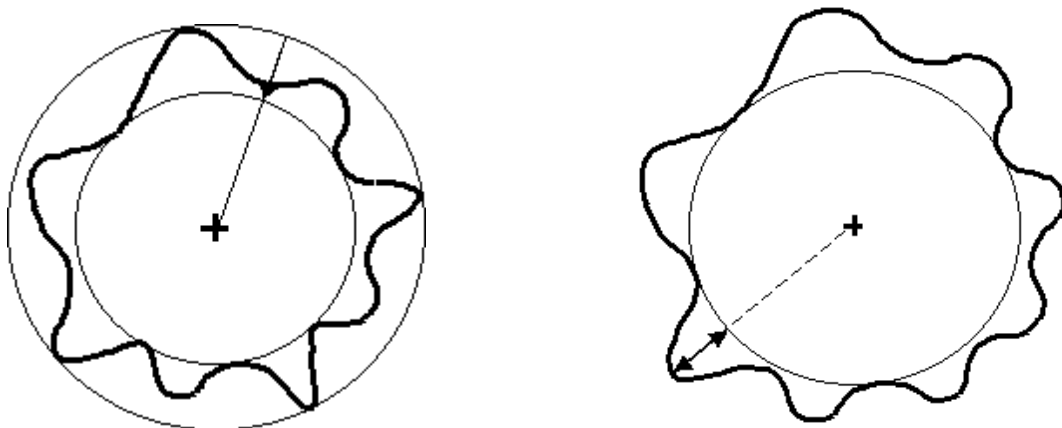
Naměřené hodnoty profilu skutečné součásti se porovnávají s **referenční kružnicí**. Referenční kružnice je definovaná normou ISO 4291: 1995 jako kružnice přiřazená profilu kruhovitosti v souladu se specifickými vlastnostmi, ke kterým jsou odchylky kruhovitosti, stejně tak jako parametry kruhovitosti uvedeny. Tato norma definuje 4 základní typy referenčních kružnic takto:

1. Metoda nejmenších čtverců referenční kružnice (*Least squares circle-LSC*) – Tato metoda může být považována za nejběžnější z metod referenčních kružnic. Pracuje s odchylkami tvaru kružnice a vyhodnocuje je. Výsledná referenční kružnice je taková, aby součet druhých mocnin hodnot odchylek menších než referenční kružnice byl co nejvíce roven součtu druhých mocnin větších jako referenční kružnice. [1]
2. Minimální opsaná referenční kružnice (*Minimum circumscribed circle-MCC*) – V této metodě je referenční kružnice nejmenší možná opsaná kružnice. Všechny body skutečného profilu musí ležet uvnitř této kružnice. [1]
3. Minimální zóna referenční kružnice (*Minimum zone circle-MZC*) – Tato metoda určuje dvě soustředné kružnice, které v mezikruží obsahují všechny body měřeného profilu. Jejich radiální vzdálenost je co nejmenší. [1]

4. Maximální vepsaná referenční kružnice (*Maximum inscribed circle- MIC*) – V této metodě je vepsaná kružnice skutečného profilu. Každý bod tyto kružnice se nachází mimo referenční kružnici. [1]



Obrázek 28: Least squares circle (LSC), (vlevo), Minimum circumscribed circle (MCC), (vpravo) [1]



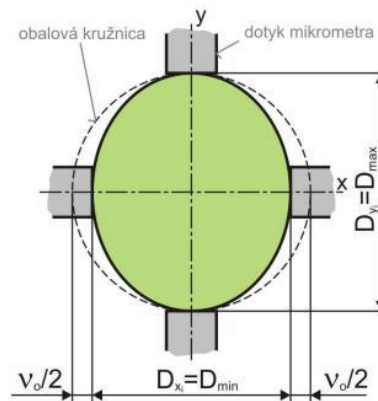
Obrázek 29: Minimum zone circle (MZC), (vlevo), Maximum inscribed circle (MIC), (vpravo) [1]

3.1 Měření odchylek kruhovitosti

Měření odchylek kruhovitosti zahrnují dvojbodové měření, trojbodové měření a měření mezi hroty. Při těchto metodách je třeba uvažovat počet oporných bodů, hlavně jejich uspořádání a také umístění měřicího přístroje. Touto metodou nejsme schopni dostat skutečný profil kruhové součásti, ale dokážeme určit změnu poloměru, ovalitu a také házení součásti. Nejedná se o konkrétní měření kruhovitosti, ale o metody používané v běžné dílenské praxi. Tyto metody jsou rychlé a efektivní, avšak neposkytují hodnoty potřebné pro analýzu celkového kruhového profilu. [18]

3.1.1 Dvojbodová metoda měření

Tato metoda měření kruhovitosti patří mezi nejjednodušší. Daná součást se měří v daném řezu nejprve v jednom směru, následně se součást otočí o 90° a měří se druhá hodnota průměru. Měření se několikrát opakuje, následně se rozdíl mezi průměry měřenými v kolmých směrech vyhodnotí. Tím získáme také odchylku oválnosti. Touto metodou se nejvíce kontrolují hřídele. Používají se nejběžnější měřidla jako je posuvní měřidlo nebo mikrometr. Tato metoda, se více než v metrologii, využívá v dílenském prostředí, protože je nejjednodušší a nejrychlejší. [18]



Obrázek 30: Měření kruhovitosti dvojbodovou metodou [18]

3.1.2 Trojbodová metoda měření

Další z metod, která se na měření kruhovitosti používá, je metoda trojbodová. Nejčastěji se v dílenských podmínkách jedná o součást uloženou na V-prismatické podložce a změny na poloměru se zaznamenávají číselníkovým úchylkoměrem při rotačním pohybu součásti. Hodnota odchylky je pak rovna rozdílu maximální a minimální odchylky. Tříbodové měření může probíhat symetricky nebo asymetricky, a to závisí na rozložení podpěr a úchylkoměru. Pro přesnost měření je dobré tuto metodu několikrát opakovat v různých řezech součásti.

Tato metoda se kromě vnějších průměrů dá aplikovat i jako měření vnitřních průměrů. Na tento typ měření se v dílenských podmínkách obvykle používají kalibry pro kontrolu, zda-li díra vyhovuje, anebo dutinoměry pro zjištění přesného rozměru díry. [18]



Obrázek 31: Dílenské trojbodové měření kruhovitosti (vlevo), Dutinoměr (vpravo) [8]

3.1.3 Měření mezi hroty

Mezi měření kruhovitosti touto metodou patří mnoho způsobů, které se mění od uspořádání a vyhotovení přístroje. Metoda měření je však vždy stejná, rozdíly jsou jenom v uspořádání stroje. Provedení může být svislé nebo vodorovné. Uspořádání stroje záleží hlavně na rozměru součástí. Menší hřídele se upínají vodorovně, rozměrné a objemné součásti je jednodušší upnout svisle. V dílenské praxi se jedná o nejčastěji využívanou metodu na zjištění změn poloměru a házení dané součásti. [8], [18]

Princip měření spočívá v otáčení součásti, umístěné mezi hroty, kolem své osy, přičemž v jednom místě je umístěný úchylkoměr, kterým se zjišťuje změna poloměru. Toto měření je nejběžnější, rychlé a velmi přesné. Přesnost je závislá na přesnosti úchylkoměru a přesnosti vyhotovení střednicích důlku na měřené součásti. Toto měření však nedokáže přesně určit kruhovitost, ale určí nám hodnotu odchylka, která způsobuje házení.



Obrázek 32: Měření kruhovitosti mezi hroty[18]

3.2 Měření speciálními dotykovými přístroji

V předchozích metodách jsme nebyli schopní určovat přesné hodnoty kruhovitosti. Jednalo se o měření, v kterých šlo o zjištění odchylek rozměrů od předepsané hodnoty. V případě měření dotykovými přístroji dostaneme přímo profil měřené součásti a následně z těchto hodnot dostaneme konkrétní hodnoty kruhovitosti i házení.

Při tomto typu měření dotyková sonda snímá jednotlivé body na povrchu součásti. Tato součást je rozložena na základní geometrické prvky, přičemž každý tvar je definován určitým počtem bodů, měřicí přístroj musí nasnímat minimálně tolik bodů. Nasnímanými body se přeloží ideální tvar a z rozdílů zjistíme přesnost výrobku. Jedná se o nejčastější, a hlavně nejpřesnější typ měření odchylek kruhovitosti. [11]

3.2.1.1 Kruhoměry

První skupinou strojů na měření kruhovitosti jsou *kruhoměry*. Jedná se o přístroje, které mají ve své stavbě vytvořené referenční vedení po kružnici, a které jsou vybaveny dotykem. Speciální přístroje se v průmyslu vyskytují přibližně od roku 1950 a jejich přesnost se neustále zlepšuje. V současnosti se jedná o nejpřesnější metodu měření kruhovitosti, kdy se pohybujeme v přesnosti rozlišení měřidla několik desetin nanometru, což je oproti souřadnicovým měřícím strojům o několik řádů přesnější. [11]

Rozlišujeme dva typy kruhoměrů:

- a) Kruhoměry s rotujícím stolem
- b) Kruhoměry s rotujícím měřícím zařízením



Obrázek 33:Kruhoměr s rotujícím stolem (vlevo), Kruhoměr s rotující měřící sondou (vpravo) [11]

Vhodnost použití jednoho nebo druhého typu záleží na typu obrobku. Na trhu existuje mnoho variant a řešení kruhoměrů. Jejich velikost záleží také na velikosti součásti, kterou měříme. Na obrázku 33 vlevo je zobrazen stroj, který patří do kategorie menších. Na obrázku 33 vpravo je na druhou stranu kruhoměr, který je jedním z největších na trhu. [11]

Měření, při kterém je součást pevně uchycená bez pohybu je vhodnější při součástech, které mají velké rozměry a hmotnost. Je jednodušší a méně nákladné upnout na měřící stroj obrobek jednou, než zabezpečovat jeho stabilitu a rotaci v průběhu celého měření. Měřící sonda už jenom po své předepsané trajektorii provede měření a vyhodnotí dané parametry. Tyto stroje mají pravidelně výrazně větší rozměry a tužší stavbu. Jak pracovní stůl, tak i rameno se sondou musí být dostatečně odolné, aby se při váze obrobku nepoškodily.

Měření, při kterém je součást umístěná na rotačním stole a měřící sonda je pevná, je dobré použít při součástech, u kterých měříme hlavně stejný kruhový profil. Pevná sonda

vykoná měření, zatímco obrobek koná rotační pohyb. Při měření jednoduchých rotačních součástí, je tato metoda mimořádně efektivní a rychlá, zatímco při součástech, které mají více os rotace, je měření pomalejší, nicméně stále efektivní.

Na základě analýzy trhu jsem z dostupných strojů na trhu vybral kruhoměr Talyrond 565H Range, který podle zadaných parametrů patří k těm nejpreciznějším a nejvyspělejším ve své kategorii. [10]

Talyrond 565H Range

Měřicí stroj od firmy Taylor-Hobson, Talyrond 565H, je v současné době považovaný za jeden z nejpreciznějších strojů na měření kruhovitosti. Kromě jiného je schopen měřit a analyzovat také parametry jako kulatost, válcovitost a rovinnost. Celý systém je stabilní a využívá vzduchová ložiska, s přesností až $\pm 0,015$ mikrometru, aby všechny části na sebe navazovali a soustava byla co nejpreciznější. Program stroje obsahuje šest různých systémů, které si uživatel může dle svých požadavků vybrat a použít ten nejvhodnější právě pro tuto operaci. Systém stroje je vybaven také automatickou kalibrací odchylek a maximální rozlišení tohoto stroje představuje až 0,3nm. Tento stroj je možné použít při měření důležitých rozměrů ložisek, palivových vstřikovačů, klikových hřídelí, nebo také rotačních součástech jako jsou turba v motorech. [10]



Obrázek 34: Talyrond 565H (vlevo), Měření klikové hřídele na kruhoměru (vpravo) [10]

3.2.1.2 Souřadnicové měřicí stroje

V současnosti je na trhu mnoho výrobců přístrojů na takto prováděné měření tvaru. Nejznámější z nich jsou Taylor-Hobson, Mitutoyo, Carl ZEISS a Mesing. Ve většině případů se jedná o přístroje univerzální, které kromě kruhovitosti dokážou měřit také vlastnosti povrchu či jiné geometrické specifikace, které nejsou úzce spjaté s kruhovitostí. Mezi takové stroje patří *souřadnicové měřicí stroje*. Tyto stroje se dále dělí podle své konstrukce na portálové, stojanové a mostové. Jejich další použití je specifické vždy pro jiný typ výrobků. Portálové měřicí stroje jsou nejrychlejší a nejpřesnější z této skupiny.

Na základě analýzy trhu, jsem z dostupných strojů na trhu vybral Souřadnicový měřicí stroj Zeiss Prismo navigator, který podle zadaných parametrů patří k těm nejpřesnějším a nejvyšším ve své kategorii. [12]

ZEISS PRISMO navigátor



Obrázek 35: Zeiss Prismo navigator (vlevo), Skenovací hlava Zeiss (vpravo) [12]

Tento stroj dokáže vysokorychlostně skenovat s maximální přesností ve výrobním prostředí. Všechny funkčně důležité části jsou vzájemně sladěny. Tento stroj používá ve všech hlavních osách vzduchové ložiska, které zabraňují jakýmkoliv venkovním vlivům, které by ovlivnily měření. Vodící části jsou zakryté, tím pádem použití v blízkosti výroby není žádný problém. Jeho přesnost měření dosahuje až 0,5 mikrometru, což splňuje nejvyšší požadavky na přesnost. Tento stroj dokáže pracovat při automaticky nastavené maximální rychlosti se zaručenou přesností. Další čas se šetří díky tangenciálnímu najíždění do místa snímání, skenování po šroubovici a také rychlá dynamická kalibrace snímače. Měření na tomto stroji je zajištěno standardizovaným multisenzorovým systémem, který je možné podle konkrétních specifikací daného měření upravit použitím vhodné sondy s dotekem tak, jak to potřebujeme. Velikost dotekové (měřicí) kuličky záleží od velikosti obrobku a od toho, jaké specifikace měříme. Dotyková sonda je standardně uchycena na stroji magnetickým úchytem na 3 kontaktních bodech po 120°. Sondy na takových strojích jsou opatřeny ochranou proti kolizím, kdy dojde k zastavení hned při nárazu. [12]

4 Metody filtrace

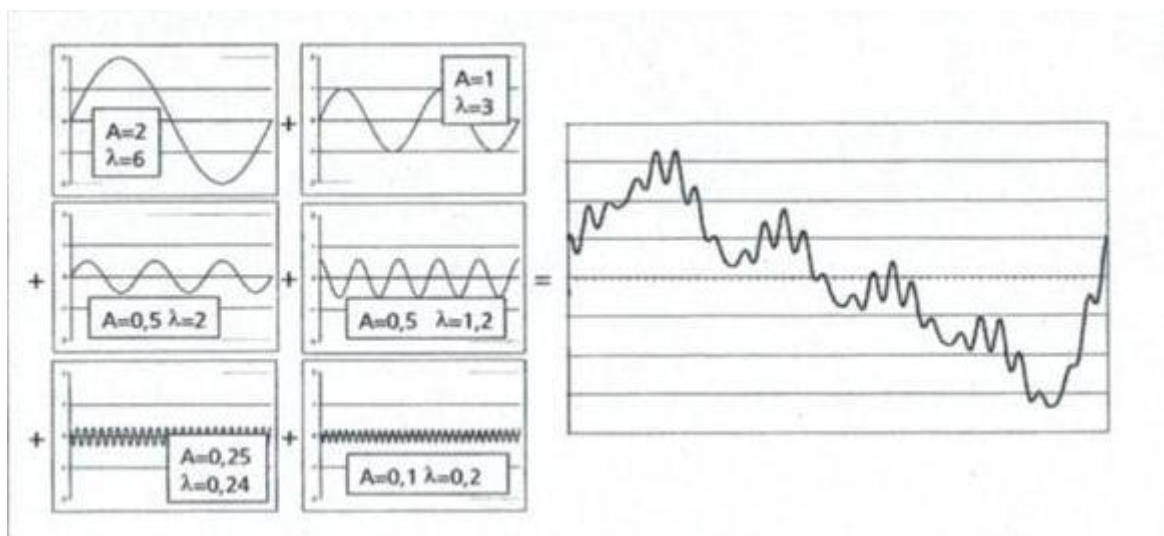
V této části mé bakalářské práce jsem se zaměřil na metody filtrace při měření kruhovitosti. Zaměřil jsem se zejména na digitální filtry a důvody jejich použití a také na Rychlou Fourierovou transformaci.

Povrch obrobku je tvořen strukturou povrchu. Struktura povrchu se dá rozdělit na jednodušší prvky, a to vlnitost, drsnost a tvar profilu. Samotná součást je ovlivněna kromě struktury povrchu taky rozměrovými parametry. Do této skupiny patří rozměrové chyby, chyby tvaru, chyby umístění a chyby přímosti. Kruhovitost a vlnitost je důležité sledovat, zaznamenávat a vyhodnocovat, aby se výrobní vlivy na povrchu požadované součásti eliminovaly. Jedná se například o:

- Maximální přípustnou vlnitost brzdového kotouče
- Nežádoucí vibrace stroje nebo nástroje
- Vibrace měřícího stroje při měření

To všechno vyžaduje samostatnou kontrolu povrchu s ohledem na různé chyby a rozličné typy vlnitosti a drsnosti. Analýza se provádí rozdělením povrchu do frekvencí. Toto rozdělení se nazývá *analýza spektra* a její výsledkem je *spektrum*. Vzhledem k analýze, každá forma obrysu může být vyjádřena matematicky jako sinusoida. Aby měřený profil co nejlépe vyhovoval vzhledem k matematickému vyjádření, hledají se vlny, které jsou reprezentovány amplitudou A na ose Y a vlnovou délkou λ na ose X tak, aby se co nejlépe překrývali. Frekvence, které vyjadřují počet vln na otáčku, se nazývají **UPR - Undulation Per Revolution**. Mezinárodně uznávané UPR filtry jsou 1-15 UPR, 1-50 UPR, 1-150 UPR a 1-500 UPR. Každý filtr nám ukáže nějaký jiný parametr. Sinusoida s velkou frekvencí reprezentuje **drsnost**. Se střední frekvencí **vlnitost**, a nakonec s malou frekvencí **tvar profilu**. [2]

Jako příklad rozložení technického povrchu poslouží graf obrobené rotační součásti, kde každá amplituda reprezentuje něco jiného. Na prvním grafu je to sinusoida, které reprezentuje drsnost. Na obrázku uprostřed sinusoida představuje vlnitost a na posledním obrázku tvar profilu. Na obrázku vpravo je potom primární profil, který vznikne spojením všech sinusoid dohromady. [2]



Obrázek 36: Rozličná vlnová délka a amplitúda v grafu [2]

Při použití UPR filtru, každá hodnota filtru představuje jinou vlastnost, která se na součásti může objevit. Několik nejběžnějších chyb, které vznikají na kruhových součástech, jsou uvedené v následující tabulce. [2]

Tabulka 2: Běžné chyby kruhových součástí

Chyba	Hodnota UPR	Příklad
Excentricita	1 UPR	
Ovalita	2 UPR	
K-profil	3 UPR	
Kruhovitost a chyby tvaru	50 UPR	
Chvění a vlnitost	20-150 UPR	
Drsnost	100 UPR	

Všechny tyto složky společně tvoří primární profil součásti, který zkoumáme. Kombinací všech sinusoid dostaneme sinusoidu, která reprezentuje primární profil.

4.1 Rychlá Fourierova Transformace(FFT)

Rozdělení povrchu na jeho prvky se nazývá Fourierova analýza. Moderní měřicí softwary měřících strojů je počítají pomocí speciálních velmi rychlých algoritmů nazývaných *Fast Fourier Transformation (FFT)*.

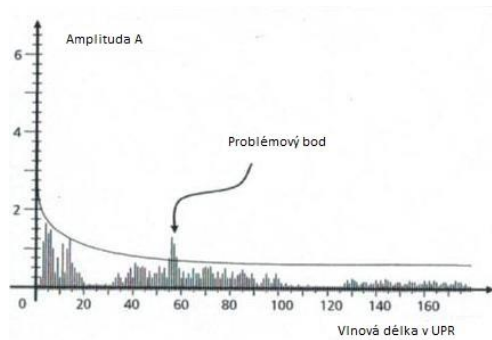
Fourierova analýza v metrologii může být přímo použita na:

- Předpovídání hluku a vibrací otočných částí
- Zjištění zkroucené struktury na obrobcích
- Použití mnoho dalších způsobů výroby a řízení

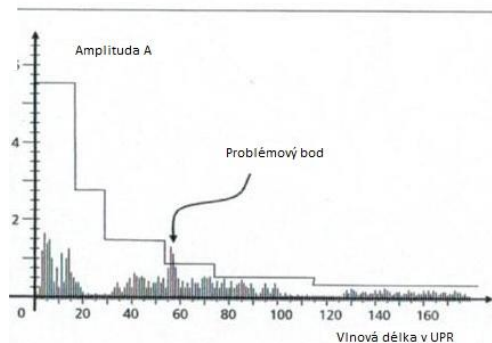
Jako příklad dobře poslouží Fourierova analýza kmitočtů na povrchu rotujících součástí. Tam může být FFT použita k předpokladu hluku při jízdě a také k vibracím částí při jejich používání. Když dostaneme tuto analýzu, můžeme problém opravit již ve výrobním procesu. Tato metoda se nazývá analýza v reálném čase (RTA). Používá se zejména na kontrolu funkčnosti valivých ložisek. Spektrum je porovnáváno s limitní křivkou. Pokud jednotlivé amplitudy na základě analýzy překračují hraniční křivku, pak může nastat při používání nežádoucí hluk při jízdě a chvění celé sestavy. Na základě použité Fourierovy analýzy jsou tyto chyby viditelné ještě před začátkem používání. [2]

Limitní křivka

$$f(x) = \frac{R}{(x-1)^{1+1/x}}$$



Schodovitá limitní křivka



Obrázek 37: Příklad použití RTA[2]

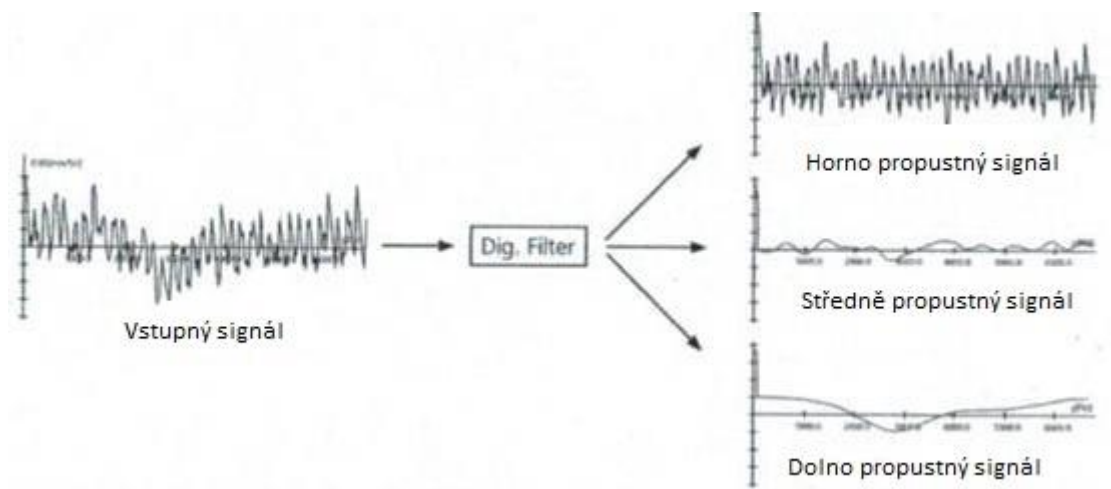
Při Fourierové analýze mohou být vyhodnoceny pouze ty frekvence, jejichž vlnová délka je minimálně dvakrát větší než vzdálenost mezi snímanými body. V praxi se používá a funguje pouze tehdy, je-li měřená délka výrazně větší než největší vlnová délka. V jiných případech může dojít k vzniku křivek, které by neodpovídali měřenému povrchu. Podrobná Fourierová analýza od tvaru k drsnosti by neměla být realizována pomocí souřadnicových měřících strojů, protože ty nejsou vhodné pro vysoce přesné zachycení chyb tvaru. [2]

4.2 Digitální filtry

Frekvence se nemusí zobrazovat jenom graficky. Výpočtem se dá zachycený povrch zobrazit tak, že bude zobrazená pouze část frekvencí. K tomu slouží digitální filtry. Filtry slouží na to, aby se zobrazily pouze určité vlnové délky. Proto poznáme 3 typy filtrů:

- Dolno propustný filtr-pouze nízké frekvence se zobrazí
- Horno propustný filtr-pouze vysoké frekvence se zobrazí
- Středně propustný filtr-pouze střední frekvence se zobrazí.

Při použití dolno propustného filtru se na této sinusoidě zobrazují tvarové prvky. Pro hornu propustný filtr jsou to prvky drsnosti a pro středně propustný filtr se na sinusoidě zobrazí prvky vlnitosti. [2]



Obrázek 38: Princip digitálního filtru [2]

Filtry jsou typem matematického algoritmu, přičemž jejich vlnové číslo w_c v UPR pro kruhové plochy a jejich vlnová délka λ_c pro rovný povrch jsou vzájemně v matematickém vztahu.

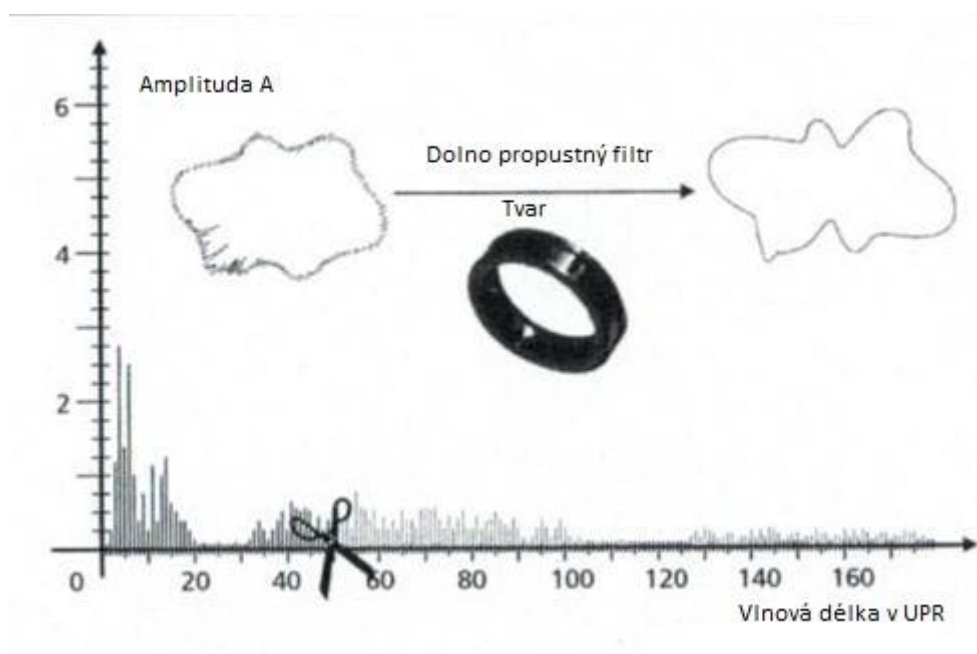
$$\lambda_c = \frac{D \cdot 3,14}{w_c}$$

Kde λ_c je vlnová délka a w_c je vlnové číslo v UPR.

Aby matematický filtr byl stabilní, je nutné, aby bylo zachyceno dostatečné měřicí místo a to tak, že na hranici vlnové délky se nachází minimálně sedm měřených bodů. Celá měřená délka musí být alespoň dvakrát větší než mezní vlnová délka. [2]

4.2.1 Dolno propustný filtr

Dolno propustný filtr se používá pro analýzu tvarových částí povrchu. Odděluje kratší frekvence (pod mezní vlnovou délkou) a zobrazuje jenom nízké frekvence.



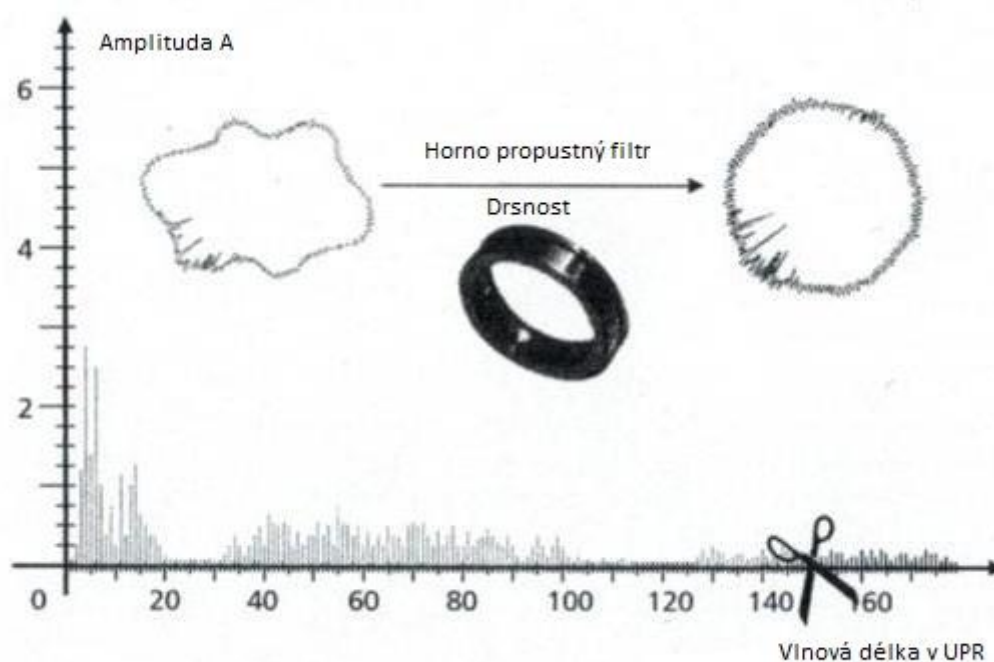
Obrázek 39: Použití dolno propustného filtru[2]

Při dolno propustných filtrech je matematický algoritmus založen na Gaussově algoritmu pro měření tvaru a drsnosti. Tento filtr vypočítá průměrnou hodnotu, nejen z naměřené hodnoty ale také ze sousedních naměřených hodnot. Hodnoty jsou vázány v Gaussově křivce, a proto hodnoty vzdálenější nemají takový vliv na průměrnou hodnotu jako hodnoty ve středě pole. Do výpočtu je zahrnuto více či méně sousedních bodů vzhledem k předpokládané šířce zvlněné plochy. Tento algoritmus vyžaduje také předchozí a následující hodnoty, a teda rozsahy začátku a konce filtru. Bez těchto hodnot není filtrování možné, protože chybí hodnoty jak na jedné, tak na druhé straně. V důsledku toho se vždy jako tyto rozsahy přidává poloviční vlnová délka. V případě filtrování uzavřeného kruhu tyto

problémy nevznikají. Filtrovaný povrch musí být nejprve změřen s dostatečným počtem měřících bodů a pak teprve odfiltrován z Fourierova grafu vlnovými délkami. [2]

4.2.2 Horno propustný filtr

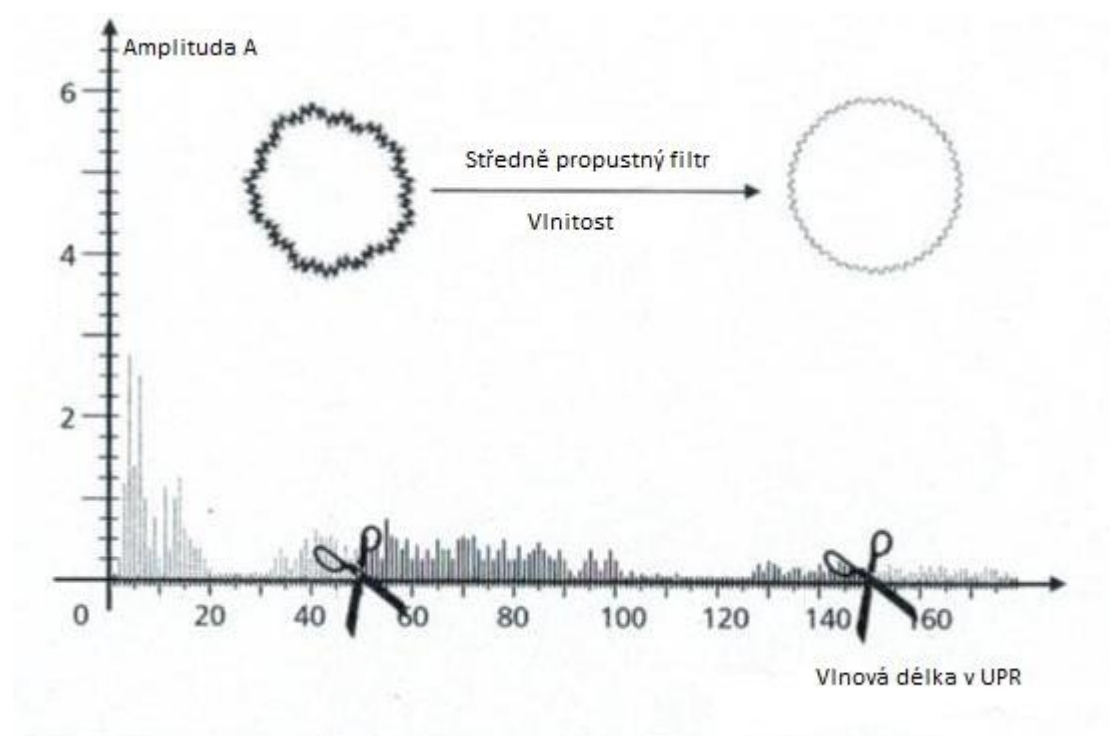
Horno propustný filtr se používá pro analýzu prvků drsnosti. Odděluje vysoké frekvence (nad mezní vlnovou délkou) a zobrazuje jenom vysoké frekvence. Pro toto měření se používá vysoce průchozí profilový řez povrchu, který má být zkontrolován. Profilový řez je výhodnější příčný na směr obrábění, aby se eliminovali vlivy obrábění. Po získání profilu drsnosti pomoci filtru se určí všechny požadované parametry drsnosti. Je tu velké množství rozličných parametrů drsnosti, které mají jinou funkci a jsou mezinárodně definovány v normách. [2]



Obrázek 40: Použití horno propustného filtru [2]

4.2.3 Středně propustný filtr

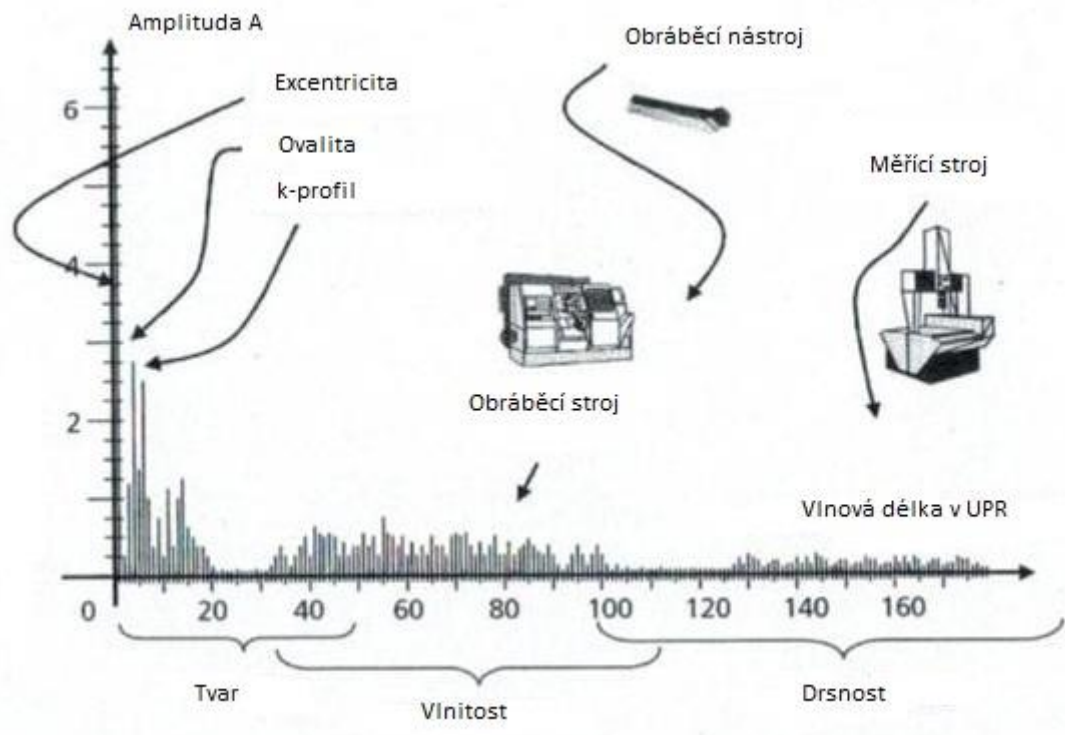
Středně propustný filtr, jinak nazývaný taky pásmově průchozí filtr, je kombinací horno propustného filtru, kde se oddělí vysoké frekvence a dolno propustného filtru, kde se oddělí nízké frekvence. Tím se oddělí chyby tvaru a drsnosti. Středně propustný filtr zobrazuje tvar vlnitosti. Ve skutečnosti je vlnitost zahrnuta v toleranci tvaru, na jeho analyzování musí být vlnitost vyhodnocena pomocí pásmového filtru.



Obrázek 41: Použití středně průchozího filtru [2]

V případě vlnitosti existují maximálně dva dominantní typy vlnění. Dominantní vlnitost lze charakterizovat pomocí parametrů jako hloubka vlny a její šířka. Pokud obrys má jednu nebo žádnou dominantní vlnu, tyto parametry neexistují.

Každým použitým filtrem zjistíme jiné hodnoty daného povrchu. Každý z problému má svůj zdroj. Když jsme schopni zjistit, v kterých vlnách se pohybují největší výchytky, potom poznáme i zdroj problému. Jako příklad poslouží následující obrázek. [2]



Obrázek 42: Příčiny vzniku chyb podle vlnové délky [2]

Demonstrace vlivu filtrace a metody výpočtu na výsledky měření

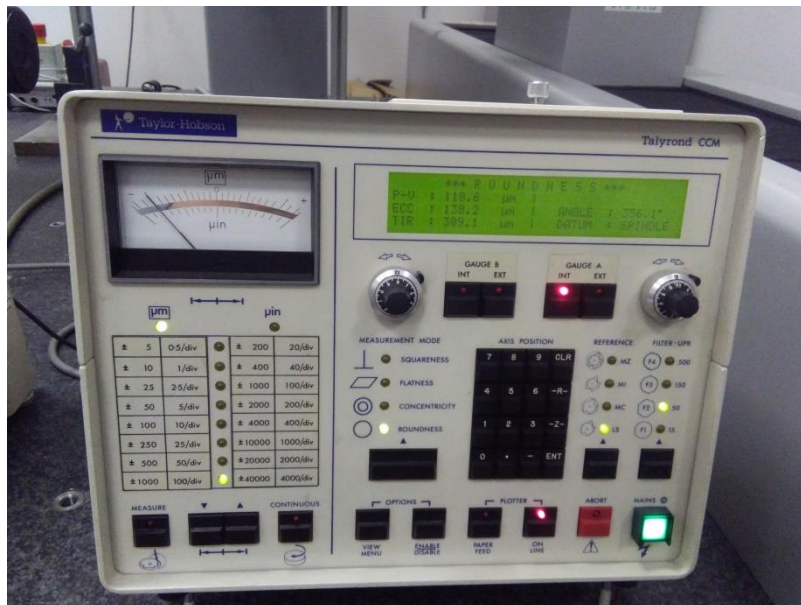
V praktické části mé bakalářské práce jsem se věnoval konkrétnímu měření kruhovitosti s použitím různých filtrů. Měření bylo provedeno na kruhoměru **Talyrond 30** od firmy **Taylor-Hobson**. Další měření proběhlo na souřadnicovém měřícím stroji **Zeiss Prismo navigator**. Při použitém kruhoměru není možné nastavovat, jaký filtr bude použitý, protože se jedná o starší zařízení. Provedeno bylo měření pomocí odfiltrování určité části vln a to nastavením filtru UPR postupně tabulkovými hodnotami UPR 15, UPR 50, UPR 150, UPR 500.

Měření na souřadnicovém stroji má výhodu, že naměřený profil lze různě měnit v počítačovém programu. V prvním případě byl nastavený filtr *2RC*, což reprezentuje filtr nejvíce podobný filtru na kruhoměru. Bylo provedeno filtrování UPR, podobně jako v případě kruhoměru, počtem vln na otáčku UPR konkrétně UPR 15, UPR 50, UPR 150 a UPR 500. Tímto měřením jsem chtěl docílit porovnání dvou strojů, jakož i to, že na starší stroje nezáleží. Poslední případ bylo nastavení filtru *spline* a opět bylo nastaveno filtrů UPR hodnot UPR 15, UPR 50, UPR 150 a UPR 500. Tento filtr je novější a měl by vykazovat přesnější hodnoty.

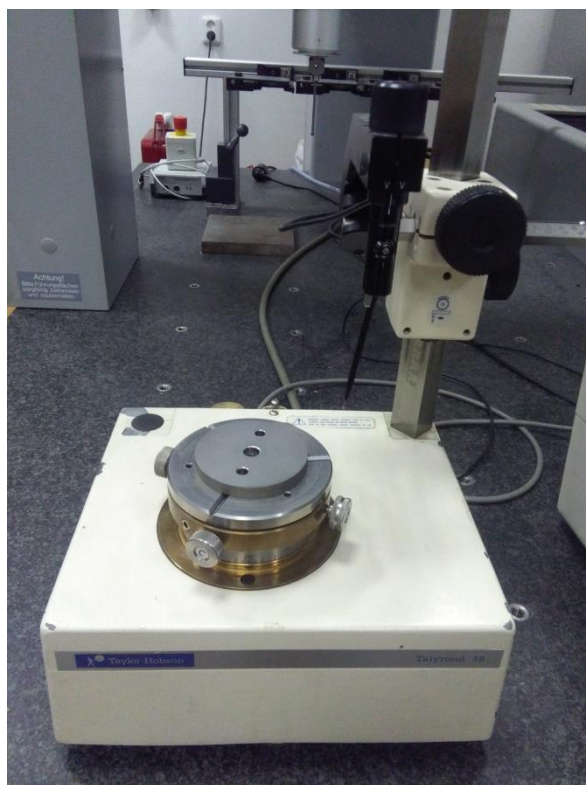
4.3 Měření na kruhoměru

První měření bylo měření na kruhoměru Talyrond 30. Tento kruhoměr pracuje na vzduchovém ložisku. První operací proto je otevření vzduchového ventilu, aby v systému byl vzduch. Další operací je kalibrace přístroje. V případě tohoto měření na tomto typu kruhoměru probíhá kalibrace manuálně, pomocí čtyř nastavitelných šroubů. Dva z nich nastavují posunutí v osách, další dva slouží při měření válcovitosti na nastavení naklonění pracovní desky. Kalibrace probíhá za pomoci koncových měrek, anebo pomocí přesného válce s broušenou plochou, která reprezentuje extrém. Výsledek měření se zobrazí na přiloženém displeji počítače. Při kalibraci je důležité, aby měřená hodnota neukazovala na úchytkoměru výchytky.

Tento typ kruhoměru není schopný měřené hodnoty převést do počítače, aby se s nimi mohlo dále pracovat v programu. Měřené hodnoty se provádějí a zobrazují na ovládacím zařízení stroje. Je možné naměřené hodnoty i vytisknout na termopapír. Na ovládacím panelu potom můžeme nastavovat filtr UPR, citlivost měření, použitou referenční kružnici, a nakonec i to, co budeme měřit. Tento přístroj dokáže měřit kolmost, rovinnost kružnici, a nakonec i to, co budeme měřit. Tento přístroj dokáže měřit kolmost, rovinnost kruhovitost a sousost.



Obrázek 43: Ovládací panel kruhoměru Talyrond CCM



Obrázek 44: Kruhoměr Talysond 30

Po kalibraci proběhlo měření na konkrétní součásti. Měření proběhlo na součásti „multiwave“. Jedná se o kruhovou součást, jejíž povrch tvoří dva typy pravidelných vln. Měření proběhlo postupně při změně nastavení filtru UPR. Výslední grafy se výrazně odlišují. Při různých hodnotách UPR se výsledný povrch zobrazuje jinak, také naměřené hodnoty odchylek se v závislosti na použitém filtru výrazně odlišují. Konkrétní výsledky měření budou uvedeny v následující části společně s výsledky měření na souřadnicovém stroji.



Obrázek 45: Měřená součást na kruhoměru

4.4 Měření na souřadnicovém měřícím stroji

Druhé měření proběhlo na souřadnicovém měřícím stroji Zeiss Prismo navigator. Podobně jako při kruhoměru se jedná o zařízení na vzduchových ložiskách, proto jako první je nutno otevřít ventil vzduchu. Tento stroj je značně automatizovaný, a proto je ovládaný počítačem, i když je vybavený i samotným ovládacím panelem. První operací byla kalibrace přístroje pomocí kalibrační koule. Kalibrace proběhla referenčním snímačem. Manuálním ovládním se dotyk dotknul kalibrační koule, následně stroj automaticky nasnímal několik bodů koule. Proběhla výměna snímacího senzoru na senzor s kuličkou o průměru 1,5mm, který byl použitý pro měření. Kalibrace pomocí kalibrační koule proběhla i s tímto senzorem.



Obrázek 46: Kalibrační koule a kalibrovaný měřící senzor

Následovalo upnutí součásti na základní desku souřadnicového stroje. Následně bylo nutné určit souřadný systém konkrétního měření. Naměřil jsem několik bodů roviny součásti a taky několik bodů po obvodu součásti. Výsledek byl počítačovým programem vyhodnocen a dostali jsme konkrétní souřadný systém pro měřenou součást. Měření kruhového profilu proběhlo automaticky po zadání daného požadavku v programu. Měření neproběhlo jenom po obvodu 360° ale určitá část byla překryta. Při takovém typu měření je to běžné, protože při měření jenom 360° můžou nastat při napojení nepřesnosti. Celkově bylo zaznamenaných

5576 bodů po obvodu, které následně v počítačovém programu vykreslily skutečný profil rotační součásti bez filtrace. Výhodou tohoto měření je, že z jednoho měření jsme schopní vygenerovat různé filtrované kružnice, bez toho aby probíhalo další měření. Filtraci v počítačovém programu je možné provádět i mimo měřícího zařízení, stačí k tomu příslušný počítačový program.



Obrázek 47: Měření na souřadnicovém měřicím stroji (vlevo), ovládací panel souřadnicového měřícího stroje (vpravo)

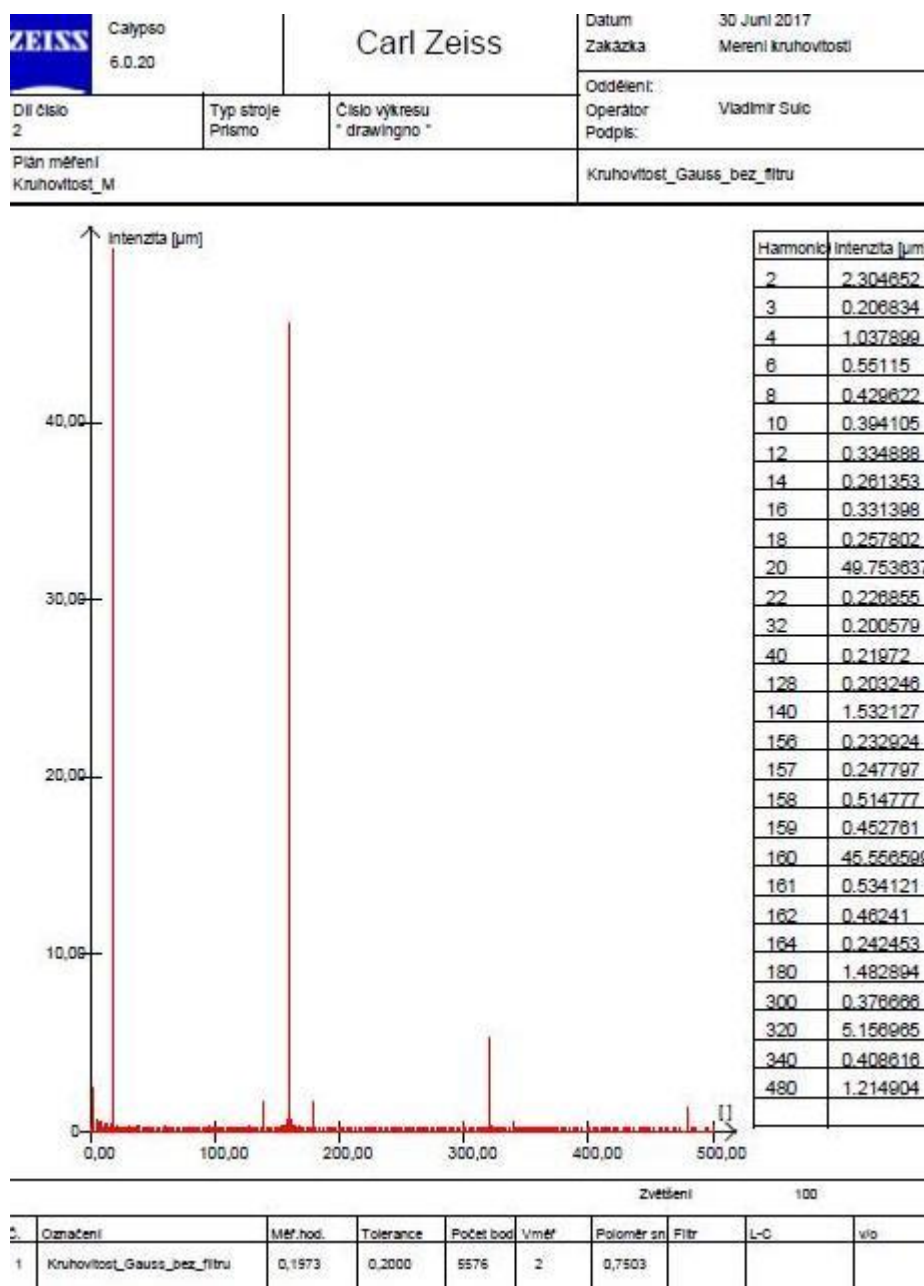
Cílem mého měření bylo porovnání naměřených hodnot při použití kruhoměru a různých filtrů na souřadnicovém měřicím stroji. Proto jsem s příslušnými naměřenými hodnotami v počítačovém programu dále pracoval a vygeneroval výsledky pro použitý filtr 2RC, který by měl být přibližně stejný jak u kruhoměru, pro všechny hodnoty UPR. Druhým výsledkem bylo použití filtru spline, který by měl reprezentovat moderní způsob filtrace.

V následující části mé práce budou výsledky měření a porovnání jednotlivých měření.

4.5 Výsledky měření a porovnání jednotlivých měření

Po provedení všech měření jsem výsledky porovnal. V následujících tabulkách jsou zaznamenány výsledky měření vždy pro konkrétní hodnotu UPR.

4.5.1 Rychlá Fourierova Transformace



Obrázek 48: FFT konkrétního měření

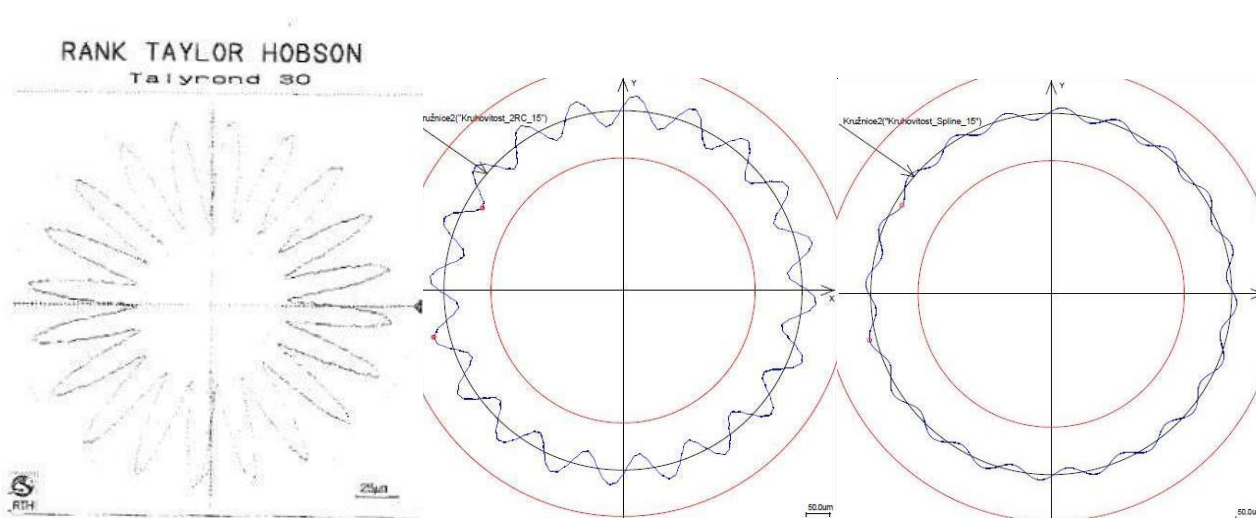
Jednou z funkcí, které je možné v počítačovém programu vygenerovat z naměřených hodnot je Rychlá Fourierova transformace. Na tomto grafu je patrně viditelné, která vlna UPR je dominantní. Z grafu je jasné, že po obvodu se nachází 20 dominantních vln s intenzitou 49,75 μm a 160 dominantních vln s intenzitou 45,55 μm . Čísla 20 a 160 reprezentují hodnoty UPR.

4.5.2 UPR 15

Tabulka 3: Výsledky měření pro filtr UPR 15

UPR 15	Kruhoměr	Souřadnicový měřicí stroj	
		2RC	Spline
filtr		2RC	Spline
Tolerance (mm)	0,2	0,2	0,2
Odchylka (mm)	0,0713	0,0697	0,0299
Poloměr snímače (mm)	0,75	0,7503	0,7503

Při použití filtru UPR 15 se zobrazí jenom profil, který má 15 vln na otáčku. Na grafu se teda zobrazí profil, který je téměř hladký. Naměřené odchylky se výrazně odlišují podle použitého filtru. Při odchylce u kruhoměru a při použití filtru 2RC při souřadnicovém měřicím stroji se hodnoty odchylky téměř neodlišují. Moderní filtr Spline vykazuje hodnotu odchylky výrazně nižší oproti ostatním hodnotám. Všechny naměřené hodnoty však splňují toleranci. Rozdíl mezi těmito hodnotami je patrný taky na grafech. Graf z kruhoměru se odlišuje výrazně, jelikož je zobrazený v jiném měřítku. Je však vidět velký rozdíl mezi filtry 2RC a spline, kde při filtru spline jsou výrazně potlačeny i vlny UPR 20.



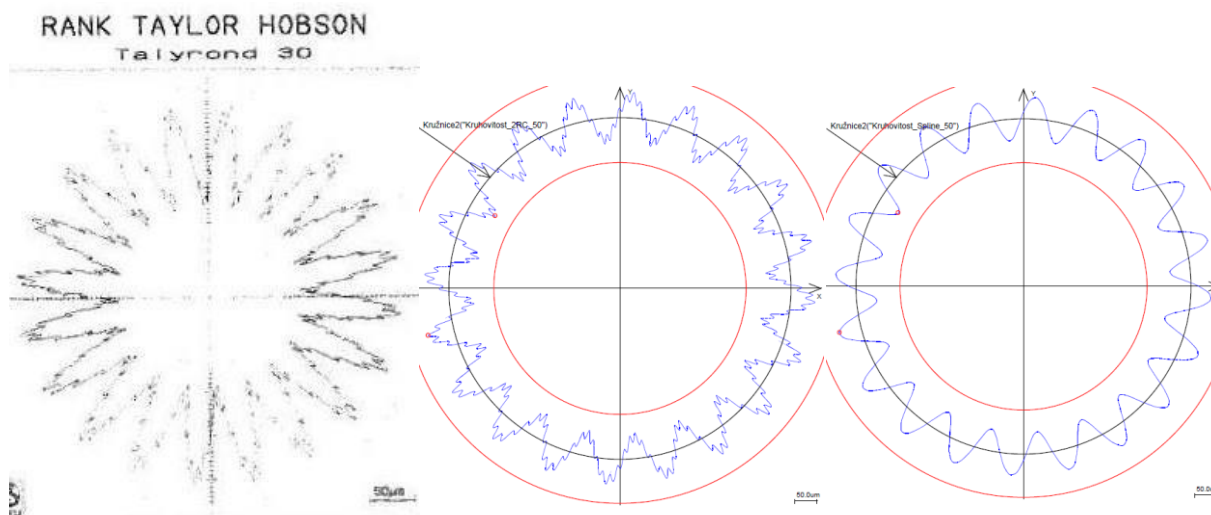
Obrázek 49: Zobrazení profilu při použití filtru UPR 15- kruhoměr (vlevo), 2RC (uprostřed), spline (vpravo)

4.5.3 UPR 50

Tabulka 4: Výsledky měření pro filtr UPR 50

UPR 50	Kruhoměr	Souřadnicový měřící stroj	
		2RC	Spline
filtr		2RC	Spline
Tolerance (mm)	0,2	0,2	0,2
Odchylka (mm)	0,1218	0,1193	0,1031
Poloměr snímače (mm)	0,75	0,7503	0,7503

Při měření s použitým filtrem UPR 50, se zobrazí profil, který má do 50 vln na otáčku. Zobrazený profil se oproti filtru UPR 15 odlišuje tím, že se zde už objevují další vlny a profil už není hladký. Podle FFT v bodě 5.3.1 je patrné, že dominantní je vlna s UPR 20 a další až při UPR 160. Proto při filtraci pomocí filtru UPR 50 se v grafu zobrazí další prvky jenom okrajově. Potvrdilo se první měření, kdy se opět hodnota odchylky při kruhoměru a při použití filtru 2RC při souřadnicovém měřícím stroji příliš neodlišuje. Hodnota při použití filtru Spline je zase o něco menší. Na grafech je viditelný rozdíl, když při filtrech 2RC se zobrazují zbytky dominantních vln UPR 160 a při použití moderního filtru spline jsou tyto hodnoty odfiltrovány a zobrazený profil je pravidelný bez zbytkových vln.



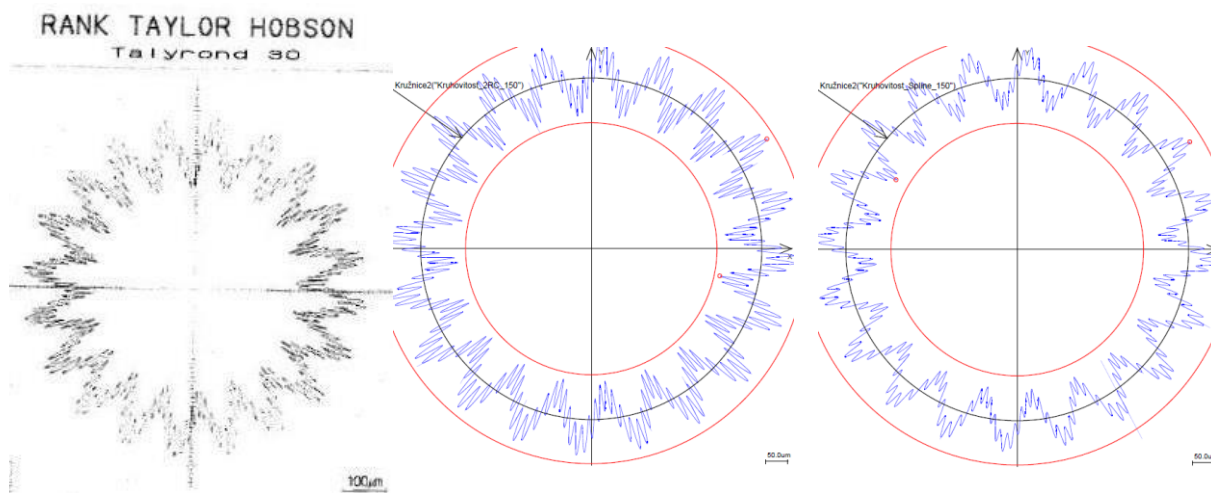
Obrázek 50: Zobrazení profilu při použití filtru UPR 50- kruhoměr (vlevo), 2RC (uprostřed), spline (vpravo)

4.5.4 UPR 150

Tabulka 5: Výsledky měření pro filtr UPR 150

UPR 150 filtr	Kruhoměr	Souřadnicový měřicí stroj	
		2RC	Spline
Tolerance (mm)	0,2	0,2	0,2
Odchylka (mm)	0,1742	0,1694	0,1432
Poloměr snímače (mm)	0,75	0,7503	0,7503

Pro použitý filtr UPR 150, se hodnoty odchylek zvyšují a taky se pomalu vyrovnávají rozdíly mezi použitím filtrů 2RC a spline. Kromě dominantních vln UPR 20 se zde už výrazně objevují i další vlny, které jsou viditelné z FFT. Je zde vidět dominantní vlny UPR 160 ale ne však v celém rozsahu. Celá vlna se zobrazí až v případě filtru vyššího jak je hodnota dominantní vlny. Všechny naměřené hodnoty i v tomto případě splňují hodnotu tolerance.



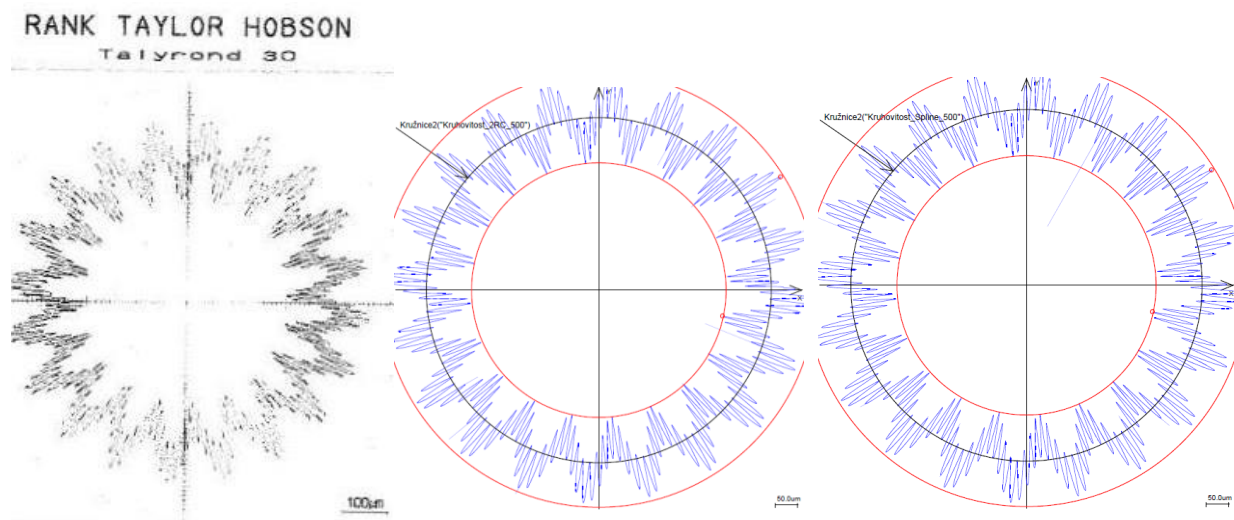
Obrázek 51: Zobrazení profilu při použití filtru UPR 150- kruhoměr (vlevo), 2RC (uprostřed), spline (vpravo)

4.5.5 UPR 500

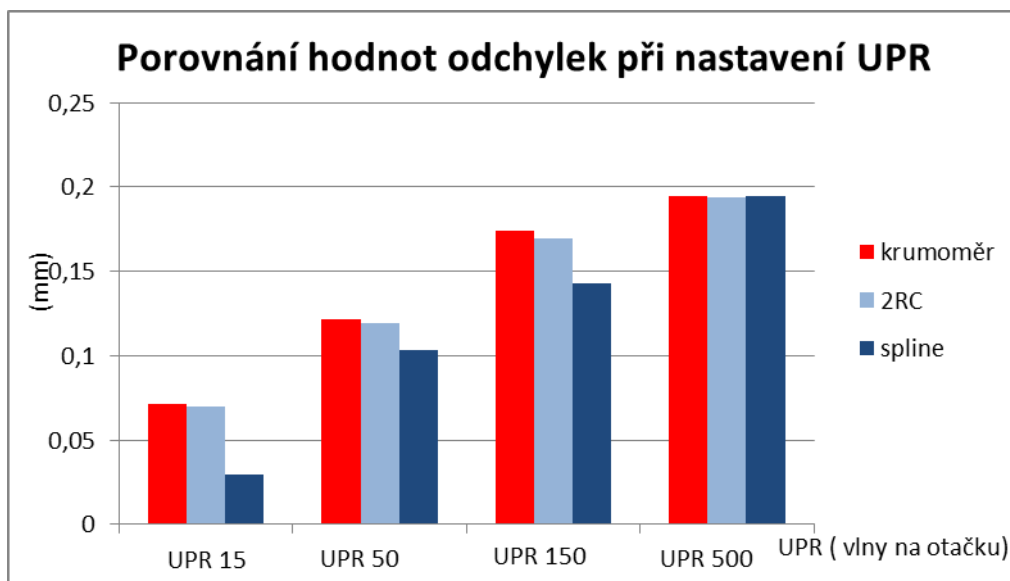
Tabulka 6: Výsledky měření pro filtr UPR 500

UPR 500	Kruhoměr	Souřadnicový měřicí stroj	
		2RC	Spline
filtr		2RC	Spline
Tolerance (mm)	0,2	0,2	0,2
Odchylka (mm)	0,1945	0,1938	0,1947
Poloměr snímače (mm)	0,75	0,7503	0,7503

Nejvíce vln na otáček má uznávaný filtr UPR 500. V mém případě při mnou použité měřené součásti, reprezentuje tento graf už téměř reálný profil měřené součásti. Jak je patrné z FFT hodnot vyšších jak 500 je velmi málo a proto se tento profil může považovat za základní. Měřené hodnoty odchylky jsou v toleranci a rozdíly mezi jednotlivými měřeními jsou minimální. Na grafech je patrné, že jak hodnoty, tak i grafy jsou v tomto případě skoro totožné.



Obrázek 52: Zobrazení profilu při použití filtru UPR 500- kruhoměr (vlevo), 2RC (uprostřed), spline (vpravo)



Obrázek 53: Graf porovnání hodnot odchylek při nastavení UPR

Jak bylo popsáno v předcházejících částech, hodnoty odchylek se liší. Tyto odchylky jsou zaznamenány v grafu na obrázku 53. Je zde vidět minimální rozdíly mezi odchylkami při měření na kruhoměru a při použití filtru 2RC na souřadnicovém měřicím stroji. V porovnání s filtrem spline je patrné, že modernější filtr dokáže filtrovat přesněji konkrétní hodnoty UPR. Je to vidět při filtru UPR 15, kde reálnou hodnotu zjištěnou z FFT, 20 vln na otáčku, první dva filtry nepotlačili téměř vůbec a filtr spline je výrazně potlačil. Hodnota odchylky při použití filtru spline je více jak dva krát menší jak v případě měření na kruhoměru a s použitím filtru 2RC na souřadnicovém měřicím stroji. Rozdíly mezi odchylkami se s rostoucím UPR zmenšují, a při filtru UPR 500 jsou téměř totožné, jelikož se jedná o profil už téměř základní.

Závěr

Bakalářská práce byla zaměřená na kruhovitost a na seznámení se s metodami filtrace kruhovitosti, i konkrétními metodami měření kruhovitosti.

V první části mojí práce byli popsány geometrické tolerance a jejich rozdělení. V práci je zde zmíněna potřeba základů pro konkrétní typ geometrické tolerance jako i jejich zobrazení na technickém výkrese.

V druhé části jsem se věnoval vlivu filtrace pro funkci strojních součástí. V této části, je zmíněno jaký vliv na výslednou kruhovitost má upnutí součástí při rotačním obrábění. Jsou zde popsány metody upnutí a to upnutí pomocí sklíčidla, soustružnických trnů, lícní desky, pomocí kleštiny a upnutí mezi hroty. Dále je v této části popsáno upínání rotačních nástrojů a tuhost těchto upnutí, aby zde nevznikali nežádoucí vibrace či házení.

V další části jsou popsány metody měření kruhovitosti, a to postupně běžná komunální měřidla pro měření dvojbodovou a trojbodovou metodou, až po moderní metody měření pomocí speciálních dotykových měřících strojů, jako kruhoměry a souřadnicové měřící stroje. V této části jsou taky zmíněny možnosti referenčních kružnic použitých pro měření kruhovitosti.

Ve čtvrté části jsem popsal konkrétní metody filtrace. Začal jsem základními filtry UPR, které jsou mezinárodně uznávané. Dále je zde zmíněna metoda filtrace FFT (rychlá Fourierova Transformace), při které se zobrazí jaká vlna je dominantní. Následně jsou zde rozebrány dolno propustné, středně propustné a horní propustné filtry. Každý filtr odfiltruje jiné vlnové délky a reprezentuje jiné hodnoty UPR. Dolno propustný filtr reprezentuje tvarové prvky, horní propustný filtr reprezentuje drsnost a středně propustný filtr vlnitost.

V praktické části mojí práce proběhlo měření na součásti multiwave. Měření proběhlo postupně na kruhoměru a na souřadnicovém měřícím stroji. V jednotlivých měřeních se výsledky měření podrobili filtraci UPR, postupně pomocí UPR 15, UPR 50, UPR 150 a UPR 500. Naměřené hodnoty byly porovnány a výsledky měření vyhodnoceny. Z grafu, který porovnává jednotlivé metody je patrné, že použitím filtru spline se dosahuje lepších výsledků. Filtr spline dokáže přesněji odfiltrovat nežádoucí vlny i takové, které jsou blízké

hodnotě filtru. Na druhé straně filtr 2RC při souřadnicovém měřícím stroji by měl vykazovat stejné hodnoty jako filtr použitý na kruhoměru. Toto tvrzení se podařilo potvrdit, když při všech použitých filtrech UPR, se hodnoty těchto dvou měření téměř neodlišují.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Tolerance přímosti-značení, vysvětlení, příklad předpisu [9].....	11
Obrázek 2: Tolerance rovinnosti-značení, vysvětlení, příklad předpisu [9].....	11
Obrázek 3: Tolerance kruhovitosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9].....	12
Obrázek 4: Tolerance válcovitosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9].....	12
Obrázek 5: Tolerance tvaru profilu libovolné čáry-značení, vysvětlení, příklad předpisu [9] .	12
Obrázek 6: Tolerance tvaru profilu libovolné plochy- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]	13
Obrázek 7: Tolerance rovnoběžnosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]	13
Obrázek 8: Tolerance kolmosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]	13
Obrázek 9: Tolerance sklonu- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9].....	14
Obrázek 10: Tolerance polohy- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]	14
Obrázek 11: Tolerance souososti a soustřednosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9] .	15
Obrázek 12: Tolerance souměrnosti- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]	15
Obrázek 13: Tolerance kruhového házení- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]	16
Obrázek 14: Tolerance celkového házení- značení, vysvětlení, příklad předpisu [9]	16
Obrázek 15: Uložení hřídel-ložisko [1]	17
Obrázek 16: Kleštinový upínač (vlevo), upínač WELDON-princip (vpravo) [15]	18
Obrázek 17: Hydraulický upínač [16]	19
Obrázek 18: Princip silově deformačního upnutí [16]	19
Obrázek 19: Tepelný upínač [13].....	19
Obrázek 20: Čelistě sklíčidla, Tříčelistové sklíčidlo [15]	20
Obrázek 21: Univerzální lícní upínací deska	21
Obrázek 22: Kuželový soustružnický trn	22
Obrázek 23: Princip rozpínacího trnu: 1 - trn, 2 –rozpínací pouzdro, 3- matice, 4 – čelní matice.....	22
Obrázek 24: Řez kleštinou [17].....	23
Obrázek 25: Upínání mezi hroty[5]	24
Obrázek 26: Upínací hrot [17]	24
Obrázek 27: Pevná a pohyblivá opěrka (luneta) [5].....	25

Obrázek 28: Least squares circle (LSC), (vlevo), Minimum circumscribed circle (MCC), (vpravo) [1].....	27
Obrázek 29: Minimum zone circle (MZC), (vlevo), Maximum inscribed circle (MIC), (vpravo) [1]	27
Obrázek 30: Měření kruhovitosti dvojbodovou metodou [18].....	28
Obrázek 31: Dílenské trojbodové měření kruhovitosti (vlevo), Dutinoměr (vpravo) [8].....	29
Obrázek 32: Měření kruhovitosti mezi hroty[18].....	29
Obrázek 33:Kruhoměr s rotujícím stolem (vlevo), Kruhoměr s rotující měřicí sondou (vpravo) [11]	31
Obrázek 34: Talyrond 585H (vlevo), Měření klikové hřídele na kruhoměru (vpravo) [10].....	32
Obrázek 35: Zeiss Prismo navigator (vlevo), Skenovací hlava Zeiss (vpravo) [12]	34
Obrázek 36: Rozličná vlnová délka a amplitúda v grafu [2]	36
Obrázek 37: Příklad použití RTA[2].....	37
Obrázek 38: Princip digitálního filtru [2]	38
Obrázek 39: Použití dolno propustného filtru[2]	39
Obrázek 40: Použití horní propustného filtru [2].....	40
Obrázek 41: Použití středně průchozího filtru [2].....	41
Obrázek 42: Příčiny vzniku chyb podle vlnové délky [2]	42
Obrázek 43: Ovládací panel kruhoměru Talyrond CCM.....	44
Obrázek 44: Kruhoměr Talyrond 30	45
Obrázek 45: Měřená součást na kruhoměru	45
Obrázek 46: Kalibrační koule a kalibrovaný měřicí senzor.....	46
Obrázek 47:Měření na souřadnicovém měřicím stroji (vlevo), ovládací panel souřadnicového měřicího stroje (vpravo)	47
Obrázek 48: FFT konkrétního měření.....	48
Obrázek 49: Zobrazení profilu při použití filtru UPR 15- kruhoměr (vlevo), 2RC (uprostřed), spline (vpravo).....	49
Obrázek 50: Zobrazení profilu při použití filtru UPR 50- kruhoměr (vlevo), 2RC (uprostřed), spline (vpravo).....	50
Obrázek 51: Zobrazení profilu při použití filtru UPR 150- kruhoměr (vlevo), 2RC (uprostřed), spline (vpravo).....	51

Obrázek 52: Zobrazení profilu při použití filtru UPR 500- kruhoměr (vlevo), 2RC (uprostřed), spline (vpravo).....	52
Obrázek 53: Graf porovnání hodnot odchylek při nastavení UPR	53

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled geometrických tolerancí.....	10
Tabulka 2: Běžné chyby kruhových součástí	36
Tabulka 3: Výsledky měření pro filtr UPR 15.....	49
Tabulka 4: Výsledky měření pro filtr UPR 50.....	50
Tabulka 5: Výsledky měření pro filtr UPR 150.....	51
Tabulka 6: Výsledky měření pro filtr UPR 500.....	52

Zdroje

- [1] SMITH, Graham T. *Industrial metrology: surfaces and roundness*. New York: Springer, c2002. ISBN 1-85233-507-6.
- [2] ROITHMEIER, Robert. *Productive measurement: function and production oriented coordinate metrology ; a publication of Carl Zeiss 3D Akademie*. Ellwangen: Opferkuch, 2009. ISBN 9783981142266.
- [3] POSPÍCHAL, Jaroslav. *Technické kreslení*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 9788001032145.
- [4] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1
- [5] ČECH J., PERNIKÁŘ J., PODANÝ K.: *Strojírenská metrologie*. VUT Brno, 2003. ISBN 80-214-3070-2.
- [6] MÁDL, Jan, BARCAL, Jaroslav. *Základy technologie II*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 55 s. ISBN 80-01-02610-8.
- [7] ČSN EN ISO 1101 (014120). *Geometrické specifikace výrobků (GPS) – Geometrické tolerování – Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. 2014.
- [8] ČSN ISO 4291. *Metody hodnocení úchylek kruhovitosti. Měření změn poloměru*. 1994.
- [9] Geometrické tolerance. *E-konstrukter* [online]. 2014 [cit. 2017-07-05]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance>
- [10] *Talyrond 565/585H, A revolutionary concept in automated roundness inspection* [online]. , 3 [cit. 2017-06-10]. Dostupné z: http://www.taylor-hobson.com/uploads/downloads/products/Talyrond_565H_585H_Highres_EN-web.pdf
- [11] *Taylor-Hobson* [online]. Taylor Hobson, 2016 [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <http://www.taylor-hobson.com/products/18/108.html#Talyrond-585H-Range2>
- [12] *ZEISS Prismo navigator* [online]. [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/bridge-type-cmms/prismo-navigator.html>

[13] *Teple upinani nástroju* [online]. Luděk Dvořák, 2015 [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/teple-upinani-nastroju-11885.html>

[14] *Technická příručka obrábění: soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*: příručka firmy Sandvik Coromant. Praha: Sandvik Coromant, 2005

[15] *Werkzeug- aufnahmen Tool Holder* [online]. 2017, , 160 [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: https://www.haimer.biz/fileadmin/assets/downloads/kataloge/DE_EN/2017_02_Werkzeugaufnahmen_DE_EN_Screen.pdf

[16] *Hydraulický upinač* [online]. [cit. 2017-07-10]. Dostupné z: <http://www.verko.cz/hydraulicky-upinac-9808/>

[17] *T-support* [online]. praha, 2012 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/upinani-rotacnich-obrobku-2-cast-7>

[18] *Kruhovitost a radiálne hádzanie* [online]. , 7 [cit. 2017-06-11]. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/smetrologia/navody/uloha09.pdf>